HENRY
Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.)

Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse

Originalveröffentlichung / Original Publication:

https://doi.org/10.5675/BfG_Mitteilungen_31.2014

Verfügbar unter / Available at:

https://hdl.handle.net/20.500.11970/107490

Vorgeschlagene Zitierweise / Suggested citation:

Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hg.) (2014): Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde (Mitteilungen, 31). https://doi.org/10.5675/BfG_Mitteilungen_31.2014.

Alle Rechte vorbehalten

Nr. 31

Mitteilungen

Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse

Koblenz, Dezember 2014

Herausgeber:
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
Tel.: +49 (0)261 1306-0
Fax: +49 (0)261 1306 5302
E-Mail: posteingang@bafg.de
Internet: http://www.bafg.de

Druck:
Druckerei Fuck, Koblenz

ISSN 1431 – 2409
ISBN 978-3-940247-11-7

DOI: 10.5675/BfG_Mitteilungen_31.2014
URL: http://doi.bafg.de/BfG/2014/BfG_Mitteilungen_31.2014.pdf

Zitiervorschlag:
Belz J U et al. (2014): **Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse.** Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 232 S., graph. Darst.
In: Mitteilungen, Nr. 31. ISBN 978-3-940247-11-7, DOI: 10.5675/BfG_Mitteilungen_31.2014,
URL: http://doi.bafg.de/BfG/2014/BfG_Mitteilungen_31.2014.pdf

Fachliche Bearbeitung

Leitung: **Jörg Uwe Belz**

Adler, Matthias	Kapitel 5.2
Baschek, Björn	Kapitel 5.4.1
Belz, Jörg Uwe	Kapitel 1 / 3 / 5.1 / 7 / 8.1 / 8.2
Bergfeld-Wiedemann, Tanja	Kapitel 4.2
Brockmann, Herbert	Kapitel 5.4 / 5.5
Busch, Norbert	Kapitel 3.2.1 / 3.3.3 / 3.4.3 / 3.5.4 / 5.3
Claes, Jochen*	Kapitel 5.5.1
Daedlow, Katja**	Kapitel 5.5.2
Hammer, Matthias	Kapitel 3.3.3
Hatz, Marcus	Kapitel 3.2.1 / 3.3.3 / 3.4.3 / 3.5.4 / 5.3
Hillebrand, Gudrun	Kapitel 4.1
Hübner, Gerd	Kapitel 4.3
Klein, Bastian	Kapitel 2 / 8.3
Kleisinger, Carmen	Kapitel 4.4
Krahe, Peter	Kapitel 2 / 8.1 / 8.3
Larina-Pooth, Maria	Kapitel 8.2
Meißner, Dennis	Kapitel 6 / 7
Mothes, Dietmar***	Kapitel 5.1.3
Mürlebach, Michael	Kapitel 7
Nilson, Enno	Kapitel 2 / 8.1 / 8.3
Otto, Wilfried	Kapitel 4.1
Promny, Markus	Kapitel 3.5.4
Rademacher, Silke	Kapitel 6
Schöl, Andreas	Kapitel 4.2
Schriever, Sönke	Kapitel 4.1
Schubert, Birgit	Kapitel 4.4
Schwandt, Daniel	Kapitel 4.3
Viergutz, Carsten	Kapitel 4.2

(Die Nennung eines Kapitels schließt die untergeordneten Teilkapitel mit ein.)

Alle Autoren sind Mitarbeiter der BfG, außer:

* Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle Süd

** Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle Ost

*** Bundesanstalt für IT-Dienstleistungen

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 7

2 Hydrometeorologische Ursachen ... 9

2.1 Rückblick Winter 2012/13 und Frühjahr 2013 ... 9
2.2 Witterungsverlauf April, Mai und Juni 2013 ... 11
2.3 Verlauf des Niederschlags in den Stromgebieten ... 14
2.4 Niederschlagsintensitäten ... 17
2.5 Synoptische Entwicklung und raum-zeitliche Niederschlagsverteilung 28. Mai bis 3. Juni 2013 ... 18
2.6 Schneedeckenentwicklung und Bodenfeuchte ... 23
2.7 Fazit: Hydrometeorologische Ursachen des Hochwassers 2013 ... 25

3 Hochwasserverlauf, Retentionswirkungen und statistische Einordnung der Wasserstände und Durchflüsse in den betroffenen Flussgebieten ... 26

3.1 Vorbemerkung ... 26
3.2 Verlauf und Einordnung des Hochwassers im Wesergebiet ... 28
3.2.1 Retentionsmaßnahmen im Wesergebiet ... 32
3.2.2 Fazit Wesergebiet ... 33
3.3 Verlauf und Einordnung des Hochwassers im Rheingebiet ... 33
3.3.1 Vorangehendes Hochwasser der Mosel ... 33
3.3.2 Hochwasserverlauf im südlichen Rheingebiet oberhalb von Basel ... 34
3.3.3 Verlauf des Hochwassers im deutschen Rheingebiet ... 37
3.3.4 Fazit Rheingebiet ... 44
3.4 Verlauf und Einordnung des Hochwassers im Donaugebiet ... 46
3.4.1 Hochwasserverlauf in der Donau ... 47
3.4.2 Die Situation in den wichtigsten Nebenflüssen der deutschen Donau ... 51
3.4.3 Retentionseinflüsse auf das Hochwasser der Donau ... 53
3.4.4 Fazit Donaugebiet ... 54
3.5 Verlauf des Hochwassers im Elbegebiet ... 55
3.5.1 Verlauf des Hochwassers im tschechischen Elbegebiet ... 56
3.5.2 Verlauf und Einordnung des Hochwassers im deutschen Elbegebiet ... 57
3.5.3 Die Situation in den wichtigsten Nebenflüssen der deutschen Elbe ... 64
3.5.4 Auswirkungen gesteuerter und ungesteuerter Retention auf den Hochwasserverlauf in der deutschen Elbe ... 67
3.5.5 Fazit Elbegebiet ... 76

4 Sediment-, Stoffhaushalt und Schadstoffbelastung an Bundeswasserstraßen ... 78

4.1 Sedimenthaushalt ... 78
4.1.1 Messmethodik ... 78
4.1.2 Schwebstofffrachten Rheingebiet ... 79
4.1.3 Schwebstofffrachten Donaugebiet ... 81
4.1.4 Schwebstofffrachten Wesergebiet ... 81
4.1.5 Schwebstofffrachten Elbegebiet ... 82
4.1.6 Fazit Sedimenthaushalt ... 86

4.2 Auswirkungen auf die Gewässergüte ... 87
4.2.1 Wesergebiet ... 87
4.2.2 Rheingebiet ... 88
4.2.3 Donaugebiet ... 90
4.2.4 Elbegebiet ... 90
4.2.5 Fazit ... 93
4.3 Schadstoffbelastung der Binnenelbe ... 93
4.3.1 Das Messprogramm Extremereignisse ... 93
4.3.2 Datengrundlagen/Methodik ... 94
4.3.3 Schadstoffkonzentration ... 95
4.3.4 Frachtschätzung ... 98
4.3.5 Fazit ... 100
4.4 Schadstoffbelastung in der Tideelbe und Tideweser ... 100
4.4.1 Tideelbe ... 100
4.4.2 Tideweser ... 104
4.4.3 Fazit ... 105

5 Ereigniserfassung und Hydrometrie ... 106

5.1 Wasserstandsmessung an den Bundeswasserstraßen im Juni 2013 und ihre Kommunikation ... 106
5.1.1 Donau ... 107
5.1.2 Elbe ... 108
5.1.3 Internetgestützte Pegeldatenkommunikation ... 109
5.2 Abflussmessungen an Bundeswasserstraßen ... 110
5.2.1 Abflussmessungen an Elbe und Saale ... 111
5.2.2 Abflussmessungen an Donau, Werra, Ober- und Mittelrhein ... 119
5.2.3 Fazit Wasserstands- und Abflussmessungen beim Hochwasser 2013 ... 120
5.3 Wasserspiegelfixierungen an Bundeswasserstraßen ... 121
5.3.1 Übersicht zu den vorgenommenen Messungen ... 121
5.3.2 Auswertungen der Wasserspiegelfixierungen an Elbe und Rhein ... 122
5.3.3 Fazit ... 126
5.4 Fernerkundungseinsätze ... 126
5.4.1 Ereignisnahe Informationen zur Deichdurchfeuchtung an der Elbe ... 126
5.4.2 Photogrammetrische Erfassung von Überschwemmungsgrenzen und Wasserspiegellagen ... 130
5.5 Messprogramm „Hochwasserereigniserfassung“ ... 140
5.6 Fazit Fernerkundungseinsätze beim Hochwasser 2013 ... 141

6 Hochwasservorhersagen für die betroffenen Bundeswasserstraßen ... 142

6.1 Hochwasservorhersage Rhein ... 145
6.2 Hochwasservorhersage Donau ... 147
6.3 Hochwasservorhersage Elbe ... 148
6.4 Fazit Hochwasservorhersage ... 149

7 Wirtschaftliche Folgen des Hochwassers, insbesondere hinsichtlich der Befahrbarkeit der Bundeswasserstraßen ... 151

8 Hochwasseranalyse: langfristige Entwicklungen in den betroffenen Flussgebieten ... 154

8.1 Vergleich der Hochwasserereignisse der Jahre 2002 und 2013 im Donau- und Elbegebiet ... 154

8.1.1 Vergleich der Vor- und Randbedingungen der Hochwasserextreme 2002 und 2013 im Donau- und Elbegebiet 154
8.1.2 Vergleich der Hochwasserverläufe der Jahre 2002 und 2013 an Donau und Elbe 156
8.2 Entwicklungen seit Mitte des 20. Jahrhunderts 160
8.2.1 Intensität der Hochwasserscheitel 160
8.2.2 Saisonalität des Hochwasserauftretens 164
8.2.3 Frequenzverhalten von Hochwasserereignissen 170
8.2.4 Volumenbetrachtung von Hochwasserereignissen 173
8.2.5 Fazit retrospektive Entwicklungsdynamik von Hochwasserereignissen 175
8.3 Klimavariabilität, Klimawandel und Hochwasser 175
8.3.1 Grundsätzliches und Vorgehensweise 175
8.3.2 Beobachtete Extreme des Gebietsniederschlages im Mai* 2013 und Vergleich mit dem Klimamittel 1961/90 177
8.3.3 Entwicklung hoher Niederschlagssummen in der Zeitreihe 1950/2013 180
8.3.4 Mögliche zukünftige Entwicklung hochwasserauslösender Niederschläge in den Monaten Mai und Juni 183
8.3.5 Mögliche zukünftige Entwicklung der Hochwasser im Rhein- und Elbegebiet 188
8.3.6 Fazit Klimawandel und Hochwasser 191

9 Zusammenfassung / Summary 193

Literatur 205

Abbildungsverzeichnis 213

Tabellenverzeichnis 219

Abkürzungen 221

Glossar 227

1 Einleitung

Jörg Uwe Belz

Das große Hochwasser des Jahres 2013 in Mitteleuropa war ein in mehrfacher Hinsicht außergewöhnliches Ereignis. Das betrifft sowohl die Art seines Zustandekommens als auch sein räumliches Ausmaß und seine Intensität.

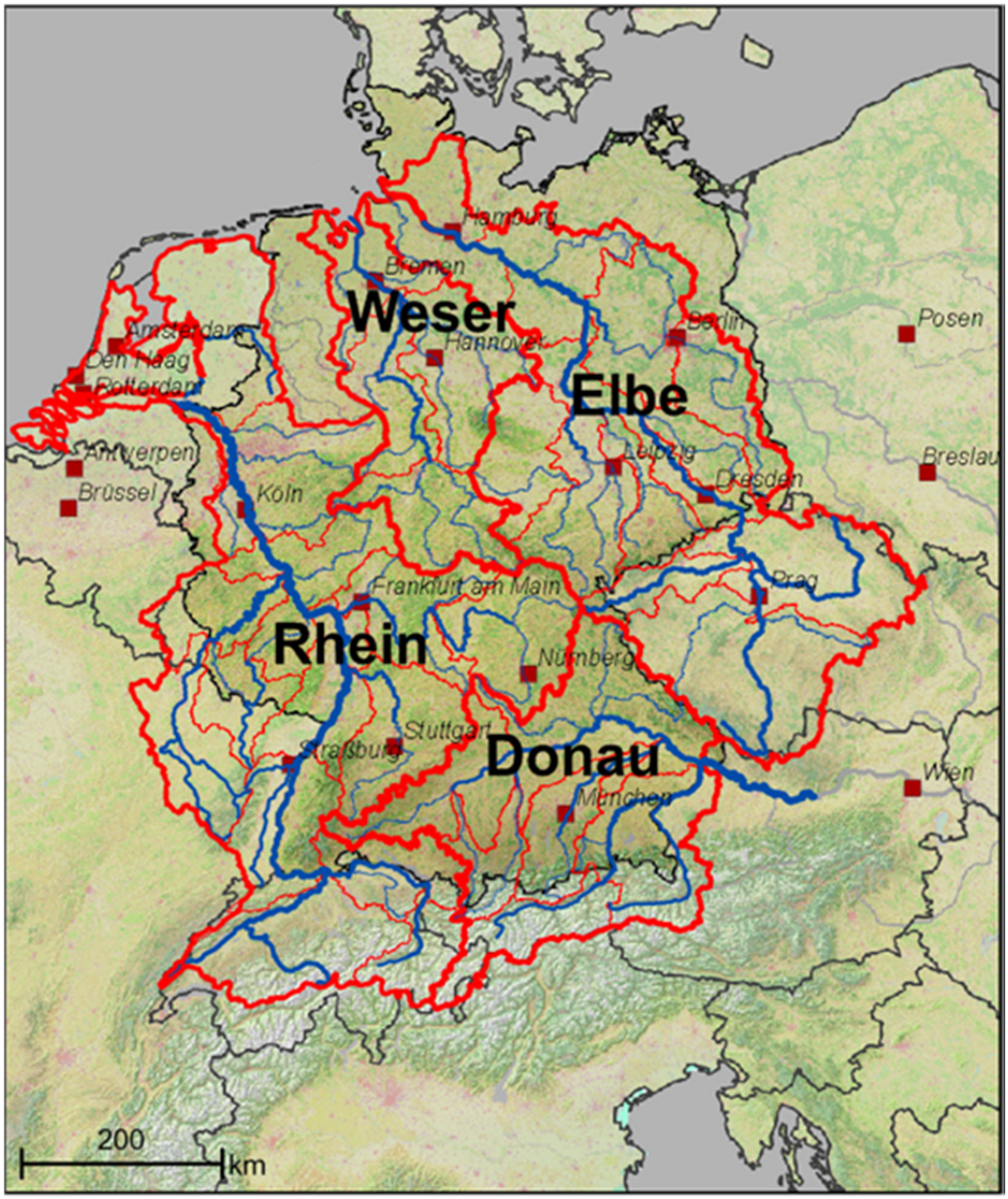


Abb. 1.1: Mitteleuropa mit den vom Hochwasser 2013 hauptsächlich betroffenen Stromgebieten

Bereits unmittelbar nach dem Ereignis hatte die Bundesanstalt für Gewässerkunde eine erste vorläufige Dokumentation und Analyse vorgelegt (BfG 2013c) und diese im August 2013 unter Beteiligung der Fachbehörden der Bundesländer erweitert und verdichtet (BfG 2013d). Seitdem sind eine Reihe weiterer Auswertungen, in der Regel auf regionaler Basis, erschienen.

Nachdem diese bisherigen Arbeiten angesichts der Vielzahl der erhobenen, anschließend zu prüfendenden, zu plausibilisierenden und zu analysierenden Daten zumindest in Teilen auf vorläufiger bzw. Rohdatenbasis vonstattengehen mussten, kann nun, mehr als ein Jahr nach dem Ereignis, mit wenigen Ausnahmen von einer konsolidierten Datengrundlage ausgegangen werden. Vorliegende Publikation stellt deshalb nun gebietsübergreifend die abschließende Dokumentation und Analyse des Hochwassergeschehens im Juni 2013 in Deutschland dar. Dies erfolgt in interdisziplinärer Weise, dabei schwerpunktmäßig unter Bezug auf die großen Flüsse (die Bundeswasserstraßen). Zusätzlich wurden immer dann, wenn aus diesen wesentliche Impulse für das Hochwassergeschehen im Hauptgewässer zu konstatieren bzw. spezifische Prozesse zu erklären waren, auch die Nebeneinzugsgebiete einbezogen. Einen Überblick über die in Mitteleuropa im Wesentlichen vom Hochwasserextrem des Juni 2013 betroffenen Stromgebiete bietet die Karte in Abb. 1.1. Hier nicht herausgestellt und im Folgenden auch nicht näher behandelt wird das Abflussgeschehen im Ems- und im Odergebiet, weil hier in dieser Zeit kein nennenswertes Hochwasser aufgetreten war.

Die nun vorgelegten Ergebnisse wurden zumindest im Länderkontext abgestimmt. Weitere Einzelheiten, die über den hier verfolgten synoptisch-prozessorientierten Ansatz hinausgehen, sind entweder den erwähnten regionaler orientierten Berichten vor allem der Bundesländer oder speziellen Fachveröffentlichungen zu entnehmen, wie z.B. DWD (2013) bezüglich der meteorologischen Situation, BREMICKER & VARGA (2014) zu Fragen der Hochwasservorhersage oder SCHWANDT & HÜBNER (2014) zum hochwasserbezogenen Schadstoffmonitoring. . Auch haben einige Flussgebietskommissionen für ihre Zuständigkeitsbereiche eigene Berichte vorgelegt, z.B. Hochwasserzentralen Rhein (2013) oder IKSE (2014).

2 Hydrometeorologische Ursachen

Peter Krahe, Enno Nilson, Bastian Klein

2.1 Rückblick Winter 2012/13 und Frühjahr 2013

Die in der Hochwasserperiode von Mai und Juni 2013 an vielen Flüssen Mitteleuropas aufgetretenen Hochwasser wurden durch eine ungewöhnlich langandauernde Phase mit einer an vielen Tagen kühlen und niederschlagsreichen Witterung hervorgerufen. Zum Verständnis der Hochwassergenese und zur Einordnung des beobachteten Verlaufs der Hochwasser ist eine Charakterisierung der wichtigsten hochwasserrelevanten synoptischen und hydrometeorologischen Bedingungen erforderlich. Nachfolgend wird ein Überblick über den Witterungsablauf in Mitteleuropa gegeben, der während der hochwasserbestimmenden Periode des Jahres 2013 herrschte. Da auch der Witterungscharakter in den Winter- und Frühjahrsmonaten vor der eigentlichen Hochwasserperiode zur Ausprägung des Hochwassers beigetragen hat, werden zur besseren Einordnung und Bewertung hier bereits die Monate ab November 2012, dem Beginn des hydrologischen Jahres 2013, betrachtet.

Dem außergewöhnlich niederschlagsreichen Monat Mai 2013 (Abb. 2.3) ging eine Folge verschiedenster Witterungsextreme im mitteleuropäischen Raum voraus. Bei ungewöhnlich trübem Wetter wies bereits der Winter (Monate Dezember, Januar und Februar) eine positive Niederschlagsbilanz auf (DWD 2014), wobei besonders im Dezember mit ~ +40 % das vieljährige Mittel 1961/90 übertroffen wurde. Der Januar und der Februar machten ihn zum sonnenscheinärmsten Winter seit Beginn flächendeckender Aufzeichnungen im Jahr 1951 (Abb. 2.1 und DWD 2014). Drei kältere und zwei mildere Perioden (14.12.2012-10.01.2013 und 28.01.2013-04.02.2013) wechselten sich miteinander ab. Die kälteren Witterungsabschnitte brachten bis ins Flachland gebietsweise reichlich Schnee. So befand sich am 21. Januar 2013 fast ganz Deutschland unter einer geschlossenen Schneedecke. Während der Mildphasen traten regional Starkregenfälle auf.

Der Frühling 2013 (Monate März, April und Mai), verlief in Deutschland mit Ausnahme des Monats April überwiegend kühler als im langjährigen Mittel der Klimastandardnormalperiode 1961/1990 (Abb. 2.2), wobei er im März und April deutlich trockener (57 % bzw. 71 % des Klimamittels) und im Mai extrem niederschlagsreich ausfiel (178 % seines Klimamittels, DWD 2013a, 2014). Nach den Angaben des Deutschen Wetterdienstes geht der Monat bezogen auf das Bundesgebiet als zweitnassester Mai seit Beginn der Messungen im Jahr 1881 in die Klimageschichte ein. Die Niederschläge im März fielen im Nordosten fast ausschließlich als Schnee, so dass sich bedingt durch die niedrigen Temperaturen eine langlebige Schneedecke ausbilden konnte. Solche Schneehöhen im letzten Märzdrittel hat es beispielsweise in Berlin seit 1892 nicht mehr gegeben. Vor allem aber war der Frühling, mit Ausnahme des März, wie schon der Winter außergewöhnlich sonnenscheinarm. Zusammen mit den Monaten Januar und Februar gehörten damit die ersten fünf Monate des Jahres zu den drei trübsten Jahresanfängen seit Beginn der Sonnenscheinmessung 1951. Abgesehen von einigen sehr

milden Tagen Anfang März dominierte im Frühjahr bis in den April hinein verbreitet winterliche Witterung. Damit gehörte der März 2013 bundesweit zu den sechs kältesten Märzmonaten seit Messbeginn 1881. Der Frühling war letztmals 1987 kälter.

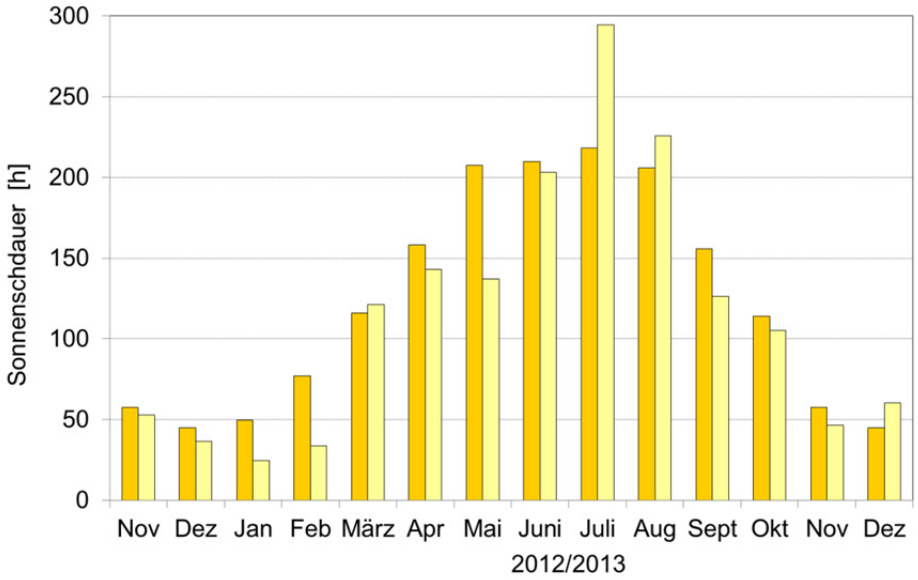


Abb. 2.1: Flächenmittel der Monatssummen der Sonnenscheindauer in Deutschland berechnet aus 70 Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes, für die Monate des Kalender- und des hydrologischen Jahres 2013 (gelb) im Vergleich zum Mittel 1961/90 (orange) (Datenquelle: DWD)

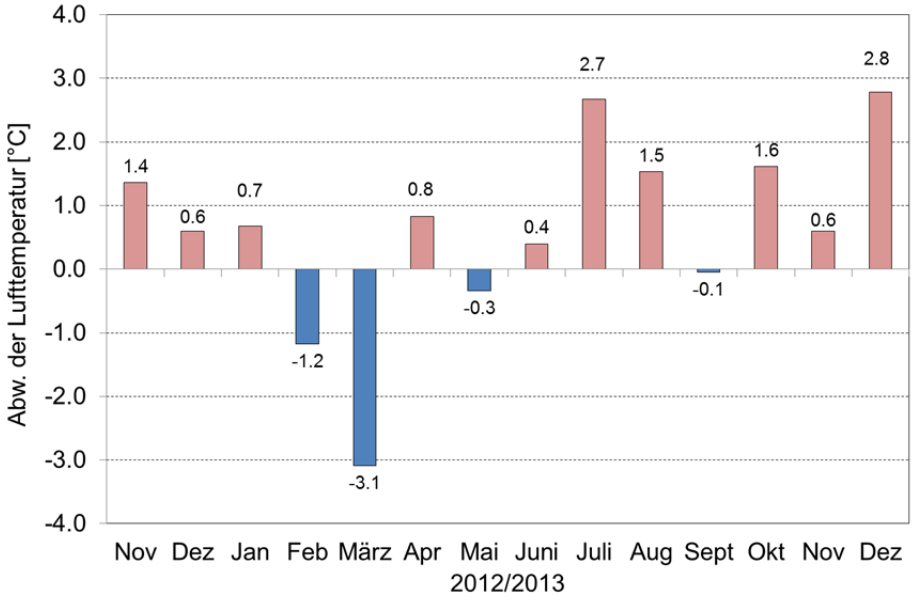


Abb. 2.2: Abweichung des Flächenmittels der Monatsmitteltemperaturen in Deutschland berechnet aus 70 Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes, vom vieljährigen Mittel 1961/90 für die Monate des Kalender- und des hydrologischen Jahres 2013 (Datenquelle: DWD)

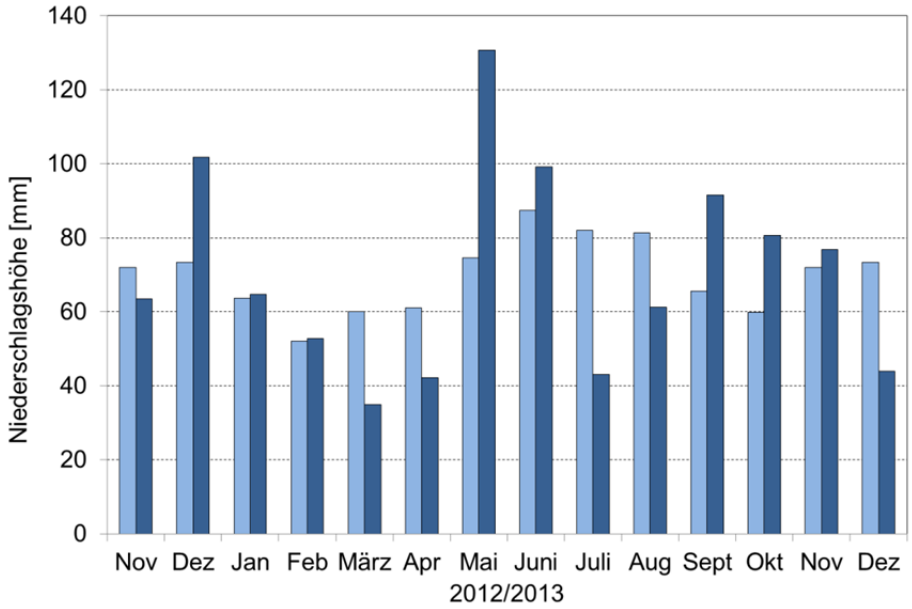


Abb. 2.3: Flächenmittel der Monatssummen des Niederschlags in Deutschland
berechnet aus 70 Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes, für die Monate des Kalender- und des hydrologischen Jahres 2013 (dunkelblau) im Vergleich zum Mittel 1961/90 (hellblau) (Datenquelle: DWD)

2.2 Witterungsverlauf April, Mai und Juni 2013

Zahlreiche und ausgedehnte Tiefdruckgebiete und damit einhergehende Niederschläge dominierten das Wettergeschehen in Mitteleuropa bereits beginnend mit der letzten Aprilwoche (26. April) bis in die erste Juniwoche hinein (02./03. Juni) (Tab. 2.1). Die Tiefdrucksysteme wurden vom 26. bis zum 28. April und dann durchgängig ab dem 18. Mai durch Höhenströmungen gesteuert, die den Großwetterlagen (GWL) „Trog Westeuropa (TrW)“, „Trog Mitteleuropa (TrM)“ und „Tief Mitteleuropa (TM)“ zuzuschreiben sind (GERSTENGARBE et al. 1999). Diese als niederschlagsreich bekannten Wetterlagen lenkten beständig kühle Luft aus Norden nach Deutschland und diese meridionale Zirkulationsform führte zu einer scharf ausgeprägten Luftmassengrenze, die kühle Meeresluft über Westeuropa von subtropischer Warmluft über Osteuropa trennte. Entlang dieser Frontalzone kam es immer wieder durch Aufgleitbewegungen zu ergiebigen Regenfällen. Insbesondere erwies sich die GWL TM vom 28./29. Mai bis 02./03. Juni als das wesentliche Steuerungszentrum für das Wettergeschehen über Deutschland. Auf der Trogvorderseite, im Raum Osteuropa, entstanden immer wieder Bodentiefdruckgebiete, die sich mit der Warmluft aus dem Mittelmeerraum intensivierten und west- bis südwestwärts zogen. Die maßgeblichen Großwetterlagen und das dazugehörige Wetter- und Niederschlagsgeschehen ist für die einzelnen Tage der Monate April, Mai und Juni 2013 der Tab. 2.1 zu entnehmen.

Das großräumig herrschende einheitlich niederschlagsreiche Witterungsgeschehen über den vom Hochwasser betroffenen Stromgebieten Deutschlands (Donau bis zur deutsch-österreichischen Grenze, Rhein bis zur deutsch-niederländischen Grenze) sowie Weser und Elbe, jeweils ohne Tideanteil) ist anhand der Gebietsmittelwerte der täglichen Lufttemperaturmittel

und Niederschlagshöhen abzulesen (s. Abb. 2.4). So vollzog sich der Übergang vom Winter zum Frühling vergleichsweise spät. Noch am 1. April lag das Gebietsmittel der bodennahen Lufttemperatur unter 0° C. Bis Mitte April erfolgte kontinuierlich eine Erwärmung in den betrachteten Flussgebieten, wobei die Tagesmitteltemperaturen aber nur an wenigen Tagen das Klimamittel der langjährigen Reihe 1961/90 erreichten bzw. überschritten.

Tab. 2.1: Großwetterlagen (GWL) nach Hess & Brezowsky (GERSTENGARBE et al. 1999) mit Kurzbeschreibung der atmosphärischen Strömung und des Niederschlags- und Wettergeschehens im April, Mai und Juni 2013 (entnommen DWD 2013b)

Tag	GWL nach Hesse & Brezowsky	Kurzbeschreibung
April 2013		
26.4. 27.4. 28.4.	**TrW** **TrW** **TrW**	Ein Trog weitet sich von Island her kommend über die Britischen Inseln zur Iberischen Halbinsel aus, wo er in Folge abtropft. Die zugehörige, zum Ende hin von Katalonien bis zum Ural reichende Front sorgt in weiten Teilen des Kontinents für Niederschläge.
29.4. 30.4.	**BM** **BM**	Nach dem Abtropfprozess des westeuropäischen Troges baut sich zwischen einem Atlantikhoch und einem Russlandhoch wieder eine brückenartige Verbindung auf.
Mai 2013		
01.5. 02.5. 03.5. 04.5. 05.5. 06.5. 07.5.	**BM** **BM** **BM** **BM** **BM** **BM** **BM**	Eine brückenartige Hochdruckverbindung, die von Atlantik über West- und Mitteleuropa hinweg bis nach Osteuropa reicht, regeneriert sich im Verlauf der ersten Mai-Tage immer wieder. Zwischenzeitlich können zwar Tiefausläufer nach Mitteleuropa vordringen, weisen aber meist nur eine räumlich und zeitlich begrenzte Wetteraktivität auf. Vorübergehend rutscht die Hochdruckbrücke auch mal recht weit nach Norden, so dass die Tiefdrucktätigkeit vom Mittelmeer aus weit über die Alpen hinweg bis ins südliche Deutschland ausgreifen kann.
08.5. 09.5. 10.5. 11.5. 12.5. 13.5. 14.5.	**WW** **WW** **WW** **WW** **WW** **WW** **WW**	Über Osteuropa baut sich zumindest in der Höhe eine umfangreiche Antizyklone auf. Im Bodendruckfeld zeichnet sich diese – der Jahreszeit und der damit verbundenen hohen Lufttemperatur entsprechend – nur in abgeschwächter Form ab. Die vom Atlantik her kommenden Tiefausläufer werden über dem östlichen Mitteleuropa in ihrer Ostverlagerung abgebremst und der Höhenströmung gemäß nach Norden umgelenkt. Auf Grund dieses Strömungsmusters wird die Wetterlage als WW klassifiziert, was für den Monat Mai recht ungewöhnlich ist (WW tritt bevorzugt im Winterhalbjahr auf).
15.5. 16.5. 17.5.	**Sz** **Sz** **Sz**	Auf der Vorderseite eines markanten Troges über Westeuropa stellt sich über Mitteleuropa eine südliche Höhenströmung ein. In dieser ziehen Tiefausläufer von den Alpen zur Ostsee. Dabei gelangt vorübergehend sehr warme Luft ins östliche Mitteleuropa.
18.5. 19.5. 20.5. 21.5.	**TM** **TM** **TM** **TM**	Tiefer Luftdruck etabliert sich über dem zentralen Europa. Dabei bestimmt im nördlichen Teil zunächst noch die von der vergangenen Wetterlage nach Norden gepumpte Warmluft das Wettergeschehen, während sich im übrigen Mitteleuropa die kühle Luft des über Südwesteuropa liegenden Troges ausbreitet.
22.5. 23.5. 24.5. 25.5. 26.5. 27.5. 28.5.	**TrM** **TrM** **TrM** **TrM** **TrM** **TrM** **TrM**	Von Nordwesten her einströmende Polarluft lässt über Mitteleuropa einen hochreichenden Kaltluftkörper entstehen. Um diesen herum kreisen kleine Bodentiefs mit entsprechender Auswirkung auf die Witterung. Im Westen sinkt die Schneefallgrenze vorübergehend bis in die Mittelgebirgslagen. Es kommt verbreitet zu Niederschlägen, die zeit- und gebietsweise recht ergiebig sind, im Norden und in der Mitte Deutschlands fallen erste unwetterartige Regenmengen.
29.5. 30.5. 31.5.	**TM** **TM** **TM**	Auch das Bodendruckfeld über Mitteleuropa zeigt wieder klaren zyklonalen Charakter. Vor allem im Osten und Süden fallen unwetterartige Niederschlagsmengen, die zu verbreitetem Hochwasser in kleineren und mittleren Flüssen führen.
Juni 2013		
01.6. 02.6.	**TM** **TM**	Zu Monatsbeginn hält die Zentraltieflage mit teils unwetterartigen Regenmengen noch an, wenngleich sich der Schwerpunkt der Tiefdrucktätigkeit ins östliche Mitteleuropa verlagert.
03.6. 04.6. 05.6. 06.6.	**NEa** **NEa** **NEa** **NEa**	Vom Atlantik her schiebt sich ein kräftiges Hoch über die Britischen Inseln hinweg bis ins Nordmeer und nach Nordnorwegen. Dabei stellt sich über Mitteleuropa eine nordöstliche Strömung mit überwiegend leicht antizyklonalem Witterungsgepräge ein. Lediglich im Süden sind die Verhältnisse etwas zyklonaler.

Großwetterlagen: Trog Westeuropa (TrW); Hochdruckbrücke Mitteleuropa (BM); Winkelförmige Westlage (WW); Südlage, zyklonal (Sz); Tief Mitteleuropa (TM); Trog Mitteleuropa (TrM); Nordostlage, antizyklonal (NEa)

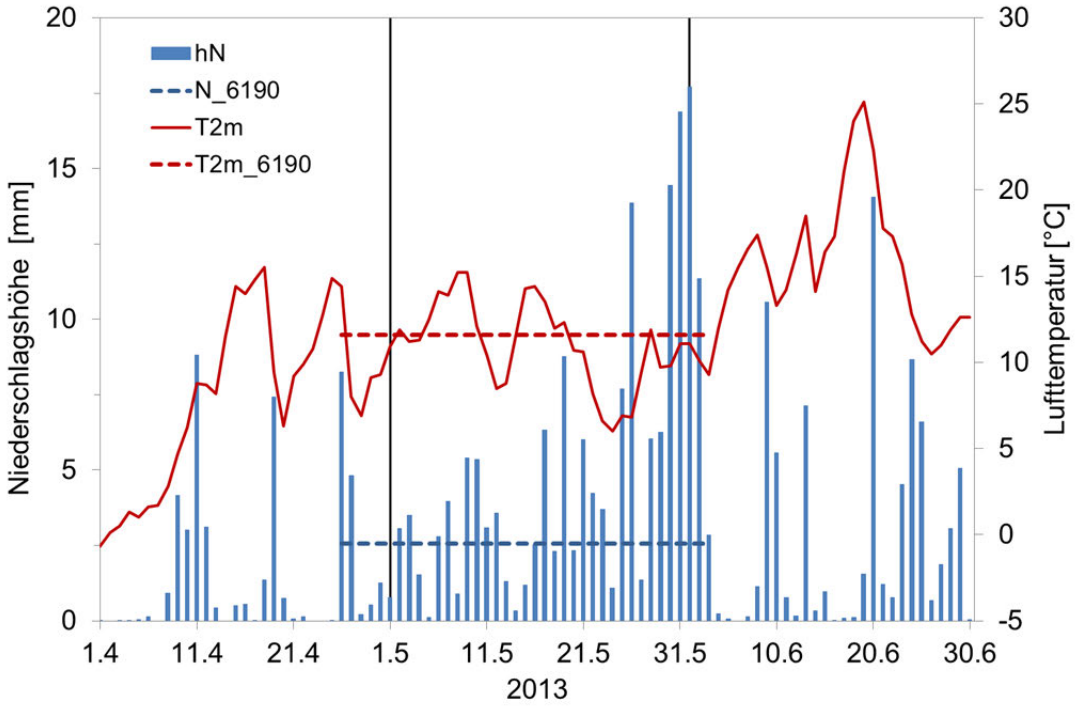


Abb. 2.4: Tagessummen und -mittel des Gebietsniederschlags (hN) und der bodennahen Lufttemperatur (T2m)
für die vom Hochwasser betroffenen Stromgebiete Deutschlands einschließlich der ausländischen Flussgebietsanteile (A_{Eo} = 480 091 km²) für den Zeitraum 01. April bis 30. Juni 2013. Ergänzend sind die vieljährigen Mittelwerte der Periode 1961/90 eingezeichnet. (Datenquelle: BfG, vgl. Kap.8.2)

Tab. 2.2: Niederschlagshöhen der verschiedenen Phasen der hochwasserrelevanten Witterungsperiode Mai* 2013, Phasen in mm und als Vielfaches des Mittelwertes der Periode 1961/90 für die Einzugsgebiete von Donau, Rhein sowie die tideunbeeinflussten Gebietsanteile von Weser und Elbe

Periode bzw. Phase	Ein-heit	von	bis	Summe Ein-zugsgebiete	Donau	Rhein	Weser	Elbe
Fläche	[km²]			410 000	76 615	160 198	38 509	134 491
Jahr 1961/90	[mm]			822	1 047	884	449	726
Mai 1961/90	[mm]			77	99	77	43	74
Mai* 1961/90	[mm]			100	125	110	83	79
Mai* 2013	[mm]			188	238	185	150	176
Phase 1	[-/-]	26.04.	16.05.	1,0	0,9	1,1	0,8	1,0
Phase 2	[-/-]	17.05.	24.05.	1,7	1,2	1,8	3,1	1,6
Phase 3	[-/-]	25.05.	27.05.	3,3	2,0	1,9	7,7	4,3
Phase 4a	[-/-]	28.05.	03.06.	4,3	5,8	3,1	1,9	5,7
Phase 4b	[-/-]	30.05.	02.06.	6,0	8,9	4,0	2,3	7,9
Mai* 2013	[-/-]	26.04	03.06.	1,9	1,9	1,7	2,0	2,2

Beginnend mit dem 26. April setzte eine insgesamt 39 Tage anhaltendende und nahezu ununterbrochene niederschlagsreiche und an vielen Tagen ungewöhnlich kühle Witterung ein, die schließlich aufgrund der spezifischen raum-zeitlichen Abfolge und Überlagerung von Ereignissen zu der extremen Hochwassersituation in den Flusseinzugsgebieten Mitteleuropas geführt hat.

Dieser hochwasserrelevante Zeitraum (26.04. bis 03.06.2013) wird im Weiteren als Zeitraum Mai* 2013 bezeichnet.

Im Zeitraum Mai* 2013 lassen sich vier Phasen hinsichtlich Wetterlage und resultierender Niederschlagstätigkeit unterscheiden (s. Tab. 2.2). Innerhalb der vierten Phase stechen insbesondere hinsichtlich der aufgetretenen Niederschlagsintensitäten die vier Tage vom 30. Mai bis zum 02. Juni heraus (Phase 4b), so dass dieser Zeitraum zusätzlich hervorgehoben und betrachtet wird (vgl. Kap. 2.3 und 2.4).

2.3 Verlauf des Niederschlags in den Stromgebieten

In den durch die zahlreichen Tiefdruckgebiete geprägten vier identifizierten Witterungsabschnitten (s. Tab. 2.2) traten die Niederschläge mit unterschiedlich zeitlichen und räumlichen Schwerpunkten in den Flussgebieten Deutschlands und des benachbarten Auslandes auf. Für eine zusammenfassende Darstellung dieser vielfältigen Erscheinungen, werden die in Rasterform vorliegenden täglichen Niederschlagssummen zu Gebietsmittelwerten von 50 Flusseinzugsgebieten zusammengefasst (vgl. Abb. 2.5) und für die vier Witterungsabschnitte sowie für den gesamten hochwasserrelevanten Zeitraum des Mai* 2013 aufsummiert.

Anhand des Verhältnisses von der in der Hochwasserperiode beobachteten Niederschlagssumme des Mai* 2013 zum vieljährigen Mittel der Niederschlagssumme im Mai* 1961/90 treten die Teileinzugsgebiete mit besonders hohen Niederschlägen (Werte > 2, d.h. dem 2-fachen und mehr des Klimamittels) hervor. Im Stromgebiet der Donau (Abb. 2.5) waren dies die beiden Teilgebiete „Unterer Inn mit Salzach“ und „Donau-Altmühl-Regen“. Im Elbegebiet wiesen gleich acht von elf Gebieten mehr als das 2-fache des Klimamittels auf. Insbesondere ragten die Gebiete von Mulde (Faktor 3,1), Saale (Faktor 2,8) und Eger (Faktor 2,6) heraus. Im Rheingebiet erreichte der „Obere Main“ das 2,4-fache des Klimamittels, während die Weserteileinzugsgebiete „Aller-Leine“ und „Fulda-Werra“ das 2,2- bzw. 2,1-fache des Klimamittels verzeichneten. Nur wenige Gebiete (Ems, Maas, Nord- und Ostseeküste) zeigten eine geringe bzw. eine moderate Anomalie (Faktoren < 1,6).

Bereits bei dieser Betrachtung wird die besondere Niederschlagsbelastung für die Flussgebiete Mittel-, Ost- und Südostdeutschlands sowie der westlichen Teile von Tschechien und Österreich deutlich. Darüber hinaus lassen sich innerhalb des Hochwasserzeitraums weitere raumzeitliche Muster erkennen, die durch den Anteil der für die Witterungsabschnitte aufsummierten Gebietsniederschläge an der Gesamtsumme der jeweiligen Gebietsniederschläge aufgezeigt werden.

Die Abfolge der Niederschlagsschwerpunkte, die wichtige Einblicke in die Hochwassergenese gibt, lässt sich wie folgt zusammenfassen (vgl. Abb. 2.6):

> In der ersten Phase (26.04. bis 16.05.) traten die Niederschläge mehr oder weniger gleich stark verteilt in allen Flussgebieten auf. Es wurden in dieser 21-tägigen Periode vielfach 6 % - 30 % der gesamten Niederschlagssumme des Mai* 2013 erreicht.

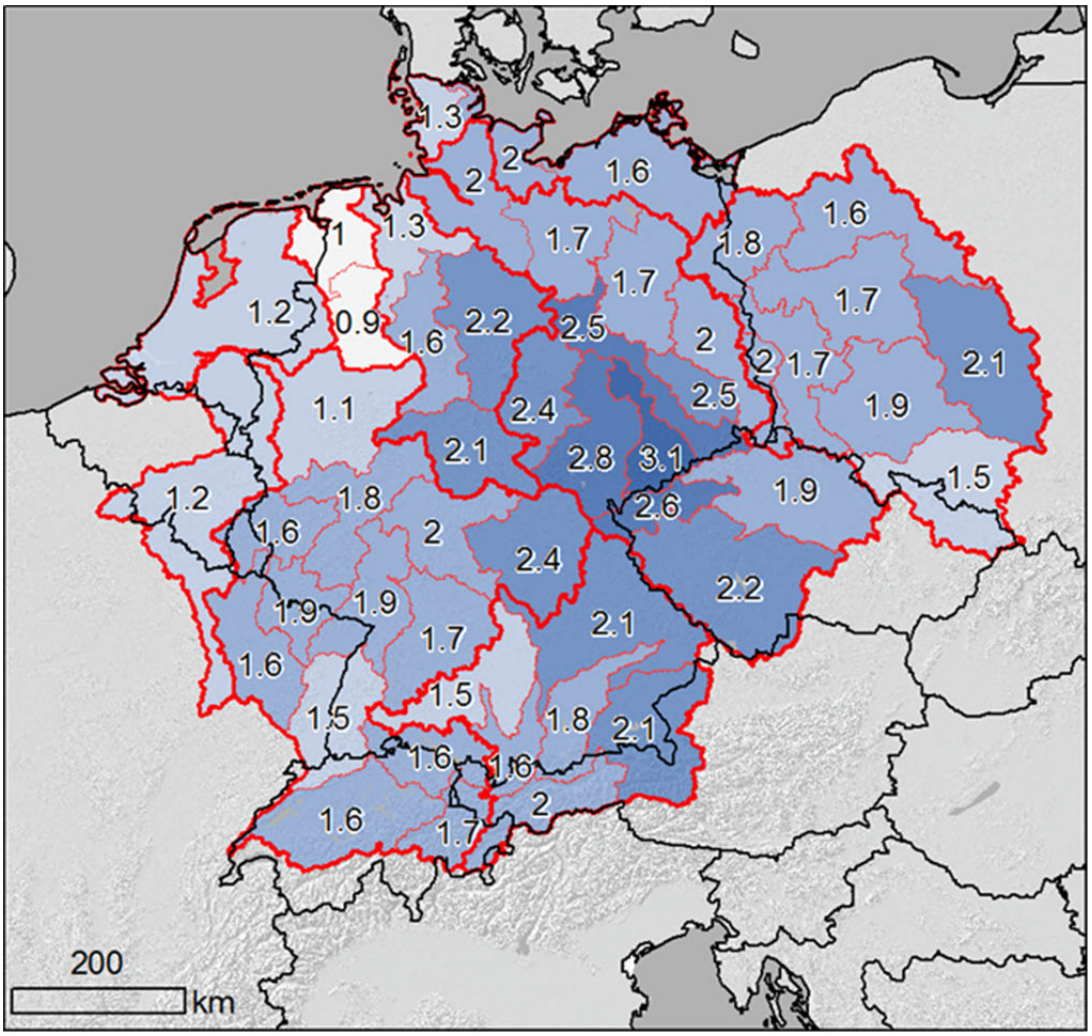


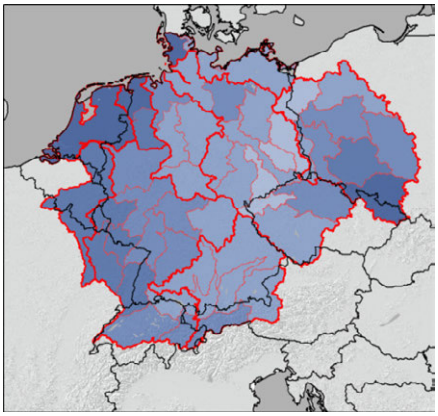
Abb. 2.5: Verhältnis der in der Hochwasserperiode Mai* 2013 (26.04.-03.06.2013) beobachteten Niederschlagssummen zum vieljährigen Mittel der Niederschlagssumme im Mai* 1961/90

> In der zweiten, siebentägigen Phase (17.05. bis 24.05.) waren insbesondere die Gebiete in Nordwest- und Westdeutschland sowie das französische Moselgebiet betroffen. Hier fielen 31 % bzw. bis zu 50 % des gesamten Niederschlages. Aber auch in den übrigen Flussgebieten Mitteleuropas erreichten die Niederschlagsanteile flächenmäßig immer noch 6 % bis 30 % (Bezug: Mai* 2013).

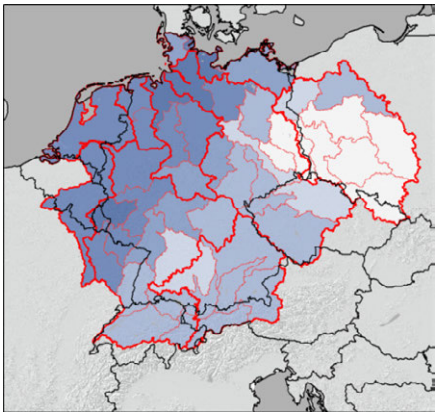
> Die dritte, nur drei Tage andauernde Phase (25.05. bis 27.05.), ist durch Schwerpunkte des Niederschlagsgeschehens mit Werten von 21 % bis 40 % in den nicht tidebeeinflussten Teileinzugsgebieten der Weser sowie den nördlichen Nebenflüssen der Elbe (rechtsseitige Nebenflüsse zur unteren Mittelelbe einschließlich Havel) gekennzeichnet. Weiterhin wurden aber auch in den übrigen Flussgebieten mit Ausnahme der westlichen und südwestlichen Einzugsgebiete von Rhein und Maas Niederschlagsanteile von 6 % bis 20 % erreicht.

> Der entscheidende Niederschlagsimpuls als das auslösende Moment für die extremen Hochwasser in Teilen des Rheins, der Donau und der Elbe fällt in die vierte Phase (28. Mai bis 03. Juni). In diesen Flussgebieten fielen 50 %, teilweise auch mehr als

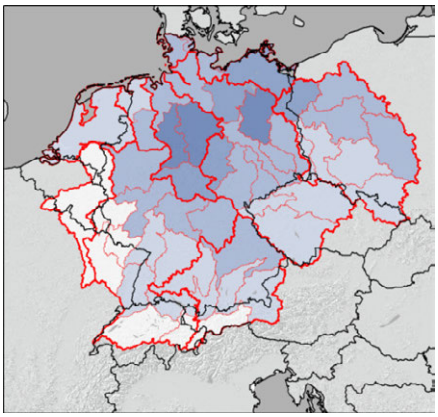
60 % des gesamten Niederschlages. Grenzt man die Betrachtung auf die viertägige Phase 4b weiter ein, so stellt man fest, dass in dieser bereits 40 % und teilweise auch 50 % der Niederschlagsmenge des gesamten Zeitraumes erreicht wurden. Schwerpunkte bilden hier die alpin geprägten Einzugsgebiete der Donau sowie im Elbegebiet die Flussgebiete von Moldau, Eger, Mulde und Schwarzer Elster. Im Einzugsgebiet des Rheins treten nur die Einzugsgebiete oberhalb der Mainmündung und der Main selbst hervor. Der Fokus lag hier jedoch eindeutig in den Gebieten von Alpenrhein und Bodensee sowie des Neckars.



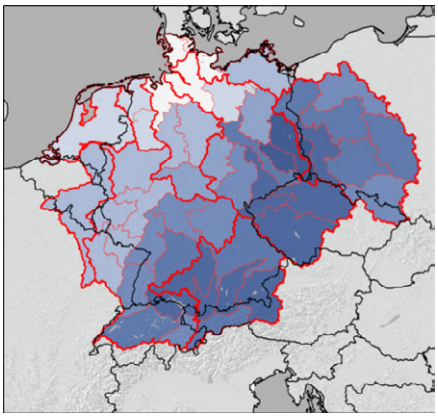
Phase 1: 26.04.-16.05.2013



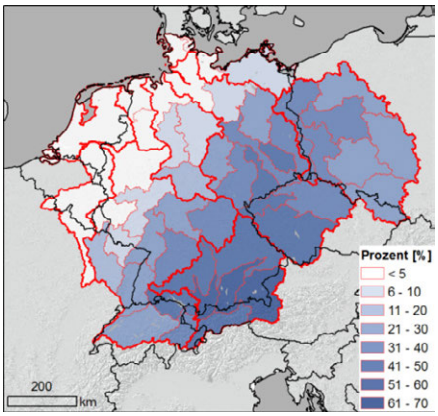
Phase 2: 17.05.-24.05.2013



Phase 3: 25.05.-27.05.2013



Phase 4a: 28.05.-03.06.2013



Phase 4b: 30.05.-02.06.2013

Abb. 2.6: Prozentuale Anteile des Niederschlags in den ausgewiesenen Phasen an der Niederschlagsmenge des Zeitraumes Mai* 2013 (26.04.-03.06.2013) für 50 Teileinzugsgebiete Mitteleuropas

2.4 Niederschlagsintensitäten

Für die Hochwasserabflussbildung stellt neben der Niederschlagsandauer und der damit verbundenen Menge auch die Intensität des Niederschlages einen bedeutenden Faktor dar. Die vorstehenden Analysen (Kap. 2.1 bis 2.3) haben gezeigt, dass das Niederschlagsgeschehen in den Flussgebieten Mitteleuropas durch die große flächenhafte Ausdehnung, die langandauernde niederschlagsreiche Witterung und darin eingelagerte Cluster mit mehrtägigen niederschlagsreichen Sequenzen gekennzeichnet war.

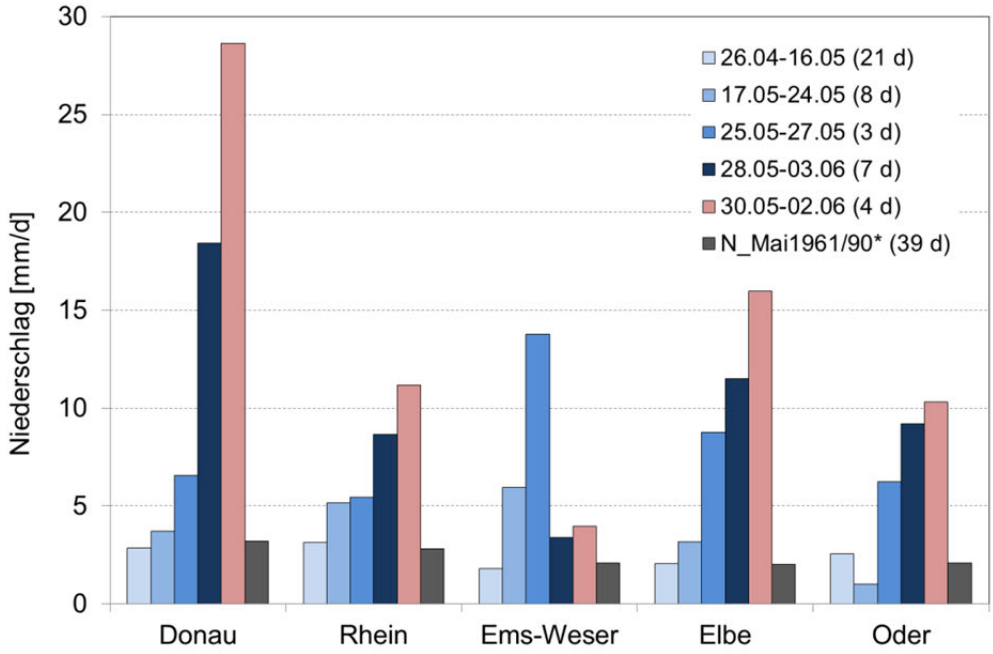


Abb. 2.7: Mittlere tägliche Gebietsniederschläge für ausgewählte Phasen der hydrometeorologischen Hochwasserperiode 2013 und für diesen Zeitraum gültige Mittelwerte der Referenzperiode 1961/90 für die Stromgebiete Mitteleuropas (ohne tidebeeinflusste Gebietsanteile)

Eine zusammenfassende Charakterisierung der Niederschlagsintensitäten aus hydrologischer Sicht erfolgt hier durch die Ausweisung und Auszählung der Tage mit besonders hohen Tagessummen des Gebietsniederschlages (> 10 mm) der Stromgebiete Mitteleuropas (Tab. 2.3). Für die fünf Phasen werden die mittleren täglichen Gebietsniederschläge berechnet, die einen Indikator für die in diesen Zeitabschnitten herrschenden Niederschlagsintensitäten darstellen. Die mittleren täglichen Niederschlagshöhen werden dem für den hochwasserrelevanten Zeitraum gültigen vieljährigen Mittel 1961/90 gegenübergestellt.

Die Ergebnisse (Abb. 2.7) belegen, dass mit Ausnahme der ersten Phase (im Odergebiet auch die zweite Phase), in allen Phasen der klimatisch erwartete Wert deutlich um ein Vielfaches überschritten wurde. Auch wird die besondere Stellung der vier- bis siebentägigen Phasen ab dem 28. Mai in den Stromgebieten von Rhein, Donau, Elbe und Oder deutlich. Die Einzugsgebiete von Ems und Weser waren dagegen insbesondere in der dritten Phase (25.-27. Mai) betroffen. Das Odergebiet stimmt in der Ausprägung am ehesten mit dem Rheingebiet überein; davon abweichend fiel die zweite Phase im Odergebiet jedoch verhältnismäßig trocken aus.

Gebietsmittelwerte der täglichen Niederschlaghöhe von 10 mm und mehr wurden während des Zeitabschnitts Mai* 2013 im Donaugebiet an sechs Tagen, im Elbe-, Rhein- und Ems-Wesergebiet an fünf Tagen sowie im Odergebiet an vier Tagen erreicht oder überschritten (s. Tab. 2.3). Die raum-zeitliche Abfolge dieser besonders niederschlagsreichen Tage bestätigt noch einmal die vorgenannten Niederschlagsschwerpunkte.

Tab. 2.3: Niederschlagsreiche Tage, definiert als Tage mit einer Gebietsniederschlagshöhe ≥ 10 mm, und Gebietsniederschlagshöhen in mm in der hydrometeorologischen Hochwasserperiode Mai* 2013 in den Stromgebieten von Donau, Rhein, Ems-Weser, Elbe und Oder (ohne tidebeeinflusste Gebietsanteile).
Zum Vergleich ist der für diese Periode berechnete vieljährige Mittelwert der Zeitreihe 1961/90 (hN) aufgeführt.

	Donau	**Rhein**	**Ems-Weser**	**Elbe**	**Oder**
AEo [km²]	**76615**	**160198**	**46907**	**134491**	**118938**
hN [mm/d]	**3,2**	**2,5**	**2,1**	**2,0**	**2,1**
26.04.2013	1	**13**	**11**	6	2
10.05.2013	**14**	2	0	6	9
17.05.2013	8	4	**13**	6	0
21.05.2013	5	8	**14**	2	0
25.05.2013	2	4	**14**	**12**	7
26.05.2013	**15**	**12**	**24**	**12**	0
27.05.2013	2	0	3	2	**11**
28.05.2013	4	9	4	5	**10**
30.05.2013	**22**	**11**	7	**18**	**16**
31.05.2013	**26**	**21**	8	9	5
01.06.2013	**37**	**10**	1	**21**	8
02.06.2013	**30**	2	0	**16**	**11**
∑ Tage hN ≥ 10 mm	6	5	5	5	4

2.5 Synoptische Entwicklung und raum-zeitliche Niederschlagsverteilung 28. Mai bis 03. Juni 2013

Der Witterungsperiode vom 28. Mai bis zum 03. Juni, und insbesondere dem darin enthaltenen viertägigen Zeitraum vom 30. Mai bis 02. Juni, kommt eine herausragende Bedeutung für die Hochwasserabflussbildung in den Stromgebieten von Donau, Rhein (Hoch- und Oberrhein) und Elbe zu. Die über Deutschland und Mitteleuropa in diesem Zeitraum dominierende Wetterlage und das daraus folgende zeitlich und räumliche Niederschlagsgeschehen wird deshalb hier im Detail an Hand von Bodenluftdruckkarten und räumlich hochauflösenden kalibrierten Radardaten des Niederschlages (~ 1 km x 1 km, RADOLAN) aufgezeigt. In den meteorologischen Bodenkarten (Abb. 2.8 und Abb. 2.9) findet sich ergänzend die mit dem geostationären Satelliten Meteosat beobachtete Wolkenbedeckung eingezeichnet. Zusätzlich ist die Lage des die Bodentiefdruckgebiete in der Höhe steuernden Tiefdruckkerns (HTK) vermerkt. Dieses kalte Höhentief bildete sich vom 28. Mai auf den 29. Mai über Südostfrankreich (vgl. Tab. 2.1) und verlagerte sich, wie den Karten zu entnehmen ist, nur langsam ostwärts, bis es im Verlauf des 02. und 03. Juni zunehmend an Einfluss über das Wettergeschehen in Mitteleuropa verlor.

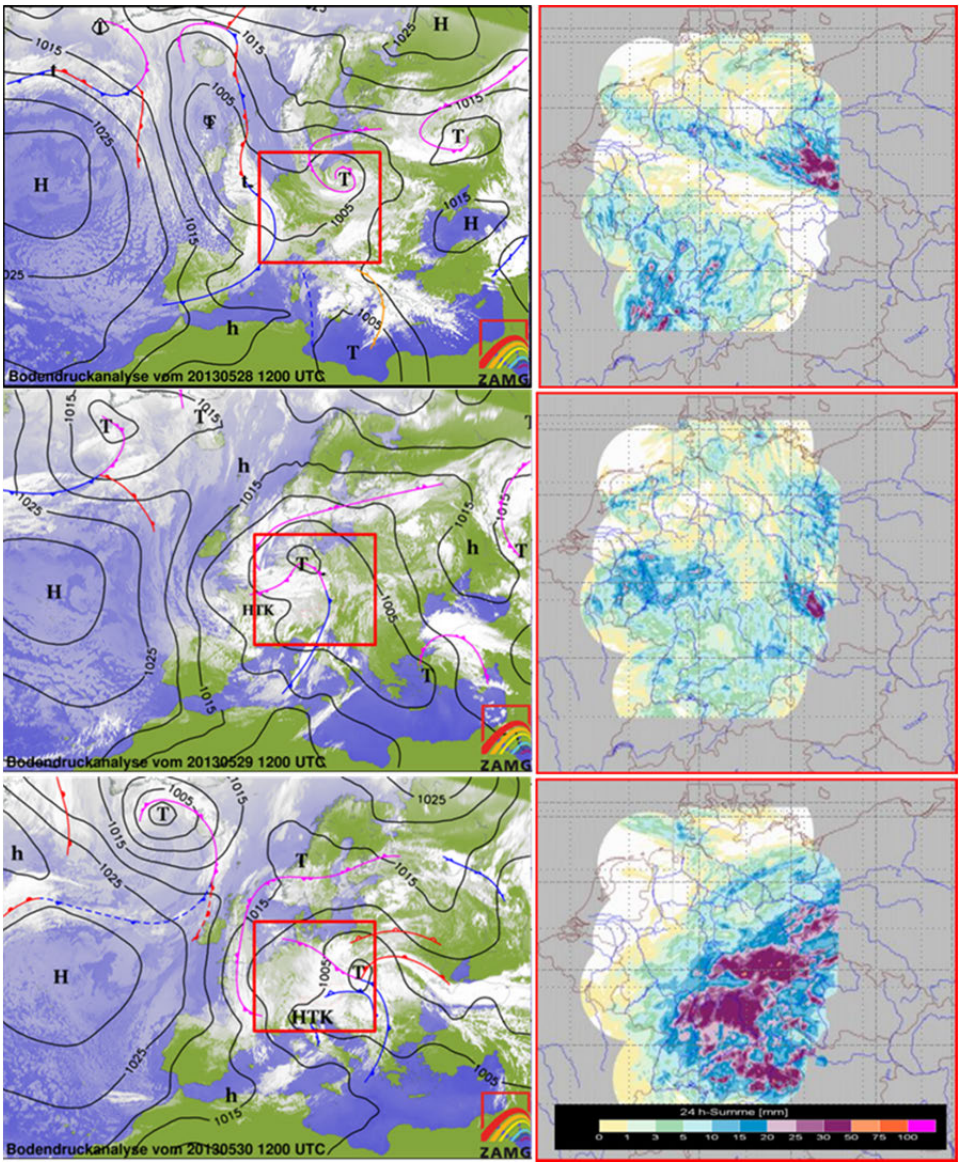


Abb. 2.8: Bodenwetterkarten mit Luftdruck, Fronten und Bewölkung (links) und Tagessumme des Niederschlages aus kalibrierten Radardaten nach dem Verfahren RADOLAN (rechts) für den Zeitraum 28.05. bis 30.05.2013.
Buchstaben bezeichnen die Lage des Kerns bodennaher Hoch- und Tiefdruckgebiete. HTK kennzeichnet die Lage des Tiefdruckkerns in ca. 5 000 m Höhe. (Quelle Bodenwetterkarte: ZAMG, Wien; Datenquelle RADOLAN: DWD, Offenbach)

Die Niederschlagsdaten sind die vom Deutschen Wetterdienst aus den Radardaten des Radarnetzes und mit an Stationen gemessenen Niederschlägen nach dem RADOLAN-Verfahren kalibrierten Stundensummen, die zu den hier gezeigten Tagessummen aufsummiert wurden. Basierend auf diesen Abbildungen und den in der Berliner Wetterkarte (BWK 2013) dargestellten Übersichten lässt sich die siebentägige Periode wie folgt synoptisch und hinsichtlich des Niederschlagsgeschehens charakterisieren:

28.05.2013: Mitteleuropa stand wieder ganz unter Tiefdruckeinfluss, wobei der hoch reichende Tiefdruckwirbel DOMINIK von Polen aus über die Oder hinweg westwärts wanderte.

Das Tief war mit feucht-labiler Luft angefüllt, so dass sich in ihr in der zweiten Tageshälfte kräftige Gewitter entwickelten. Im Westen und Süden Deutschlands war es tagsüber zunächst sonnig und trocken, ehe dann am Abend Schauer und Gewitter des westeuropäischen Tiefdrucksystems ERDMANN auf den äußersten Südwesten Deutschlands übergriffen. Die Regenfälle haben dann den Süden und die zentralen Teile Deutschlands erfasst, wobei sich der Tiefdruckwirbel ERDMANN aber weitgehend auflöste. Inzwischen entstand über den Karpaten ein neuer Tiefdruckwirbel (FREDERIK).

29.05.2013: Das noch am Mittag des 28.05. über Nordwestdeutschland liegende Tiefdruckgebiet DOMINIK wanderte langsam weiter nach Westen und erreichte mit seinem nur noch wenig ausgeprägten Kern Belgien. In seinem Bereich gab es in Mitteleuropa mehrere mit Gewittern durchsetzte Niederschlagscluster, die Regenmengen von 10 bis 20 l/m² brachten. Ein Cluster erfasste die Niederlande, ein weiterer betraf das Rheinland, sowie ein weiterer die mittlere Oder sowie große Teile der tschechischen Elbe. Das Haupthöhentief lag nun über Südfrankreich und erfasste mit seiner hoch reichenden Kaltluft das westliche Mittelmeer. An seiner Ostflanke verstärkte sich nun die Zufuhr von Warmluft von der Türkei her nach Norden, wobei diese Luft auf direktem Weg aus Afrika kam. Im Westen Deutschlands blieb es wieder sehr kühl, ebenso in fast ganz Südwest- und Süddeutschland.

30.05.2013: Die Troglage über Mitteleuropa hielt unverändert an. Im Bodenniveau hat sich dabei das Tiefdruckgebiet FREDERIK auf der Trogvorderseite von Südosteuropa östlich der Alpen mit seinem Zentrum nach Sachsen verlagert. In fast allen Regionen Mitteleuropas kam es zu ergiebigen Niederschlägen. Bis zur Nacht hatte sich das Hauptniederschlagsfeld von der Alpensüdseite auf die Nordseite verlagert. In der Südhälfte Deutschlands fielen zwischen 18 Uhr UTC und 06 Uhr UTC des 31.05. verbreitet 25 bis nahe 50 l/m². Spitzenreiter waren Niederstetten (Hohenlohe) mit 45, Schmücke mit 43 und Neuhaus am Rennweg mit 48 l/m² (Thüringer Wald). In Sachsen und Sachsen-Anhalt summierten sich die gefallenen Niederschlagsmengen über 24 Stunden ebenfalls auf Werte über 40 l/m².

31.05.2013: Der am Mittag über dem Bayerischen Wald und Erzgebirge liegende, im Bodendruckfeld nicht mehr ausgeprägte Tiefdruckwirbel FREDERIK zog weiter nach Süden zu den Alpen und brachte bis zum Morgen des 01.06. vor allem der Südhälfte Deutschlands weiteren ergiebigen Regen, wobei in der Schwäbischen Alb bis zu 63 l/m² und im Schwarzwald bis zu 81 l/m² innerhalb von 24 Stunden fielen. An der Grenze zu der sehr warmen Luft über Ost- und Nordeuropa entstand über der Ukraine das Tief GÜNTHER, das jedoch nur langsam nach Westen vorankam und sich abschwächte. Insgesamt verlagerte sich der Höhenwirbel über Mitteleuropa nur langsam nach Osten.

01.06.2013: In Mitteleuropa bestimmte weiterhin der bis zur Tropopause (~ 10 km Höhe) reichende Tiefdruckkomplex (HTK) das Wetter. Mit der Annäherung von Tief GÜNTHER lebte in Deutschland die Niederschlagstätigkeit wieder erheblich auf. Schwerpunkt der Starkregenfälle waren Sachsen und Thüringen sowie der Süden Deutschlands. Nach den Angaben des DWD war das Erzgebirge, wo in Carlsfeld in den vergangenen 24 Stunden bis in die Morgenstunden des 01.06.2013 etwa 95 mm fielen, besonders betroffen. Im Bayerischen Wald gab es bis zu 68 mm (Gr. Arber), auf der Schwäbischen Alb bis zu 45 mm (Stötten). Die Station Chieming meldete eine 24-stündige Niederschlagsmenge von 81 mm. Im benachbarten Salzburg wurden sogar 101 mm gemessen.

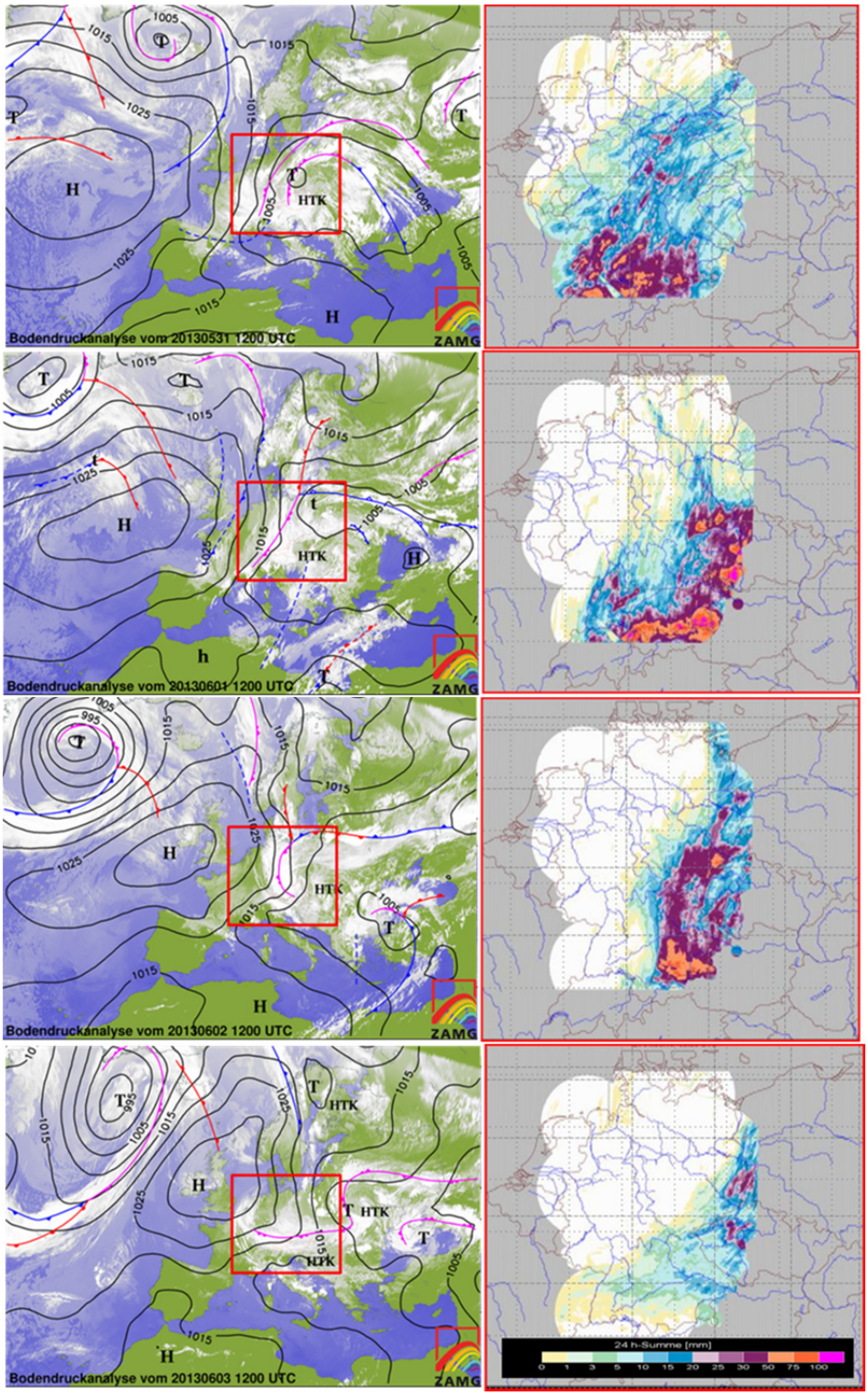


Abb. 2.9: Bodenwetterkarten mit Luftdruck, Fronten und Bewölkung (links) und Tagessumme des Niederschlages aus kalibrierten Radardaten nach dem Verfahren RADOLAN (rechts) für den Zeitraum 31.05. bis 03.06.2013.
Buchstaben bezeichnen die Lage des Kerns bodennaher Hoch- und Tiefdruckgebiete. HTK kennzeichnet die Lage des Tiefdruckkerns in ca. 5 000 m Höhe. (Quelle Bodenwetterkarte: ZAMG, Wien; Datenquelle RADOLAN: DWD, Offenbach)

02.06.2013: Das mitteleuropäische hoch reichende Tiefdrucksystem, das am Vortag noch die beiden Bodentiefs FREDERIK über Korsika und GÜNTHER über Polen aufwies, verlagerte sich insgesamt nach Osten. Dabei löste sich FREDERIK weitgehend auf, während sich GÜNTHER mit seinem Schwerpunkt etwas nach Osten verlagerte. Insgesamt stieg der Bodenluftdruck über Mitteleuropa mit dem Vorstoß des Hochs SABINE, dessen Kern nun über England lag. Das Niederschlagsfeld überdeckte an diesem Tag noch Gebiete von Westpolen bis zu den Alpen.

03.06.2013: Das nunmehr seit einer Woche das Wettergeschehen in Mitteleuropa bestimmende Höhentief verlagerte sein Zentrum weiter ostwärts bis zum 04.06. (00 UTC) nach Moldawien bzw. Nordrumänien. Dabei füllte es sich weiter auf. Ursprünglich hatte es sich am Montag, den 27.05. aus der nördlichen Frontalzone vom Raum Island gelöst und war dann über Frankreich und dem Alpenraum zum Balkan gezogen.

Im Bodendruckfeld hielt sich über der Ukraine bzw. Südostpolen die Tiefdruckzone GÜNTHER, an deren Nordwestflanke vom Baltikum her unvermindert feuchtwarme Luftmassen auf die von der Nordsee einströmende subpolare Meeresluft trafen und zum Aufgleiten gezwungen wurden. Somit dauerte auch am 03.06. noch in der Südosthälfte Deutschlands der schauerartig verstärkte Regen an und sorgte in den Hochwassergebieten für weiteren Wassernachschub. Besonders betroffen waren die Regionen Lausitz und das Osterzgebirge. So fielen 24-stündig zum Beispiel in Cottbus 22 l/m², in Boxberg 29 l/m² und in Bad Muskau 32 l/m² Regen. Im Osterzgebirge wurden in Klingenberg 22 l/m² und in Lehn 27 l/m² gemessen. Auch in Ostbayern regnete es noch zeitweise, wobei in Fürstenzell bei Passau 14 l/m² und in Wunsiedel 17 l/m² fielen. Weiteren Regen gab es auch noch in Tschechien und Nordösterreich. Im Vergleich zu den Vortagen nahmen die Regenmengen aber deutlich ab. So fielen in Prag nochmals 15 l/m² und an der Bergstation Lysa Hora 47 l/m².

West- und Norddeutschland wurde schon am 02.06. von dem über Großbritannien und dem Nordmeer liegenden Hoch SABINE beeinflusst. Inzwischen bildete sich auch in der mittleren Troposphäre mit Zentrum über Schottland ein Hochdruckgebiet, so dass zum 04.06. die Niederschlagstätigkeit über Mitteleuropa sich deutlich abschwächte.

Insgesamt fielen in den vier Tagen vom 30. Mai bis zum 02. Juni in großen Gebieten des Landes mehr als 120 l/m² (z.B. Baden-Württemberg, Station Klippeneck 125 l/m², Stötten 124 l/m²), in Sachsen und Thüringen wurde im Bergland bis zu 200 l/m² gemessen. Spitzenreiter der DWD-Stationen war mit 194 l/m² Carlsfeld/Erzgebirge, aber auch auf dem Fichtelberg/Erzgebirge gab es 165 l/m². Noch höhere Summen sind in den Alpen zusammengekommen, wo z.B. auf der Zugspitze in den vier Tagen 203 l/m² erreicht wurden; dabei erhöhte sich die Schneedecke von 315 cm am 29.05. auf 480 cm am Morgen des 04.06.

Die anhaltenden und hohen Niederschläge haben neben Deutschland auch große Gebiete in Tschechien und Österreich erfasst. Im Vergleich zum extremen Donau- und Elbehochwasser 2002 traten beim Hochwasser 2013 vier Tage in Folge Starkniederschläge auf. Ähnliche tägliche Niederschlagswerte wie die Rekordmarke von Zinnwald/Erzgebirge am 13.08.2002, als dort innerhalb von 24 Stunden 312 l/m² gemessen wurden, gab es über drei bis vier Tage summiert örtlich in den Nordalpen.

2.6 Schneedeckenentwicklung und Bodenfeuchte

Hinsichtlich des Einflusses der Schneeschmelze auf die Hochwasserabflussbildung in den alpinen Hochlagen der schweizerischen und österreichischen Einzugsgebietsanteile von Donau und Rhein wird auf BfG (2013c) und STEIN, MALITZ et al. (2013) verwiesen. Dort wird dargelegt, in welchem Umfang die Schneeschmelze zu den Ursachen für das Hochwasser im Juni 2013 beigetragen hat, wobei nur die Periode der stärksten Niederschläge vom 30. Mai bis 02. Juni 2013 betrachtet wird. Zusammenfassend wurde dort festgestellt, dass weder Schneefall, noch die Rückhaltung von Niederschlag in der Schneedecke, noch die Schneeschmelze einen nennenswerten abschwächenden bzw. verstärkenden Beitrag zum Niederschlagsdargebot erbracht haben, das zu dem Hochwasserereignis Ende Mai/Anfang Juni 2013 führte.

Die in den ausgewiesenen Perioden gefallenen Niederschläge und Intensitäten führten jedoch kontinuierlich fortschreitend und großräumig zu einer Sättigung der Porenräume in den Böden mit Wasser und bildeten somit die für die Entstehung extremer Hochwasser relevanten Anfangsbedingungen für die sich ab dem 28. Mai anschließende hochwasserauslösende Niederschlagsperiode. Die Auffüllung der Bodenwasserspeicher wurde weiterhin dadurch begünstigt, dass durch die wiederum im Vergleich zum klimatischen Mittel äußerst geringe solare Einstrahlung und den für die Jahreszeit zu niedrigen Temperaturen in Verbindung mit einer zu hohen Luftfeuchte die Verdunstung vergleichsweise gering ausfiel und damit die Bodenwasservorräte nicht, wie sonst der Jahreszeit entsprechend, verringert wurden. Auch die der Jahreszeit nicht entsprechende phänologische Entwicklung der Vegetation führte zu geringen Verdunstungswerten.

Die zeitliche Entwicklung der Bodenfeuchte lässt sich anhand des mit dem Bodenmodell des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) berechneten und mit beobachteten Satellitendaten ergänzten Bodenfeuchteindexes SAFH/H34 (ALBERGEL et al. 2012) aufzeigen. Dieser Index liegt als Tageswert für 25 km x 25 km große Raster und für vier Bodenschichten (L1: 0-7 cm; L2: 7-28 cm; L3: 28-100 cm; L4: 100-289 cm) vor. Die Raster decken die gesamte Landfläche der Erde ab. In Abb. 2.10 sind jeweils für den Beginn der ausgewiesenen Niederschlagsperioden sowie für den 30. Mai, dem Beginn der viertägigen Periode mit intensiven Niederschlägen, und dem 03. Juni 00:00 UTC, dem Ende dieser Periode, die Bodenfeuchteindexwerte der Bodenschicht L2 (7-28 cm), in welcher die kapillare Bodensättigung eventuellen Oberflächenabfluss entscheidend steuert, in Kartenform wiedergegeben. Prozentwerte von 100 % bedeuten, dass eine Sättigung des Bodens mit gespeichertem Wasser vorliegt.

Die in den Karten ersichtliche räumliche Ausdehnung und Schwerpunkte der Bodensättigung spiegeln die räumlichen Muster des beschriebenen Niederschlagsgeschehens wider und verdeutlichen die Berechnungen und Angaben des Deutschen Wetterdienstes, nach denen Ende Mai rund 40 % der Fläche Deutschlands so hohe Bodenfeuchtewerte aufwiesen, wie sie seit Beginn der Messungen 1962 noch nicht beobachtet wurden (BfG 2013c).

Die zeitliche Entwicklung der Bodenfeuchte lässt sich anhand der nahe Koblenz auf der Rheininsel Niederwerth gelegenen Lysimeteranlage aufzeigen. So erfolgte hier infolge der hohen Niederschläge am 19. und 20. Mai um ca. einen Tag verzögert eine abrupte Zunahme der Bodenfeuchte zunächst in der oberflächennahen Bodenschicht. Die Bodenwasserwelle verlagerte sich dann in den folgenden Tagen in die tieferen Bodenschichten. Dieses Niederschlagsereignis stimmt zeitlich mit dem in dieser Periode beobachteten Moselhochwasser

überein (vgl. Kap. 3.3.1). Entsprechend den vorab beschriebenen großräumigen Niederschlagsmustern, traten in dieser Region nach dem 20. Mai keine weiteren übermäßig hohen Niederschläge auf. Die weiterhin feuchte Witterung führte jedoch dazu, dass die Bodenfeuchte noch über den Juni hinaus für die Jahreszeit vergleichsweise hohe Werte aufwies.

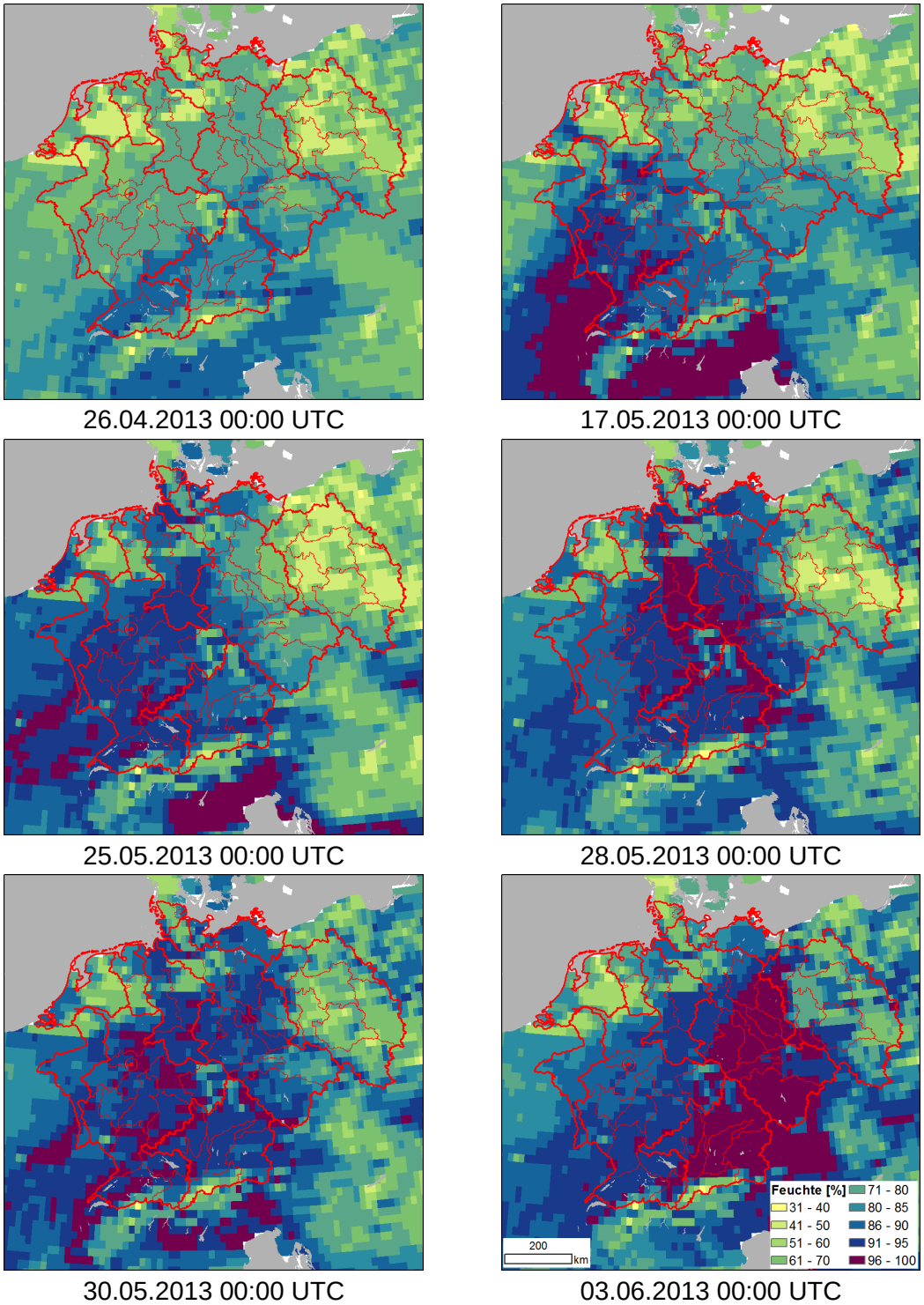


Abb. 2.10: Bodenfeuchteindex in der Schicht L2 (7-28 cm) in Mitteleuropa an ausgewählten Tagen zu Beginn, während und am Ende der Hochwasserperiode 2013
(Datenquelle: EUMETSAT-H SAF)

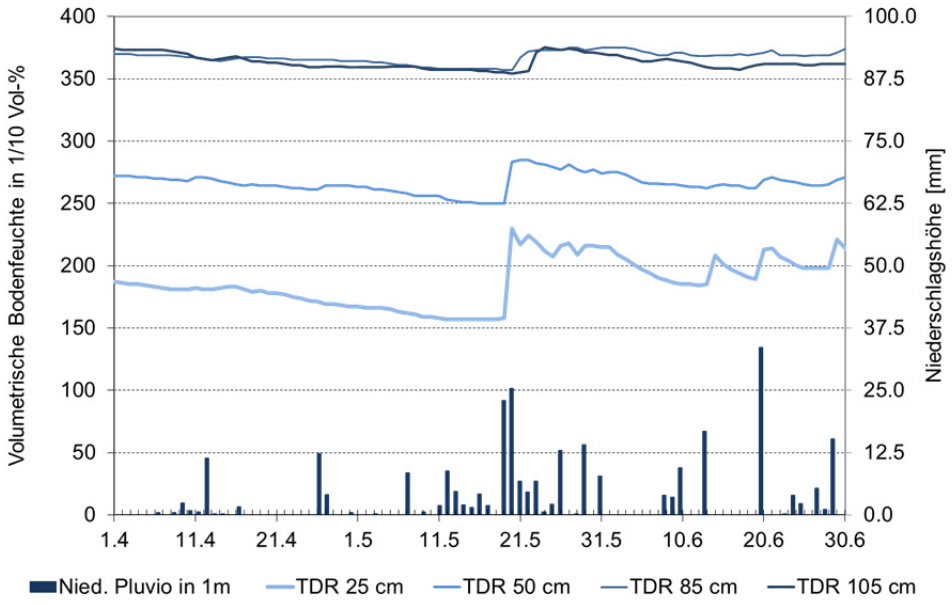


Abb. 2.11: Niederschlag (Niederschlagsmesser Pluvio) sowie volumetrische Bodenfeuchte (Time Domain Reflectometry, TDR) in verschiedenen Bodentiefen im Lysimeter L1 der Lysimeteranlage der BfG auf der Rheininsel Niederwerth bei Koblenz in den Monaten April, Mai und Juni 2013 (Datenquelle: BfG)

2.7 Fazit: Hydrometeorologische Ursachen des Hochwassers 2013

Zahlreiche Tiefdruckgebiete dominierten das Wettergeschehen in Deutschland und Mitteleuropa bereits von der letzten Aprilwoche an, und hielten mit nur wenigen Unterbrechungen bis in die erste Juniwoche hinein an. Sie sorgten mit großflächigen Starkniederschlägen und Dauerregen in den verschiedenen Flussgebieten für hohe Regenmengen. In der 39-tägigen vom 26. April bis zum 03. Juni anhaltenden Periode fiel in vielen Flussgebieten mehr als das Doppelte bis hin zum Dreifachen der mittleren Niederschlagsmenge. Besonders am 28. und 29. Mai trat zunächst bundesweit gesehen großflächiger Dauerregen ein, der sich im Süden und Südosten Deutschlands vom 30. Mai bis zum 02./03. Juni intensivierte. Hier wurden enorme Niederschlagsmengen von gebietsweise über 200 l/m² beobachtet.

Als hochwasserbegünstigender Faktor ist die kontinuierliche Füllung der Bodenwasserspeicher zu nennen, die entsprechend der vorherrschenden Wetterlagen in drei mehrtägigen Perioden (26. April bis 16. Mai, 17. Mai bis 24. Mai und 25. Mai bis 27. Mai) erfolgte. Ende Mai wiesen rund 40 % der Fläche Deutschlands so hohe Bodenfeuchtewerte auf, wie sie seit Beginn der Messungen im Jahr 1962 noch nicht beobachtet wurden.

Die räumlichen Schwerpunkte im Niederschlagsgeschehen traten in den Stromgebieten zeitlich um wenige Tage versetzt auf und wirkten so teils hochwasserfördernd (Donau, Elbe), andernorts (Rhein, Weser) hochwasserbegrenzend (vgl. auch Kap. 3.1).

3 Hochwasserverlauf, Retentionswirkungen und statistische Einordnung der Wasserstände und Durchflüsse in den betroffenen Flussgebieten

Jörg Uwe Belz, Norbert Busch, Matthias Hammer, Marcus Hatz, Markus Promny

3.1 Vorbemerkung

In den Stromgebieten Deutschlands waren im Mai und Juni 2013 unterschiedliche raumzeitliche Schwerpunkte im Niederschlagsgeschehen zu verzeichnen (vgl. Kap. 2). Dabei waren nicht nur chronologische Aspekte, d.h. Termin und Dauer der Überregnung, wesentlich, welche beispielsweise im Weser- und Rheingebiet für ein frühes Ansteigen, aber durch nachlassende Intensität letztlich für eine begrenzte Kulmination des Abflussgeschehens sorgten. Darüber hinaus war auch die Zugrichtung der Niederschlagsgebiete von Bedeutung. Beispielsweise erfolgte die Verlagerung des Regenschwerpunkts im Donaugebiet von West nach Ost, d.h. in Fließrichtung der Hochwasserwelle, und wirkte hochwasserverschärfend. Im Elbegebiet stellt sich die Situation noch komplexer dar, da hier zunächst die Eger, Mulde und Saale betroffen waren, ehe dann eine weitere Überregnung des Gebietes von Süden nach Norden hin einsetzte – auch hier letztlich mit dem Resultat einer fortgesetzten „Auffütterung“ und damit Erhöhung des Elbehochwassers.

Die intensiven Regenfälle der Niederschlagsphasen 1 und 2 (vgl. Kap. 2.2, Tab. 2.2) führten im Westen des Rheingebiets zu einem ersten regionalen Hochwasserschwerpunkt, der vor allem das Teileinzugsgebiet der Mosel betraf. Die Niederschlagsphasen 2 und 3 initiierten dann letztlich die erste Staffel des großen Junihochwassers: Den Beginn machte in der Mitte Deutschlands das Wesergebiet (und Teile des Saalegebietes). Hervorgerufen durch das sich weiter ausdehnende Niederschlagsgeschehen mit besonderer Verstärkung in den Staulagen der ost- und süddeutschen Mittelgebirge und der Alpen schlossen sich weitere Hochwasserstaffeln an. Zunehmend begünstigt durch die überregional gegebene hohe Wassersättigung der Böden setzte sich das Hochwassergeschehen bis in den Juni hinein fort, gleichermaßen unter Intensivierung und räumlicher Ausweitung. Außerordentliche Wasserstands- und Abflussextreme, teilweise unter Einstellung bisher bekannter Maximalwerte, wurden dann vor allem im Donau- und Elbegebiet registriert. Abb. 3.1 zeigt die in den Bundeswasserstraßen im Juni 2013 bei Scheiteldurchgang jeweils erreichte statistische Größenordnung. Erkennbar werden dabei die Ereignisschwerpunkte an Donau und Elbe, wo streckenweise Abflussextreme mit Wiederkehrintervallen von deutlich über einhundert Jahren auftraten.

Neben der hier vorgenommenen Dokumentation der Hochwasserabläufe im Juni 2013 einschließlich der damit verbundenen naturräumlichen und anthropogenen Prozesse und deren Einordnung hinsichtlich Umfang und Bedeutung ist es eine wichtige gewässerkundliche Aufgabe, das Geschehene gegenwarts- und zukunftsorientiert auszuwerten. Dies geschieht im konkreten Fall nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund, dass großräumige extreme Hochwasserereignisse in erheblichem Maße auch die Verkehrsinfrastruktur des Bundes beeinträchtigen.

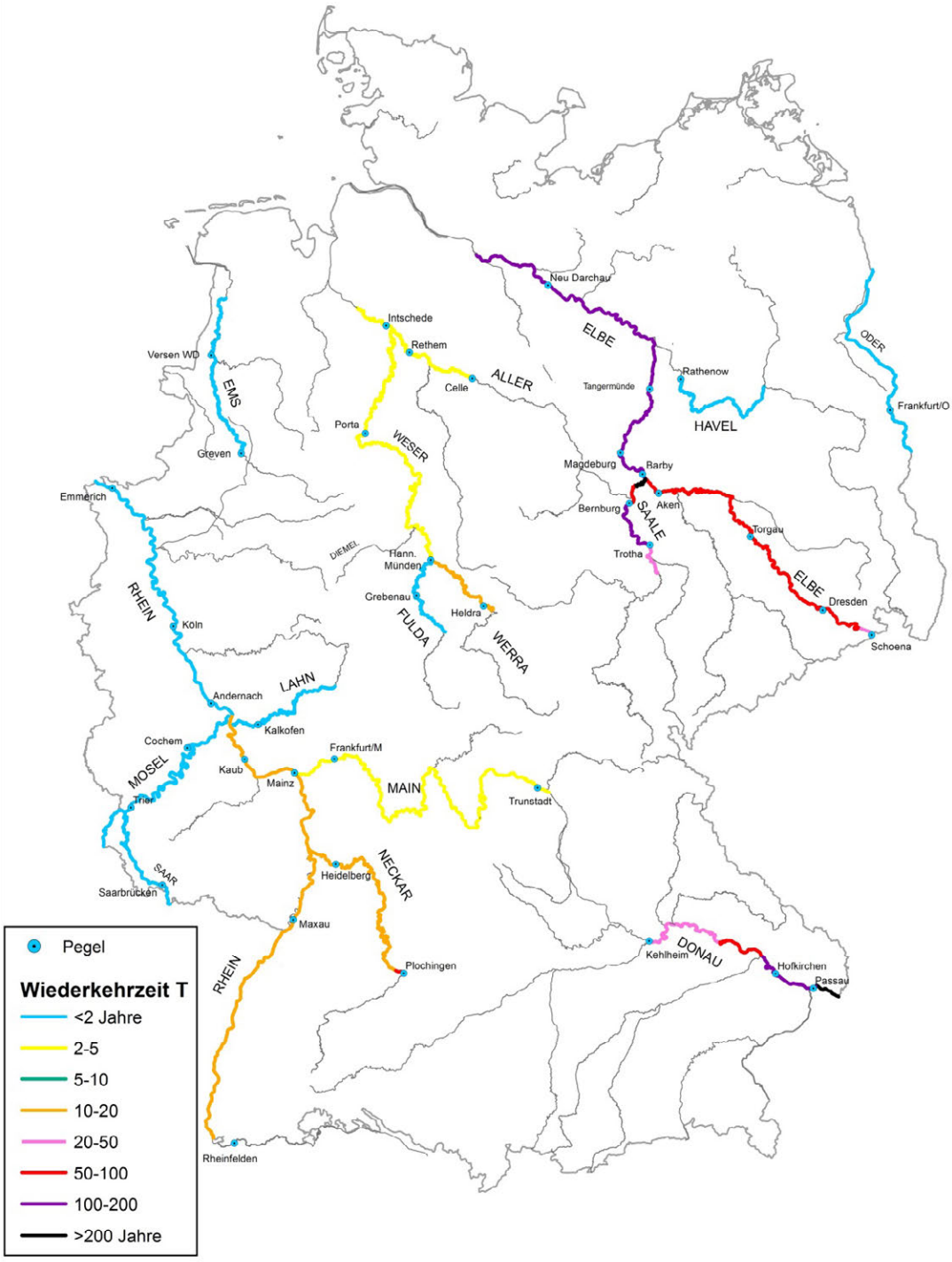


Abb. 3.1: Ausmaß des Juni-Hochwassers 2013 in den deutschen Bundeswasserstraßen anhand der jeweiligen statistischen Wiederkehrzeiten

Integriert in die gewässerkundliche Analyse der Hochwasserereignisse 2013 ist auch eine staaten- und länderübergreifende Bewertung von Abflussgeschehen und Abflussbeeinflussung. Die BfG als Oberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr

und digitale Infrastruktur (BMVI)[1] hat bereits in der Vergangenheit ihre Fließgewässermodelle des Rheins und der Elbe entsprechend eingesetzt (IKSR 2006, BfG 2006, BfG 2011a, BfG 2011b, BfG 2012). Im unmittelbaren Nachgang zum Hochwasser 2013 führte die BfG im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)[2] für die Elbe mit Hilfe des bestehenden Nachweisinstruments Szenarienberechnungen durch, um die Wirkungen von Deichbrüchen, Deichrückverlegungen, Polderflutungen und von Wasserrückhalt in Talsperren auf den Hochwasserablauf zu evaluieren (BfG 2013a). Darüber hinaus wurde das in Kooperation mit den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Schleswig-Holstein aufgebaute und betriebene 2D-Modell der unteren Mittelelbe (BfG 2013b) genutzt, um die Effekte der Deichrückverlegung Lenzen (PROMNY et al. 2014) auf den Hochwasserablauf im Juni 2013 zu analysieren. Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Rahmen der Kapitel 3.5.4 auszugsweise vorgestellt.

Modellgestützte Analysen zu großräumigen Wirkungen von Retentionsmaßnahmen am Mittel- und Niederrhein wurden ebenfalls – im Zuge der Erstellung der Berichte BfG-1793 (BfG 2013c) und BfG-1797 (BfG 2013d) – durchgeführt. Diese – auf ersten Modellergebnissen für die Oberrheinstrecke (vgl. LUBW 2013a, LUWG 2013) fußenden – Szenarienberechnungen werden im Rahmen von Kapitel 3.3.3 zusammengefasst. Für die Weser und die Donau wurden solche großräumigen Modellberechnungen von der BfG nicht vorgenommen, so dass für die beiden Gewässer (und ihre Nebenflüsse) hinsichtlich dieser Aspekte auf die Berichte der jeweiligen Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer verwiesen wird (z.B. für das Einzugsgebiet der Donau: LfU 2013).

3.2 Verlauf und Einordnung des Hochwassers im Wesergebiet

Die Weser (mit den Quellflüssen Fulda und Werra) war nach der Mosel (vgl. Kap. 3.3) die zweite Bundeswasserstraße, die bereits im Mai 2013 Hochwasser führte. Wie anhand Abb. 3.3 nachzuvollziehen, begannen die Wasserstände und Abflüsse im oberen Wesergebiet relativ zeitgleich am 26. Mai 2013 deutlich anzusteigen. In den beiden Quellflüssen bildeten sich jeweils langgestreckte Hochwasserwellen aus, die erst am 05. Juni (Fulda) bzw. 07. Juni (Werra) wieder abklangen.

Beide Quellflüsse trugen letztlich in ähnlichem Umfang zur Hochwasserwelle der Weser bei, wenngleich mit einem leichten quantitativen Übergewicht der Werra. Durch den zeitlichen Versatz ihrer Scheitelwasserstände um rund eine Woche bewirkten sie flussabwärts in der Weser die Ausbildung einer breiten Welle mit sattelähnlichem Aufbau, die mit kleineren Schwankungen vom 27.05 bis 05.06.2013 auf hohem Niveau verharrte.

Die Abflussscheitel lagen bei 408 m³/s (Werra, Pegel Letzter Heller, 04.06.2013) bzw. 320 m³/s (Fulda, Pegel Guntershausen, 30.05.2013). Für die Werra ist dies eine Größenordnung, die im vieljährigen Mittel bei Hochwassersituationen etwa alle fünf Jahre zu erwarten ist. Im Falle der Fulda war das mündungsnah erreichte Niveau ebenfalls wenig extrem und blieb noch deutlich unter dem MHQ (mittlerer Hochwasserabfluss), welcher bei 397 m³/s liegt (Bezugsperiode jeweils 1941/2010).

[1] bis Ende 2013: BMVBS - Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
[2] seit Ende 2013: BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

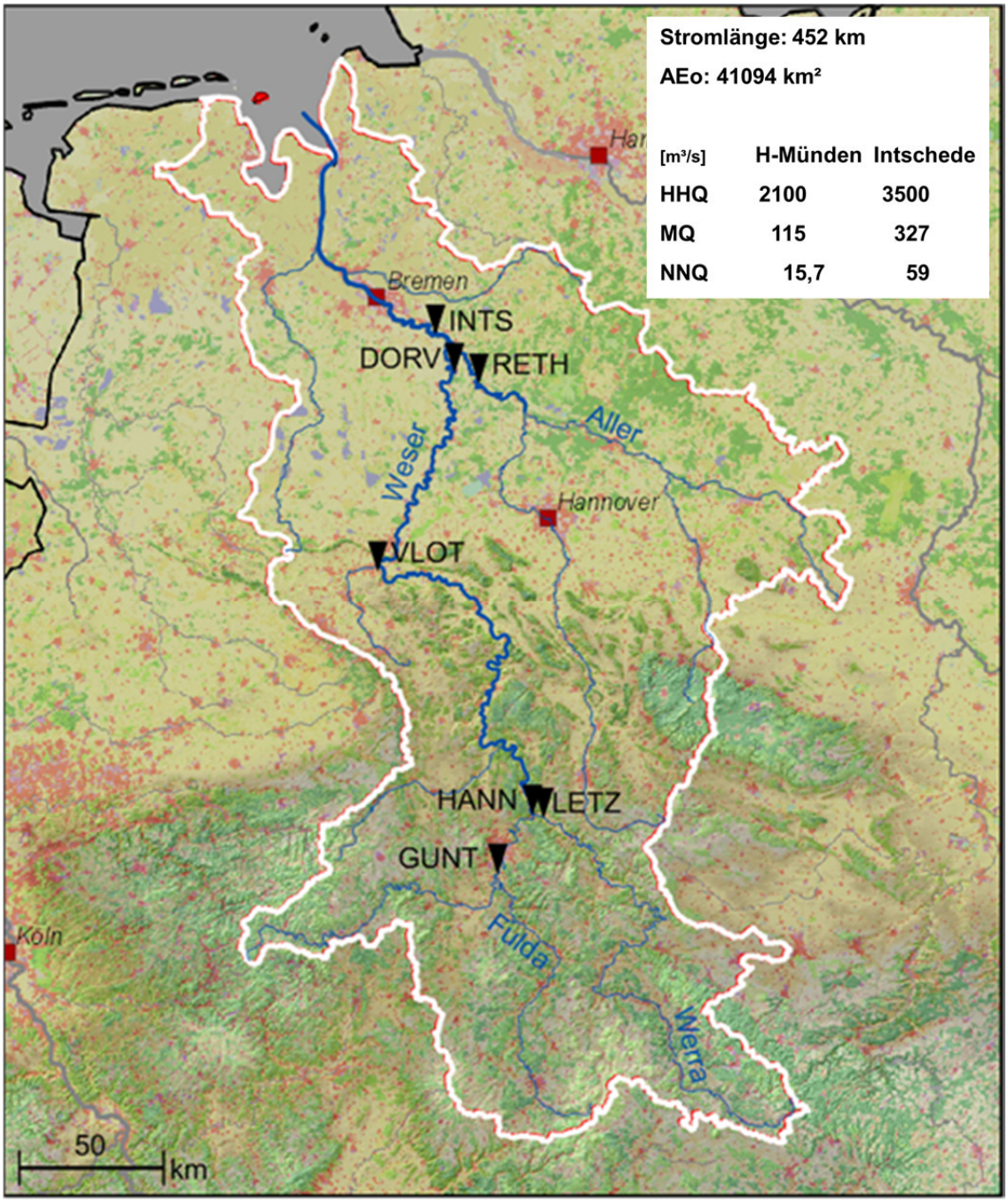


Abb. 3.2: Das Einzugsgebiet der Weser einschließlich wichtiger Pegelstandorte (Abkürzungen und Legende s. S. 224ff.)

Der Wellenablauf des anschließenden Hochwassers der Weser kann anhand der Abb. 3.4a und Abb. 3.4b bzw. den Zahlenangaben in Tab. 3.1 nachvollzogen werden. Der Vergleich zwischen den beiden Pegeln Hannoversch Münden (Oberweser) und Porta (Mittelweser) zeigt, dass der Hochwasserscheitel auf einer Fließstrecke von fast 200 km, bei gleichzeitiger Zunahme des Einzugsgebietes um ca. 54 %, nur um 74 m³/s (12 %) anwuchs. Somit veränderte (erhöhte) sich die bei Vereinigung von Fulda und Werra erreichte Scheitelhöhe im weiteren Verlauf erst bei Einmündung der Aller in substanziellem Umfang.

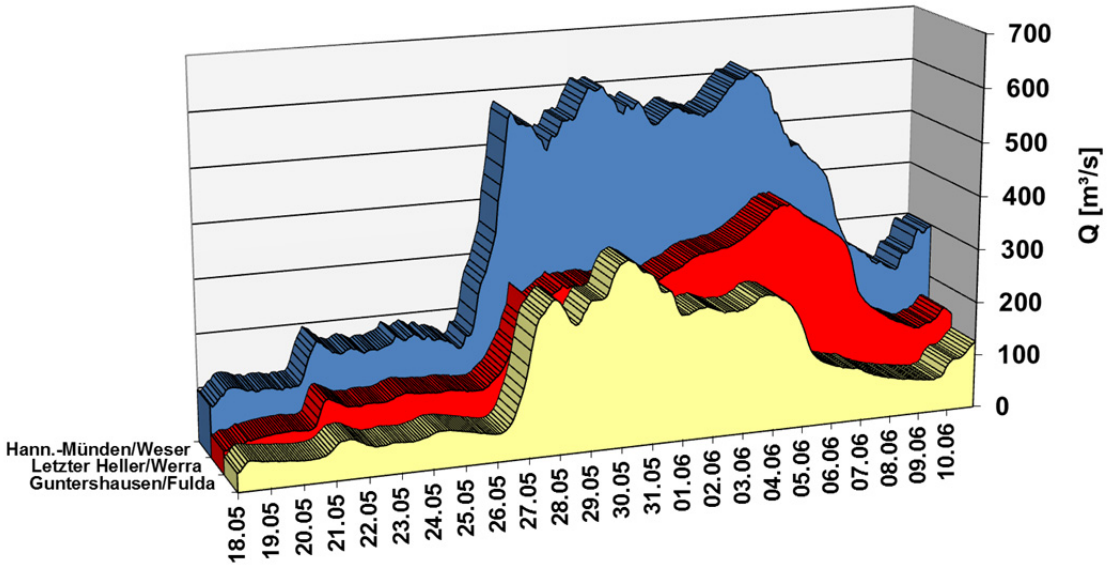


Abb. 3.3: Ablauf der Hochwasserwellen im Mai und Juni 2013 an repräsentativen Pegeln der Weser (blau) und ihren Quellflüssen Fulda (gelb) und Werra (rot)

Die Aller entwässert gemeinsam mit ihrem größten Nebenfluss, der Leine, das westliche und den größten Teil des nördlichen Harzgebietes und führte der Weser im Juni 2013 einen breiten Hochwasserscheitel zu, der in der Spitze 442 m³/s maß (Pegel Rethem, 03.06.2013). Statistisch ist ein Hochwasserabfluss auf diesem Niveau in der Aller im Mittel alle zwei Jahre zu erwarten. Diese Kontribution bewirkte einen sprunghaften Anstieg der Wasserführung der Weser; ihr Scheitelabfluss stromab der Allermündung (Pegel Intschede / 1 050 m³/s am 03. Juni) entstammte zu rund einem Drittel der Aller.

Trotzdem blieb die statistische Größenordnung des Weserscheitels durch die Abflusserhöhung unverändert. Dies wird anhand der Tab. 3.1 angesichts eines 2-jährlichen Wiederkehrintervalls sowohl ober- als auch unterhalb der Allermündung deutlich (Pegel Porta vs. Pegel Intschede). Insgesamt ist angesichts dessen das Hochwasserereignis von Mai und Juni 2013 an der Bundeswasserstraße Weser und ihren großen Nebenflüssen als hydrologisch weniger bedeutsam einzustufen. Außergewöhnliche Ereignisse sind jedoch für kleinere Nebenflüsse, besonders im Teileinzugsgebiet der Werra, zu konstatieren: Beispielsweise trugen die Hasel und die Schmalkalde wesentlich zum Hochwasser der Werra bei und verzeichneten Wiederkehrintervalle zwischen 20 und 50 Jahren.

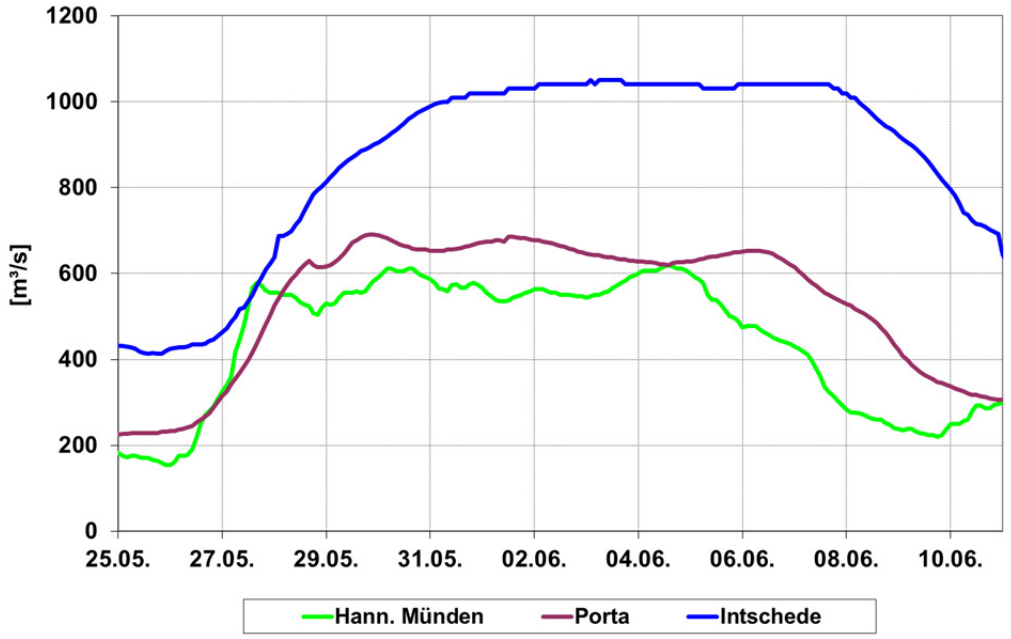


Abb. 3.4a: Hochwasser-Abflussganglinien vom Juni 2013 an den Weserpegeln Hannoversch Münden, Porta und lntschede

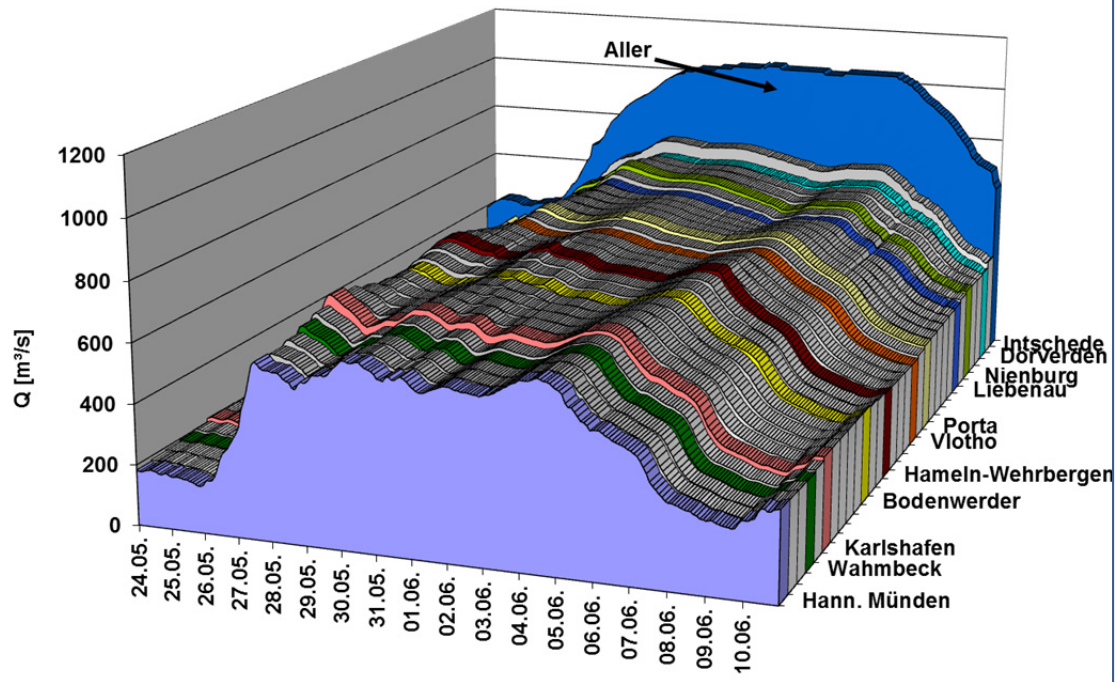


Abb. 3.4b: Ablauf der Hochwasserwelle vom Juni 2013 an der Weser

3.2.1 Retentionsmaßnahmen im Wesergebiet

Eine Hochwasserentlastung der Weser erfolgte im Zeitraum 26. Mai bis 03. Juni 2013 im Bereich Minden durch Pumpmaßnahmen in einer Größenordnung von insgesamt rund 12 Mio. m³ über den Mittellandkanal in Richtung Elbe.

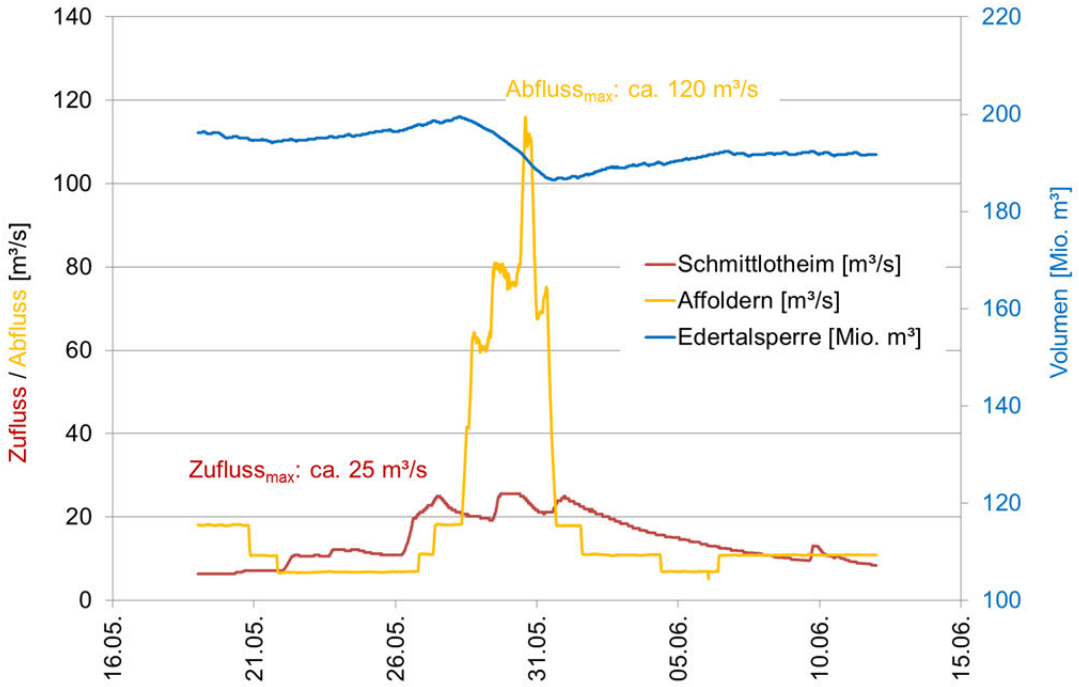


Abb. 3.5: Edertalsperre: Zufluss (Pegel Schmittlotheim, rot), Abfluss (Pegel Affoldern, gelb) und Talsperrenvolumen (blau) Ende Mai/Anfang Juni 2013 (Quelle: WSA Hann. Münden)

Innerhalb des Wesergebietes liegen im Hessischen Bergland (Eder- und Diemeltalsperre – im Zuständigkeitsbereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes) und im Thüringer Wald (Talsperre Schönbrunn, Bergsee Ratscher – im Zuständigkeitsbereich der Thüringer Fernwasserversorgung) bedeutende Stauseen. Angesichts der sich abzeichnenden meteorologischen Entwicklung hatten die Betreiber bereits vorausschauend auf die Hochwasserwelle reagiert. Alle Talsperren wurden rechtzeitig vorentlastet, um zusätzlichen Rückhalteraum für die erwarteten Zuflussmengen zu schaffen.

Beispielhaft zeigt Abb. 3.5 für den Edersee, dass das Volumen der Talsperre im Vorlauf des erwarteten Hochwassers um ca. 15 Mio. m³ reduziert wurde. Dies entspricht einer Absenkung des Beckenwasserstands um annähernd 1,5 m. Am Pegel Affoldern/Eder (unterhalb der Talsperre) wurde somit eine maximale Abgabe von 120 m³/s generiert; der Zufluss am Pegel Schmittlotheim betrug in diesem Zeitraum ca. 25 m³/s. Da Anfang Juni in der Eder selbst ein Hochwasser ausblieb, stieg der Beckenwasserstand im Anschluss an die Vorentleerung nur langsam wieder an. Ein längerfristig bedeutsamer Wasserrückhalt erfolgte (wie aus der Grafik zu ersehen ist) nicht.

Für Details zur Steuerung und zum Volumenrückhalt der Talsperre Schönbrunn und des Hochwasserrückhaltebeckens Ratscher (beide am Oberlauf der Werra) wird auf die entsprechende Dokumentation des Freistaates Thüringen verwiesen (TLUG 2013, dort S. 33-34).

3.2.2 Fazit Wesergebiet

Die Weser war der erste der großen deutschen Ströme, der von den Hochwasserereignissen des Mai und Juni 2013 erfasst wurde. Vom 26.05. an bewegte sich eine langgestreckte Hochwasserwelle mit sattelförmigem, breitem Aufbau den Fluss hinab; ein Scheitelniveau in der Größenordnung eines 2-jähr1ichen Ereignisses wurde mit kleineren Schwankungen auf der gesamten Fließstrecke rund 10 Tage lang gehalten.

Damit ist hier das Hochwasser des Jahres 2013 an dieser Bundeswasserstraße und ihren großen Nebenflüssen als von untergeordneter Bedeutung einzustufen. Die Zahlenangaben in Tab. 3.1 erlauben die Einordnung des Ereignisses im Vergleich mit anderen Hochwassersituationen der Weser.

Tab. 3.1: Das Juni-Hochwasser 2013 an wichtigen Pegeln an der Weser im Ereignisvergleich (Datenquelle: WSV)

	1981	1995	2011	2013	
	HQ [m³/s]	HQ [m³/s]	HQ [m³/s]	Scheitel-abfluss [m³/s] (Datum)	Wieder-kehr-intervall [Jahre]
Hann. Münden	854	1 060	864	620 (04.06.2013)	2
Porta	1 260	1 370	1 040	694 (29.05.2013)	2
Intschede	2 400	1 900	1 320	1 050 (03.06.2013)	2

3.3 Verlauf und Einordnung des Hochwassers im Rheingebiet

Ausgehend von seinem südlichen, größtenteils auf Schweizer Territorium befindlichen Einzugsgebiet entwickelte sich im Rhein seit dem 31. Mai 2013 eine Hochwasserwelle, die sich im Laufe des ersten Junidrittels stromab bewegte (vgl. Abb. 3.7a und Abb. 3.7b). Jeweils substanzielle Aufhöhung erfuhr die Welle insbesondere durch die Zuflüsse aus Neckar und Main. Am Oberrhein stromauf der Neckarmündung wurden die Höchststände der Hochwasserereignisse von 1988 und 1995 übertroffen, diejenigen des Hochwassers im Mai 1999 jedoch nicht erreicht. Angesichts des Ausbleibens höherer Abflussbeiträge aus den Nebengewässern unterhalb der Mainmündung veränderten sich die Größenordnungen der Scheitel-durchflüsse im Weiteren nur mehr in unbedeutender Weise.

3.3.1 Vorangehendes Hochwasser der Mosel

Im Westen des Rheingebietes hatten die starken Niederschläge des Mai im Teileinzugsgebiet der Mosel bereits früh ein erstes kleines Hochwasserereignis ausgelöst. Dieses begann mit raschem Anstieg am 20. Mai und kulminierte am Bezugspegel Cochem am 21.05.2014 bei einem Wasserstand von 614 cm ü. PNP und einem Durchfluss von 1 650 m³/s (vgl. Abb. 3.11). Es verblieb dergestalt um mehr als 400 m³/s unter dem MHQ und damit in wenig bedeutender Größenordnung. Nach wenigen Tagen verebbte die Welle; Ende Mai bereits war in der Mosel nur mehr erhöhte Mittelwasserführung zu registrieren.

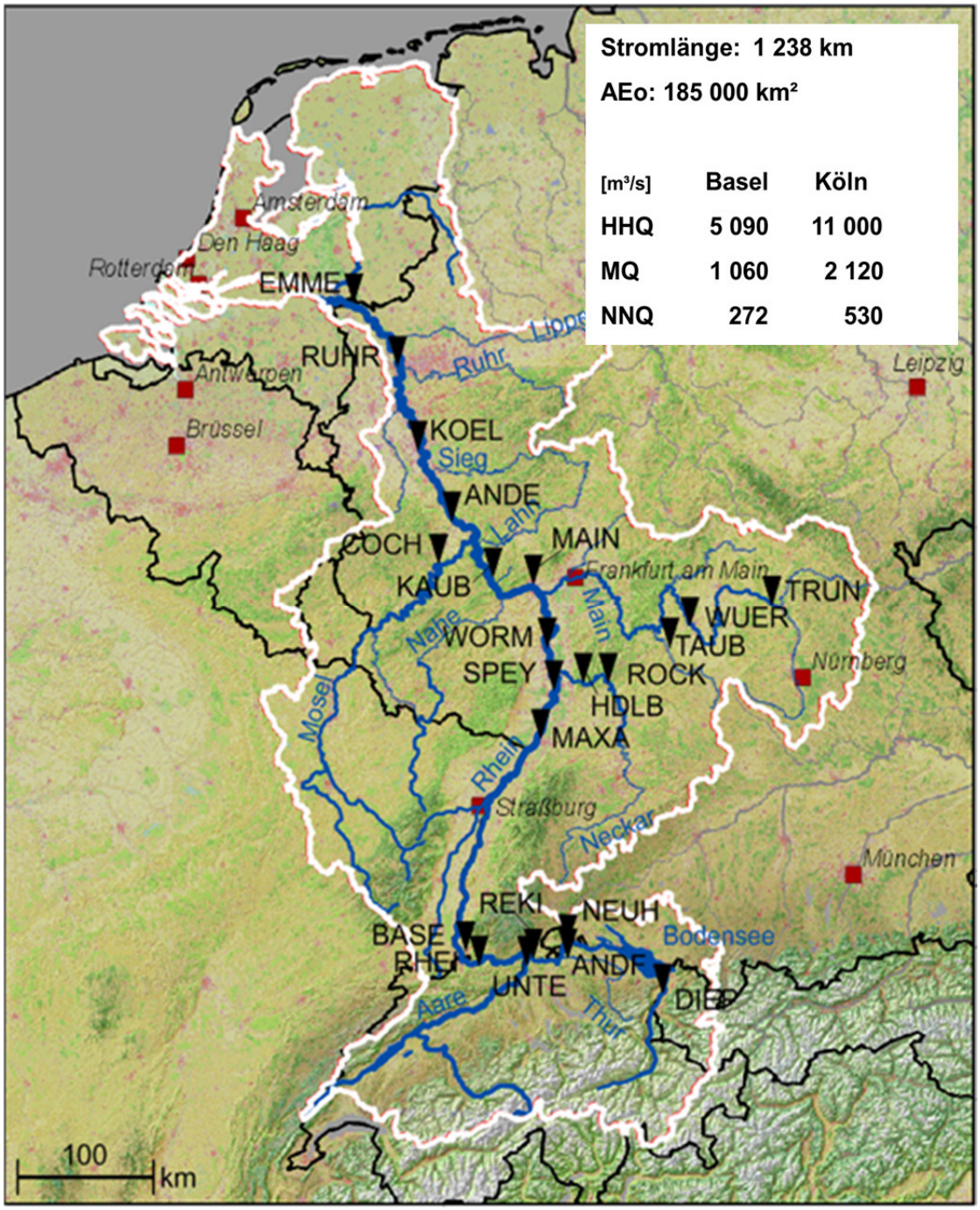


Abb. 3.6: Das Einzugsgebiet des Rheins einschließlich wichtiger Pegelstandorte (Abkürzungen und Legende s. S. 224ff.)

3.3.2 Hochwasserverlauf im südlichen Rheingebiet oberhalb von Basel

In den alpinen und voralpinen Herkunftsgebieten des Rheins und einiger seiner wichtigen Nebenflüsse waren intensive Niederschläge, nur geringfügig im Verein mit Schneeschmelze, hochwasserauslösend. Gemäß MeteoSchweiz fielen besonders ergiebige Niederschläge am zentralen und östlichen Alpennordhang. Hier kam es in den 72 Stunden vom 31. Mai bis 02. Juni 2013 zu Niederschlagssummen von 100-180 mm, in einigen Teilregionen (Schwyzer Alpen, Appenzell) sogar über 200 mm (BAFU 2014).

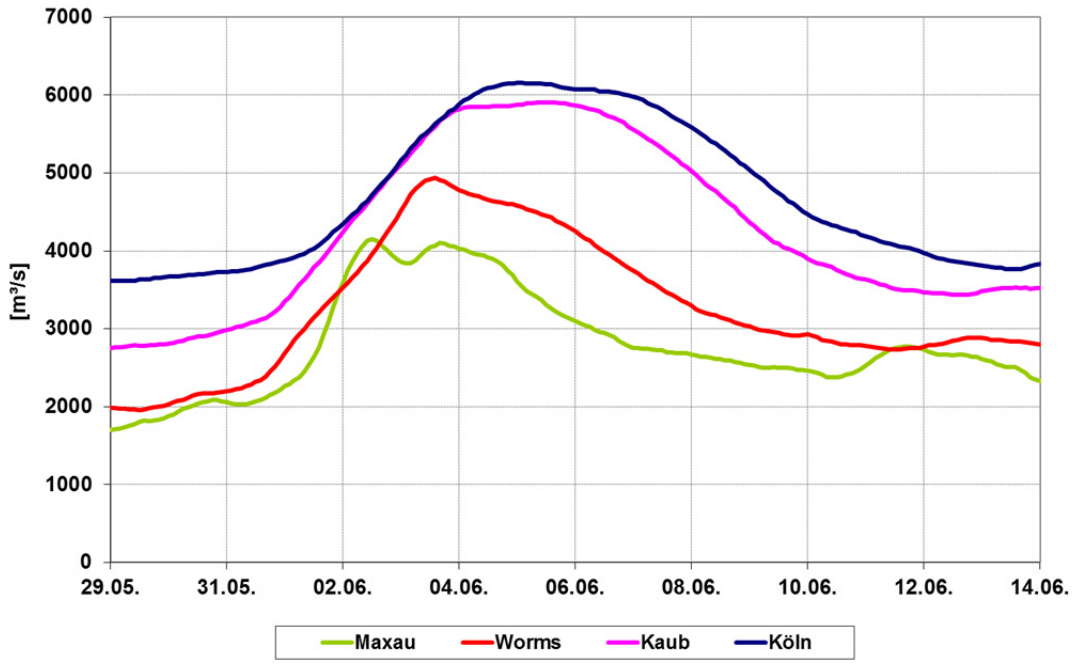


Abb. 3.7a: Hochwasser-Abflussganglinien vom Juni 2013 an den Rheinpegeln Maxau, Worms, Kaub und Köln

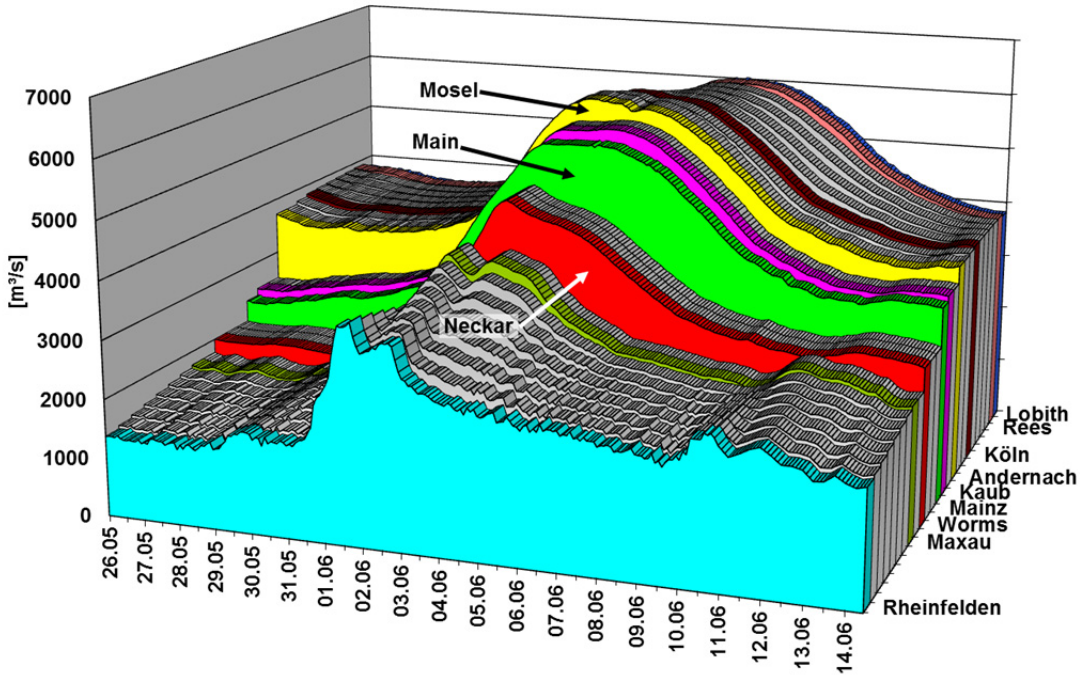


Abb. 3.7b: Ablauf der Hochwasserwelle des Rheins vom Juni 2013

Die Reaktion in den Oberflächengewässern waren rasch ansteigende Pegelstände. Tab. 3.2 gibt für wichtige Pegel im südlichen Rheineinzugsgebiet einen Überblick über Scheitelabflüsse, Eintrittszeitpunkte und ihre statistische Einordnung.

Tab. 3.2: Das Juni-Hochwasser 2013 an wichtigen Pegeln im alpinen und voralpinen Rheingebiet (Quelle: BAFU o.J., verändert)

Gewässer	Pegel	Scheitelwerte		Wiederkehr-intervall [Jahre] (Bezugs-periode)
		(Datum)	Abfluss [m³/s]	
Alpenrhein	**Diepoldsau**	(02.06.2013)	1 130	< MHQ
Hochrhein	**Neuhausen**	(04.06.2013)	804	5-10 (1959/2012)
Thur	**Andelfingen**	(04.06.2013)	992	10-30 (1904/2012)
Hochrhein	**Rekingen**	(02.06.2013)	1 720	30-50 (1904/2012)
Aare	**Untersiggenthal**	(01.06.2013)	2 010	5-10 (1935/2012)
Oberrhein	**Basel**	(01.06.2013)	3 880	10-30 (1891/2012)

Insgesamt ist das Ereignis im ostschweizerischen Raum als extremer einzustufen als im Mittelland; außerhalb des Rheingebietes war die Schweiz im Juni 2013 nahezu hochwasserfrei (vgl. Abb. 3.8).

Abb. 3.8: Hochwassersituation an den Fließgewässern und ihren Pegeln in der Schweiz vom 01. bis 03. Juni 2013 (Quelle: BAFU 2014)

Retentionsmaßnahmen oberhalb von Basel im Mai und Juni 2013

Durch gesteuerte Retention, hier in Gestalt des gezielten Einsatzes der schweizerischen Jurarandseen (Bieler-, Neuenburger- und Murtensee), konnte eine Minderung der Aare-Welle erreicht werden. Dies erfolgte gemäß Hochwasserzentralen Rhein (2013) per Vorabsenkung

ab dem 28.05.2013 im Rahmen der sogenannten „Prognoseregulierung“ der drei Seen. Diese wurde im Jahr 2009 eingeführt und kam im Vorlauf des Juni-Hochwassers 2013 erstmals zur Anwendung (AWA 2014). Dabei ist es bei Sommerhochwassern beispielsweise möglich, den Wasserstand des Bielersees um bis zu 40 cm abzusenken (AWA 2012). Ein Anstieg der drei Seen (die über Kanäle verbunden sind und deshalb als hydraulische Einheit betrachtet werden können) um einen Meter kann ein Speichervolumen von 280 Mio. m^3 (AWA 2012) schaffen. Beim vorliegenden Ereignis wurden insgesamt über 75 Mio. m^3 in den Jurarandseen zwischengespeichert (Hochwasserzentralen Rhein 2013).

Im Anschluss an die Vorabsenkung erfolgte am 01.06.2013 eine gesteuerte Hochwasserrückhaltung in den Seen, wodurch der Hochwasserabfluss der Aare flussabwärts um rund 300-350 m^3/s gedrosselt wurde (LUBW 2013a). Diese Seensteuerung in der Schweiz ist auch für den Hochwasserablauf am Oberrhein bedeutsam, weil dadurch Ausmaß und zeitlicher Eintritt des Aare-Scheitels, damit die Konstellation des Zusammentreffens mit dem Hochrhein und so letztlich die Dimension der in Richtung Basel ziehenden Hochwasserwelle beeinflusst werden kann. Eine detaillierte Analyse der Wirkungen der Schweizer Retentionsmaßnahmen auf den Hochwasserablauf des Jahres 2013 am Rhein in Deutschland erfolgte bislang nicht.

3.3.3 Verlauf des Hochwassers im deutschen Rheingebiet

Der weitere Ablauf des Hochwassers im Oberrhein verlief in der unveränderten Größenordnung eines Wiederkehrintervalls von 10-20 Jahren. Durch die zahlreichen Schwarzwald- und Vogesenflüsse, die zwar ebenfalls Hochwasser führten, aber von ihrem Volumen her den großen Vorfluter nicht grundlegend beeinflussen konnten, erfolgten keine deutlichen Abflusszunahmen. So gewann die Welle auf der rund 200 km langen Strecke (entsprechend einer Einzugsgebietsvergrößerung von 14 272 km^2) zwischen den Pegeln Basel und Maxau nur 300 m^3/s an Umfang hinzu (vgl. Tab. 3.2, Tab. 3.3, Abb. 3.7b); allerdings ist hier auch der Einfluss der eingeleiteten Retentionsmaßnahmen oberstrom der Illmündung einzukalkulieren, durch welche der Scheitelabfluss des Rheins in erheblichem Umfang auf die gemessenen Werte verringert wurde (s.u.). Ungeachtet dessen erreichte das Hochwasser am Pegel Maxau am 02.06.2013 mit 870 cm ü.PNP den zweithöchsten hier seit Beginn der Auswertung im Jahre 1880 gemessenen Wasserstand – der Höchstwert mit 884 cm ü.PNP stammt vom Mai 1999.

Erst der Neckar bewirkte wieder ein sprunghaftes Anwachsen des Rheinabflusses (vgl. Abb. 3.7b), denn er führte dem Strom eine eigene Hochwasserwelle zu, die im Scheitel am 02.06.2013 mündungsnah beinahe 2000 m^3/s erreichte (s.u.). Das Eintreffen des Neckarscheitels erfolgte jedoch zeitversetzt zur Hochwasserwelle des Rheins. Dies geschah genau zu dem Zeitpunkt, da bei der Rheinwelle die durch den oberstromigen Poldereinsatz bedingten Kappungseffekte wirksam wurden (vgl. Abb. 3.9). Dadurch verblieb das Rheinhochwasser stromab der Neckarmündung weiterhin in der moderaten Größenordnung eines Wiederkehrintervalls von 10-20 Jahren (4 950 m^3/s am 03.06.2013 am Pegel Worms).

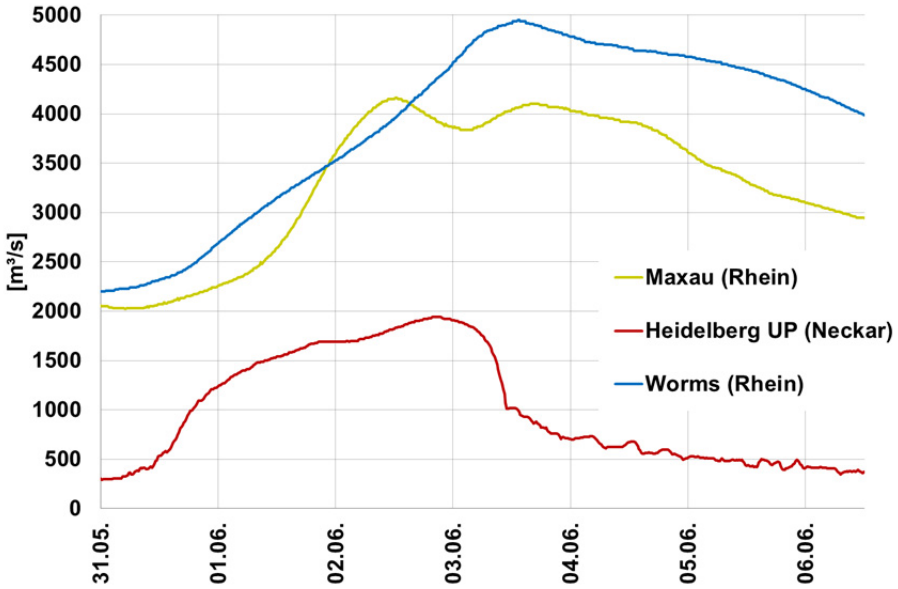


Abb. 3.9: Verlauf der Hochwasserwellen im Juni 2013 im Rheinabschnitt zwischen Maxau und Worms mit der Neckarmündıng

Tab. 3.3: Scheitelwerte beim Juni-Hochwasser 2013 an ausgewählten Pegeln im deutschen Rheineinzugsgebiet (Quelle: Hochwasserzentralen Rhein 2013, verändert und aktualisiert)

Gewässer	Pegel	Scheitelwerte		Wiederkehr-intervall [Jahre] *
		Wasserstand (Datum)	Abfluss [m³/s]	
Oberrhein	**Maxau**	870 cm (02.06.2013)	4 180	10-20
Oberrhein	**Speyer**	840 cm (04.06.2013)	4 190	10-20
Neckar	**Heidelberg UP**	531 cm (02.06.2013)	1 950	10-20
Oberrhein	**Worms**	708 cm (03.06.2013)	4 950	10-20
Main	**Raunheim**	415 cm (03.06.2013)	1 260	5
Oberrhein	**Mainz**	682 cm (05.06.2013)	5 720	10-20
Mittelrhein	**Kaub**	719 cm (05.06.2013)	5 910	10-20
Mittelrhein	**Andernach**	723 cm (04.06.2013)	6 260	~ MHQ
Niederrhein	**Köln**	766 cm (04.06.2013)	6 170	< MHQ
Niederrhein	**Duisburg Ruhrort**	854 cm (05.06.2013)	6 220	~ MHQ
Niederrhein	**Emmerich**	691 cm (06.06.2013)	6 050	< MHQ

* HQ(T): Bezugsperiode 1901/1999, HQ auf den Ausbauzustand 1977 homogenisiert

Der einmündende Main führte anschließend zu einer prägnanten Überformung der Rheinwelle, weil die langgestreckte Hochwasserwelle dieses bedeutenden Nebenflusses zweigipfelig ausgeprägt war (vgl. Abb. 3.11). Deren erstes Maximum erreichte am 03. Juni 2013 mit einem Spitzenabfluss von 1 260 m³/s den Vorfluter; der drei Tage später (am 06. Juni) eintreffende zweite Scheitel blieb nur knapp darunter. Beide Abflussmaxima des Mains umschlossen in ihrem zeitlichen Eintreten den Scheitel des Rheins und sorgten dort mit ihren Überlagerungen für eine sattelförmige Verbreiterung des Hochwasserscheitels, der am Pegel Mainz somit nahezu zwei volle Tage auf einem Niveau von rund 5 700 m³/s verharrte (Wiederkehrintervall 10-20 Jahre).

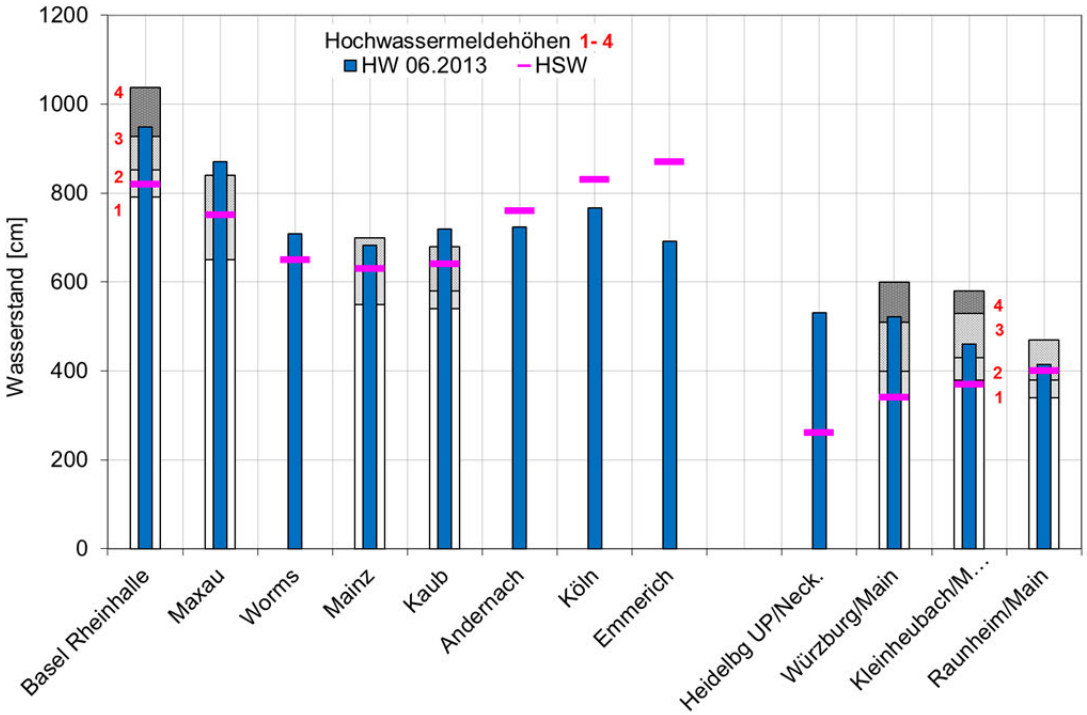


Abb. 3.10: Überschreitung maßgeblicher Wasserstandsmarken (Hochwassermeldestufen[3] und HSW (höchster schiffbarer Wasserstand)) an wichtigen Pegel von Rhein, Neckar und Main im Juni 2013

Während die Rheinwelle den oberen Mittelrhein bezüglich ihrer Jährlichkeit in nahezu unveränderter Größenordnung durchströmte (vgl. Tab. 3.3, Pegel Kaub), änderte sich dieses nach Passage von Lahn- und Moselmündung grundlegend. Beide Nebenflüsse trugen nur in unbedeutender Weise zum Abflussvolumen des Hochwassers bei (Lahn: Scheitelkontribution ca. 70 m³/s, Mosel: Scheitelkontribution rd. 550 m³/s). Dies hatte zur Folge, dass im Rhein zwar ein weiter erhöhter Abfluss zu Tale floss, dabei aber hochwasserstatistisch ab dem Pegel Andernach nur mehr ein unbedeutendes Ereignis zu registrieren war, das im Scheitel nicht einmal MHQ erreichte. Dies änderte sich auch im weiteren Verlauf des Niederrheins nicht mehr in nennenswerter Weise (Tab. 3.3). Auch Abb. 3.7b belegt bezüglich der Überschreitung wichtiger Schwellenwerte (Hochwassermeldestufen der Bundesländer und HSW

[3] Hinweis: Hochwassermeldestufen werden durch die hier zuständigen Behörden der Schweiz und der Bundesländer nicht an jedem der in der Grafik berücksichtigten Pegel ausgewiesen, zudem unterscheidet Rheinland-Pfalz lediglich 3 Stufen.

der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes) die grundsätzliche Zweiteilung der Hochwasserbetroffenheit am Rhein und seinen Nebenflüssen in das stark beaufschlagte Teilgebiet südlich von Lahn und Mosel sowie das kaum tangierte Teilgebiet nördlich davon.

Die Situation in den großen deutschen Nebenflüssen des Rheins

Die unmittelbaren Auswirkungen der Beiträge der einmündenden Nebenflüsse auf das Rheinhochwasser wurden bereits erläutert. Abb. 3.11 zeigt die Hochwasser-Abflussganglinien in den mündungsnahen Abschnitten von Neckar, Main und Mosel.

Das Kopfeinzugsgebiet des **Neckar**s zählte im Juni 2013 zu den am stärksten von Hochwasser betroffenen Regionen in Deutschland. Dies betraf insbesondere die Teileinzugsgebiete der von der Schwäbischen Alb herabströmenden Fließgewässer, wo teils 100-jährliche Abflussspitzen registriert wurden (z.B. Eyach, Starzel). Folgerichtig entwickelte sich im oberen Neckar am 02. Juni ein rund 50-jährliches Hochwasser (z.B. Pegel Plochingen: 1 020 m³/s am 02.06.2013). Angesichts geringerer Zuflüsse in seinem Mittel- und Unterlauf verringerte sich die Welle des Neckar bis zur seiner Mündung auf das Wiederkehrintervall 10-20 Jahre (Pegel Heidelberg UP: 1950 m³/s am 02.06.2013).

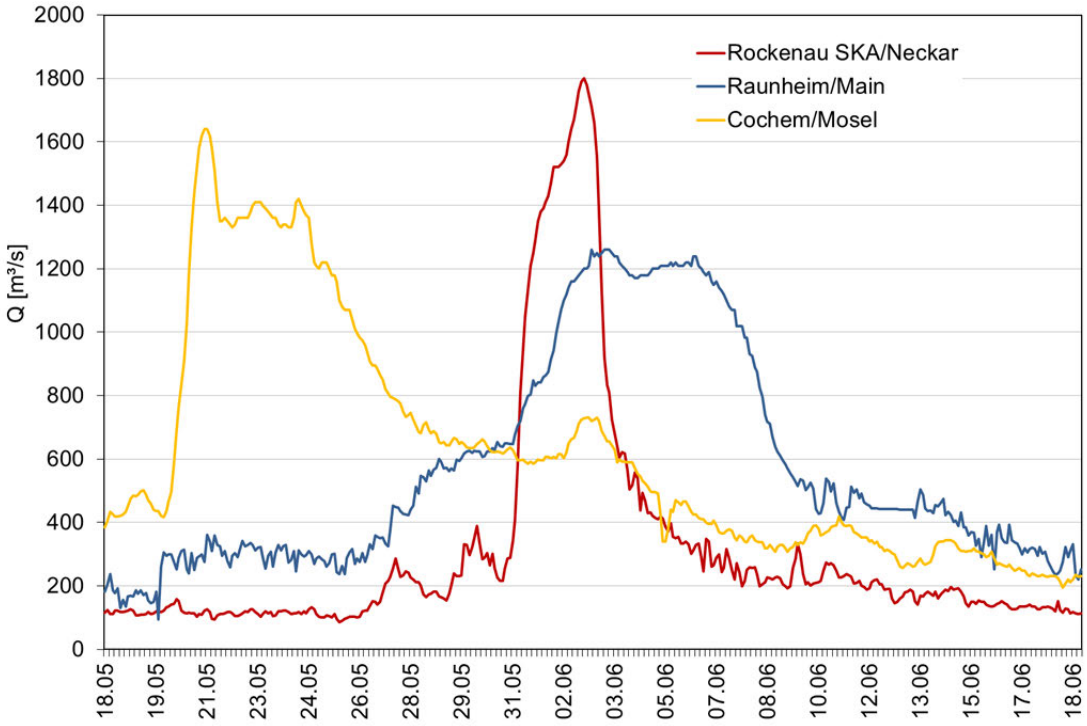


Abb. 3.11: Ablauf der Hochwasserwellen im Mai und Juni 2013 in den großen Rhein-Nebenflüssen Neckar, Main und Mosel

Im **Maingebiet** hatten die ergiebigen Niederschläge bereits seit dem 27. Mai deutlich erhöhte Pegelstände eingeleitet. Ab dem 31. Mai stiegen diese angesichts anhaltender intensiver Regenfälle in allmählicher, aber nachhaltiger Weise an. Vor dem Hintergrund teilweise moderat erhöhter, teilweise aber auch sehr extremer Wasserführung in einigen Nebenflüssen (vor allem im Regnitzgebiet, z.B. Aisch und Zenn, beide streckenweise mit Wiederkehrintervall 20-50 Jahre) bildete sich vom oberen und mittleren Main her eine Hochwasserwelle

in Größenordnung eines 2-5-jährlichen Wiederkehrintervalls aus (z.B. Pegel Trunstadt: 800 m³/s am 03.06. / Pegel Würzburg: 900 m³/s am 05.06.). Dieser voraus lief im unteren Mainabschnitt eine erste, steiler ansteigende Welle, die gespeist wurde von den Mainzubringern aus Spessart, Tauberland und Odenwald. Dabei lag hier mengenmäßig allen voran die Tauber (Pegel Tauberbischofsheim: 220 m³/s am 01.06.2013, d.h. Wiederkehrintervall 10-20a).

Als Resultat des versetzten Scheiteleintreffens bildete sich im Untermain der bereits besprochene breite, zweigipfelige Hochwasserscheitel aus, der am Pegel Raunheim am 03.06. sein erstes, höheres Maximum hatte (1 260 m³/s am 03.06.2013) und dem ein Wiederkehrintervall von 5 Jahren zuzuordnen ist. Das rund 72 Stunden später eintreffende Sekundärmaximum dieser sattelförmigen Hochwasserwelle lag an diesem Pegel nur geringfügig darunter (1 240 m³/s am 06.06.2013).

Wie in Kap. 3.3.1 beschrieben lief das Hochwasser der Mosel den Hauptereignissen im Rhein um rund zwei Wochen voraus (vgl. Abb. 3.11) und erreichte am Pegel Cochem knapp HQ_1, verblieb aber deutlich unter dem vieljährigen MHQ (1931/2012), das mit 2090 m³/s angegeben wird.

Retentionsmaßnahmen an der deutschen Rheinstrecke

Durch den Anstieg der Abflüsse am Oberrhein zwischen Basel und Bingen wurden Kriterien für den Einsatz von gesteuerten Rückhaltemaßnahmen überschritten. Damit mussten die in Tab. 3.4 aufgelisteten Retentionsmaßnahmen in Frankreich, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz eingesetzt werden, woraus ein effektives Gesamtvolumen von 53 Mio. m³ (LUBW 2013a, LUWG 2013) resultierte. Darüber hinaus wurde auf der Flussstrecke zwischen Neckarmündung und Bingen ein Teil der dortigen Sommerpolder ungesteuert überflutet, die insgesamt einen zusätzlichen Rückhalteraum von ca. 70 Mio. m³ bereitstellen können (BfG 2013d).

Tab. 3.4: Volumina der Retentionsmaßnahmen am Oberrhein (Quellen: LUBW 2013a, LUWG 2013)

Maßnahme und Ort	Wirkweise	Betreiber	eingesetztes Volumen [Mio. m³]
Polder Erstein	gesteuert	Frankreich	7,8
Stauhaltung Straßburg	gesteuert	Frankreich	5,0
Kulturwehr Kehl	gesteuert	Baden-Württemberg	23,0
Polder Altenheim 1 / 2	gesteuert	Baden-Württemberg	9,0
Sommerpolder Daxlander Au	ungesteuert	Rheinland-Pfalz	4,0
Deichrückverlegungen Mittlerer Busch und Worms Bürgerweide	ungesteuert	Rheinland-Pfalz	2,0
Polder Ingelheim	gesteuert	Rheinland-Pfalz	2,5

Grundsätzlich sind die Wirkungen von gesteuerten Retentionsmaßnahmen je nach betrachtetem Standort unterschiedlich. Einerseits ist die Wirkung am direkt unterhalb gelegenen Pegel in der Regel am stärksten, andererseits sind die Fließverhältnisse und insbesondere die Breite des durchflossenen Querschnitts ebenfalls maßgebend für die (durch die Abflussminderung hervorgerufene) Wasserstandsreduktion. Soweit Maßnahmen gesteuert eingesetzt werden, erfolgt dieser Einsatz stets auf ein definiertes Schutzziel und eine definierte Rheinstrecke unterhalb. Darüber hinausgehend erzielte Scheitelminderungen sind als „Mitnahmeeffekte“ zu bewerten. Dieser Zusammenhang gilt auch hinsichtlich der Retentionsmaßnahmen am Oberrhein und ihrer Auswirkungen auf den Niederrhein (BfG 2013d).

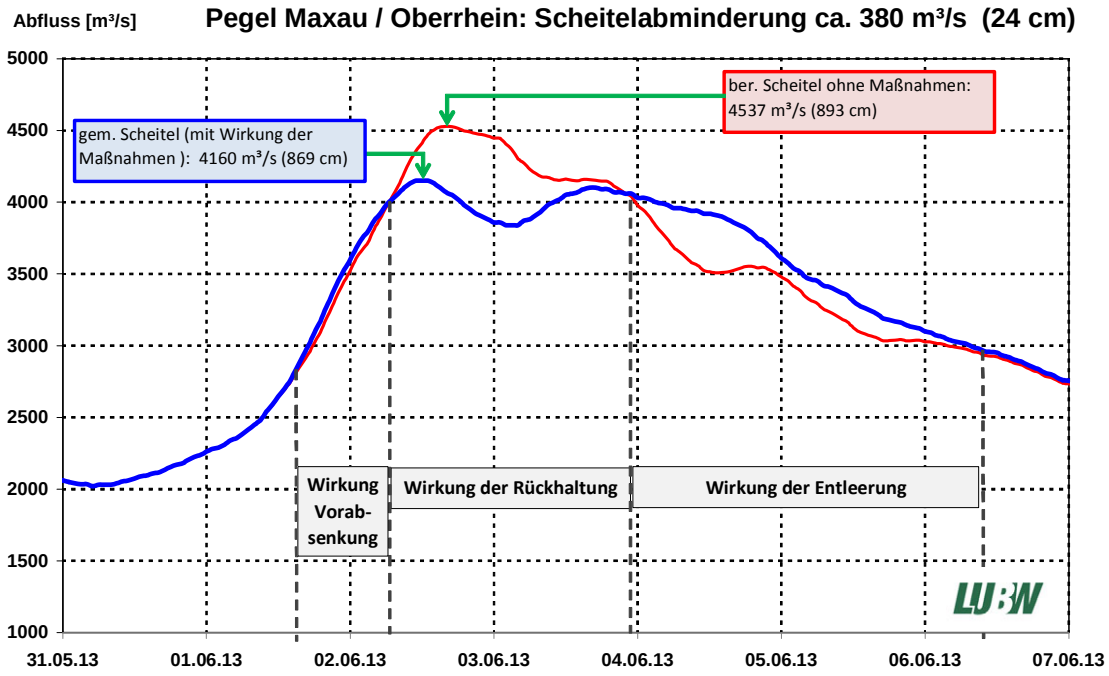


Abb. 3.12: Wirkung der Polderflutungen am Oberrhein auf den Abfluss am Pegel Maxau (blau: Messdaten, rot: Modellberechnung der LUBW, ohne Maßnahmen/Quelle: Hochwasserzentralen Rhein 2013)

Während die Wirkungen der Sommerpolder und Deichrückverlegungen auf das Hochwasser vom Juni 2013 nicht explizit ausgewertet wurden und diese deshalb nur aus bereits existierenden Studien (Hochwasserstudiengruppe 1993) abgeschätzt werden können – an den Pegeln Kaub bzw. Andernach würde der Hochwasserscheitel vom Sommer 1983 (HQ_{15} bzw. HQ_{20}) demnach um etwa 150 m³/s höher auflaufen, wenn die Sommerdeiche zwischen Worms und Bingen aufgegeben würden – weisen modellgestützte Berechnungen der LUBW die Wirkungen der gesteuerten Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein oberhalb von Maxau nach. Die Scheitel abmindernde Wirkung der Retentionsmaßnahmen lag nach LUBW (s. Hochwasserzentralen Rhein 2013) an den Pegeln Maxau und Speyer (oberhalb der Neckarmündung) bei 24 cm (377 m³/s) bzw. 29 cm (303 m³/s), am Pegel Worms unterhalb der Neckarmündung bei 15 cm (190 m³/s) (siehe auch Tab. 3.5). Beispielhaft veranschaulicht Abb. 3.12 die scheitelmindernde Wirkung der Rückhaltemaßnahmen am Pegel Maxau.

Tab. 3.5: Großräumige Reduktionen der Hochwasserscheitel durch die am Oberrhein eingesetzten Retentionsmaßnahmen mit Vergleichsrechnungen (Quellen: Hochwasserzentralen Rhein (2013) und Berechnungen der BfG mit konsolidierten Grundlagendaten des Jahres 2014)

Pegel	**Rhein-km**	**Reduktion des Hochwasser-Scheitelwasser-stands [cm]**		**Reduktion des HW-Scheitel-durch-flusses [m³/s]**	**Reduktion der Wieder-kehrintervalle HQ(T) [Jahre]**	
					ohne Maßnah-men	**mit Maß-nahmen**
		LUBW / LUWG	**BfG**	**LUBW/LUWG**	**(LUBW/ LUWG)**	**(LUBW/ LUWG)**
Maxau	**362,3**	24	-	377	20	10
Speyer	**400,6**	29	-	303	15	10
Worms	**443,4**	15	12	190	20	15
Mainz	**498,3**	11	9	156	15	10
Kaub	**546,2**	13	18	160	15	10
Koblenz	**591,5**	10	13	-		
Andernach	**613,8**	9	14	110		
Köln	**688,0**	11	11	130		
Düsseldorf	**744,2**		11	-		
Ruhrort	**780,8**		12	-		
Rees	**837,4**		9	-		
Emmerich	**851,9**		9	-		

Großräumige Modellsimulationen der BfG vom Sommer 2013, die durch Berechnungen auf Grundlage von konsolidierten Daten im Jahr 2014 gestützt werden, bestätigen die o.g. Ergebnisse der LUBW für den Abschnitt des frei fließenden Oberrheins unterhalb von Iffezheim. Darüber hinaus belegen sie eine erkennbare Wirkung der am Oberrhein eingesetzten Rückhaltemaßnahmen bis in den Mittel- und Niederrhein (vgl. Tab. 3.5). Begünstigt wurde dies beim Hochwasserereignis vom Juni 2013 durch den vergleichsweise seltenen Fall, dass die unterhalb des Mains in den Rhein mündenden Nebenflüsse (u.a. Lahn und Mosel) kaum Einfluss auf den Hochwasserablauf des Rheins selbst – insbesondere auch nicht im Scheitelbereich – besaßen[4]. Die Modellberechnungen zeigen Absenkungen des Scheitelwasserstands von ca. 10 cm an den Pegeln auf der Rheinstrecke zwischen Koblenz und Ruhrort; die Effektivität der Maßnahmen schwächte sich im weiteren Verlauf sukzessive in Fließrichtung ab.

[4] Bei höheren Durchflüssen am Niederrhein bzw. einer höheren Kontribution durch die Mosel können die Wirkungen von Maßnahmen am Oberrhein weniger effektiv sein.

Abb. 3.13 belegt in grafischer Aufbereitung eines modellgestützten Vergleichs mit Hilfe des hydraulischen Rhein-Modells der BfG (SOBEK-River) die Wirksamkeit der Retentionsmaßnahmen am Oberrhein auf den Hochwasserablauf bis in den Niederrhein am Beispiel der berechneten Wasserstandsganglinien des Pegels Düsseldorf.

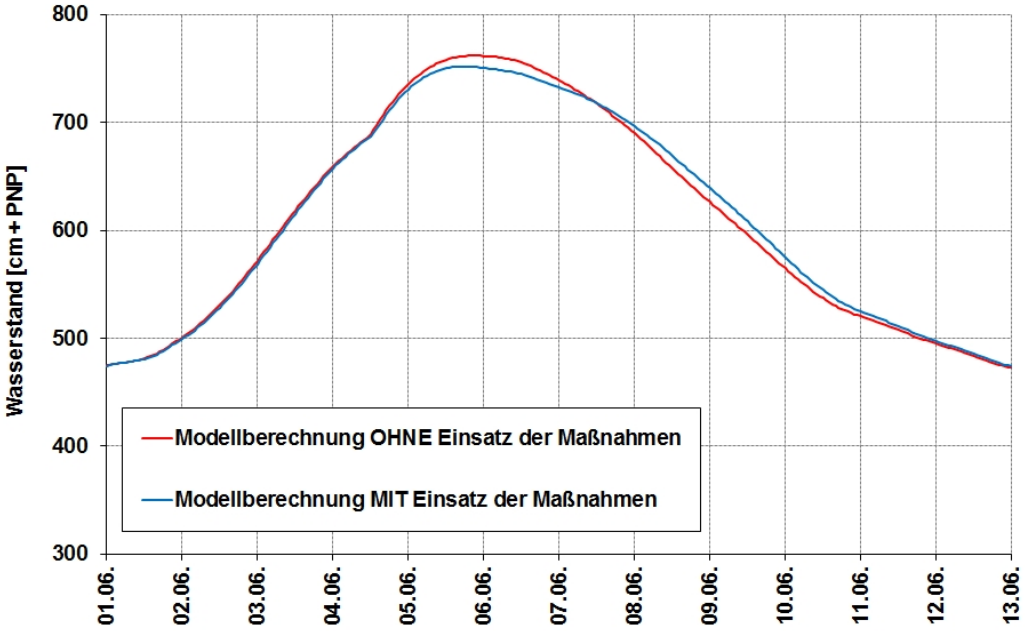


Abb. 3.13: Fernwirkung der Retentionsmaßnahmen am Oberrhein auf den Niederrhein am Beispielpegel Düsseldorf (modellgestützter Vergleich)

3.3.4 Fazit Rheingebiet

Tab. 3.6: Das Juni-Hochwasser 2013 an wichtigen Pegeln am Rhein im Ereignisvergleich (Datenquelle: WSV)

	1988	1995	1999 (Mai)	2011	2013	
	HQ [m³/s]	HQ [m³/s]	HQ [m³/s]	HQ [m³/s]	Scheitel-Abfluss [m³/s] (Datum)	Wieder-kehr-Intervall [Jahre]
Rheinfelden	3 160	3 470	4 550	1 895	3 820 (01.06.2013)	10-20
Maxau	4 090	4 080	4 440	2 980	4160 (02.06.2013)	10-20
Worms	5 270	4 250	4 240	3 600	4 950 (03.06.2013	10-20
Kaub	7 200	6 550	4 450	5 570	5 910 (05.06.2013	10-20
Köln	9 580	10 800	4 500	7 780	6 160 (05.06.2013)	2

Entsprechend der raumzeitlichen Niederschlagsverteilung im Einzugsgebiet wurden besonders extreme Hochwassersituationen in den baden-württembergischen Bereichen des Rheingebietes erreicht, insbesondere im oberen Neckargebiet sowie in den Bodenseezuflüssen. Hier wurden Scheiteldurchflüsse mit Jährlichkeiten um oder sogar über l00 Jahre beobachtet. Weitere Schwerpunkte des Hochwassergeschehens lagen im oberen Maingebiet.

Im Rheinstrom selbst lag die höchste Durchflusswiederkehr bei 30-50 Jahren im Hochrhein zwischen den Einmündungen von Thur und Aare. Der Einsatz von Retentionsmaßnahmen in Frankreich, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz führte zu einer Abminderung der Rheinwasserstände von 15-30 cm im mittleren Oberrhein und noch knapp 10 cm im Niederrhein. Damit einher ging eine Verringerung der statistischen Größenordnung der Scheitelabflüsse, die sich zwischen Aare- und Moselmündung in einem Wiederkehrintervall von 10-20 Jahren bewegten.

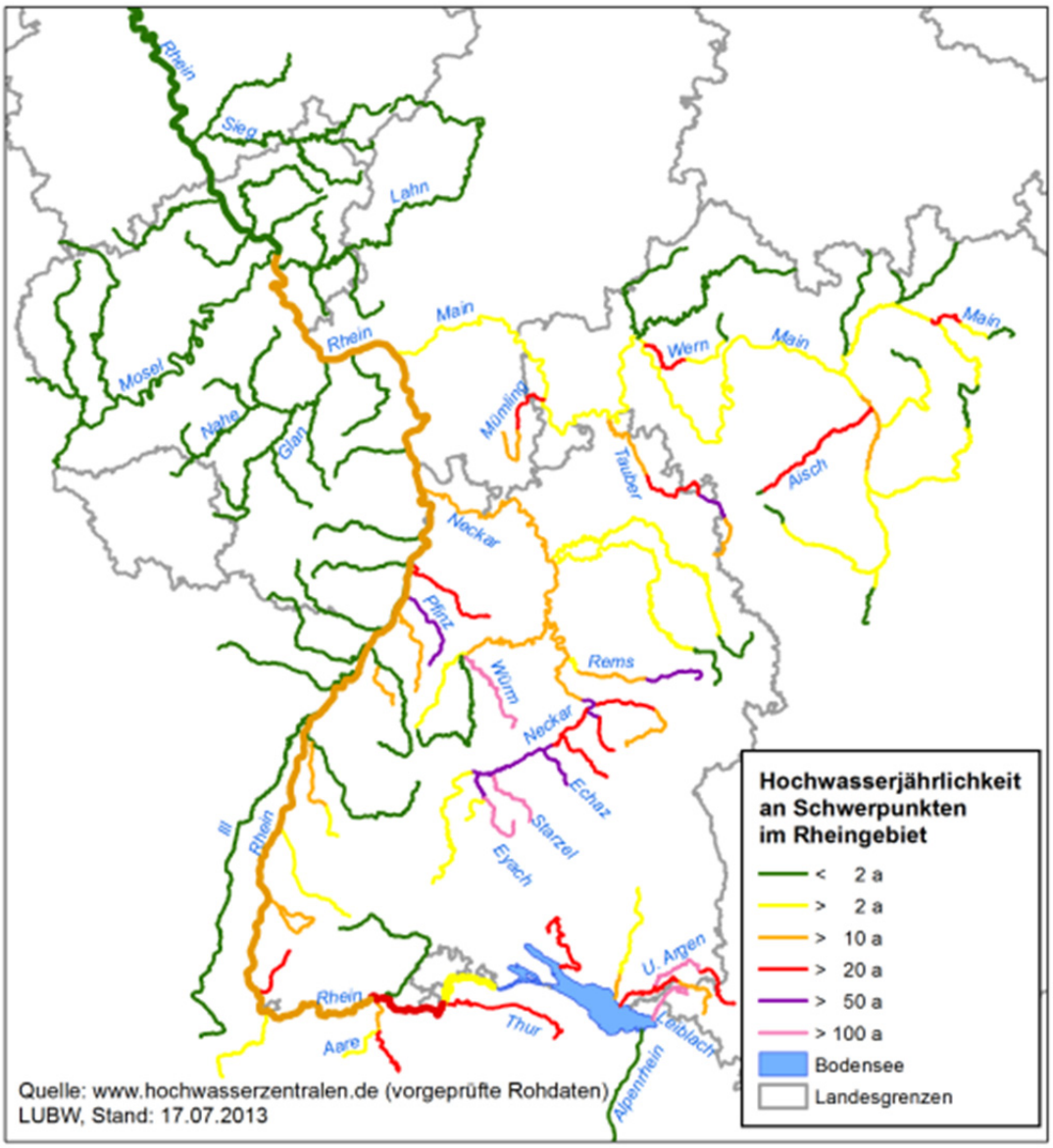


Abb. 3.14: Statistische Einordnung des Hochwassers im Juni 2013 im Rheingebiet
(aus: Hochwasserzentralen Rhein 2013)

Tab. 3.6 erlaubt einen Vergleich bedeutender Hochwassersituationen des Rheins. Die Karte in Abb. 3.14 enthält einen Überblick über die gegebene statistische Größenordnung und regionale Differenzierung, offenbart die Schwerpunkte im Bereich des Hochrheins, des oberen Neckars und einiger Mainzuflüsse und zeigt die geringe Betroffenheit im Westen und Norden des Rheingebiets.

3.4 Verlauf und Einordnung des Hochwassers im Donaugebiet

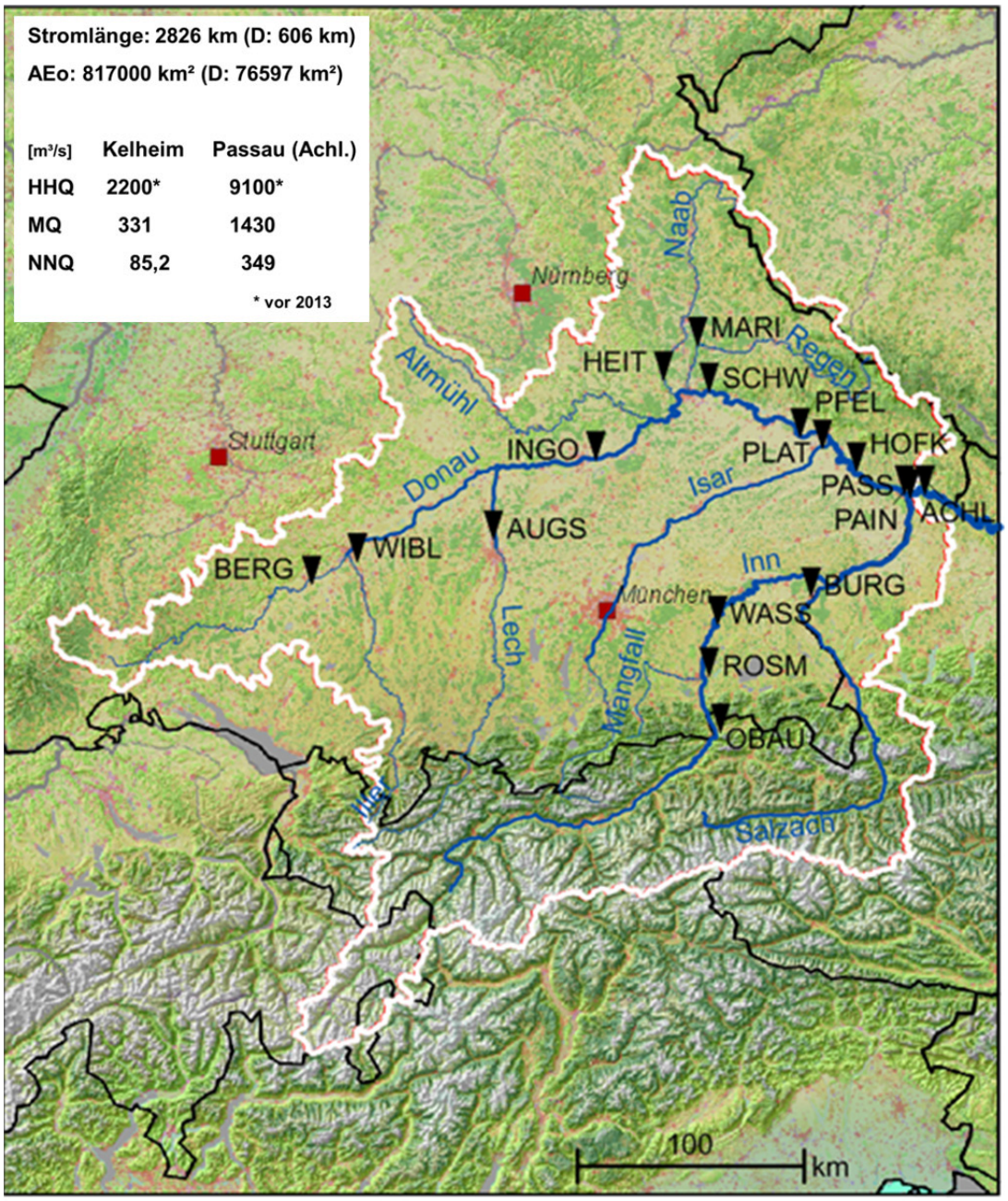


Abb. 3.15: Das Einzugsgebiet der Donau einschließlich wichtiger Pegelstandorte (Abkürzungen und Legende s. S. 224ff.)

Eine außerordentlich hohe Vorsättigung der Böden (vgl. Kap. 2.6) im Verein mit extrem hohen Niederschlägen zwischen dem 30.05. und 02.06.2013 in den Staulagen der Alpen und des Bayerischen Waldes zeitigte im deutschen Donaugebiet teils extrem hohe Wasserstände und Abflüsse; hier führten (mit wenigen Ausnahmen im südöstlichen Schwarzwald) nahezu alle Fließgewässer zwischen Ende Mai und Mitte Juni 2013 mehr oder weniger ausgeprägt Hochwasser. Frühzeitig und in massiver Weise betroffen war dabei der Inn.

3.4.1 Hochwasserverlauf in der Donau

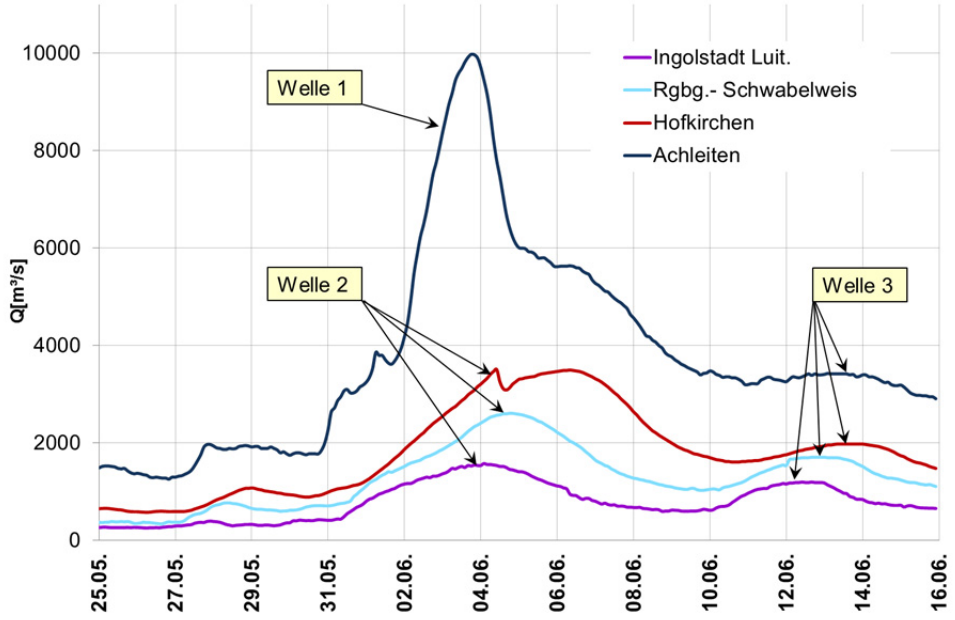


Abb. 3.16a: Hochwasser-Abflussganglinien vom Juni 2013 an den Donaupegeln Ingolstadt, Regensburg-Schwabelweis, Hofkirchen und Achleiten

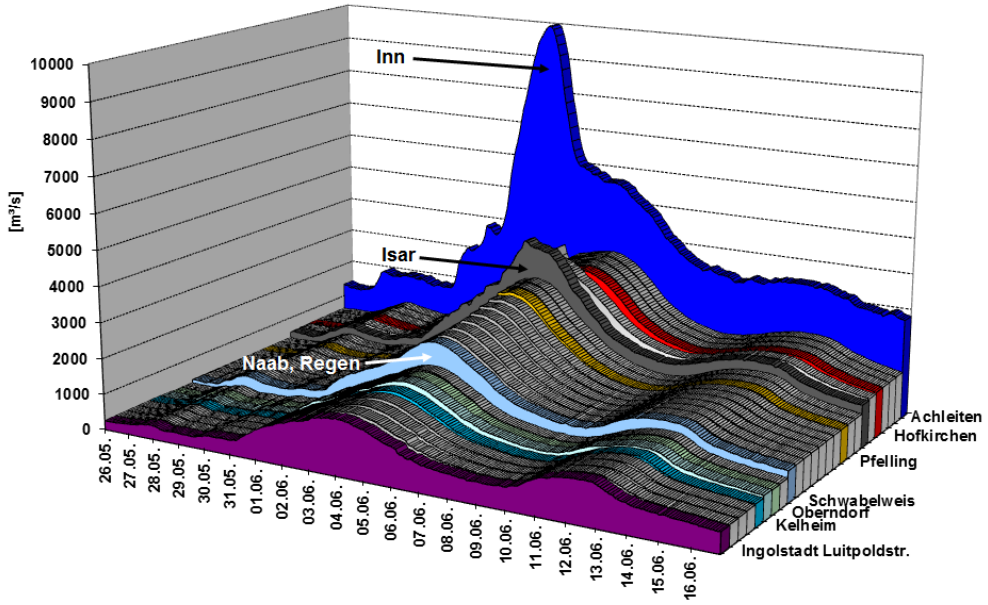


Abb. 3.16b: Ablauf der Hochwasserwelle der Donau vom Juni 2013

Angesichts der regional differenzierten Entstehungscharakteristika aufgrund des Zeitpunkts und der Intensität der auslösenden Niederschläge sowie der unterschiedlichen Fließzeiten im Gewässernetz wies die Donau als Hauptvorfluter insgesamt drei Hochwasserwellen unterschiedlichen Ursprungs auf (Abb. 3.16a und Abb. 3.16b).

Tab. 3.7: Gemessene Scheitelwerte an ausgewählten Pegeln im deutschen Donaueinzugsgebiet (Q-Angaben vorläufig gültig, Quelle: LfU 2013, verändert und aktualisiert gemäß LfU 2014a und LfU 2014b)

Gewässer	Pegel	Scheitelwerte		Wiederkehr-intervall [Jahre] (Bezugszeit-raum)
		Wasserstand (Datum)	Abfluss [m³/s]	
Donau	**Berg**	235 cm (03.06.2013)	196	2-5 (1930/2012)
Iller	**Wiblingen**	705 cm (02.06.2013)	645	5-10 (1901/2012)
Lech	**Augsburg u.d.W.**	364 cm (02.06.2013)	764	5-10 (1901/2012)
Donau	**Ingolstadt**	587 cm (04.06.2013)	1 600	10 (1826/2012)
Donau	**Regensburg-Schwabelweis**	693 cm (04.06.2013)	2 660	20-50 (1845/2012)
Isar	**Plattling**	397 cm (04.06.2013)	1 190	100 (1959/2012)
Donau	**Pfelling**	898 cm (05.06.2013)	3 300	100 (1826/2012)
Donau	**Hofkirchen ***	730 cm * (04.06.2013)	3 500 *	100 * (1826/2012)
Inn	**Oberaudorf**	320 cm (02.06.2013)	1 420	2-5 (1844/2012)
Inn	**Passau-Ingling**	1 159 cm (03.06.2013)	6 800	100 (1827/2012)
Donau	**Achleiten ****	1 011 cm (03.06.2013)	9 800	200-500 (1861/2012)

* Pegel Hofkirchen: Angegeben ist der deichbruchgeminderte Originalwert des Abflusses. Der deichbruchbereinigte Durchfluss beträgt 4 100 m³/s und weist damit das angegebene Wiederkehrintervall von 100 Jahren auf (LfU 2013).

** Pegel Achleiten: alle Angaben gemäß Betreiber viadonau (Österreich)

Die erste Hochwasserwelle der Donau wurde primär über den Inn, dem bedeutsamsten Stromzufluss in Deutschland und Österreich, ausgelöst (Details zum lnnhochwasser in Kap. 3.4.2). Dieser hatte in seinem Unterlauf eine Hochwasserwelle ausgebildet, die im Scheitel mehr als doppelt so groß war wie der Donaudurchfluss zu diesem Zeitpunkt. In Passau traf die Innwelle am 03. Juni 2013 mit einem Scheitelabfluss von 6 800 m³/s (Pegel Passau-

Ingling) auf bereits stark erhöhte Donauabflüsse in der Größenordnung von rund 3 000 m³/s (siehe Abb. 3.16). Dies führte dazu, dass am Donaupegel Passau an diesem Tag der bisher höchste gemessene Wasserstand (HHW), aufgetreten mit 1 220 cm ü.PNP beim Hochwasser im Juni 1954, deutlich überschritten wurde. Letztlich erreichte die Donau an diesem Pegel ihren Scheitel mit 1 289 cm ü.PNP am 03. Juni um 21 Uhr. Zugehörige Durchflüsse können hier nicht durch Messungen belegt werden, Rückrechnungen vom nahegelegenen österreichischen Pegel Achleiten und dem lnnpegel Passau-Ingling lassen einen Wert um etwa 10 000 m³/s plausibel erscheinen (LfU 2013). Dies entspricht einem Wiederkehrintervall von 200-500 Jahren.

Zeitgleich rollte die zweite, im Bereich der oberen Donau gebildete Hochwasserwelle stromabwärts (vgl. Abb. 3.16b), verfehlte aber in ihrem Verlauf bis Passau den vorausgeeilten Innscheitel und damit die erste Hochwasserwelle um drei Tage. Diese zweite Donauwelle wurde insbesondere von den südlichen Zuflüssen aus dem Voralpengebiet gespeist, deren Scheitel allerdings oftmals versetzt zum Donauscheitel eintrafen. Dadurch wurde das Aufsteilen der Donauwelle verringert, allerdings der Wellenrücken verlängert.

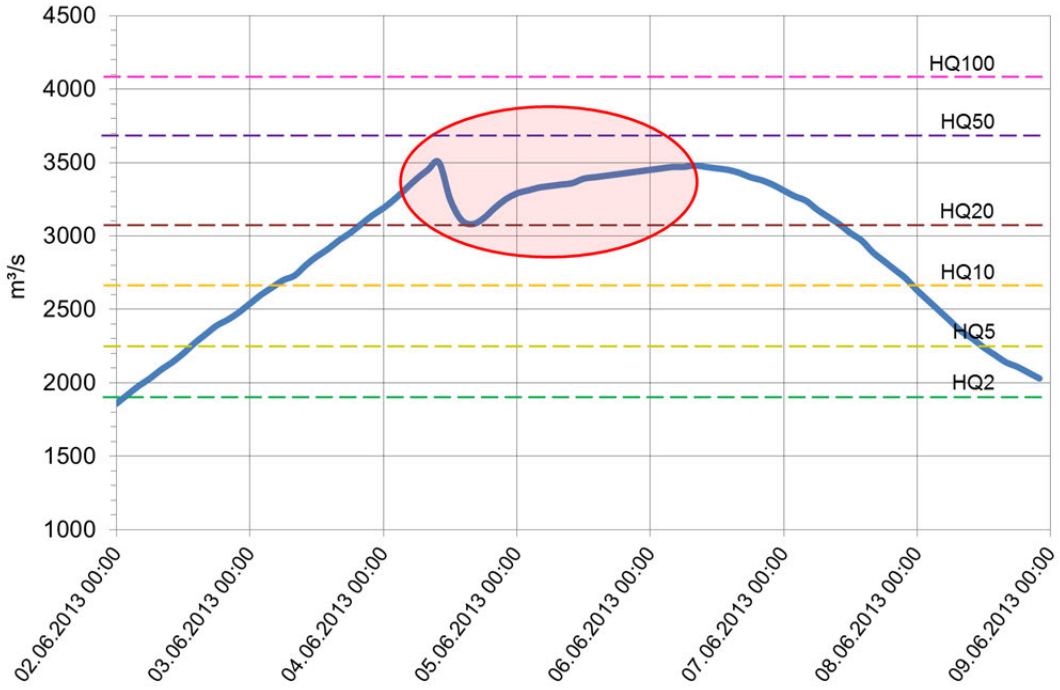


Abb. 3.17: Pegel Hofkirchen: Hochwasserganglinie der Donau mit deichbruchbedingter Scheitelbeeinflussung

Das vom Kopfeinzugsgebiet her moderate Donauhochwasser erreichte mit zunehmender Fließstrecke angesichts der Zuflüsse aus den Nebengewässern, die selbst, wie z.B. Iller und Lech, ausnahmslos alle ebenfalls Hochwasser führten, immer größere Dimensionen, Details vgl. LfU (2013) und BfG (2013d). Der Pegel Regensburg-Schwabelweis an der Donau erreichte durch die Zuflüsse von Regen und Naab eine über 20-jährliche Abflussspitze (2 660 m³/s am 04. Juni, vgl. Tab. 3.7). Die Hochwasseıwelle des Regen lief dem Hochwasserscheitel der Donau voraus, während sich die Scheitel der Donau und der Naab direkt überlagerten.

Am Pegel Regensburg-Schwabelweis resultierte fast ein Drittel des Scheitelabflusses (nämlich über 800 m³/s) aus den Zuflüssen von Naab und Regen.

Der Donauscheitel erreichte den Pegel Pfelling am 05. Juni mit ca. 3 300 m³/s. Von hier an ist stromab für die Donau im Bereich Deggendorf gemäß LfU (2013) von einer Hochwasserwiederkehr von 100 Jahren auszugehen.

Zwei Deichbrüche, jeweils am 04. Juni am Unterlauf der Isar sowie an der Donau (Strom-km 2 267 in der Nähe von Winzer) führten zu einer Kappung des Hochwasserscheitels, so dass die Welle flussabwärts am Pegel Hofkirchen nur mehr das Ausmaß eines 20-50-jährlichen Ereignisses hatte; der Spitzenabfluss lag hier entsprechend der Situation vor den Deichbrüchen am 04.06. bei 3 500 m³/s (Abb. 3.17).

Trotz der deutlichen Reduzierung des Abflusses wurde mit einem Wasserstand von 730 cm ü.PNP am Pegel Hofkirchen ein bislang noch nicht registrierter neuer Höchstwert (HHW) erreicht. Ohnehin wurden an zahlreichen Pegeln entlang der Bundeswasserstraße Donau die bisherigen HHW überschritten (Abb. 3.18). Dies betraf insbesondere den Stromabschnitt unterhalb der Isarmündung. Die Isar selbst trug dazu mit Scheitelabflüssen im Unterlauf, die eine Wiederkehr von 100 Jahren aufwiesen (z.B. 1 190 m³/s am Pegel Plattling, vgl. Tab. 3.7), in erheblichem Maße bei.

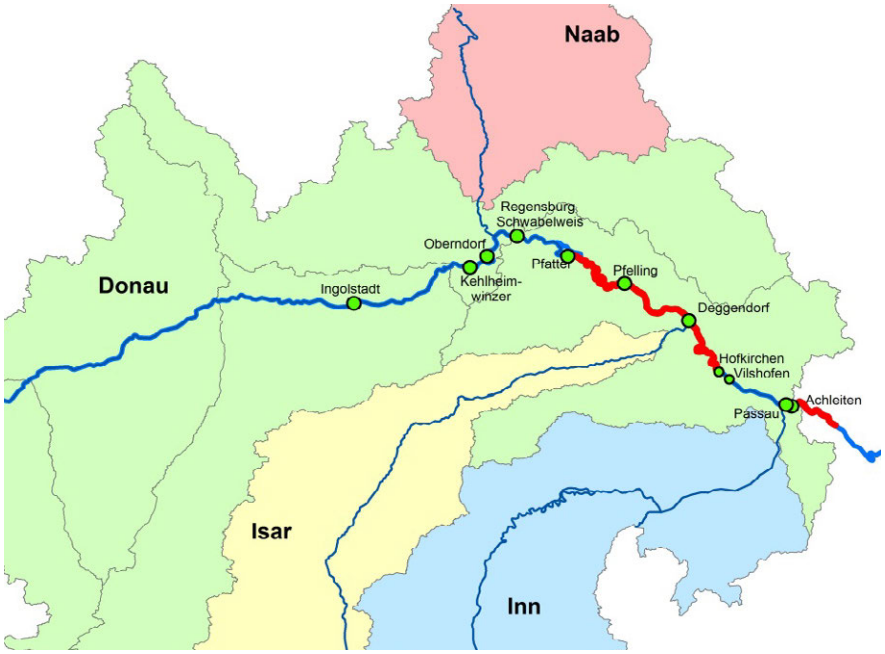


Abb. 3.18: Juni 2013: Überschreitungen des HHW (höchster bekannter eisfreier Wasserstandswert seit Pegeleinrichtung) im Verlauf der Donau (rote Kennzeichnung)

Die Hochwasserwelle der Donau erreichte am 06. Juni den Raum Passau. Der Abfluss des Inns war zu diesem Zeitpunkt bereits wieder auf rund 3 200 m³/s gesunken (d.h. immer noch rd. 500 m³/s > MHQ 1921/2012), so dass hier die Wasserstände dieser zweiten Hochwasserwelle an der unteren deutschen Donau geringere Niveaus als bei der durch den Inn ausgelösten Situation wenige Tage zuvor erbrachten (vgl. Abb. 3.16a bzw. Abb. 3.16b). Angesichts der rasch zurückgehenden Abflüsse des Inns bildete sich auch kein eigner Scheitel aus, lediglich eine Verlangsamung des Abflussrückgangs war zu konstatieren. Der Donau-Durchfluss

lag in dieser Phase mit knapp 7 000 m³/s (Pegel Passau-Ilzstadt) im Bereich eines 20-jährlichen Hochwassers. Abb. 3.19 zeigt, dass während der ersten (Achleiten) und zweiten Hochwasserwelle der Donau (übrige dargestellte Pegel) alle wichtigen Hochwassermeldestufen erheblich überschritten waren.

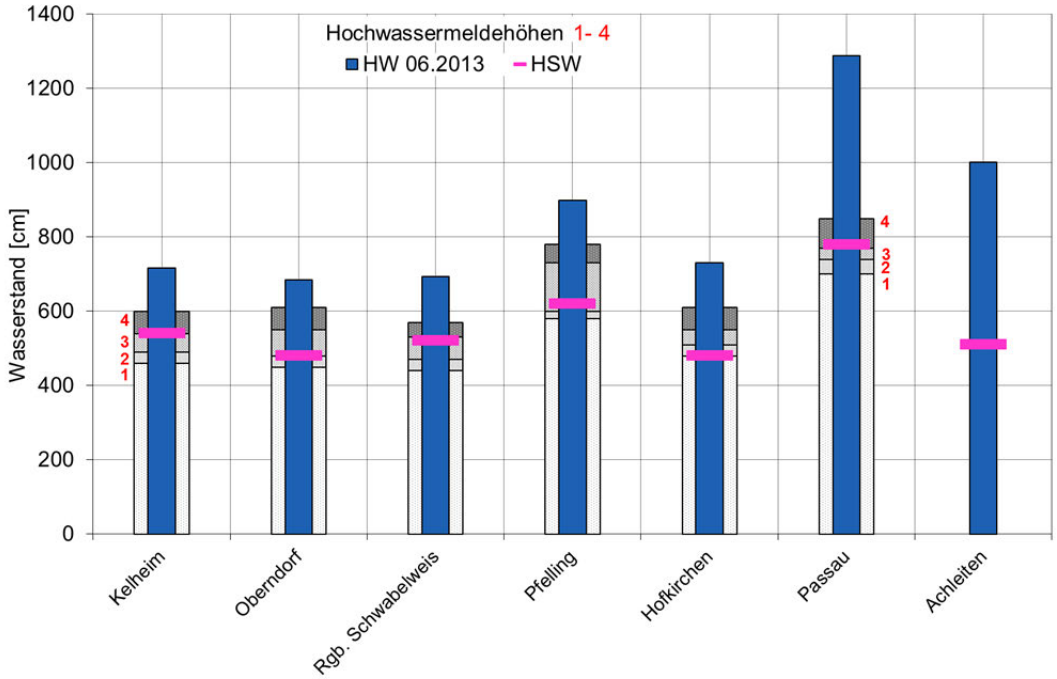


Abb. 3.19: Überschreitung maßgeblicher Wasserstandsmarken (Hochwassermeldestufen und HSW (höchster schiffbarer Wasserstand)) an wichtigen Pegeln der Donau während der ersten Juniwoche 2013

Erneute Niederschläge im oberen Abschnitt der Donau sowie ihrer Zuflüsse führten zwischen dem 11. und 14. Juni zu einer dritten, wenn auch deutlich kleineren Hochwasserwelle. Es wurde ein Wiederansteigen der Wasserstände bis in den Bereich der Meldestufen 2 und 3 verzeichnet. Der Scheitel wurde am Pegel Pfelling an 13. Juni mit gut 1 500 m³/s registriert, was im Bereich eines HQ_2 liegt.

3.4.2 Die Situation in den wichtigsten Nebenflüssen der deutschen Donau

Das Gebiet der Schwäbischen Alb zählte zu den am stärksten vom Juni-Hochwasser betroffenen Regionen in Deutschland. Ähnlich wie bei den nordwärts in Richtung Neckar verlaufenden Fließgewässern bauten sich hier auch bei den südwärts abfließenden Zubringern der Donau teilweise bis über 100-jährliche Hochwassersituationen auf (z.B. Lauchert und Schmeie). Da die Schwarzwaldzuflüsse der Donau kein Hochwasser führten, entwickelte sich in der oberen Donau bis zur Illermündung jedoch nur ein etwa 2-jährliches Hochwasser. Wie Abb. 3.20 für den Zeitraum der ersten beiden Hochwasserwellen der Donau belegt, wurden beide Ereignisse auf der weiteren Fließstrecke vornehmlich durch die südlichen Zuflüsse gespeist, insbesondere durch Isar und Inn.

Die abflussstärksten **nördlichen Donauzuflüsse** waren Naab und Regen, beide blieben allerdings in der Spitze unter einem Abfluss von 500 m³/s. Insgesamt traten nördlich der Donau überwiegend vergleichsweise geringe Jährlichkeiten auf. Ausnahmen bildeten einzelne Pegel an den Oberläufen von Wörnitz und Altmühl sowie im Einzugsgebiet der Naab an der Murach, der Schwarzach und der Vils.

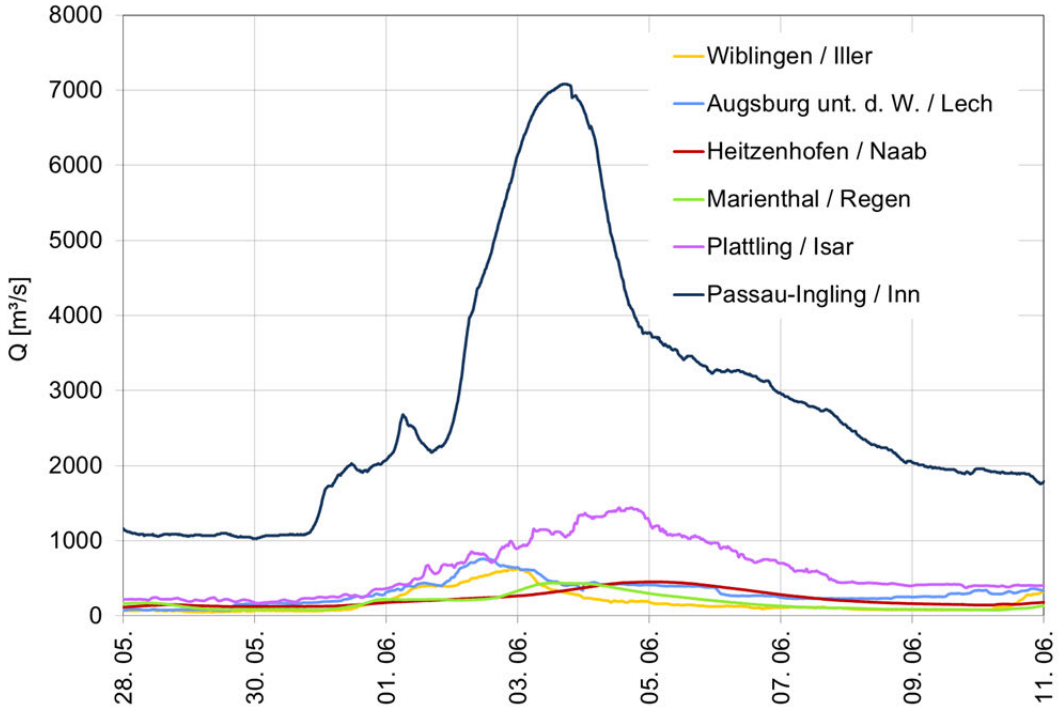


Abb. 3.20: Hochwasserganglinien mündungsnaher Pegel der maßgeblichen Zuflüsse der deutschen Donau

Die Nebenflüsse **südlich der Donau** trugen demgegenüber in erheblich größerem Maße zum Donauhochwasser bei. Zeitlich gesehen betraf dies zunächst **Iller** und **Lech** mit Scheitelabflüssen mit einem 5-10-jährlichen Wiederkehrintervall (vgl. Tab. 3.7) am 02.06. Juni. Um einige Tage versetzt, aber sehr prägend für die zweite Donauwelle, lag der Zufluss der **Isar**. Anders als bei früheren großen Hochwasserereignissen, bei denen maßgeblich die Alpen und der Alpenrand zum Gesamtabfluss beitrugen (z.B. beim Hochwasser 2002), wurde diesmal das gesamte Isareinzugsgebiet relativ einheitlich überregnet. In den Alpen wurde allerdings nicht der gesamte Niederschlag abflusswirksam, da die Schneefallgrenze während des Hochwassers bei ca. 1 800 m lag. Durch die lange Dauer des Hochwassers trugen auch die kleineren Isarzuflüsse maßgeblich zur Bildung des dortigen Hochwasserscheitels bei. Dadurch nahmen die Jährlichkeiten an der Isar flussabwärts zu. Die höchsten Wiederkehrintervalle wurden ergo nicht an den alpinen Pegeln, sondern nördlich von München gemessen. Zu berücksichtigen ist bei dieser Aufteilung auch die scheitelmindernde Wirkung der Steuerung des Sylvensteinspeichers (s. Kap. 3.4.3), die erst auf der Isarstrecke unterhalb von München in den Hintergrund trat (LfU 2013). Der Pegel Plattling am Unterlauf der Isar wies am 04. Juni einen Spitzendurchfluss von 1 190 m³/s auf (Wiederkehrintervall 100 Jahre, vgl. Tab. 3.7). Der Deichbruch an der Isar kurz vor ihrer Mündung in die Donau (vgl. Kap. 3.4.1) erfolgte unterhalb dieses Pegels und war für diesen nicht scheitelwirksam.

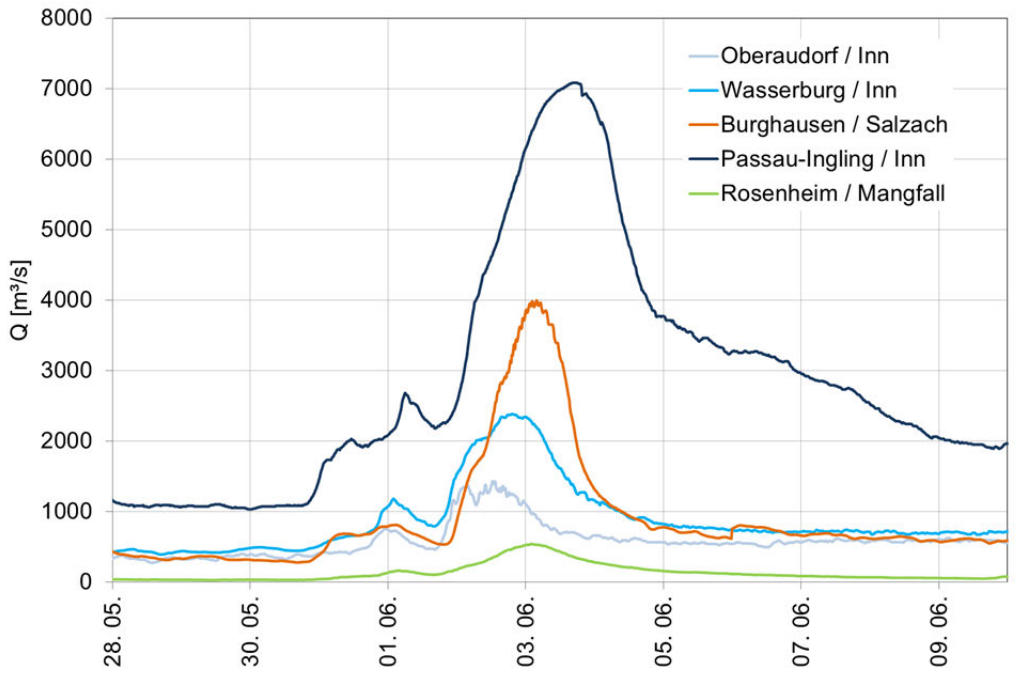


Abb. 3.21: Hochwasser-Abflussganglinien im Juni 2013 an repräsentativen Pegeln des bayerischen Inns

Das Hochwasser des **Inn**s prägte mit seinem Beitrag die Abflusssituation des Vorfluters Donau bei der ersten Hochwasserwelle in umfassender Weise. Ausschlaggebend dafür waren extrem hohe Wasserstände und Abflüsse nach dem Übergang des Inns in sein voralpines Teileinzugsgebiet: Lag am Pegel Oberaudorf am 02. Juni nur eine moderate Hochwassersituation mit einer Wiederkehr von 2-5 Jahren vor, so trugen die einmündenden Fließgewässer im weiteren Verlauf des Flusses maßgeblich zur Ausbildung einer außerordentlich großen Hochwasserwelle bei. Abb. 3.21 veranschaulicht die Hochwasserentwicklung in diesem bedeutenden Donauzufluss, wobei insbesondere hohe Zuflüsse aus der Mangfall (lt. LfU (2013) bis > HQ_{100}) und vor allem Salzach (z.B. höchster je gemessener Abfluss am Pegel Burghausen/Salzach mit rd. 4 000 m³/s) prägend wirkten.

3.4.3 Retentionseinflüsse auf das Hochwasser der Donau

Für die Donau liegen, im Gegensatz zu Rhein (Kap. 3.3.3) und Elbe (Kap. 3.5.4), keine großräumigen, modellgestützten Betrachtungen hinsichtlich der Wirkungen von Deichbrüchen, von Polderflutungen und von Wasserrückhalt in Talsperren auf den Hochwasserablauf vor. Für detaillierte Informationen zu den Einzelwirkungen der eingesetzten Rückhaltemaßnahmen (Scheitelreduktion, Retentionsvolumen, Verlauf der Steuerung) wird an dieser Stelle auf den Bericht des Bayerischen Landesamts für Umwelt zum Hochwasser 2013 (LfU 2013) verwiesen, der eine vollständige Übersicht über den Einsatz der Maßnahmen im gesamten bayerischen Donaugebiet beinhaltet.

Da in den staatlichen bayerischen Wasserspeichern insgesamt über 180 Mio. m^3 Wasser zurückgehalten wurden und für einzelne Maßnahmen Scheitelreduktionen von teilweise mehreren 100 m³/s angegeben werden – beispielsweise reduzierte der Einsatz des Sylvensteinspeichers den Scheitelabfluss an der Isar in München um 570 m³/s, der Rückhalt im vorabgesenk-

ten Forggensee den Scheitelabfluss des Lechs unterhalb Füssen um 400 m³/s – wären zukünftig auch derartige Szenarienbetrachtungen zur Wirkung der eingetretenen Retentionseffekte insbesondere auch auf den Hauptvorfluter Donau nutzbringend.

Die bereits in Kap. 3.4.1 behandelten beiden Deichbrüche des 04. Juni im Unterlauf der Isar und an der Donau bei Winzer wirkten sich deutlich mindernd auf die anschließend eingetretenen Scheitelwasserstände der Donauwelle oberhalb von Passau aus. Nach Berechnungen des LfU (2013) wäre der Donauscheitel bei Hofkirchen ohne die hierdurch bewirkte ungesteuerte Retention (Rückhaltevolumen zwischen 70 und 100 Mio. m³) um rund 500-600 m³/s höher ausgefallen und hätte die Größenordnung eines Wiederkehrintervalles von 100 Jahren erreicht.

3.4.4 Fazit Donaugebiet

Die Donau, deren Einzugsgebiet in Deutschland im Juni 2013 nahezu flächendeckend von Hochwasser betroffen war (vgl. Abb. 3.22), verzeichnete in dieser Zeit insgesamt drei Hochwasserwellen. Dabei wurden über große Abschnitte stromab der Isarmündung neue HHW registriert.

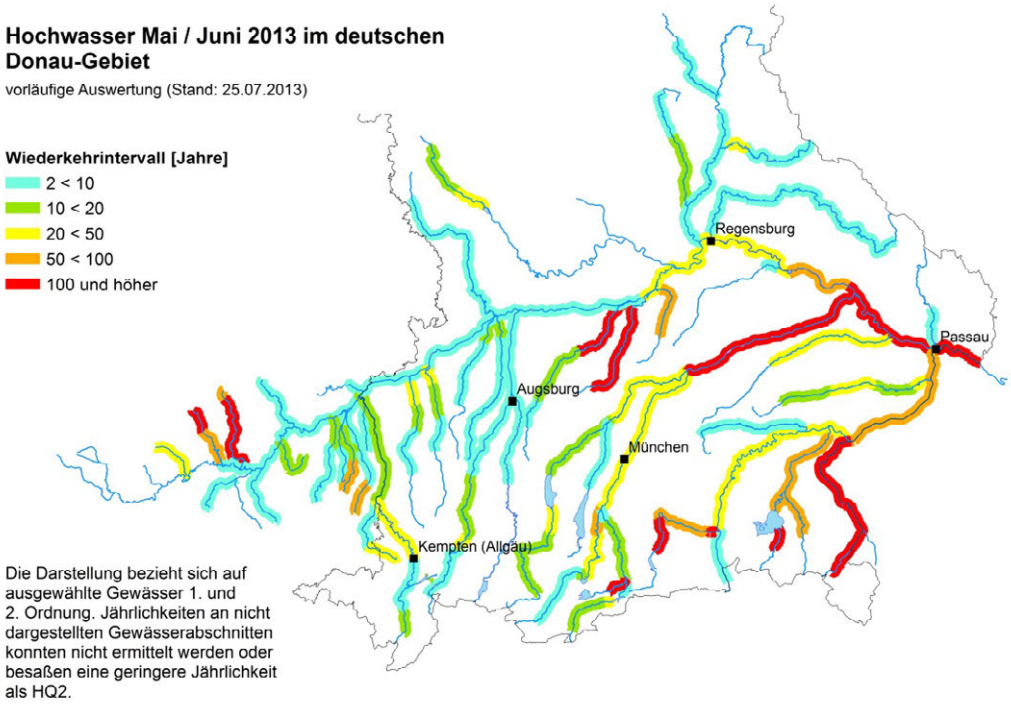


Abb. 3.22: Statistische Einordnung des Hochwassers vom Juni 2013 im Donaugebiet (im Donauabschnitt unterhalb der Isarmündung mit Bezug auf deichbruchbereinigte Durchflüsse, Quelle: LfU 2014)

Die erste und abflussstärkste Hochwasserwelle, ausgehend vom Inn, baute sich ab dem Bereich Passau mit einem Scheitelwasserstand am 03. Juni auf. Ihr Durchflussmaximum betrug am wenige Kilometer unterhalb der Drei-Flüsse-Stadt gelegenen Pegel Achleiten 9 800 m³/s, was in der Größenordnung eines 200-500-jährlichen Wiederkehrintervalls liegt (vgl. Tab. 3.8).

Die zweite Welle, ausgehend von der oberen Donau, bewegte sich ab dem 02. Juni stromabwärts und gewann aufgrund der Speisung durch die ebenfalls hochwasserführenden Nebenflüsse kontinuierlich an Umfang. Sie erreichte mit ihrem Scheitel den Raum Passau am 06. Juni. Hinsichtlich der registrierten Wasserstands- und Abflussspitzen und ihrer statistischen Größenordnung blieb sie hinter der ersten Welle zurück (vgl. Tab. 3.8). Deichbrüche führten ab Deggendorf zu einer effektiven Scheitelkappung, die sich bis Hofkirchen und darüber hinaus deutlich auswirkte.

Eine dritte, größenordnungsmäßig nachrangige Hochwasserwelle entwickelte sich zu Beginn des zweiten Junidrittels in der Donau; es wurden maximal Durchflüsse mit einer Wiederkehr von 2 Jahren verzeichnet.

Tab. 3.8: Das Juni-Hochwasser 2013 an wichtigen Pegeln der Donau im Ereignisvergleich (Datenquellen: LfU 2014a, LfU 2014b, viadonau, WSV)

	1954	**1999**	**2002**	**2011 ***	**2013 ***	
	HQ [m³/s]	**HQ [m³/s]**	**HQ [m³/s]**	**HQ [m³/s]**	**Scheitel-Abfluss [m³/s] (Datum)**	**Wieder-kehr-intervall [Jahre]**
Kelheim	1 320	2 140	1 680	1 270	1 820 (04.06.2013)	20-50
Regensburg-Schwabelweis	2 200	2 280	2 360	2 180	2 660 (04.06.2013)	20-50
Pfelling	2 240	2 350	2 400	2 540	3 200 (05.06.2013)	100
Hofkirchen	3 320	3 300	2 900	2 850	3 500 ** (04.06.2013)	100 ***
Achleiten	9 100	5 400	7 700	5 400	9 800 (03.06.2013)	200-500

* vorläufig gültige Durchflussangaben der LfU (2014a und 2014b)
** deichbruchgeminderte Originalwerte. Der deichbruchbereinigte Durchfluss beträgt 4 100 m³/s (LfU 2013).
*** bezogen auf den deichbruchbereinigten Durchfluss (4 100 m³/s). Das Wiederkehrintervall des Originalwertes 3 500 m³/s beträgt 20-50 Jahre (LfU 2013)

Die im Juni 2013 registrierten Wasserstands- und Durchflussspitzen an der Bundeswasserstraße Donau markieren ab dem Pegel Pfelling (Strom-km 2 305,53) historische Höchststände, die zumindest seit Ende des 19. Jahrhunderts nicht erreicht wurden.

3.5 Verlauf des Hochwassers im Elbegebiet

Die in weiten Teilen des Elbegebiets angesichts der vorausgegangenen intensiven Niederschläge gegebene Wassersättigung der Böden schränkte deren Versickerungsvermögen erheblich ein (vgl. Kap. 2.6). Ähnlich wie im Donaugebiet wurde auch hier damit ab der letzten Maiwoche angesichts der nicht aufnahmefähigen Oberflächen ein Großteil der weiterhin ergiebigen Regenmenge unmittelbar abflusswirksam.

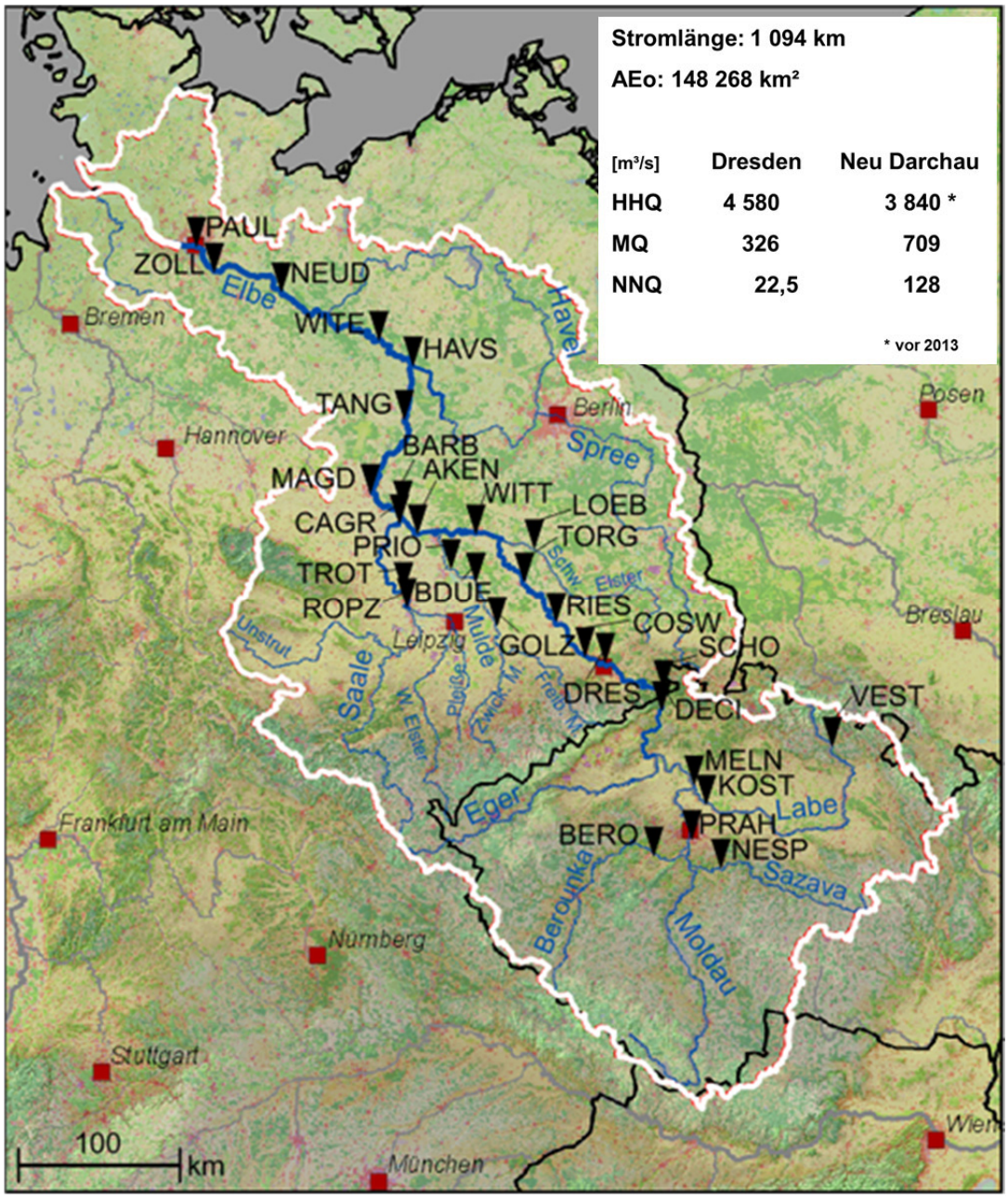


Abb. 3.23: Das Einzugsgebiet der Elbe einschließlich wichtiger Pegelstandorte (Abkürzungen und Legende s. S 224ff.)

3.5.1 Verlauf des Hochwassers im tschechischen Elbegebiet

Mit einem Niederschlagsschwerpunkt im südlichen und westlichen Böhmen wurde der Hochwasserablauf im tschechischen Elbeeinzugsgebiet entscheidend durch die Moldau und hier wiederum durch zwei unterschiedliche Faktoren geprägt: In den Fließgewässern des südlichen Moldaugebietes traten Hochwasserereignisse auf, die teilweise Jährlichkeiten >100 a aufwiesen. Einerseits konnte hier der Moldauscheitel durch die bedarfsgerechte Steuerung der hiesigen Talsperren (Moldaukaskade) erfolgreich gekappt und die Welle im Ablauf zeitlich gestreckt werden (vgl. Kap. 3.5.4). Andererseits trafen aber die Hochwasserwellen der Sázava und der Berounka auf einem kurzen Flussabschnitt oberhalb von Prag nahezu zeit-

gleich aufeinander (vgl. Tab. 3.9). Durch ihre Beiträge wuchs der Abflussscheitel der Moldau um rund 40 % auf einen Wert von 3 080 m³/s (Pegel Prag-Chuchle am 04.06.2013) und erreichte so die Größenordnung eines HQ_{20-50}.

Tab. 3.9: Gemessene Scheitelwerte an ausgewählten Pegeln im tschechischen Elbegebiet (Quelle: ČHMÚ, in: IKSE 2014)

Gewässer	Pegel	Hochwasser 06/2013		
		Scheitelwerte		Wiederkehr-intervall [Jahre]
		Wasserstand (Datum)	Abfluss [m³/s]	
Elbe	**Vestřev**	354 cm (02.06.2013)	272	50-100
Elbe	**Kostelec n. L.**	712 cm (04.06.2013)	744	5
Sázava	**Nespeky**	544 cm (03.06.2013)	515	20-50
Berounka	**Beroun**	578 cm (03.06.2013)	960	20
Moldau	**Prag-Chuchle**	546 cm (05.06.2013)	3 080	20-50
Elbe	**Mělník**	936 cm (04.06.2013)	3 640	50
Elbe	**Děčín**	1 074 cm (06.06.2013)	3 740	20-50

Das Hochwasser der im Riesengebirge im Nordosten Tschechiens entspringenden oberen Elbe verlief dagegen in deutlich gemäßigteren Bahnen und bewegte sich mit Ausnahme des stark betroffenen Kopfeinzugsgebietes größtenteils auf dem Niveau eines maximal 5-jährlichen Ereignisses (vgl. Tab. 3.9/Pegel Kostelec). Allerdings überlagerten sich die Scheitel der Elbe- und Moldauwelle an ihrem Zusammenfluss bei Melnik nahezu vollständig, anschließend wurde daher hier ein Spitzendurchfluss von 3 640 m³/s registriert. Stromab erhöhte sich die Elbewelle aus verschiedenen Gründen nur noch unbeträchtlich, weil geringe Zuflüsse im nach Norden anschließenden böhmischen Einzugsgebiet zuströmten; die Eger als größter Nebenfluss in diesem Elbeabschnitt erreichte z.B. nur ein HQ_2; zudem traf die Egerwelle mit ihrem Scheitel um einige Tage versetzt hinter der Abflussspitze der Elbe ein. Insbesondere im Bereich der Egermündung kamen erhebliche Retentionseffekte zum Tragen, deren Scheitelminderungseffekte auf 150-200 m³/s eingeschätzt werden (Ministerstvo životního prostredí 2014). In Decin wurde am 06.06.2013 ein Durchfluss von 3 740 m³/s (Wiederkehrintervall 20-50 Jahre) registriert.

3.5.2 Verlauf und Einordnung des Hochwassers im deutschen Elbegebiet

Der weitere Verlauf des Hochwassergeschehens in der Elbe und sein Bezug zu den Nebenflüssen ist anhand der Abb. 3.24a und Abb. 3.24b visuell nachzuvollziehen.

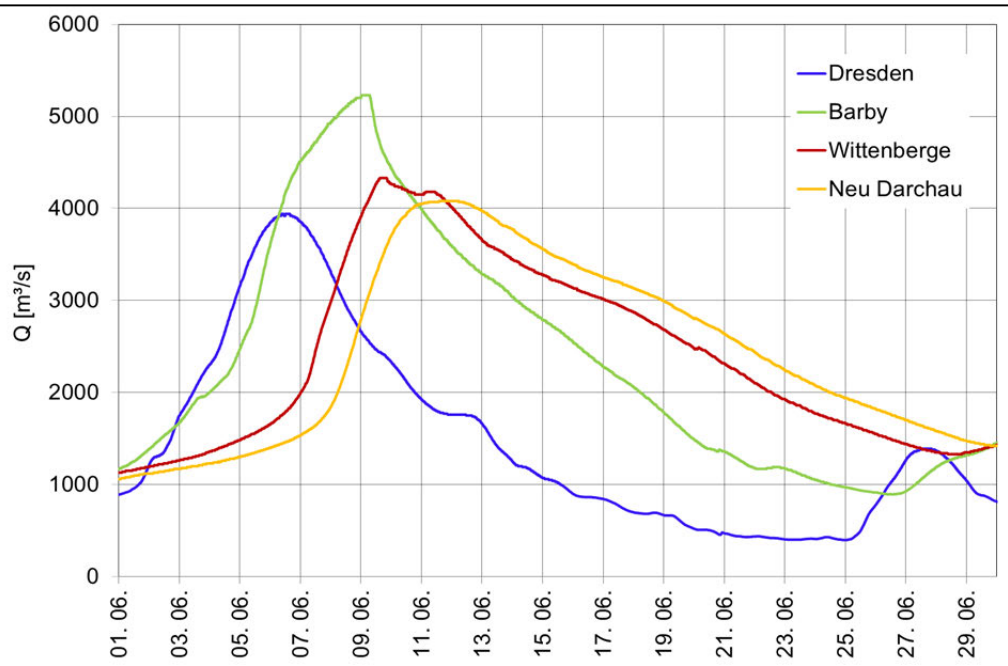


Abb. 3.24a: Ablauf der Hochwasserwelle vom Juni 2013 an der deutschen Elbe an den Pegeln Dresden, Barby, Wittenberge und Neu Darchau

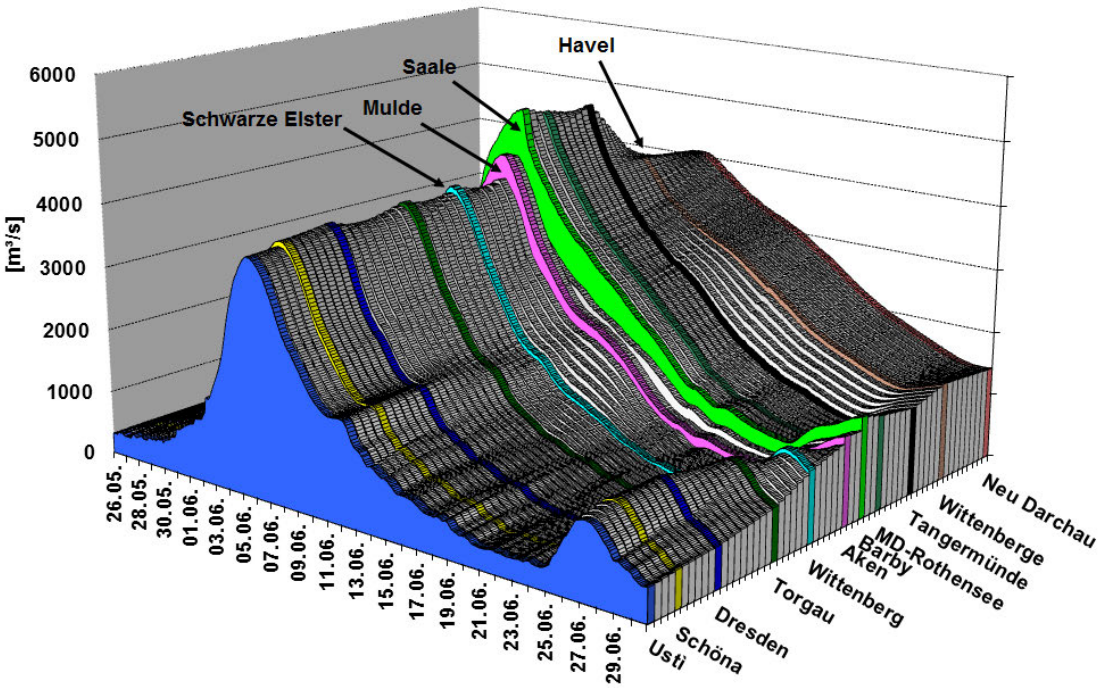


Abb. 3.24b: Ablauf der Hochwasserwelle vom Juni 2013 an der deutschen Elbe

Bereits in Schöna, dem Standort des ersten Elbepegels auf deutschem Staatsgebiet, überschritt das Hochwasser alle vorhandenen Warnstufen sowie den höchsten schiffbaren Wasserstand (HSW). Derartige umfassende Überschreitungen waren im Weiteren auch für den Gesamtverlauf der Bundeswasserstraße Elbe (binnen) sowie der Bundeswasserstraße Saale zu konstatieren (vgl. Abb. 3.25).

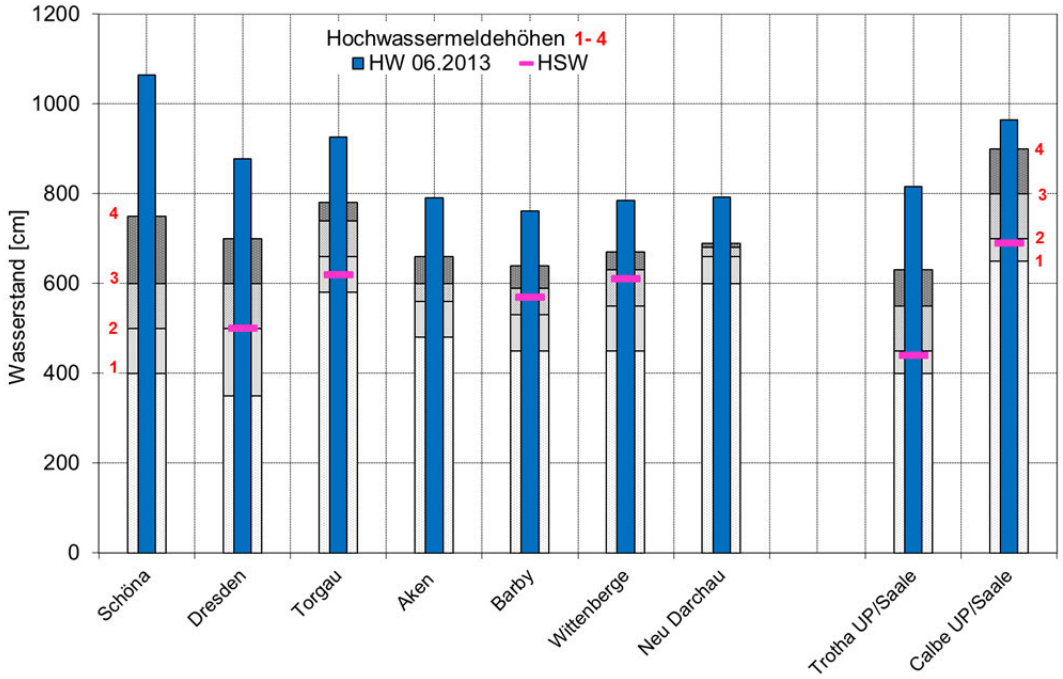


Abb. 3.25: Überschreitung maßgeblicher Wasserstandsmarken (Hochwassermeldestufen und HSW (höchster schiffbarer Wasserstand)) an wichtigen Pegeln der Elbe und Saale im Juni 2013

Nach Querung des Durchbruchstales durch das Elbsandsteingebirge hatte sich der Abflussscheitel der Hochwasserwelle des Elbstroms bis Dresden auf 3 950 m³/s erhöht. Das entspricht einem Scheitelwasserstand von 878 cm ü.PNP, erreicht am 06. Juni 2013 (Tab. 3.10). Damit wurde der Höchstwert aus dem Jahre 2002 um 62 cm verfehlt. Statistisch gesehen entspricht dieser Durchflusswert einem Wiederkehrintervall von 50-100 Jahren.

Auf der weiteren Elbestrecke bis zur Mündung der Schwarzen Elster ereigneten sich insgesamt vier Deichbrüche aufgrund Überströmens der Deichkörper und ein Deichbruch aufgrund des Versagens des Sielbauwerks, die teilweise lokale Minderungen der Hochwasserwelle bewirkten (vgl. auch Kap.3.5.4).

Die Schwarze Elster trug angesichts eines eher moderaten eigenen Hochwassers in der Größenordnung eines Wiederkehrintervalls von 5-10 Jahren nur unmaßgeblich zum Wellenaufbau im Elbstrom bei (vgl. Pegel Löben in Tab. 3.10).

An den Pegeln Torgau und Wittenberg hielt sich die Elbewelle trotz leichter Zugewinne unverändert auf dem Niveau eines 50-100-jährlichen Ereignisses. Mit Annäherung an die Einmündung der Mulde begann ab dem Pegel Coswig der rund 350 km lange zusammenhängende Stromabschnitt der Binnenelbe, auf dem bis zum Wehr Geesthacht die bisherigen eisfreien HHW sukzessive mit Passage des Hochwasserscheitels überschritten wurden (dies teilweise mit Beträgen >70 cm, vgl. Abb. 3.26, Tab. 3.11).

Tab. 3.10: Hochwasser-Scheitelwerte an ausgewählten Pegeln im deutschen Elbegebiet (Quelle: WSV, LfULG, LHW, in: IKSE 2014)

Gewässer	Pegel	Scheitelwerte		Wiederkehr-intervall [Jahre] (Bezugs-periode)
		Wasserstand (Datum)	Abfluss [m³/s]	
Elbe	**Schöna**	1 065 cm (06.06.2013)	3 750	20-50 (1956/2006)
Elbe	**Dresden**	878 cm (06.06.2013)	3 950	50-100 (1890/2006)
Elbe	**Torgau**	923 cm (07.06.2013)	4 090	50-100 (1936/2006)
Schwarze Elster	**Löben**	306 cm (06.06.2013)	98	<10 (1974/2006)
Elbe	**Wittenberg/L.**	691 cm (08.06.2013)	4 210	50-100 *
Mulde	**Bad Düben 1**	866 cm (04.06.2013)	1 770	50-100 (1961/2006)
Elbe	**Aken**	791 cm (09.06.2013)	4 600	50-100 *
Saale	**Calbe-Grizehne**	802 cm (06.06.2013)	1 030	>200 (1932/2013)
Elbe	**Barby**	762 cm (09.06.2013)	5 250	100-200 (1890/2013)
Elbe	**Magdeburg-Strombrücke**	747 cm (09.06.2013)	5 140	100-200 *
Elbe	**Tangermünde**	838 cm (09.06.2013)	5 150	100-200 *
Havel	**Havelberg Stadt**	452 cm (10.06.2013)	361 **	- **
Elbe	**Wittenberge**	785 cm (09.06.2013)	4 330 ***	100-200 **** (1890/2013)
Elbe	**Neu Darchau**	792 cm (11.06.2013)	4 080 ***	100-200 **** (1890/2013)

* Steuerungsbeeinflusst: Abfluss wurde zurückgehalten. Wasserstand und Durchfluss sind somit entkoppelt, eine Einordnung der Jährlichkeit ist daher nicht möglich.

** Die Angabe des Wiederkehrintervalls erfolgt aufgrund inkonsistenter Datenlage unter Berücksichtigung der Abflüsse und Wiederkehrintervalle der Nachbarpegel (oberstrom und unterstrom) durch Einpassung im Längsprofil (vgl. IKSE 2014).

*** Originalwert (nach Kappung des Elbescheitels durch Deichbrüche und Flutung der Havelniederung)

**** Zur statistischen Einordung nicht auf den durch eingetretene Retentionseffekte verzerrten beobachteten Wert in der Spalte „Abfluss“ bezogen, sondern auf den homogenisierten HQ-Wert ohne Retention; der homogenisierte HQ 2013 beträgt am Pegel Wittenberge 4 950 m³/s und am Pegel Neu Darchau 4 780 m³/s (vgl. IKSE 2014)

Abb. 3.26: Juni 2013: Überschreitungen des HHW (höchster bekannter eisfreier Wasserstandswert seit Pegeleinrichtung) im Verlauf der Bundeswasserstraßen Elbe und Saale (in Rot)

Die Hochwasserwelle der Mulde traf an ihrer Mündung mit einem Scheitel in Höhe von rund 1 450 m³/s rund fünf Tage vor der Elbewelle ein. Somit kulminierte das Elbehochwasser in diesem Abschnitt erst zu einem Zeitpunkt, als das Ereignis in der Mulde bereits stark abflaute. Insofern kam es durch diesen bedeutenden Nebenfluss bei Scheiteldurchgang im Vorfluter nur noch zu einer Aufhöhung um rund 500 m³/s, mithin weniger als ein Drittel des Muldescheitels vom 03.06.2013.

Der Zufluss des Saalescheitels lief der Elbespitze um mehr als zwei Tage voraus. Da die Saale aber nur sehr langsam zurückging, strömten an ihrer Mündung dem Elbehochwasser bei Scheiteldurchgang immer noch mehr als 800 m³/s zu. Am Pegel Barby[5] erreichte der

[5] Hinweis: Aufgrund der problematischen Struktur der jeweiligen Messprofile (u.a. Vorhandensein von Waldbedeckung bzw. Umflutrinnen) sind die Durchflussspitzen der Pegel Aken und Barby bei größerem Hochwasser nicht durch Messungen vor Ort belegbar, sondern müssen durch Analogieverfahren hergeleitet werden (vgl. Kap. 5.3). Zudem sind derzeit noch nicht quantifizierbare hydraulische Effekte aus der Öffnung des Pretziener Wehrs auf die Wasserstands-Abfluss-Beziehung am Pegel Barby anzunehmen. Vor diesem Hintergrund gelten für diese beiden Pegel bezüglich der hier angegebenen Scheitelwerte (und entsprechend auch der Abflussbilanz Aken/ Calbe/Barby) größere Genauigkeitsspielräume um ca. 5 %.

Hochwasserscheitel der Elbe am 09. Juni dergestalt mit 5 250 m³/s eine neue Dimension in Größenordnung eines $HQ_{100-200}$; diese statistische Klassifizierung verblieb stromab in der Folge bis zum Ästuarbereich unverändert.

Tab. 3.11: HHW-Überschreitungen beim Juni-Hochwasser 2013 an den Bundeswasserstraßen Elbe und Saale (Daten: WSV, ČHMÚ o.J.)

Elbe

Pegelname	Fluss-km	Ereignis Juni 2013 höchster Wasserstand W_{max}		Differenz W_{max} - HHW_{alt}	Höchststände vor 2013 HHW_{alt} *ungehemmt*		HHW_{alt} *gehemmt*	
		[cm üPNP]	Datum/Uhrzeit	[cm]	[cm üPNP]	Datum	[cm üPNP]	Datum
COSWIG	236,31	**766**	**08.06. 11:42**	12	754	18.08.2002		
VOCKERODE	245,62	**792**	**08.06. 14:18**	11	781	18.08.2002		
ROSSLAU	257,84	**694**	**08.06. 21:08**	20	674	18.08.2002		
DESSAU	261,16	**746**	**08.06. 21:58**	30	716	18.08.2002		
AKEN	274,75	**791**	**09.06. 03:02**	25	766	19.08.2002		
BARBY	294,82	**762**	**09.06. 04:48**	29	733	03.04.1845		
MAGDEBURG-BUCKAU	325,39	**752**	**09.06. 07:08**	75	677	19.08.2002		
MAGDEBURG-STROMBRÜCKE	326,67	**747**	**09.06. 07:18**	62	685	03.04.1845	701*	18.02.1941*
ROTHENSEE	333,12	**901**	**09.06. 09:59**	57	844	19.08.2002		
NIEGRIPP AP	343,60	**984**	**09.06. 10:08**	63	921	19.08.2002	953*	16.02.1941*
TANGERMÜNDE	388,26	**838**	**09.06. 22:58**	70	768	20.08.2002		
SANDAU	416,06	**825**	**09.06. 23:22+**	55	770	20.08.2002		
SCHARLEUK	447,22	**769**	**09.06. 13:58**	46	723	20.08.2002		
WITTENBERGE	453,98	**785**	**09.06. 14:43**	51	734	20.08.2002	744*	14.03.1838*
MÜGGENDORF	463,94	**782**	**09.06. 18:25**	44	738	20.08.2002		
SCHNACKENBURG	474,56	**781**	**10.06. 04:11**	30	751	21.08.2002		
LENZEN	484,70	**793**	**10.06. 10:09+**	46	747	02.04.1895	749*	14.02.1862*
DÖMITZ	504,73	**721**	**10.06. 20:30+**	49	672	22.01.2011	754*	23.03.1888*
HITZACKER	522,92	**817**	**11.06. 07:45+**	47	770	22.01.2011		
NEU DARCHAU	536,44	**792**	**11.06. 14:00+**	43	749	09.04.2006+	825*	24.03.1888*
BOIZENBURG	559,46	**732**	**11.06. 22:00**	42	690	23.01.2011		
HOHNSTORF	569,00	**955**	**12.06. 03:45**	12	943	04.03.1876+	988*	20.03.1855*

+ Wert ist noch an weiteren Terminen aufgetreten *** eisbeeinflusst**

Saale

Pegelname	Fluss-km	Ereignis Juni 2013 höchster Wasserstand W_{max}		Differenz W_{max} - HHW_{alt}	Höchststände vor 2013 HHW_{alt} *ungehemmt*		HHW_{alt} *gehemmt*	
		[cm üPNP]	Datum/Uhrzeit	[cm]	[cm üPNP]	Datum	[cm üPNP]	Datum
RÖPZIG	101,90	**400**	**04.06. 19:43+**	45	355	16.01.2011		
TROTHA-UP	89,15	**816**	**05.06. 06:18**	116	700	15.03.1947+		
WETTIN-UP	70,30	**856**	**05.06. 15:29**	47	809	14.03.1941	809*	14.03.1947*
BERNBURG-UP	36,05	**653**	**06.06. 17:23**	63	590	16.03.1947		
CALBE-UP	19,90	**965**	**06.06. 19:59+**	51	914	17.03.1947		

+ Wert ist noch an weiteren Terminen aufgetreten *** eisbeeinflusst**

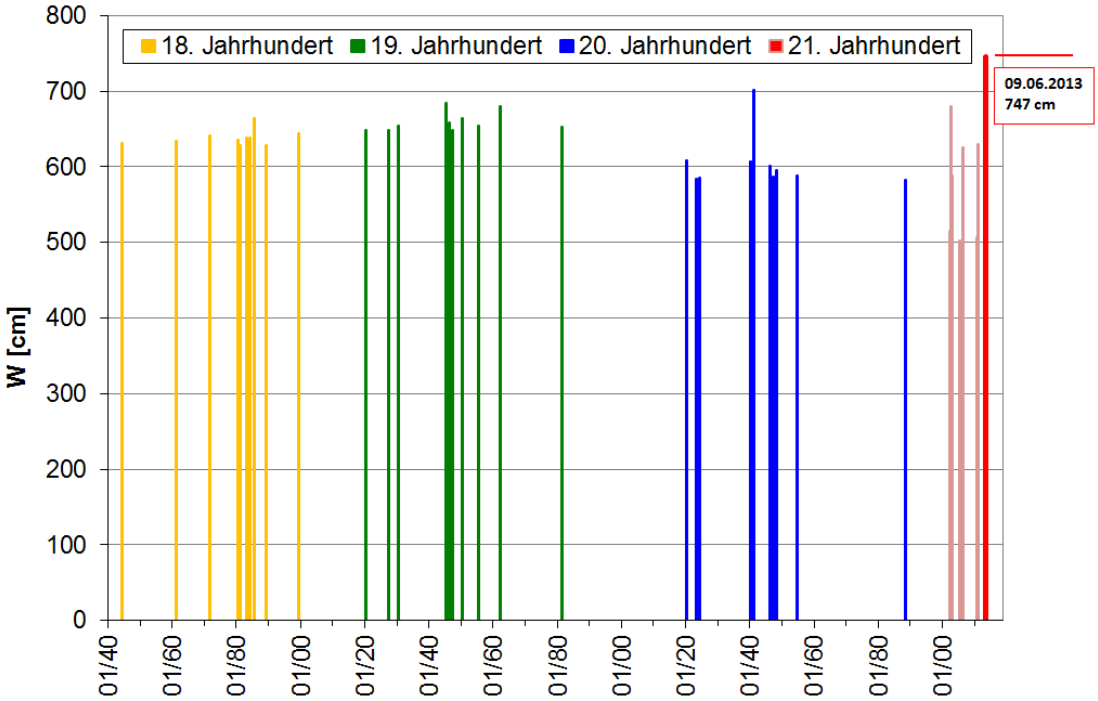


Abb. 3.27: Pegel Magdeburg-Strombrücke (Elbe): Die zehn größten Wasserstandsscheitel pro Jahrhundert seit 1727 (Daten: SIMON 2010, WSV)

Unter nur geringer Abminderung des Scheitels auf 5 140 m³/s durchströmte am gleichen Tag das Hochwasser Magdeburg und die dortige Stromspaltung. Damit verbunden war ein neuer Rekordwasserstand von 747 cm ü.PNP am Pegel Magdeburg-Strombrücke. Ein vergleichbares Scheitelwasserstandsniveau war bislang an diesem Pegel, der schon seit 1727 betrieben wird, niemals registriert worden (Abb. 3.27). Der bisherige HHW (eisfrei) am Pegel Magdeburg wurde so um 46 cm überschritten. Bei der vergleichenden Bewertung dieser Wasserstandsgrafik ist zu beachten, dass hier teilweise Eishochwasser enthalten sind (wie es z.B. beim scheinbar zweithöchsten Ereignis 1941 der Fall war); auch besteht die scheitelmindernde Wirkung des Umflutkanals ab dem Wehr Pretzien (vgl. Kap. 3.5.4) erst seit Mitte des 19. Jahrhunderts. Die historische Dimension der im Juni 2013 in Magdeburg erreichten Hochwasserspitze wird angesichts dessen besonders deutlich.

Deichbrüche, am 09. Juni im Mündungsbereich der Saale bei Breitenhagen (Ortslage Klein Rosenburg) und an der Elbe bei Hohenwarthe nördlich von Magdeburg sowie am 10. Juni an der Elbe unweit des rechtselbischen Dorfes Fischbeck (Elbe-km 388 gegenüber von Tangermünde, rund 60 km nördlich von Magdeburg) geschahen nach dem derzeitigen Stand der Kenntnisse (vgl. Kap. 3.5.4) jeweils unmittelbar nach Durchgang des Elbescheitels und hatten keine direkten Auswirkungen auf die örtlichen Abflussspitzen. Sie minderten trotzdem die Breite des Wellenscheitels sowie das Volumen der Hochwasserwelle und wurden so in gewissem Umfang stromab auch scheitelwirksam. Verglichen mit diesen hatte die bereits am 09. Juni mit Schließung des Durchstichwehrs bei Quitzöbel und Öffnung des Einlaufbauwerks Neuwerben eingeleitete kontrollierte Flutung der Havelniederung (bekannt als „Havelpolder“, vgl. Karte in Abb. 3.31) deutlichere Minderungseffekte auf den Elbescheitel (vgl. Kap. 3.5.4). Der summarische Kappungseffekt wird anhand Abb. 3.24 insbesondere in der

Gangliniendarstellung für den Pegel Wittenberge, nur 16 km unterhalb der Havelmündung gelegen, deutlich. Der Scheiteldurchfluss betrug hier am Nachmittag des 09. Juni 4 330 m³/s.

Die einordnende statistische Bewertung dieses Hochwasserereignisses kann für den stromab der Havel gelegenen Stromabschnitt jedoch nicht anhand der durch gesteuerte und durch unkontrollierte Retention verzerrten Messwerte erfolgen. Vielmehr ist dies (ähnlich wie im Falle der Donau, vgl. Kap. 3.4.2) anhand rückgerechneter Werte ohne die abmindernden Retentionseffekte durchzuführen. Dies geschah hier näherungsweise mittels einer empirisch begründeten Faustformel (gemäß BTU Cottbus, in: BfG 2008). Dabei wird als Bezugswert der HQ am Elbepegel Barby bei Erfüllung bestimmter Rahmenbedingungen im Hinblick auf Wittenberge und Neu Darchau um unterschiedliche Beträge (300 bzw. 470 m³/s) gemindert. Die so „homogenisierten“ Durchflusswerte 4 950 m³/s (Wittenberge) und 4 780 m³/s (Neu Darchau) entsprechen jeweils einem Wiederkehrintervall von 100-200 Jahren (s. auch IKSE 2014).

In der markanten Aufweitung des binnenwärts durch das Wehr Geesthacht abgeriegelten, tidebeeinflussten Mündungstrichters der Unteren Elbe verlor sich die Hochwasserwelle allmählich. Stellte der Wasserstandsscheitel an der Ästuarwurzel am Pegel Geesthacht UP am 12.06.2013 mit 1 143 cm ü.PNP noch den vom 09.04.2006 resultierenden höchsten Tidehochwasserstand (HThw, Bezugsperiode 2001/10) um 40 cm ein und ergab damit eine neue Höchstmarke, so lag rund 12 km elbabwärts am Pegel Zollenspieker am 13. Juni mit 949 cm ü.PNP (= 4,48 m ü.NN) bereits ein Wert vor, der deutlich unter dem bisherigen HThw (1 057 cm ü.PNP aus dem Jahre 2007) blieb. Am 14. Juni kam der Scheitel des Elbehochwassers im Hamburger Hafen an. Der Pegel St. Pauli verzeichnete ein Maximum in Höhe von 793 cm ü.PNP; ein Wert, der sich zwar über dem mittleren Tidehochwasser bewegt, aber kein nennenswertes Extrem mehr darstellt. Grundsätzlich werden Wasserstandshöchstmarken in diesem Ästuarbereich nurmehr durch die im Vergleich zur Binnenelbe über ungleich größeren Wasservolumina verfügende Nordsee ausgelöst. Dies war dann beispielsweise bereits einige Monate später im Jahr der Fall, als am 06.12.2013 am Pegel Hamburg-St. Pauli sturmflutbedingt mit 1 108 cm ü.PNP (= 6,08 m ü.NN) ein Hochwasser eintrat, das dort in dieser Höhe im 21. Jahrhundert noch nicht registriert worden war.

Nach Abschwellen der großen Hochwasserwelle führten ergiebige Regenfälle im oberen Elbegebiet, schwerpunktmäßig in der Tschechischen Republik, zu erneutem Anstieg der Wasserstände und Abflüsse der Binnenelbe (vgl. Abb. 3.24b). Dabei wurde maximal die Meldestufe 2 überschritten, z.B. am Pegel Dresden. Die Dimension des wenige Wochen zuvor abgelaufenen Rekordhochwassers wurde bei weitem verfehlt.

3.5.3 Die Situation in den wichtigsten Nebenflüssen der deutschen Elbe

Schwarze Elster

Obschon es bei ihrer Mündung in die Elbe zu einer vollständigen Scheitelüberlagerung kam, beeinflusste die Hochwasserwelle der Schwarzen Elster das Elbeereignis nur wenig. Die geleisteten Beiträge lagen um 100 m³/s und damit in der Größenordnung eines Wiederkehrintervalles von 5-10 Jahren (Pegel Löben). Neben hydraulisch bedingter Wellenverflachung im Unterlauf hatte sich dabei insbesondere die Ableitung bedeutender Volumina in die Tagebaurestseen und den Senftenberger Speicher im Mittellauf des Flusses entlastend ausgewirkt.

Mulde

Die Hochwasserwelle der Mulde lief derjenigen der Elbe um mehrere Tage voraus (vgl. Abb. 3.28 und Tab. 3.10). Gleichzeitig war das Muldehochwasser durch zahlreiche Deichbrüche gekennzeichnet. Am Pegel Golzern, unterhalb der Vereinigung der Zwickauer mit der Freiberger Mulde gelegen, wurde der Abflussscheitel am Morgen des 03. Juni in Größenordnung eines HQ_{200} (1 980 m³/s) registriert. Der HHQ, zurückgehend auf das Hochwasserextrem des Jahres 2002, liegt an diesem Pegel bei 2 600 m³/s. Eine Folge von Deichbrüchen sowie Versickerungsverluste in den Grundwasserkörper minderten den Hochwasserverlauf flussabwärts; am Pegel Bad Düben 1 wurde am 04.06.2013 mit 1 770 m³/s immer noch ein 50-100-jährliches Ereignis verzeichnet. Der Bruch des linksseitigen Deichs der Vereinigten Mulde mit daraus resultierender Flutung des Seelhausener Sees und später auch des Goitzschesees führte unmittelbar unterhalb von Bad Düben zu einer nachhaltigen Reduzierung der Muldewelle. Gemäß LMBV (2014) wurde dabei in der Spitze muldebezogen ein Abflussverlust in Höhe von 760 m³/s hervorgerufen.

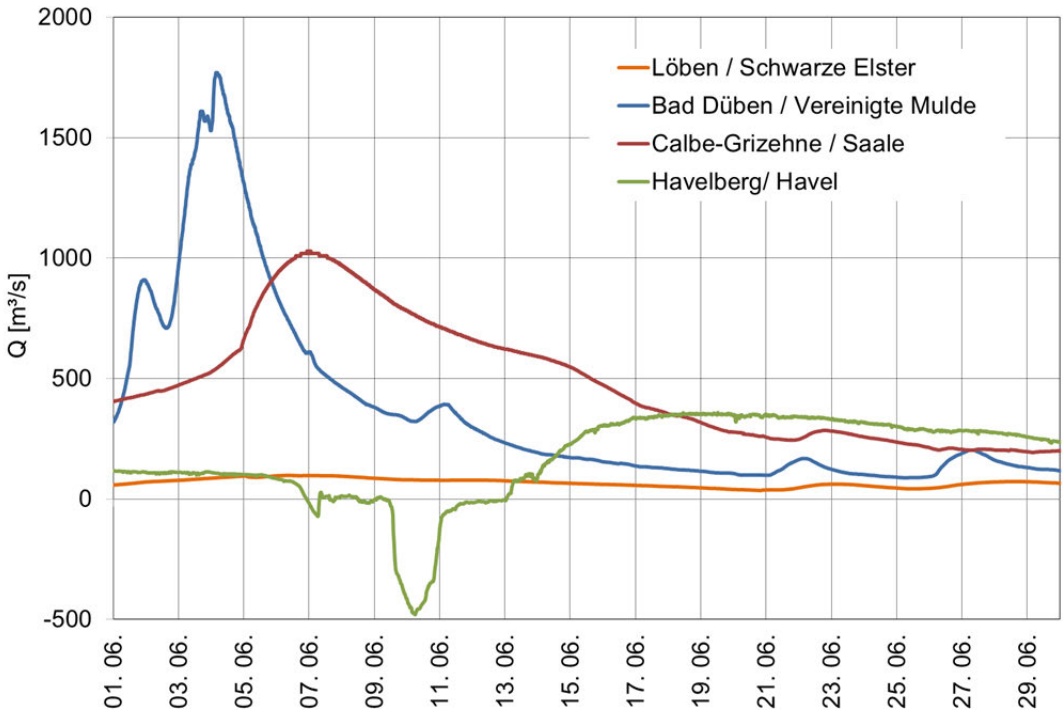


Abb. 3.28: Hochwasser-Abflussganglinien im Juni 2013 an mündungsnahen Pegeln wichtiger Nebenflüsse der deutschen Elbe (Daten: WSV, LfULG)

Diese unkontrollierte, aber trotz allem effektive Scheitelkappung führte zu einer massiven Minderung der Hochwasserwelle, die in der Folge nicht mehr ausgeglichen wurde. Entsprechend stammt der Maximalzufluss der Mulde in die Elbe aus der Zeit vor diesem Deichbruch (Pegel Priorau mit 1 440 m³/s am 03. Juni). Die am 08. Juni im Mündungsbereich der Mulde eintreffende Hochwasserwelle der Elbe erhielt aus dem merklich abgesunkenen Muldehochwasser noch einen Abflussbeitrag von rund 500 m³/s.

Saale

Das Extremhochwasser der Saale nahm nachhaltigen Einfluss auf die Hochwasserwelle des Elbstromes.

Die vielfach bereits bordvollen Fließgewässer im Saalegebiet reagierten auf die ergiebigen Regenfälle, die am 26. Mai 2013 einsetzten, mit ebenso raschem wie verbreitetem Überschreiten der hochwasserbezogenen Richtwerte, zunächst in den Oberläufen von Unstrut, Ilm und Weißer Elster. In der Folge überschritt die Saale bei steigender Tendenz bereits am 27. Mai unterhalb der Unstrutmündung die Hochwassermeldestufe 2. Gleiches erfolgte mit 450 cm ü.PNP in den Nachmittagsstunden des 28. Mai am Pegel Halle-Trotha UP, wo diese Marke dann erst am 16.06.2013 wieder unterschritten wurde. Die Retentionseffekte aus der Talsperrensteuerung (v.a. Bleiloch, Hohenwarte) sowie weitere reduzierende Maßnahmen, z.B. im Raum Leipzig zur Minderung der Hochwasserwellen aus Pleiße und Weißer Elster (vgl. hierzu Kap. 3.5.4) konnten angesichts der fortdauernden intensiven Niederschläge nicht verhindern, dass letztlich auf der gesamten Strecke der Bundeswasserstraße Saale zwischen Bad Dürrenberg und ihrer Mündung in die Elbe die bisherigen HHW[6] überschritten wurden (vgl. Tab. 3.11 und Abb. 3.26).

Prägend dabei war insbesondere der Zustrom der Weißen Elster. Der unterhalb ihrer Einmündung nächstgelegene Saalepegel Halle-Trotha UP verzeichnete am 05. Juni einen Abflussscheitel von 916 m³/s; das entspricht größenordnungsmäßig einem Wiederkehrintervall von 100-200 Jahren. Saaleabwärts stellte sich am Pegel Bernburg UP am 06.06.2013 ein Spitzenabfluss von 940 m³/s (HQ_{100}) ein. Knapp 18 km vor Einmündung in die Elbe am Pegel Calbe-Grizehne wurde am 06. Juni mit einem durch Messungen bestätigten Scheitelabfluss von 1 030 m³/s die Jährlichkeit von 200 a leicht überschritten.

Zwar lief der Saalescheitel der Elbewelle um zweieinhalb Tage voraus, dennoch bedeutete die auch in Abb. 3.28 gut erkennbare langsame Abflachung des Saalehochwassers, dass mit Eintreffen des Elbescheitels immer noch der hohe Beitrag von 820-850 m³/s aus der Saale zufloss.

Havel

Die Havel führte im Juni 2013 kein nennenswertes eigenes Hochwasser. In Abb. 3.28 manifestieren sich allerdings angesichts der Abflussganglinie des Unterlaufpegels Havelberg sehr anschaulich die verschiedenen Phasen der Flutung der Havelniederung: Die ersten leichten Abflussrückgänge entstanden durch Rückstaueffekte aufgrund des Anschwellens der Elbe am 06. Juni mit erster leichter Umkehr der Strömungsrichtung in den Morgenstunden des 7. Juni 2013. Die Schließung des Wehres Quitzöbel am 07. Juni (08:00 Uhr) beendete diese Phase und bewirkte eine Verharrung des Abflusses (bei gleichzeitig steigendem Wasserstand in der

[6] Ungeachtet dessen, dass an der Saale kontinuierlicher Pegelbetrieb z.T. bereits seit der ersten Hälfte des 19. Jh. bestand, beginnen die heute gültigen Beobachtungs- und Bezugszeiträume der Saalepegel frühestens in den 30er-Jahren des 20. Jh. (1932 und später). Grund hierfür ist die massive Beeinflussung des Abflussregimes der Saale durch Speicherbau (v.a. Bleiloch- und Hohenwartetalsperre) und der hydraulischen Verhältnisse durch den Wasserstraßenausbau (Zeitraum 1932-43). Gemäß FAIST (2013) ergibt eine Umrechnung alter HHW an alten Saaleschleusen auf das heutige Höhenbezugssystem folgende Zahlen: Halle-Trotha UP: 945 cm ü.PNP (02.03.1830) / Bernburg UP: 707 cm ü.PNP (15.3.1881) / Calbe UP: 940 cm ü.PNP (15.03.1881). Auch wenn die heutigen Gewässerbedingungen mit den damaligen nicht mehr vergleichbar sind, ergibt sich angesichts dessen eine gute Vorstellung darüber, inwieweit sich in früheren Zeiten bereits gewaltige Hochwasserereignisse im Saalegebiet eingestellt hatten.

Havel, hier nicht dargestellt). Hohe negative Abflüsse (d.h. entgegen der natürlichen Fließrichtung) bis ca. -500 m³/s waren dann am 09. Juni durch die Hochwasserentlastung aus der Elbe nach Öffnung des Neuwerbener Einlasses zu registrieren. Die Rückführung der zwischengespeicherten Poldervolumina nach Beendigung des Flutungsmanövers wurde mit zurückgehender Elbewelle stetig effektiver und erreichte ihr Maximum mit rund 350 m³/s im Zeitraum 18. bis 22. Juni.

3.5.4 Auswirkungen gesteuerter und ungesteuerter Retention auf den Hochwasserverlauf in der deutschen Elbe

Beim Junihochwasser 2013 erfolgten im Elbegebiet zahlreiche Steuerungsmaßnahmen zur Absenkung der Hochwasserwellen (d.h. kontrollierte bzw. gesteuerte Retention); zugleich waren mehrfach auch ungesteuerte Retentionseffekte zu konstatieren, in aller Regel durch Deichbrüche. Die entlastende Wirkung dieser verschiedenen Aktionen und Ereignisse wurde zeitnah im Rahmen einer Ad-hoc-Untersuchung durch die BfG anhand von Rohdaten analysiert. Abb. 3.29 zeigt die Ergebnisse für die Erhöhung der Scheitelwasserstände entlang der Elbestrecke, wie sie aufgetreten wäre, wenn einzelne (oder alle) Retentionseffekte nicht gewirkt hätten.

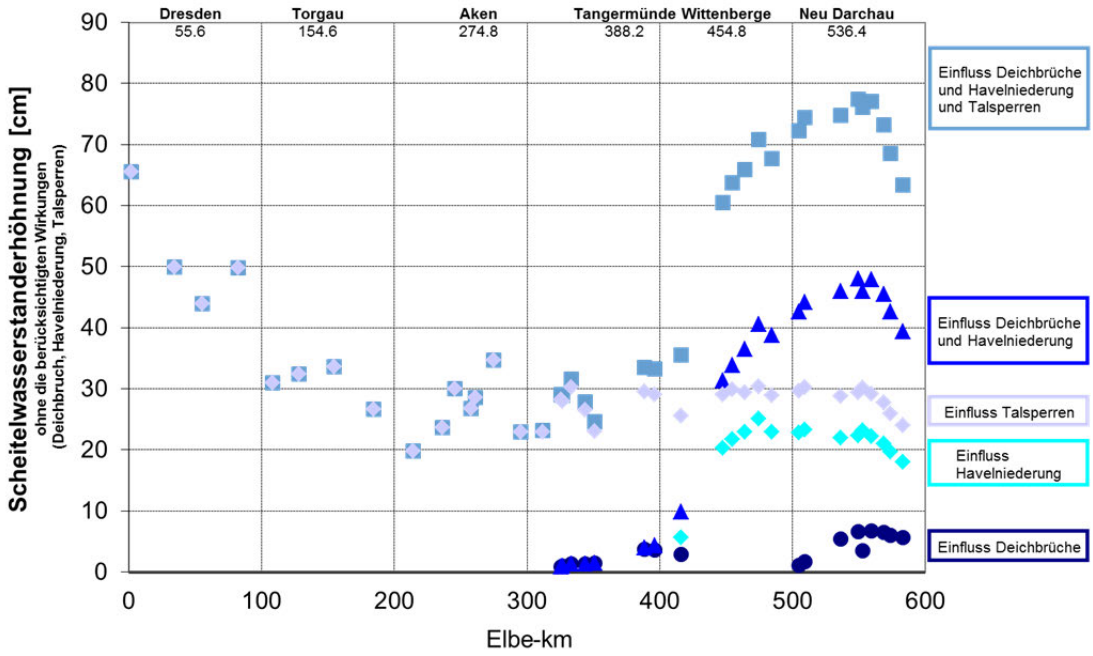


Abb. 3.29: Modellierte Scheitelwasserstandsänderungen an der Elbe während des Juni-Hochwassers 2013 für unterschiedliche Szenarienberechnungen (Talsperren im tschechischen und im Saale-Einzugsgebiet, Deichbrüche Breitenhagen und Fischbeck sowie Havelpolder) (BfG 2013a)

Gesteuerte Retention: Talsperren und Stauanlagen

Über die großen Talsperren im tschechischen Einzugsgebiet der Elbe, der Moldau (sog. Moldaukaskade) und der Eger (vor allem Talsperre Nechranice) ist eine substanzielle Beeinflussung von Hochwasserabflüssen möglich. Die Steuerung der Talsperren, welche in der Regel als Mehrzweckspeicher (Wasserversorgung, Energieerzeugung, Hochwasserschutz) betrieben

werden, erfolgt im Hochwasserfall mit dem Ziel, im Gewässerabschnitt unterhalb der Stauanlage den Abfluss schadlos abzuführen (HQ_1 bis HQ_5). Die Wirkung des zeitlich befristeten Wasserrückhalts entfaltet sich dabei nicht nur unmittelbar unterstrom der Maßnahme, sondern kann großräumig auf der gesamten deutschen Elbestrecke bis vor die Tore Hamburgs reichen (BfG 2012). Die im Rahmen der Ad-hoc-Untersuchungen zum Hochwasser 2013 in Kooperation mit dem T.G. Masaryk Water Research Institute (CZ) durchgeführten Modellberechnungen im August 2013 gehen von einer erreichten Reduktion des Scheitelabflusses am grenznahen, tschechischen Pegel Ustí nad Labem von ca. 550 m³/s aus (BfG 2013a). Dieses Ergebnis wird in der Größenordnung durch die Berechnungen bestätigt, die auf Basis konsolidierter Datengrundlagen im offiziellen tschechischen Untersuchungsbericht im Juni 2014 veröffentlicht wurden. Dort wird eine erreichte Reduktion des Scheitels von 434 m³/s am Pegel Ustí nad Labem angegeben (Ministerstvo životního prostredí 2014).

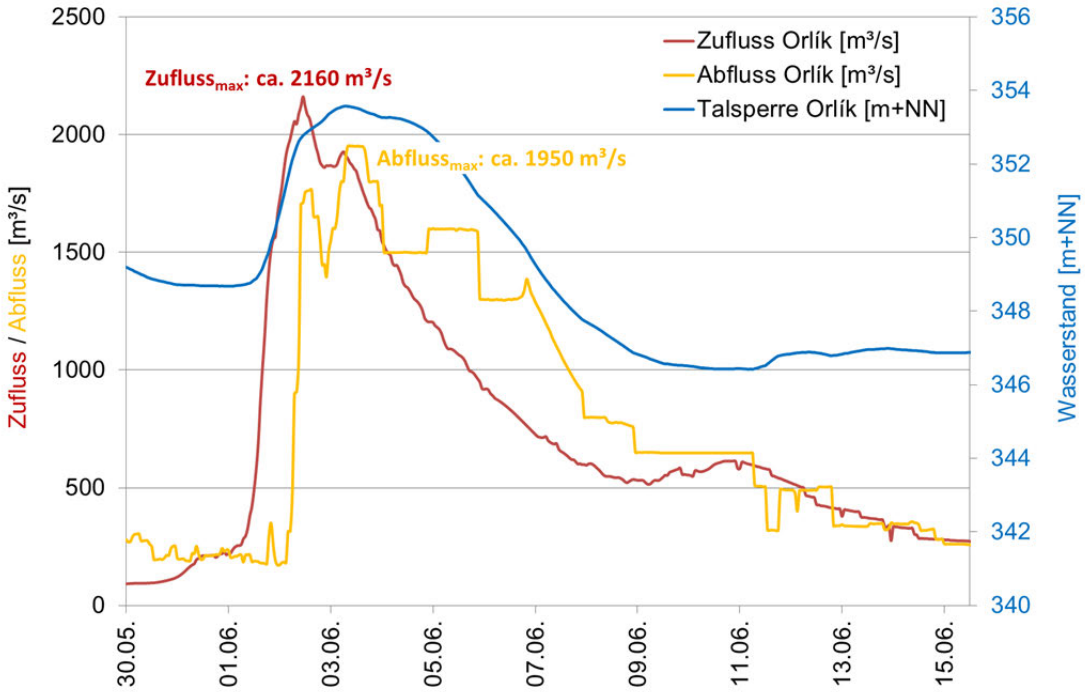


Abb. 3.30: Steuerung der Talsperre Orlík beim Hochwasser im Jahr 2013 (Datenquelle: T.G. Masaryk Water Research Institute, Prag)

Die Berechnungen der Ad-hoc-Untersuchungen durch die BfG im August 2013 ergeben für die deutsche Elbestrecke eine Abminderung des Scheitels von annähernd 70 cm am Pegel Schöna (Elbe-km 2,1). Zusammen mit der Wirkung der thüringischen Talsperren (s.u.) verbleibt von dieser Wirkung unterstrom der Saalemündung noch eine Reduktion von ca. 20 cm bis ca. 30 cm (vgl. Abb. 3.29, Symbol: Raute, hell-lila). Informationen zur Steuerung der einzelnen Talsperren (vgl. Abb. 3.30, Talsperre Orlík), der dabei zurückgehaltenen Volumina (am Pegel Ustí nad Labem aus Ganglinienvergleich ermittelt: ca. 105 Mio. m³; die Summe der Einzelvolumina ist deutlich höher) und der erzeugten Einzelwirkungen sind – basierend auf Rohdaten – in BfG (2013d) dargestellt und in konsolidierter Form dem offiziellen tschechischen Untersuchungsbericht zum Hochwasser 2013 zu entnehmen (Ministerstvo životního prostredí 2014).

Auch im sächsischen und sachsen-anhaltinischen Einzugsgebiet der Elbe sorgten zahlreiche Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken dafür, dass der Wellenablauf und die Scheitelabflüsse der Elbenebenflüsse maßgeblich beeinflusst wurden. Stellvertretend sollen an dieser Stelle die Hochwasserrückhaltemaßnahmen im Gebiet der Weißen Elster und der Pleiße aufgeführt werden, die – oberhalb von Leipzig gelegen – einen bedeutenden Beitrag nicht allein zum Schutz der größten sächsischen Stadt, sondern auch flussab für Saale und Elbe geleistet haben. So wurde der Scheitelabfluss der Pleiße durch den Stauanlagenkomplex Sebitz-Regis/ Borna um 273 m³/s reduziert und dabei ein Volumen von 36 Mio. m³ zurückgehalten (FGG Elbe 2013). Durch die Flutung des Tagebaurestlochs „Zwenkauer See“ konnte die Weiße Elster um weitere 20 Mio. m³ Wasser entlastet werden, was eine Scheitelreduktion von 130 m³/s zur Folge hatte. Insgesamt wurden im Großraum Leipzig 80 Mio. m³ des Hochwassers zurückgehalten (LfULG 2014).

Eine Aufstellung aller sächsischen Talsperren und ihrer Steuerung während des Hochwassers 2013 findet sich in LfULG (2014). Eine genaue Evaluierung hinsichtlich der Beeinflussung des Hochwasserwellenablaufs und der Scheitelhöhe in der Elbe konnte bislang nicht durchgeführt werden.

In ähnlicher Weise wie die tschechischen Reservoire haben auch die großen thüringischen Talsperren „Bleiloch“ und „Hohenwarthe“ an der Saale zu einer deutlichen Reduktion des Scheitelabflusses geführt. Insgesamt wurden im Talsperrensystem 50 Mio. m³ Wasser zurückgehalten, was am unterhalb der Saalekaskade gelegenen Pegel Kaulsdorf zu einer Scheitelabflussreduktion von ca. 170 m³/s führte. Die gesamtheitliche Wirkung der Saaletalsperren und der tschechischen Talsperren auf die Elbe unterhalb der Saalemündung wurde bereits anhand Abb. 3.29 beschrieben. Informationen zur Steuerung und Wirkung der weiteren thüringischen Talsperren finden sich in TLUG (2013).

Gesteuerte Retention: Deviationen

Zum Schutz des Großraums Magdeburg wurde am 03.06.2013 das Pretziener Wehr geöffnet. Das Wehr (Abzweig bei Elbe-km 300,8) trennt bei Niedrig- und Mittelwasser die östlich der Elbe gelegene Niederung von der Stromelbe ab und verhindert somit das Abfließen von Wasser aus der Stromelbe. Bei Hochwasser wird das Wehr jedoch geöffnet, um einen Teil des Abflusses der Stromelbe noch vor der Magdeburger Stadtstrecke in die dortige Niederung (den sogenannten „Umflutkanal“) abzuschlagen. Dieses Wasser fließt erst unterhalb von Magdeburg der Stromelbe wieder zu. Messungen (BfG 2014) und modellgestützte Berechnungen (BfG 2013a) kommen zum Schluss, dass im Maximum ca. 1 300 m³/s des Elbeabflusses durch den Umflutkanal geleitet wurden. Aus dem Vergleich der beiden Abflusskurven für den Pegel Magdeburg-Strombrücke (geöffneter Zustand / geschlossener Zustand) ergibt sich somit für den Scheitelabfluss in Magdeburg eine bedeutende Scheitelreduktion von 1,50 m. Neueste, bisher unveröffentlichte Erkenntnisse der BfG legen die Vermutung nahe, dass eine positive Wirkung dieser Maßnahme nicht nur nach unterstrom vorhanden ist, sondern auch am oberhalb des Abzweigs des Umflutkanals gelegenen Pegel Barby (Elbe-km 295) besteht und wasserstandsmindernd wirkt. Hier werden Scheitelreduktionen in der Größenordnung von wenigen Dezimetern für möglich erachtet.

Gesteuerte Retention: Polder

Durch die Flutung des Havelschlauchs und der Polder in der Havelniederung (vgl. auch Kap. 3.5.3 und Abb. 3.29, zur Lage im Raum vgl. Abb. 3.31) wurden (ohne Vorfüllung) etwa 92 Mio. m³ des maximal verfügbaren Retentionsvolumens von 285 Mio. m³ mit Elbe- und Havelwasser eingestaut. Dabei wurde durch die Steuerung der Wehrgruppe Quitzöbel nicht nur Wasser aus der Elbe in die Havel geleitet, sondern auch Eigenwasser der Havel zurückgehalten.

Die modellgestützten Untersuchungen der BfG zeigen, dass ohne die Flutung der Havelniederung beim Hochwasser 2013 trotz der Deichbrüche (s.u.) ein um mehr als 20 cm höherer Scheitelwasserstand an den Pegeln der unteren Mittelelbe (Wittenberge, Neu Darchau, Hohnstorf, …) zu verzeichnen gewesen wäre (vgl. Abb. 3.29, Symbol: Raute - mintgrün). Die Deichbrüche selbst hatten beim Poldereinsatz keinen Einfluss auf das Kappungsziel (d.h. den angestrebten Wasserstand), durch ihr Auftreten konnte die Kappungsdauer jedoch deutlich reduziert werden, so dass das ursprünglich geplante Volumen in der Havelniederung nicht vollständig in Anspruch genommen werden musste.

Hätten weder Deichbrüche noch die Flutung der Havelniederung stattgefunden, dann wäre am Pegel Wittenberge ein um 34 cm höherer, weiter stromab sogar ein um 45 cm höherer Wasserstand zu erwarten gewesen (vgl. Abb. 3.29, Symbol: blaue Dreiecke). Die durch die instationäre Überlagerung beider Effekte berechneten Auswirkungen sind somit deutlich größer als die Summe der Einzelwirkungen aus Deichbrüchen (wenige cm) und Flutung der Havelniederungen (ca. 20 cm).

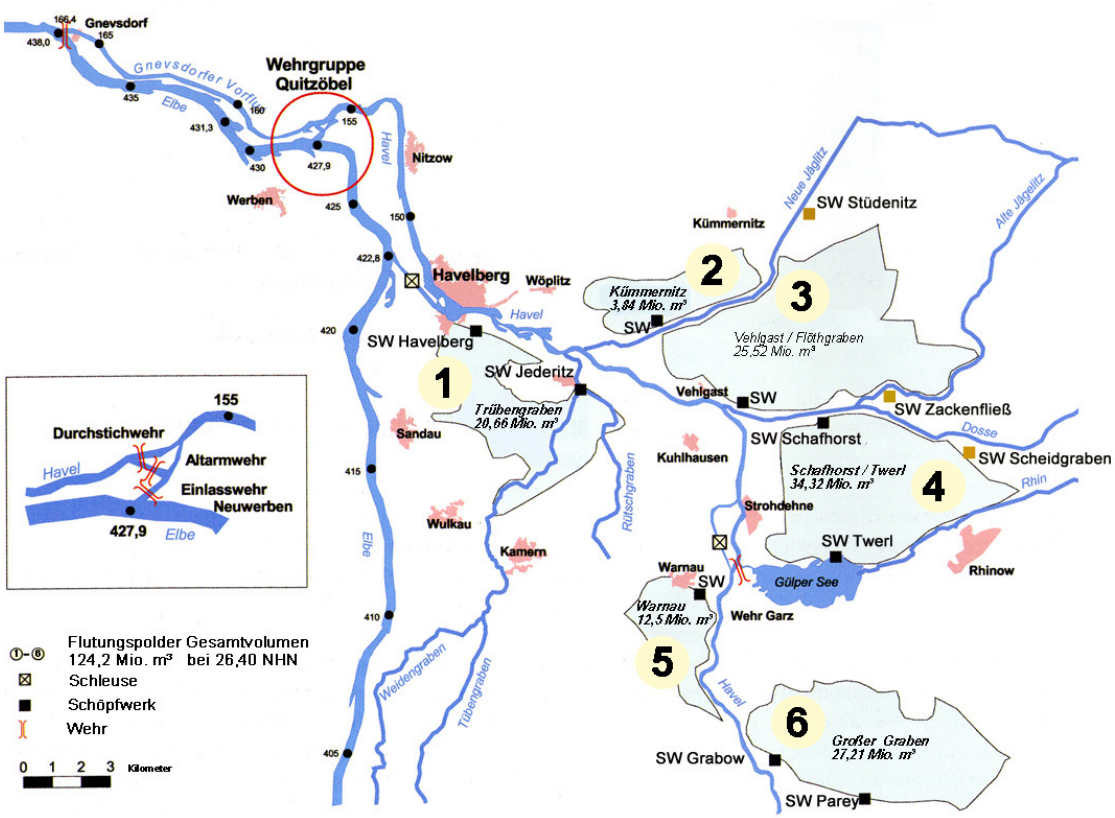


Abb. 3.31: Lagekarte der Havelpolder (Quelle: WSV)

Ungesteuerte Retention: Deichrückverlegung

Bei Lenzen an der unteren Mittelelbe (Elbe-km 476,7-483,7) wurde im Rahmen des Renaturierungsprojektes Elbtalaue eine Rückverlegung der Deichlinie in die Wege geleitet, wodurch dem Strom ca. 420 ha des ehemaligen Überschwemmungsgebietes wieder bereitgestellt und die lokalen Durchflussverhältnisse erheblich verbessert wurden. Durch Messungen bestätigte 2D-Modellierungen der BfG (PROMNY et al. 2014) zeigen, dass aufgrund dieser seit dem Jahr 2009 fertiggestellten Deichrückverlegung (DRV) eine erhebliche Absenkung des Scheitelwasserstandes stattfand. Die hierdurch bewirkte maximale Reduzierung gegenüber dem Zustand ohne DRV betrug dabei 49 cm am oberstromigen Rand der Maßnahme. Am rund 23 km elbaufwärts liegenden Pegel Wittenberge belief sich die modellierte Absenkung noch auf etwa 8 cm (Abb. 3.32). Auf die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit hat die Maßnahme hingegen so gut wie keine Auswirkung. Die Differenz der Eintrittszeitpunkte des Scheitels war nahezu null. Die Form der Hochwasserwellen mit bzw. ohne DRV ist identisch (vgl. Abb. 3.33). Dies lässt sich durch das im Vergleich zum Abflussvolumen der Hochwasserwelle geringe zusätzliche Volumen erklären, das durch die Durchströmung der DRV aktiviert wird.

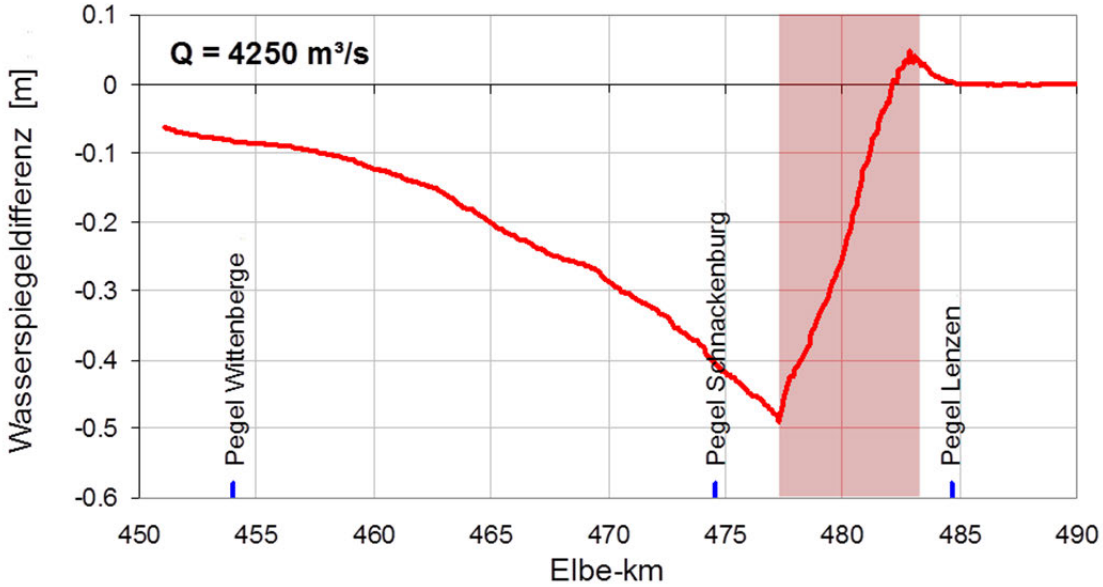


Abb. 3.32: Längsschnitt der Wasserspiegeldifferenz entlang der Gewässerachse der Elbe aus den Zuständen mit und ohne Deichrückverlegung Lenzen für den Maximalabfluss des Hochwassers 2013 (stationäre Rechnung).
Der Bereich der DRV ist farblich hinterlegt.

Ebenfalls durch die Maßnahme Lenzen verändert wird die lokale Strömungsrichtung durch das seitliche Ausleiten eines Teils des Hochwasserabflusses. Im Bereich der Rückleitung im unteren Bereich der DRV treten erhöhte Fließgeschwindigkeiten längs und quer zur Hauptströmungsrichtung auf. Lokal sind die Geschwindigkeiten um bis zu 1,4 m/s gegenüber dem Zustand ohne DRV erhöht. Am linken Ufer sowie unterhalb von Elbe-km 484 hingegen sind die Differenzen der lokalen Fließgeschwindigkeit zum Zustand ohne DRV vernachlässigbar klein. Am Zusammenfluss der Anteile aus dem Elbe-Hauptstrom und dem DRV-Gebiet bei ca. Elbe-km 483,5 kommt es infolge der Querströmungskomponente zu einer geringfügigen Behinderung des Abflusses und in deren Folge zu einem lokalen Aufstau von bis zu 5 cm.

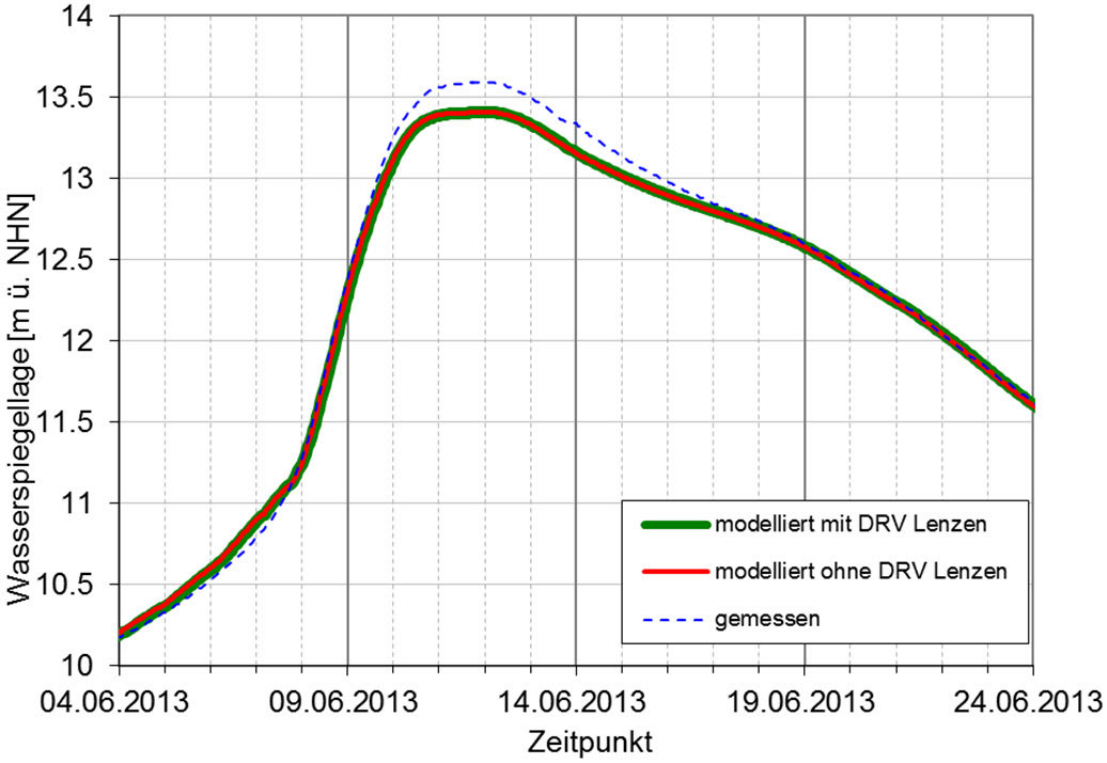


Abb. 3.33: Modellierte Wasserstandsganglinie am Pegel Neu Darchau mit (grün) bzw. ohne (rot) Deichrückverlegung Lenzen. Zum Vergleich die gemessene Ganglinie am Pegel Neu Darchau (blau)

Ungesteuerte Retention: Deichbrüche

Im Vergleich zum Hochwasser 2002 traten im Juni 2013 an der Elbe oberhalb der Saalemündung und an den Nebenflüssen deutlich weniger Deichbrüche oder Deichüberströmen auf. In Sachsen waren an der Mulde neunzehn (beim Hochwasser 2002 waren dies mehr als hundert) und an der Schwarzen Elster drei Deichbrüche. Auf dem sächsischen Elbeabschnitt kam es insgesamt zu fünf Deichbrüchen (vgl. Abb. 3.34), die teilweise den lokalen Hochwasserscheitel beeinflussten, wie z.B. am Pegel Riesa. Hier wurde am 06. Juni bei einem Wasserstand von 932 cm ohne den Deichhinterlandabfluss ein Durchfluss von 3 448 m³/s direkt gemessen. Mit dem Deichhinterlandabfluss dürfte der Scheiteldurchfluss 2013 ca. 4 000 m³/s betragen haben (IKSE 2014).

Zwischen der Mündung der Schwarzen Elster und der Saale fanden überhaupt keine Deichbrüche statt; hier hielten die Elbedeiche den Belastungen durch das Hochwasser stand.

Am Unterlauf der Saale kurz vor ihrer Mündung in die Elbe nahe dem Schöpfwerk Breitenhagen (Ortslage Klein Rosenburg) sowie an der Elbe bei Fischbeck (Elbe-km 388) traten am 09. Juni (um 08:05 Uhr) bzw. 10. Juni („um Mitternacht“, ca. 00:05 Uhr) zwei Deichbrüche auf. Beide ereigneten sich im Scheitelbereich. Ein Abgleich der Ganglinien der jeweils stromab nächstgelegenen Pegel Barby und Tangermünde auf Basis hochaufgelöster Messwerte legt den Schluss nahe, dass sich beide Ereignisse unmittelbar *nach* Scheiteldurchgang zugetragen haben und somit lokal nicht HQ-scheitelwirksam waren (Abb. 3.35a und Abb. 3.35b). Abschließende modellgestützte Untersuchungen auf konsolidierter Datengrundlage als Beleg dieser vorläufigen Annahme stehen noch aus.

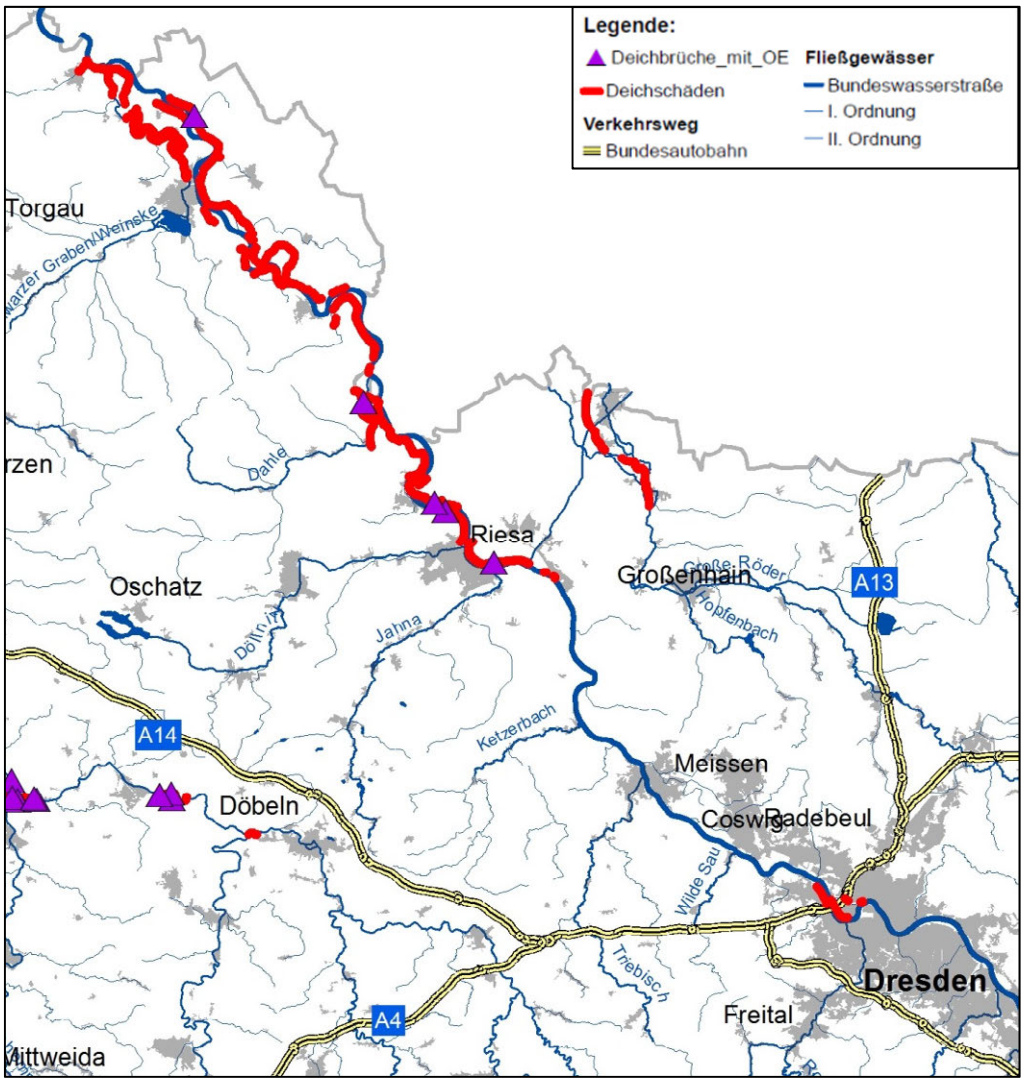


Abb. 3.34: Hochwasserbedingt beschädigte Deiche (rote Linien) und Deichbrüche (lila Dreiecke) an der sächsischen Elbestrecke (Quelle: LTV Sachsen)

Bezüglich der Deichbrüche in Sachsen-Anhalt vom 09. Juni bei Breitenhagen/Klein Rosenburg (Rückhalt ca. 40 Mio. m³) bzw. 10. Juni bei Fischbeck (geschätzter Rückhalt etwa 210 Mio. m³, vgl. Abb. 3.36) wurden mittels Rohdaten modellgestützte Szenarioberechnungen zur großräumigen Wirkung dieser Ereignisse durchgeführt. Die Berechnungen basieren auf Annahmen für das Vorhersagemodell WAVOS zur zeitlichen Entwicklung der in Folge der Deichbrüche ins Hinterland eingeströmten Wasservolumina (BfG 2013d) und den Resultaten weiterer Ad-hoc-Überflutungssimulationen im Auftrag der BfG (Geomer 2013).

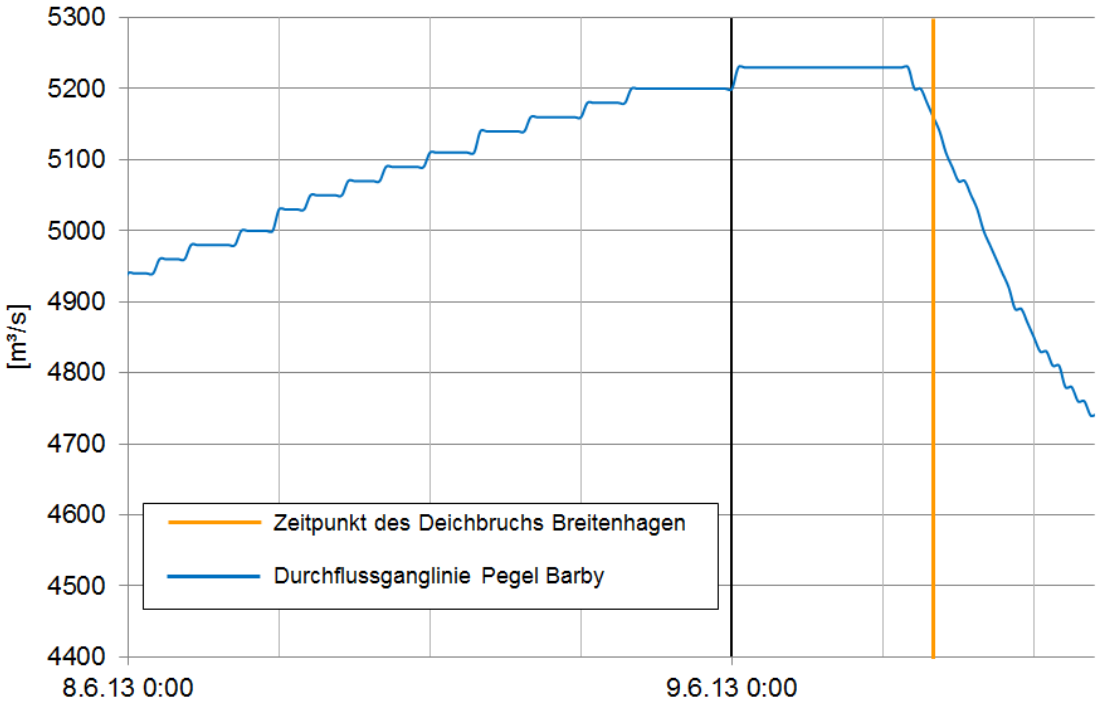


Abb. 3.35a: Pegel Barby: Deichbrucheffekt im Bereich des Hochwasserscheitels

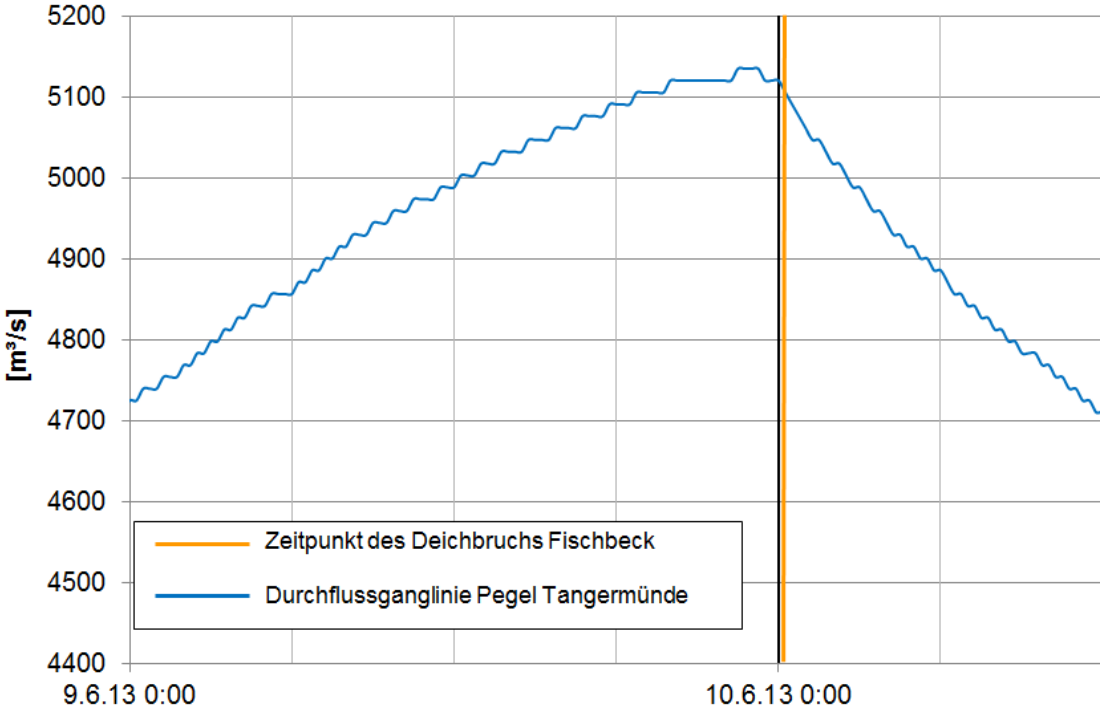


Abb. 3.35b: Pegel Tangermünde: Deichbrucheffekt im Bereich des Hochwasserscheitels

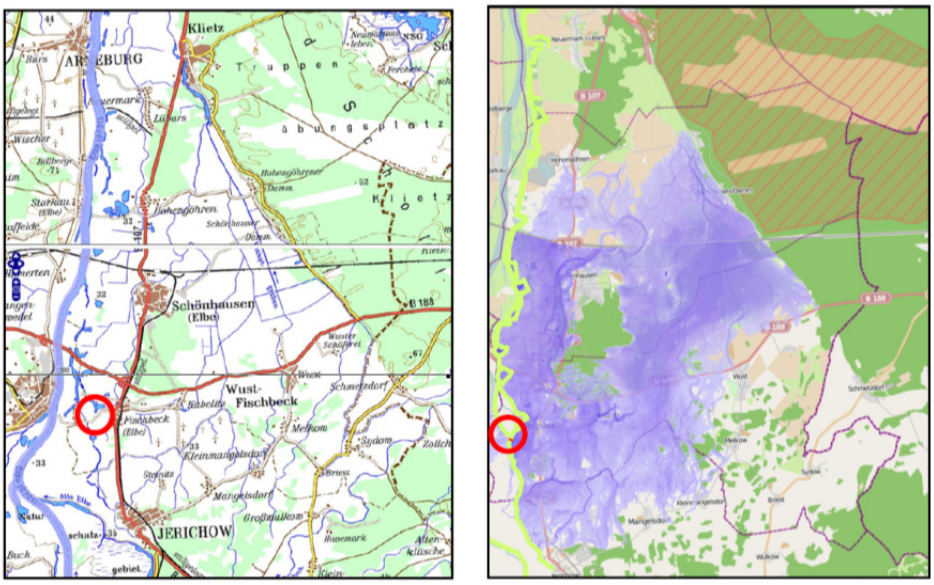


Abb. 3.36: Lage des Deichbruchs bei Fischbeck (links) und Ergebnis einer quasi-operationell vorgenommenen Überflutungssimulation der BfG (rechts)
(Quelle links: Vermessungsverwaltungen der Bundesländer und BKG)

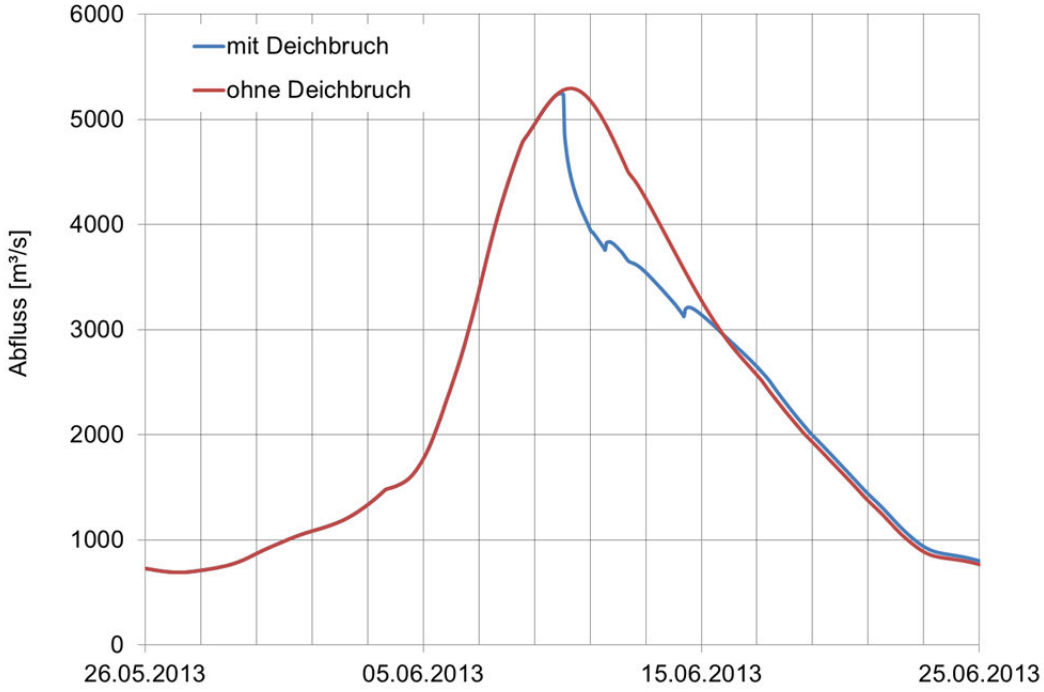


Abb. 3.37: Vergleich von rohdatenbasierten Modellberechnungen (SOBEK-Modell) am Pegel Tangermünde mit und ohne Berücksichtigung der Deichbrüche Breitenhagen (Saale) und Fischbeck (Elbe)

Die Ergebnisse der Ad-hoc-Simulationen (BfG 2013a, Abb. 3.37) zeigen, dass ohne die beiden Deichbrüche die Scheitelwasserstände an der unteren Mittelelbe beim Hochwasser 2013 nur unwesentlich höher gelegen hätten (nämlich bis maximal 6 cm; siehe Abb. 3.29, Symbol: blaue Kreise). Im Großen und Ganzen bestätigen sie somit die Schlussfolgerungen bezüglich der zeitlichen Deichbruchsituation, die aus den Messdaten (Abb. 3.35a und Abb. 3.35b) gezogen wurden: Hätten die Deichbrüche jeweils *vor* dem örtlichen Scheitelstand stattgefunden, wären die o.g. Wasserstandsminderungen stromab deutlicher als 6 cm ausgefallen.

Darüber hinaus hätte eine länger anhaltende Flutungsdauer der Havelniederung (die vor Eintreten des Deichversagens bei Fischbeck zunächst geplant war, die aber angesichts der dort auftretenden ungewollten Entlastung bei Elbe-km 388 verkürzt werden konnte) einen vergleichbaren Hochwasserstand bewirkt. Die Wirkung der Deichbrüche ist somit unterhalb der Havelmündung durch die Flutung der Havelniederung überprägt worden. Allerdings haben die Deichbrüche das langgestreckte Scheitelplateau der Elbewelle deutlich (nämlich um einen bis zwei Tage) verkürzt (vgl. Abb. 3.37)

3.5.5 Fazit Elbegebiet

Mit Ausnahme einiger Regionen an seinem nordöstlichen Rand war im Juni 2013 nahezu das gesamte Einzugsgebiet der Elbe von Hochwasser betroffen. Während dabei das Ereignis im oberen Elbegebiet trotz seines enormen Ausmaßes die Größenordnung des Rekordhochwassers des Jahres 2002 unterschritt (vgl. Tab. 3.12), baute sich im weiteren Verlauf in der Mittelelbe eine Hochwasserwelle auf, die alle bis dato durch regelmäßige Pegelaufzeichnungen dokumentierten Ereignisse in den Schatten stellte.

Tab. 3.12: Das Juni-Hochwasser 2013 an wichtigen Pegeln an der Elbe im Ereignisvergleich (Datenquelle: WSV)

	2002	2006	2011	2013	
	HQ [m³/s]	HQ [m³/s]	HQ [m³/s]	Scheitel-Abfluss [m³/s] (Datum)	Wieder-kehr-intervall [Jahre]
Dresden	4 580	2 870	2 280	3 950 (06.06.2013)	50-100
Barby	4 320 *	3 180	2 830	5 250 (09.06.2013)	100-200
Magdeburg	4 180 *	3 670	3 720	5 140 (09.06.2013)	100-200
Wittenberge	3 830 *	3 720	3 790	4 330 ** (09.06.2013)	100-200 ***
Neu Darchau	3 420 *	3 600	3 600	4 080 ** (11.06.2013)	100-200 ***

* retentionsgeminderte Originalwerte

** retentionsgeminderte Originalwerte. Der retentionsbereinigte Durchfluss beträgt 4 950 (Wittenberge) und 4 780 m³/s (Neu Darchau).

*** bezogen auf den retentionsbereinigten Durchfluss (4 950 bzw. 4 780 m³/s)

Gestützt durch die Hochwasser in der Mulde und insbesondere in der Saale wurde für die Scheitelabflüsse ab dem Pegel Barby die Größenordnung eines Wiederkehrintervalls von 100-200 Jahren erreicht und bis zum Wehr Geesthacht gehalten (Tab. 3.12). Zwischen den Pegeln Coswig (Sachsen-Anhalt) und Geesthacht OP wurden bei Scheiteldurchgang auf dieser rund 350 km langen Strecke der Binnenelbe neue eisunbeeinflusste Pegelhöchststände (HHW) registriert.

Lokale Kappungseffekte sowie überregional substanzielle Scheitelabminderungen aufgrund des Zusammenwirkens aller kontrollierten und unkontrollierten Rückhalteeffekte in Höhe von bis zu 75 cm (Pegel Neu Darchau) sind nachweisbar. Jedoch konnten weder Deichbrüche noch gesteuerte Retentionsmaßnahmen das Gesamtausmaß des Hochwassers entscheidend beeinträchtigen. Angesichts des durch die andauernden, flächendeckenden und intensiven Niederschläge gewaltig anwachsenden Abflussvolumens wurde deutlich, dass hydrologische Ereignisse einer derartigen Dimension nur in begrenztem Umfang beherrschbar sind.

4 Sediment-, Stoffhaushalt und Schadstoffbelastung an Bundeswasserstraßen

Tanja Bergfeld-Wiedemann, Gudrun Hillebrand, Gerd Hübner, Carmen Kleisinger, Wilfried Otto, Andreas Schöl, Sönke Schriever, Birgit Schubert, Daniel Schwandt, Carsten Viergutz

Die Themen Sedimenthaushalt, Sauerstoffhaushalt und Schadstoffbelastung sind fachlich eng verbunden. Beispielsweise besteht in der Mittelelbe ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Schwebstoffgehalt und dem Gehalt an organischer Substanz, der sich wiederum auf den Sauerstoffgehalt auswirkt. Die Frachten partikulär gebundener Schadstoffe hängen von der transportierten Menge an Feinsedimenten (Schwebstofffracht) ab. Entsprechende Bezüge werden in den folgenden Unterkapiteln durch Querverweise hergestellt.

An den Bundeswasserstraßen bestehen verschiedene behördliche Dauermessnetze zur Erfassung der Wasserbeschaffenheit und von Stoffströmen. Während des Juni-Hochwassers 2013 wurde an einigen Dauermessstellen die Probenahmefrequenz erhöht, an der Elbe wurde ein Sondermessprogramm zur Schadstoffbelastung durchgeführt. Zur Beurteilung der Verhältnisse beim Hochwasser 2013 stehen je nach Flussgebiet Daten relevanter Kenngrößen in unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Dichte zur Verfügung. Daher erfolgt nachstehend eine Einzeldarstellung der verschiedenen Themenbereiche.

4.1 Sedimenthaushalt

Zum Sedimenthaushalt der Bundeswasserstraßen während des Hochwasserereignisses im Mai/Juni 2013 liegen Messungen der Schwebstoffkonzentrationen aus dem Schwebstoffdauermessnetz der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) vor. Geschiebefrachten während des Hochwassers wurden nicht erfasst. Es wurden außerdem keine Peilungen der Gewässersohle mit dem Ziel einer Erfassung von Änderungen des Gewässerbetts zum Zweck der Bilanzierung von großräumigen Veränderungen aufgrund des Hochwassers durchgeführt.

4.1.1 Messmethodik

Das Schwebstoffmessnetz der WSV an den Bundeswasserstraßen im Binnenbereich wird von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) fachtechnisch betreut. Es basiert auf einer werktäglichen Entnahme von Schöpfproben an der Wasseroberfläche der Gewässer (Einpunktmessung) durch die örtlichen Stellen der WSV. An einem durch die BfG vordefinierten Punkt des Gewässerquerschnittes findet eine Entnahme mit einem 5-l-Schöpfgefäß statt. Jede Schöpfprobe wird direkt an der Messstelle mit einem zuvor in der BfG registrierten und gewogenen Papierfilter filtriert. Die Filtertüten werden getrocknet an das Feststofflabor der BfG gesandt. Im Klimaraum des Feststofflabors der BfG werden die Filtertüten klimatisiert. Nach Erreichen der Gewichtskonstanz wird durch Bestimmung der Gewichtsdifferenz unter Berücksichtigung des Probenvolumens die Schwebstoffkonzentration in mg/l bestimmt. Im

Ergebnis liegen also werktägliche Tagesstichproben der Schwebstoffkonzentration vor. Durch die Probenahme an den Arbeitstagen der örtlichen Stellen der WSV kann es vorkommen, dass entscheidende Werte (z.B. Maximalwert bei Hochwasser) nicht erfasst werden. Kleine Lücken in den Messreihen (z.B. Wochenenden) werden üblicherweise automatisch durch lineare Interpolation geschlossen. Größere Lücken bleiben bestehen.

Im Rheingebiet liegen zusätzlich an wenigen Messstellen kalibrierte Trübungsmessungen vor. Hier wird die Trübung des Gewässers kontinuierlich durch eine oberflächennah installierte Sonde erfasst. Zusätzlich werden in regelmäßigen Abständen Wasserproben zur Kalibrierung entnommen, mit geringerer Probenahmefrequenz in Zeiten niedriger Schwebstoffkonzentration und höherer Probenahmefrequenz bei Hochwasserereignissen. Alle Wasserproben werden ins Feststofflabor der BfG transportiert, wo zur Ermittlung der Schwebstoffkonzentration eine einheitliche Probenaufbereitung und Unterdruckfiltration mit Celluloseacetatfiltern stattfindet. Durch die Kalibrierung liegen an diesen Messstellen kontinuierliche Informationen (15-min-Werte) der Schwebstoffkonzentration vor. Dargestellte Tageswerte sind in diesem Fall Tagesmittelwerte im Gegensatz zu den Tagesstichprobenwerten aus dem herkömmlichen Schwebstoffdauermessnetz.

4.1.2 Schwebstofffrachten Rheingebiet

In Abb. 4.1 sind die aus den Schwebstoffkonzentrationen ermittelten Tageswerte der Schwebstofffracht ausgewählter Messstellen im Rhein während des Hochwasserereignisses dargestellt. In der Darstellung wurde auf die übliche Interpolation bei kleineren Datenlücken, z.B. am Wochenende, verzichtet. Im Hochrhein (Messstellen Reckingen Rhein-km 90,2 und Albbruck-Dogern km 108,9) ist beispielsweise zu vermuten, dass die Maximalwerte der Schwebstoffkonzentration bzw. -fracht wegen des Wochenendes (01./02. Juni) nicht erfasst wurden. Zu erkennen sind weitere fehlende Messwerte am Feiertag (30. Mai, Fronleichnam) oder bei der Messstelle Emmerich (km 851,9) auch im Bereich des Hochwasserscheitels. In der Darstellung sind zwei Messstellen enthalten, an denen über kalibrierte Trübungssonden kontinuierliche Daten vorliegen (Iffezheim km 333,0 und Koblenz KAA km 590,3). Für diese Messstellen sind Tagesmittelwerte der Fracht dargestellt.

Die mit dem Hochwasser im Rhein transportierten Frachten lagen im Mittel im Bereich von rund 20 % einer durchschnittlichen Jahresfracht über einen Zeitraum von 10 Tagen. Als maximale Tagesfracht wurden in Koblenz rund 118 000 Tonnen ermittelt.

Der Zeitpunkt des Auftretens der höchsten Schwebstofffracht liegt häufig vor dem Hochwasserscheitelwert. Da der Maximalwert des Abflusses bei diesem Ereignis am Hochrhein und Oberrhein am Wochenende bzw. am Montag auftrat, lässt sich für dieses Ereignis aufgrund der fehlenden Schwebstoffwerte kein Vergleich der zeitlichen Abfolge ziehen. An der Messstelle Koblenz KAA wurde beobachtet, dass die Scheitelwerte der Schwebstoffkonzentration sowie der -fracht etwa 4 Stunden vor dem maximalen Abfluss auftraten (nicht dargestellte Daten). Die Schwebstoffkonzentrationen fielen nach dem Scheitel sehr viel schneller wieder ab als der Abfluss. Insofern kann das Ereignis als typisch betrachtet werden. In der Grafik ist zu erkennen, dass bereits am Beginn des Oberrheins (Messstelle Weil km 173,0) hohe Frachten auftraten. Dies deutet auf hohe Schwebstoffeinträge aus dem voralpinen und dem alpinen Raum hin. Entlang der staugeregelten Strecke des Oberrheins nahmen die Frachten leicht ab, was auf einen Nettorückhalt in der staugeregelten Strecke hinweist. Im weiteren Verlauf ab der Messstelle Nierstein (km 480,6) nahmen die Frachten durch die Einträge aus den Neben-

flüssen wieder zu. In Abb. 4.2 sind die Tageswerte der Schwebstofffracht an den mündungsnächsten Messstellen in Nebenflüssen des Rheins dargestellt. Als wesentliche Schwebstofflieferanten bei diesem Hochwasserereignis sind vor allem Neckar und Main zu nennen. Die in der Mosel ablaufende Hochwasserwelle mit erhöhten Schwebstofffrachten lag zeitlich versetzt. Zum Zeitpunkt der höchsten Abflüsse und Frachten im Rhein waren die Einträge aus der Mosel schon deutlich zurückgegangen. Die höchste Schwebstofffracht in der Mosel während des Hochwasserereignisses wurde mit ca. 26 000 Tonnen am 21. Mai 2013 beobachtet. Zum Ende des dargestellten Zeitraums erkennt man einen erneuten Anstieg der Schwebstofffracht in der Mosel, verursacht durch ein weiteres kleineres Hochwasserereignis. Der Frachtwert am 21. Juni ist gleichzeitig der Maximalwert dieses Ereignisses.

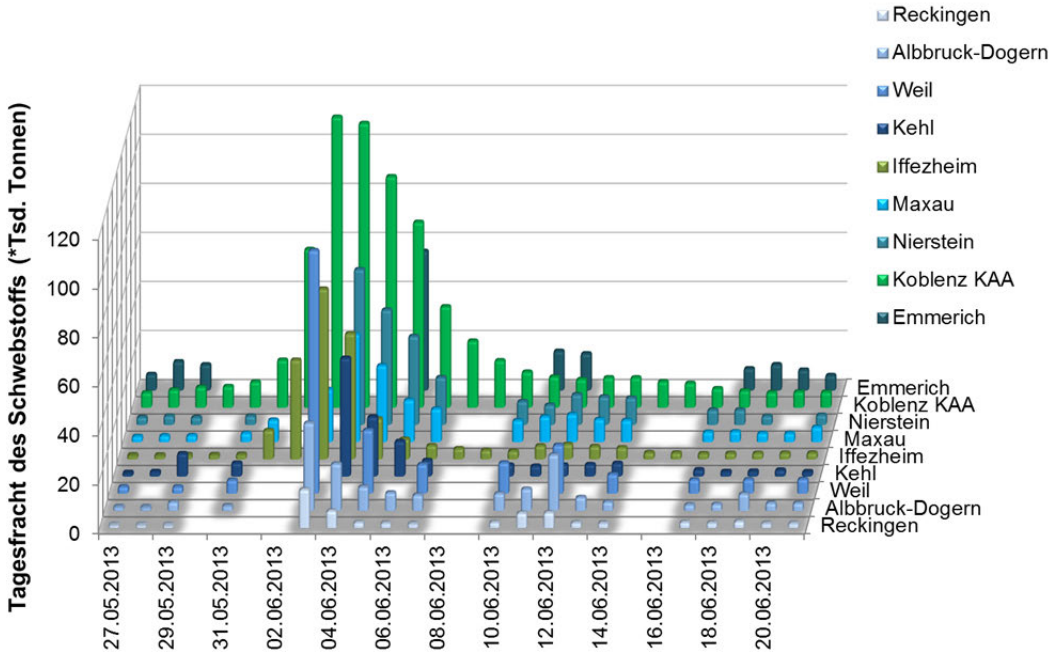


Abb. 4.1: Tageswerte der Schwebstofffracht im Rhein zwischen dem 27. Mai und dem 21. Juni 2013. Die Messstellen sind in Fließrichtung angeordnet.

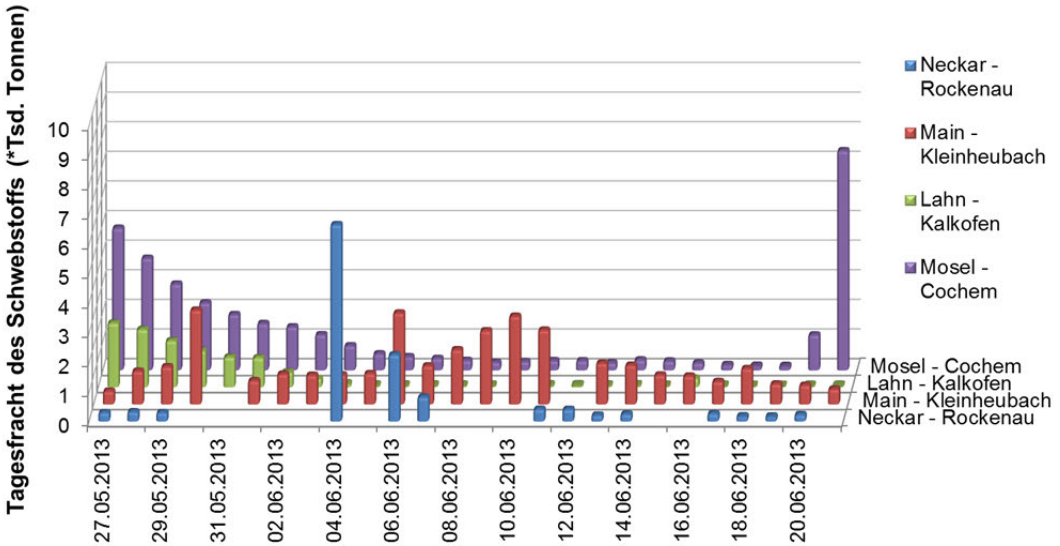


Abb. 4.2: Tageswerte der Schwebstofffracht von Nebenflüssen des Rheins zwischen dem 27. Mai und dem 21. Juni 2013. Dargestellt sind jeweils die mündungsnächsten Messstellen.

4.1.3 Schwebstofffrachten Donaugebiet

Abb. 4.3 zeigt die Tageswerte der Schwebstofffracht ausgewählter Messstellen an der Donau sowie von Isar und Inn (Daten des Bayerischen LfU). Für die Nebenflüsse wurden jeweils die mündungsnächsten Messstellen ausgewählt. Die Messreihe von Passau wurde wegen Messlücken fließzeitkorrigiert durch die Daten von Wasserburg ergänzt. Die Abbildung macht deutlich, dass die größten Frachtanteile in der Donau aus dem Inn stammten. Die geringere gemessene Fracht in der Donau unterstrom der Innmündung im Vergleich zur Fracht des Inns in Mündungsnähe kann durch Messunsicherheiten (Verwendung unterschiedlicher Messsysteme) begründet, aber auch durch Schwebstoffrückhalt im Staubereich und in den Überschwemmungsgebieten durch die großflächige Überflutung der Vorländer verursacht sein.

Bei Jochenstein (Donau-km 2 203,1) betrug die Schwebstofffracht innerhalb von 10 Tagen (31.05. bis 09.06.) ca. 2,1 Mio. Tonnen und damit zwei Drittel einer durchschnittlichen Jahresfracht.

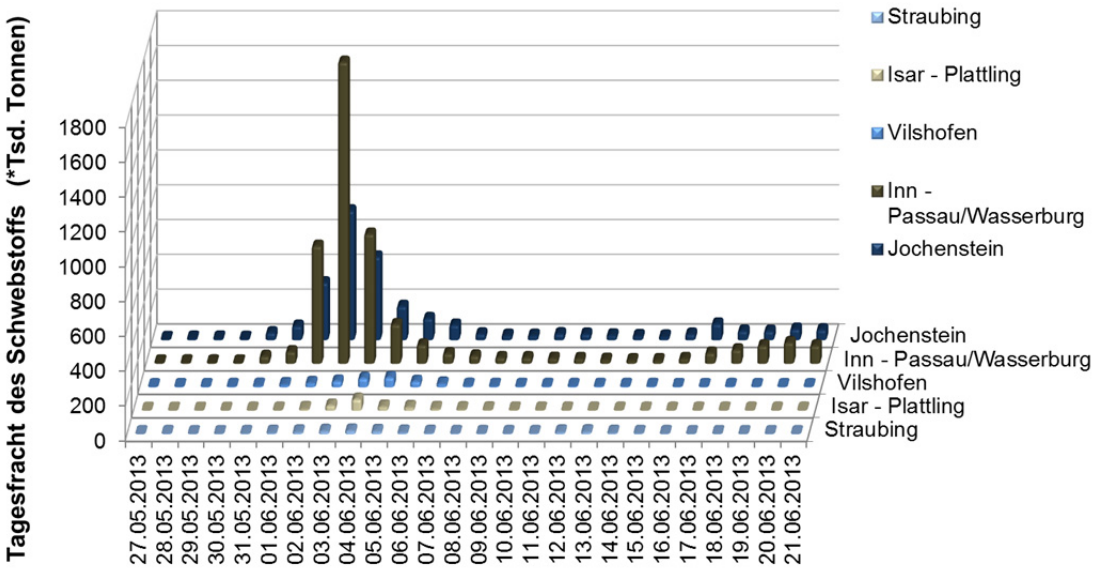


Abb. 4.3: Tageswerte der Schwebstofffracht der Donau zwischen dem 27. Mai und dem 21. Juni 2013. Dargestellt sind außerdem die mündungsnächsten Messstellen von Isar und Inn (Daten des Bayerischen LfU).

4.1.4 Schwebstofffrachten Wesergebiet

Vorhandene Schwebstoffmessdaten (Tagesstichproben) für das Wesergebiet aus dem Messnetz der WSV sind in Abb. 4.4 dargestellt. Die Frachten aus Fulda und Werra, jeweils gemessen in Hann. Münden, führten zu hohen Schwebstofffrachten in der Weser bei Höxter (km 69,4). Von Höxter bis Nienburg (km 268,1) nahmen die Frachten tendenziell ab, was möglicherweise auf Sedimentrückhalt in den Stauhaltungen zurückzuführen ist. Die kumulierte Frachtdifferenz und damit der abgeschätzte Rückhalt der Schwebstoffe zwischen Höxter und Nienburg über das gesamte Hochwasserereignis liegen im Bereich von rund 5 000 Tonnen. Zwischen Nienburg und Intschede (km 329,5) nahmen die Frachten u.a. aufgrund des Zuflusses der Aller wieder signifikant zu.

Die Maximalwerte der Fracht traten an den meisten Messstellen im Wesergebiet am 28. Mai auf. Der Abflussscheitelwert wurde hingegen an den meisten Messstellen erst am 31. Mai erreicht. Wie auch im Rhein beobachtet gab es also einen Versatz zwischen Abfluss- und Frachtspitze. In der Weser war diese Tendenz in diesem Hochwasserereignis noch deutlicher ausgeprägt als im Rhein. Als Ursache kommt beispielsweise eine Erosion von im Fluss zwischengespeicherten Feinsedimenten mit der anlaufenden Hochwasserwelle in Frage.

Die Frachten im Wesergebiet lagen über einen Zeitraum von 10 Tagen gerechnet (27.05. bis 05.06.) im Bereich von rund 10 bis 20 % einer durchschnittlichen Jahresfracht. Für Fulda und Werra wurde in diesem Zeitraum jeweils eine Schwebstofffracht von rund 20 000 Tonnen gemessen, was etwa 19 bzw. 29 % einer durchschnittlichen Jahresfracht entspricht. Entlang des Fließwegs nahm dieser Prozentsatz stetig ab bis zur Messstelle Intschede, an der die Fracht von etwa 52 000 Tonnen über 10 Tage noch rund 11 % einer durchschnittlichen Jahresfracht entsprach.

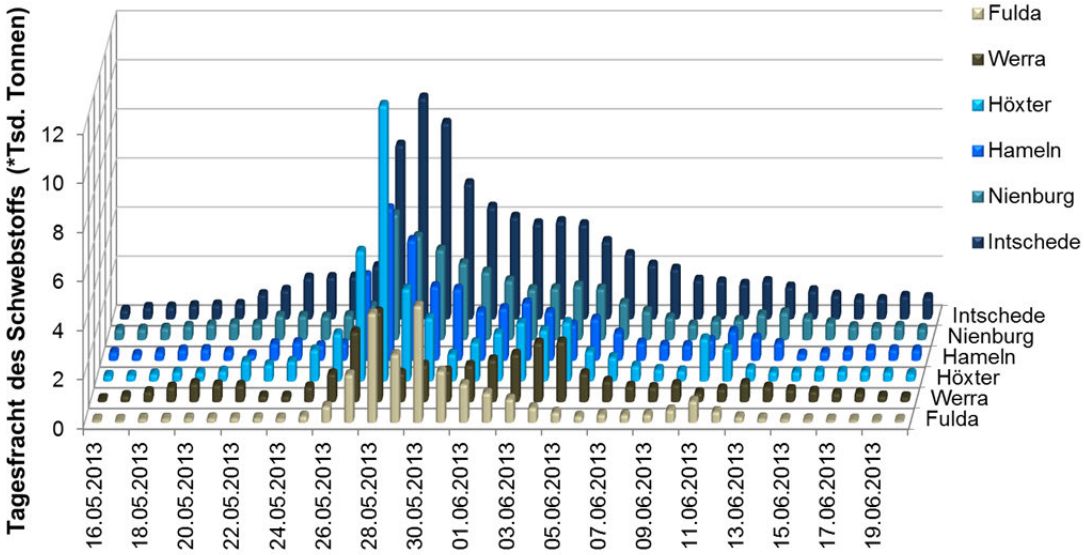


Abb. 4.4: Tageswerte der Schwebstofffracht im Wesergebiet zwischen dem 16. Mai und dem 20. Juni 2013. Die Messstellen sind in Fließrichtung angeordnet.

4.1.5 Schwebstofffrachten Elbegebiet

Neben dem Schwebstoffmessnetz der WSV stehen im Elbegebiet weitere Datenquellen zur Bestimmung der Schwebstofffracht zur Verfügung. Zur Plausibilisierung und Vervollständigung der Zeitreihen einzelner Messstellen bei Datenlücken wurden für diesen Bericht die Daten von Gütemessstellen der Bundesländer Sachsen (LfULG), Sachsen-Anhalt (LHW) und Brandenburg (LUGV) und des „Messprogramms Extremereignisse“ der FGG Elbe verwendet (vgl. Kapitel 4.3). Die ermittelten Tageswerte der Schwebstofffracht entlang der Elbe sind in Abb. 4.5 dargestellt.

Aus der Darstellung wird deutlich, dass die vom Oberlauf herrührende Schwebstoffwelle bei Pirna (Elbe-km 34,7) im weiteren Verlauf der Elbe von Frachten aus Zuflüssen überlagert wurde. Die Schwebstofffrachten stiegen zwischen Pirna und Torgau (Elbe-km 154,0) ab dem 05. Juni durch Einträge aus den sächsischen Nebengewässern deutlich an. Zwischen Torgau und Wittenberg (km 216,3) gingen die Frachten zurück und nahmen bis Aken (km 274,8)

bzw. Barby (km 294,8) durch die Zuflüsse von Mulde und Saale wieder zu. Im weiteren Verlauf entlang der Messstellen Magdeburg (km 326,6), Tangermünde (km 389,1), Wittenberge (km 454,6) bis Hitzacker (km 522,6) war ein stetiger Rückgang der Frachten zu beobachten. Abb. 4.6 zeigt deshalb die Tageswerte der Schwebstofffracht noch einmal in umgekehrter Reihung der Messstellen (entgegen der Fließrichtung). In dieser Abbildung werden der Frachtrückgang ab Barby sowie die zeitliche Verschiebung der Schwebstoffwelle entlang des Fließwegs deutlich. Der Frachtrückgang ist auf einen Rückhalt der Sedimente vor allem in den Überflutungsflächen zurückzuführen.

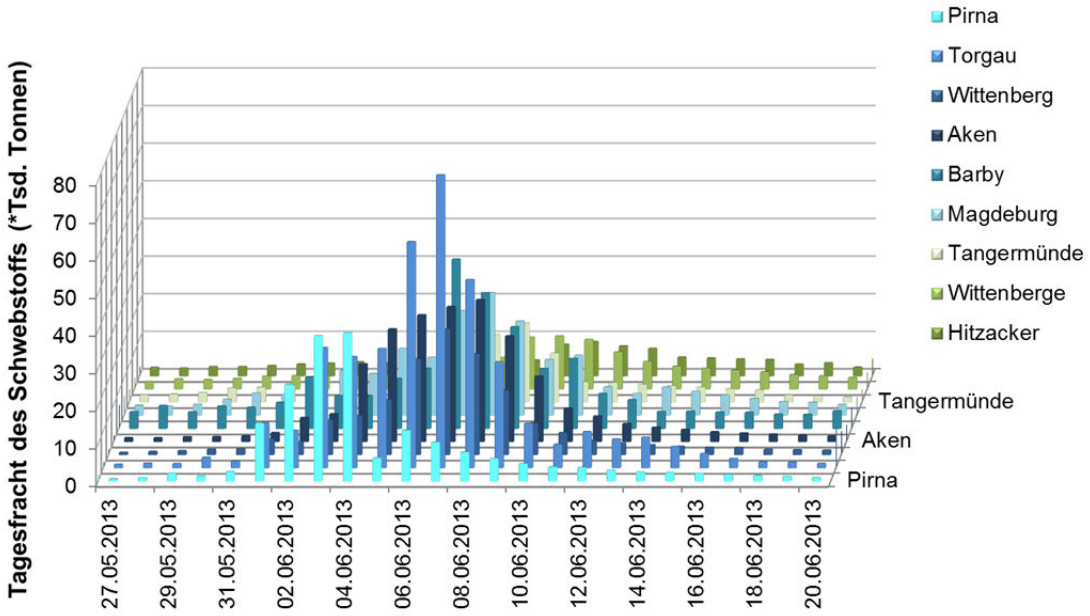


Abb. 4.5: Tageswerte der Schwebstofffracht im Elbegebiet zwischen dem 27. Mai und dem 20. Juni 2013. Die Messstellen sind in Fließrichtung angeordnet.

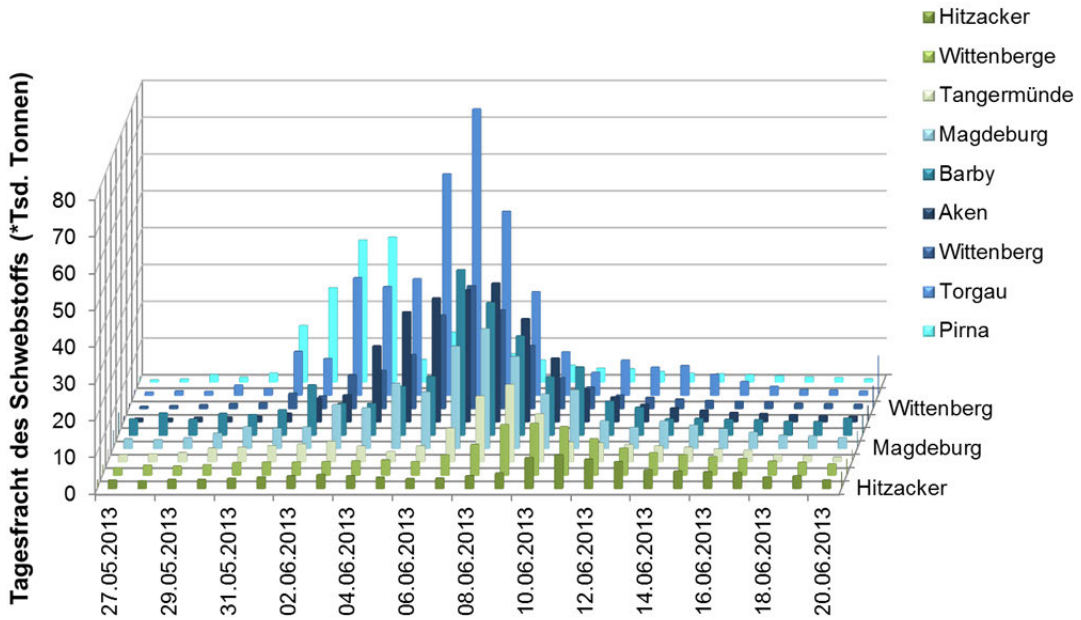


Abb. 4.6: Tageswerte der Schwebstofffracht im Elbegebiet zwischen dem 27. Mai und dem 20. Juni 2013. Anordnung der Messstellen entgegen der Fließrichtung.

Im Schnitt lief die Schwebstoffwelle der Abflusswelle etwa um einen Tag voraus, d.h. die Scheitelwerte der Schwebstofffracht traten im Mittel einen Tag vor den Scheitelwerten des Abflusses auf. Die Scheitelwerte der Schwebstoffkonzentration traten im Mittel sogar noch früher auf (bis zu 4 Tage vor dem Abflussscheitelwert). Eine Ausnahme bilden die unterstrom gelegenen Messstellen Tangermünde, Wittenberge und Hitzacker. Hier traten aufgrund der großflächigen Vorlandüberflutungen oberhalb des Teilabschnittes nur gering erhöhte oder sogar rückläufige Schwebstoffkonzentrationen während des Hochwasserereignisses auf. Die höchsten Frachten wurden deshalb zeitgleich mit dem Abflussscheitel beobachtet.

Die höchste Tagesfracht des Hochwasserereignisses wurde in Torgau mit ca. 78 000 Tonnen beobachtet. In Abb. 4.7 sind über das Hochwasserereignis Gesamtschwebstofffrachten im Längsschnitt der Elbe im Vergleich zu einer mittleren Jahresfracht auf Basis der Zeitreihen zwischen 1992 bis 2012 dargestellt. Dafür wurden die Tagesschwebstofffrachten jeder Messstelle über einen Zeitraum von etwa 4 Wochen aufsummiert. Im Maximum lag die Gesamtschwebstofffracht des Hochwasserereignisses im Bereich von ca. 80 % einer mittleren Jahresfracht (Torgau, Aken). An den weiteren Messstellen im Bereich von Pirna bis einschließlich Magdeburg lagen die Gesamtfrachten im Bereich von ca. 50 % einer mittleren Jahresfracht. Zur unteren Mittelelbe hin fällt der Anteil stetig bis auf 18 % an der Messstelle Hitzacker. In der Grafik werden noch einmal der starke Anstieg der Frachten während des Hochwasserereignisses 2013 durch die sächsischen Nebengewässer sowie der überdurchschnittlich starke Anstieg durch den Muldezufluss deutlich. Im Bereich des Saalezuflusses dagegen war entgegen dem typischen Jahreslängsschnitt während dieses Hochwasserereignisses nur ein vergleichsweise geringer Frachtanstieg zu beobachten, was vermutlich auf starken Rückhalt von Feinsedimenten in den Überflutungsflächen sowohl im Saalegebiet als auch im Bereich der Elbe zwischen Aken und Barby zurückzuführen ist. Der Rückhalt an Feinsedimenten in den Überflutungsflächen zwischen Barby und Hitzacker über das gesamte Ereignis hinweg lag in der Größenordnung von 190 000 Tonnen. Der Frachtrückgang zwischen Torgau und Wittenberg betrug ca. 210 000 Tonnen.

Abb. 4.8 verdeutlicht am Beispiel der Messstelle Hitzacker die vergleichsweise geringen Schwebstoffkonzentrationen während des Hochwasserereignisses in der unteren Mittelelbe. Dargestellt sind die Schwebstoffkonzentrationen im Jahresverlauf sowie die zugehörigen Abflüsse am Bezugspegel Neu Darchau. Die Grafik zeigt eine allmähliche Zunahme der Schwebstoffkonzentrationen ab April 2013 bis zum Anstieg des Abflusses der Hochwasserwelle am 03. Juni 2013. Mit dem steigenden Abfluss fielen die Konzentrationen von 37 mg/l ab und erreichten das Jahresminimum der Schwebstoffkonzentration von 4 mg/l am 03. und 08. Juli in der ablaufenden Hochwasserwelle. Anschließend nahmen die Schwebstoffkonzentrationen wieder deutlich zu und erreichten Werte im Bereich von 60 bis 80 mg/l (max. 99 mg/l am 28. August). Im September fielen die Werte wieder ab und pendelten sich auf einem Niveau um 20 mg/l ein.

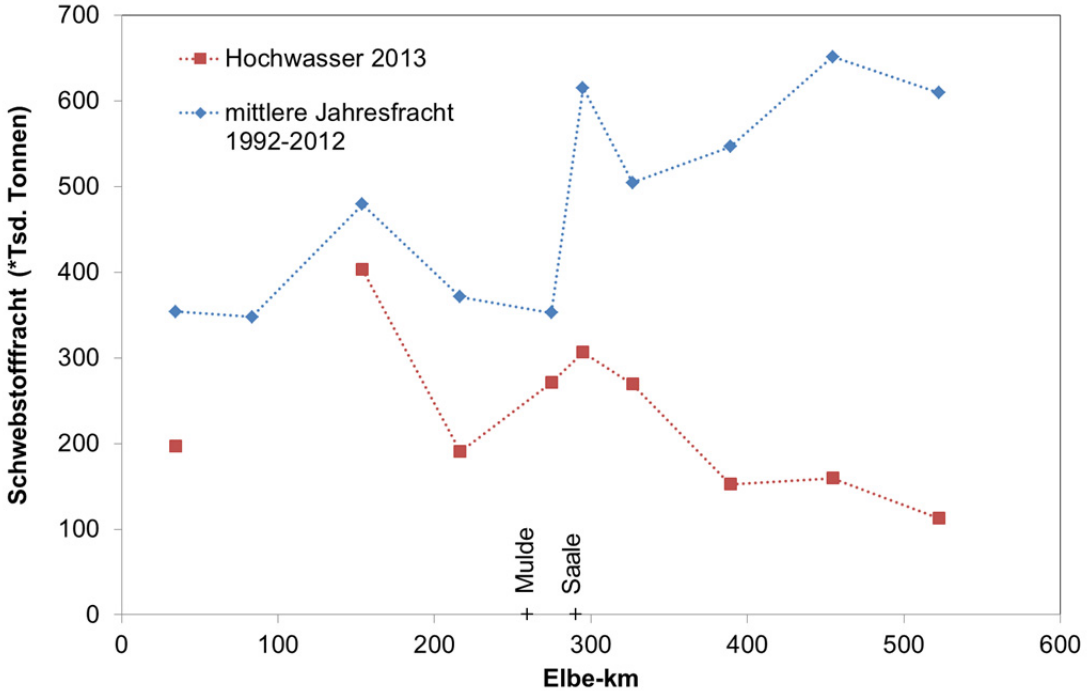


Abb. 4.7: Vergleich der Gesamtschwebstofffracht des Hochwasserereignisses 2013 mit der mittleren Jahresfracht im Längsschnitt der Elbe.

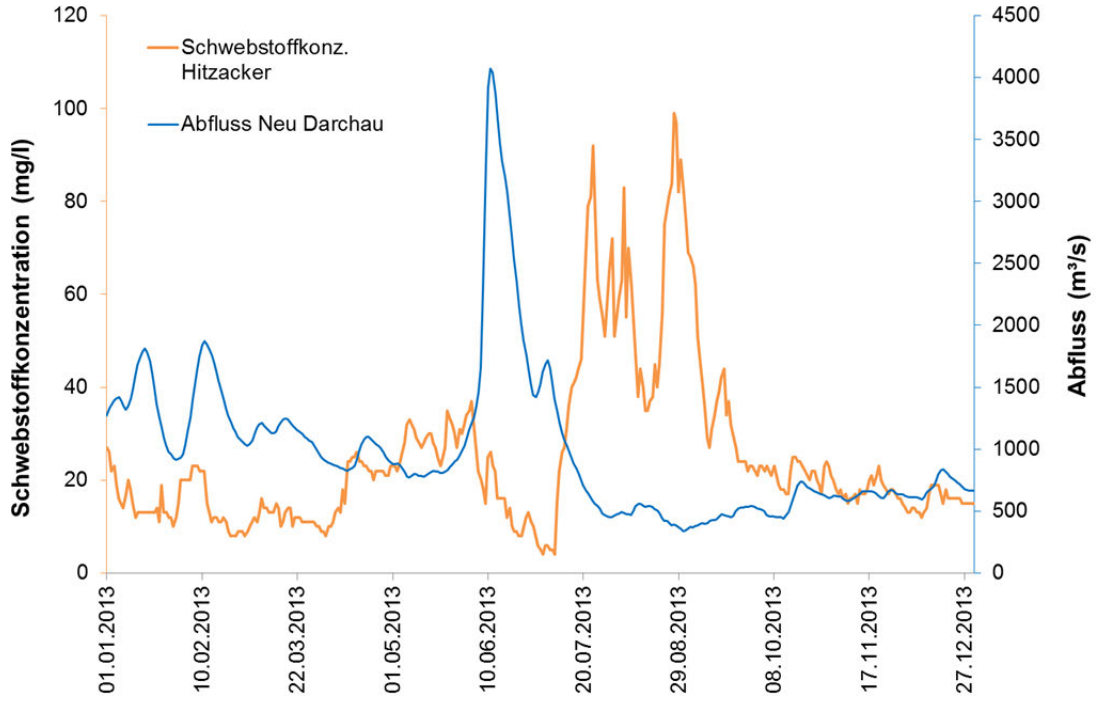


Abb. 4.8: Schwebstoffkonzentrationen an der Messstelle Hitzacker (Elbe-km 522,6) und Abflüsse am Bezugspegel Neu Darchau (Elbe-km 536,44) für das Kalenderjahr 2013.

An diesem Beispiel wird deutlich, dass in der unteren Mittelelbe vor allem im Sommer eher eine negative Korrelation zwischen Schwebstoffkonzentration und Abfluss besteht. Dies steht im Gegensatz zu typischen Verläufen anderer Gewässer (z.B. Rhein, Donau, Obere Elbe) und ist durch den hohen biogenen Anteil im Schwebstoff zu erklären (HILLEBRAND et al. 2012). Im Frühjahr mit steigendem Lichteinfall und steigender Temperatur nimmt das Wachstum des Phytoplanktons deutlich zu, was die ansteigenden Schwebstoffkonzentrationen im April und Mai 2013 erklärt. Beim Hochwasser wird aufgrund der deutlich kürzeren Wasseraufenthaltszeit und der oberstrom schlechteren Lichtbedingungen weniger neues Phytoplankton produziert. Dies führte zu einem starken Rückgang der in der Mittelelbe prägenden biogenen Schwebstoffkonzentrationen. Zusätzlich wurden aufgrund der starken Ausuferung der Elbe beim Hochwasserereignis 2013 große Mengen an Feinsedimenten oberstrom zurückgehalten und ein Verdünnungseffekt trat auf, so dass die Schwebstoffkonzentrationen beim Hochwasser abfielen. In den Sommermonaten nach dem Hochwasser mit zurückgehenden Fließgeschwindigkeiten und steigenden Aufenthaltszeiten zeigt sich in den hohen Schwebstoffkonzentrationen der Effekt starken Wachstums des Phytoplanktons. Das Hochwasser modifizierte also die typische saisonale Verteilung der biogenen Anteile in der unteren Mittelelbe mit hohen Phytoplanktonkonzentrationen im Sommer und niedrigen Werten im Winter (vgl. auch Kapitel 4.2).

4.1.6 Fazit Sedimenthaushalt

Beim Juni-Hochwasser 2013 wurden in den Flussgebieten von Rhein, Donau, Weser und Elbe erhöhte Schwebstofffrachten beobachtet. Als maximale Tagesfracht in den Bundeswasserstraßen wurde eine Schwebstofffracht von ca. 740 000 Tonnen am 03. Juni 2013 an der Donau bei Jochenstein gemessen. Die Gesamtfrachten über das Hochwasserereignis lagen im Rhein im Mittel bei etwa 20 % einer mittleren Jahresfracht. Ähnliches gilt für die Weser. An Elbe und Donau traten an vielen Messstellen höhere Frachten relativ zu den jeweiligen mittleren Jahresfrachten auf als an Rhein und Weser. An der Donau bei Jochenstein betrug die Hochwasserfracht beispielsweise etwa zwei Drittel einer durchschnittlichen Jahresfracht, an der Elbe im Bereich von Torgau und Aken sogar ca. 80 % einer durchschnittlichen Jahresfracht.

Der Scheitelpunkt der Schwebstofffracht trat in der Regel vor dem Scheitelpunkt des Abflusses auf (1 bis 4 Tage). Nach dem Scheiteldurchgang fielen die Schwebstoffkonzentrationen und -frachten deutlich schneller ab als der Abfluss. Ein solcher Verlauf ist typisch für Hochwasserereignisse.

Eine Ausnahme bildete die untere Mittelelbe. In der unteren Mittelelbe traten beim Juni-Hochwasser 2013 trotz hoher Abflüsse keine erhöhten oder nur gering erhöhte Schwebstoffkonzentrationen auf. Dies ist vermutlich vor allem auf die großflächigen Vorlandüberflutungen oberhalb und den damit verbundenen Sedimentrückhalt in den Überflutungsflächen zurückzuführen. Auch der Austrag von autochthonem organischem Material (Phytoplankton) trug zum Rückgang der Schwebstoffkonzentrationen in der unteren Mittelelbe bei.

In der Elbe, aber auch in den anderen betrachteten Bundeswasserstraßen wurde in Teilstrecken ein signifikanter Rückgang der Schwebstofffrachten im Längsverlauf, d.h. in Fließrichtung, beobachtet. Dies ist durch Sedimentrückhalt auf Überflutungsflächen oder in Stauhaltungen oder anderen strömungsberuhigten Bereichen zu erklären. Der Rückgang der Fracht

lag dabei übers Gesamtereignis betrachtet zum Teil im Bereich von bis zu 50 %. Zu beachten ist, dass der Nettorückgang der Fracht nicht direkt der zurückgehaltenen Sedimentmenge gleichzusetzen ist, da entlang der Fließstrecke beispielsweise über Nebenflüsse zusätzlich Feinsedimente eingetragen werden.

4.2 Auswirkungen auf die Gewässergüte

Im Folgenden werden die Auswirkungen des Hochwassers im Juni 2013 auf die Leitfähigkeit, den Sauerstoff- und teilweise den Chlorophyll-a-Gehalt in den vier großen Flüssen Weser, Rhein, Donau und Elbe dargestellt. Diese drei Parameter sind wichtige Kenngrößen, um die Gewässergüte zu charakterisieren. Die Leitfähigkeit ist ein Maß für die Ionenkonzentration im Wasser und damit indirekt der Konzentration aller Wasserinhaltstoffe. Generell führt Hochwasser zu einer Verdünnung der Wasserinhaltsstoffe und damit auch der Ionenkonzentration. Sauerstoff- und Chlorophyll-a-Gehalt hingegen werden nicht durch einfache Verdünnung bei Hochwasser geprägt. Beide Parameter resultieren aus einer Vielzahl von teilweise gegenläufigen Prozessen im Gewässer. Der Sauerstoffgehalt im Wasser ist von entscheidender Bedeutung für die im Gewässer lebenden Tiere und Stoffumsätze. Er hat eine Schlüsselrolle bei der Bewertung der Gewässergüte. Der Chlorophyll-a-Gehalt ist ein Maß für die Algenbiomasse im Gewässer. Durch Photosynthese der Algen steigt der Sauerstoffgehalt an, durch den nachfolgenden Abbau der Algenbiomasse sinkt der Sauerstoffgehalt zeitlich verzögert.

Um die Auswirkungen des Hochwassers 2013 auf den Stoffhaushalt darzustellen, wird die langjährige Entwicklung der Gewässergüteparameter den Verhältnissen während des Hochwassers 2013 gegenübergestellt. Außerdem ist der Abfluss der Monate Mai bis Juli 2013 für den dem jeweiligen Flussabschnitt zugeordneten Pegel dargestellt, um den Zeitpunkt des Hochwasserscheiteldurchlaufs kenntlich zu machen.

4.2.1 Wesergebiet

Die beiden Flüsse Werra und Fulda vereinigen sich in Hannoversch Münden zur Weser. In der Mittelweser liegt die Dauermessstation Hemelingen am Übergang zur tidebeeinflussten Unterweser. Auch dort ist die Leitfähigkeit durch die Einleitung von Salzabwasser der Kaliindustrie in die Werra noch relativ hoch, der 10-jährige Mittelwert der Jahre 2003-2012 betrug 1 300 µS/cm (Daten von FGG Weser). Vor dem Hochwasser im Mai 2013 wurden Werte über 1 500 µS/cm gemessen, diese wurden durch das Hochwasser auf unter 800 µS/cm deutlich reduziert (Abb. 4.9 links). Der Sauerstoffgehalt sank von knapp 10 auf 8 mg/l, dabei war er bereits vor Einsetzen des Hochwassers ab dem 18.05.13 um 1 bis 1,5 mg/l niedriger als das langjährige Mittel der Jahre 2003-2012 (Abb. 4.9 rechts). Mit dem Abklingen des Hochwassers stieg die Leitfähigkeit wieder auf relativ hohe Werte über 1 500 µS/cm, auch der Sauerstoffgehalt erreichte mit Werten über 10 mg/l zunächst ein höheres Niveau als das langjährige Mittel (Abb. 4.9 rechts).

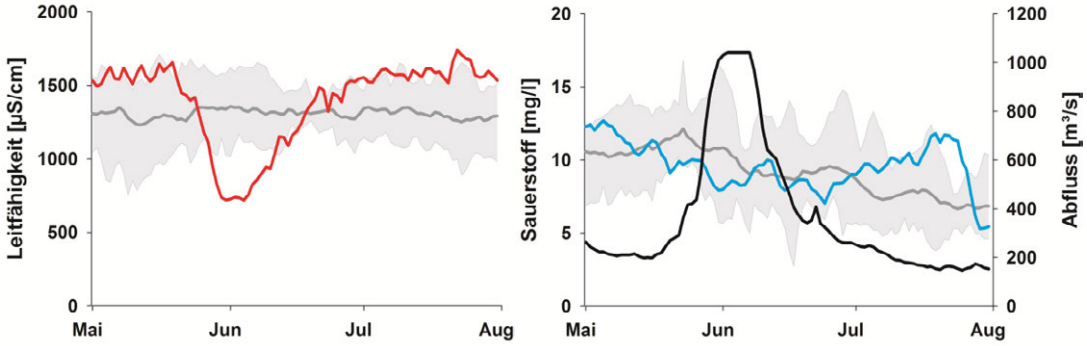


Abb. 4.9: Tagesmittelwerte Mai bis Juli 2013 von Leitfähigkeit (links, rote Kurve) und Sauerstoffgehalt (rechts, blaue Kurve) in Hemelingen (Weser-km 361, Daten von FGG Weser) sowie des Abflusses Mai bis Juli 2013 (schwarze Kurve) von Intschede (Weser-km 331, Daten der WSV). Dargestellt sind auch Mittelwert (dunkelgraue Kurve), Minima und Maxima der Tagesmittelwerte (hellgraue Fläche) der Güteparameter 2003-2012.

4.2.2 Rheingebiet

Mit dem Einsetzen des Hochwassers Anfang Juni 2013 wurde am Mittelrhein in Koblenz ein leichter Rückgang der Leitfähigkeit gemessen, weiter flussabwärts am Niederrhein in Lobith war der Rückgang von 518 µS/cm (Mittelwert Mai 2013) auf 398 µS/cm am 07.06.2013 etwas deutlicher (Abb. 4.10 links). Schon vor Beginn des Hochwassers wurde dabei an beiden Stationen im Mai 2013 eine im Verhältnis zum 10-jährigen Mittel (2003-2012) geringe Leitfähigkeit gemessen (Abb. 4.10 links).

Das Hochwasser hatte an keiner der beiden Probestellen Auswirkungen auf den im Rhein ausgeglichenen Sauerstoffgehalt (Abb. 4.10 rechts). Allerdings wurden nach Abklingen des Hochwassers höhere Sauerstoffgehalte als im langjährigen Mittel gemessen. Der Sauerstoffgehalt im Gewässer wird durch die Photosynthese der Algen erhöht. Von der Gütestation Koblenz liegen wöchentliche Messungen des Chlorophyll-a-Gehalts als Maß für die Algenbiomasse vor. Für die Jahre 2003-2012 wurden aus den wöchentlichen Messungen Monatsmittelwerte sowie Minima und Maxima für die drei Monate Mai, Juni und Juli berechnet. Das langjährige Mittel 2003-2012 zeigt eine Abnahme der mittleren Chlorophyll-a-Gehalte von Mai bis Juli (Abb. 4.11). 2013 hingegen waren im Mai nur geringe Chlorophyll-a-Gehalte gemessen worden, während des Hochwassers sogar Werte an der Nachweisgrenze (Abb. 4.11). Im Juli 2013 nach dem Hochwasser waren deutlich höhere Chlorophyll-a-Gehalte als in den vorherigen Monaten aufgetreten (Abb. 4.11), die über Photosynthese zu den höheren Sauerstoffgehalten beitrugen (Abb. 4.10). Das Maximum der Algengehalte war demnach 2013 durch das Hochwasser verschoben worden, entsprechend hatte das Hochwasser über den eigentlichen Zeitpunkt des Hochwasserscheiteldurchlaufs hinaus auch indirekte Auswirkungen auf die Gewässergüte im Rhein.

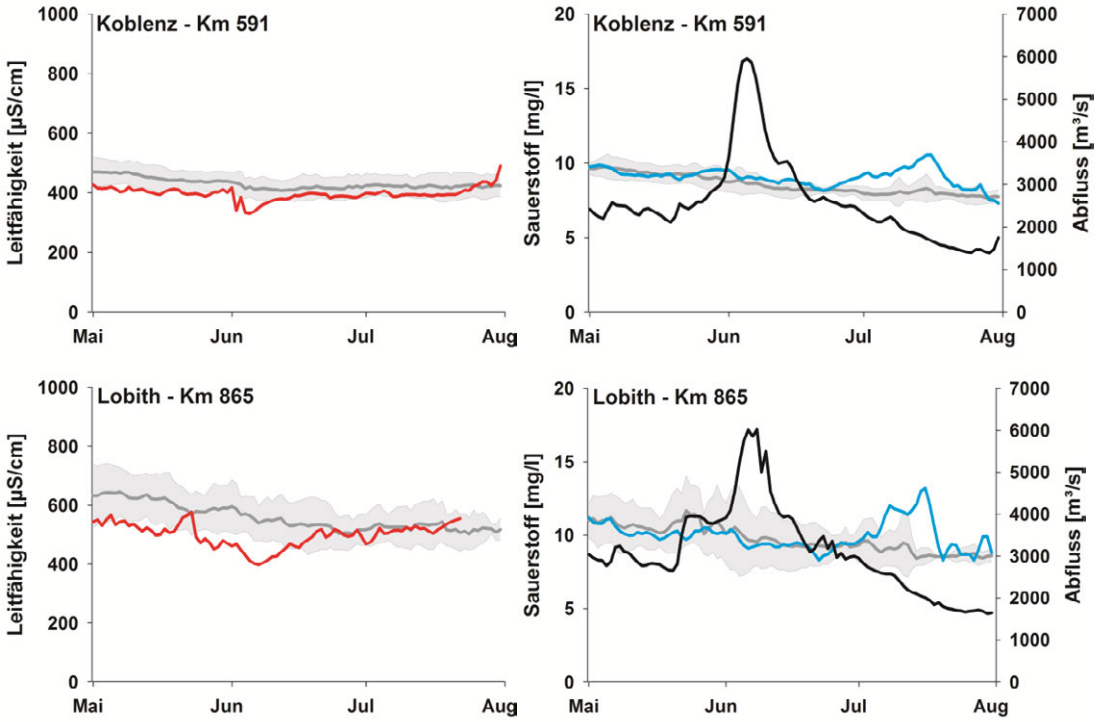


Abb. 4.10: Tagesmittelwerte Mai bis Juli 2013 von Leitfähigkeit (links, rote Kurve) und Sauerstoffgehalt (rechts, blaue Kurve) in Koblenz (Rhein-km 591) und Lobith (Rhein-km 862, Daten der IKSR)
sowie des Abflusses Mai bis Juli 2013 (schwarze Kurve) von Koblenz (Rhein-km 591) und Rees (Rhein-km 837, Daten der WSV). Dargestellt sind auch Mittelwert (dunkelgraue Line), Minima und Maxima der Tagesmittelwerte (hellgraue Fläche) der Güteparameter von Koblenz (2003-2012) und Lobith (2007-2012).

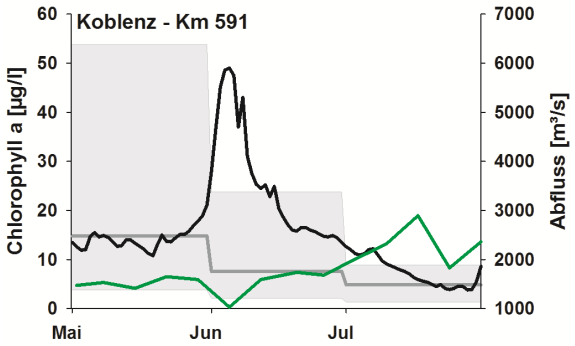


Abb. 4.11: Wöchentliche Messungen Mai bis Juli 2013 des Chlorophyll-a-Gehalts (grüne Kurve, Daten von BfG)
sowie Tagesmittelwerte Mai bis Juli 2013 des Abflusses (schwarze Kurve) von Koblenz (Rhein-km 591, Daten der WSV). Dargestellt sind auch Monatsmittelwert (dunkelgraue Line), Minima und Maxima der wöchentlichen Messungen (hellgraue Fläche) des Chlorophyll-a-Gehalts von Koblenz (2003-2012).

4.2.3 Donaugebiet

Durch das Hochwasser wurde in der Donau bei Regensburg die Leitfähigkeit innerhalb weniger Tage von Werten über 500 µS/cm Ende Mai 2013 auf 319 µS/cm am 04.06.13 verringert (Abb. 4.12 links). Diese deutliche Verdünnung der Wasserinhaltsstoffe hatte wie im Rhein keine Auswirkungen auf den auch in der Donau ausgeglichenen Sauerstoffgehalt (Abb. 4.12 rechts).

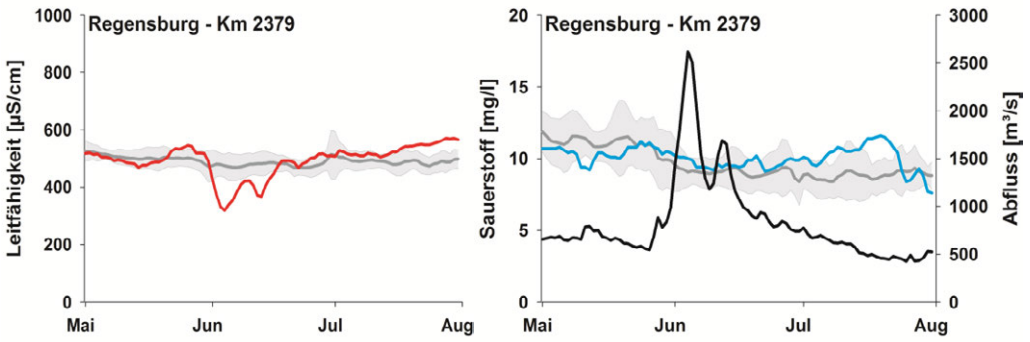


Abb. 4.12: Tagesmittelwerte Mai bis Juli 2013 von Leitfähigkeit (links, rote Kurve) und Sauerstoffgehalt (rechts, blaue Kurve) in Regensburg (Donau-km 2 379, Daten von Bayer. LfU) sowie des Abflusses Mai bis Juli 2013 (schwarze Kurve) von Schwabelweis (Donau-km 2377, Daten der WSV). Dargestellt sind auch Mittelwert (dunkelgraue Kurve), Minima und Maxima der Tagesmittelwerte (hellgraue Fläche) der Güteparameter 2003-2012.

4.2.4 Elbegebiet

Auf deutschem Gebiet ist die Elbe bis zum Wehr Geesthacht (Elbe-km 586) frei fließend. Das Wehr trennt die Binnen- von der Tideelbe. Das Hochwasser 2013 führte in der Mittel- und Tideelbe zu einer Verdünnung der Wasserinhaltsstoffe, was sich in einer Halbierung der im 10-jährigen Mittel (2003-2012) gemessenen Leitfähigkeit an ausgewählten Dauermessstationen äußerte (Abb. 4.13 links). Mit dem Hochwasser wurde in der Mittelelbe im Gegensatz zu Rhein, Donau und Weser ein deutlicher Sauerstoffrückgang gemessen. In Schnackenburg hatte sich der Sauerstoffgehalt im Vergleich zum 10-jährigen Mittel mehr als halbiert (Abb. 4.13 rechts) und lag mit Werten bis zu 4,5 mg/l zum Teil unter dem Orientierungswert von 6 mg/l (OGewV 2011).

In der Regel wird der Sauerstoffhaushalt der Elbe von der Algendynamik geprägt (HARDENBICKER 2014, HEIN et al. 2014, SCHÖL et al. 2006). In der Mittelelbe findet im Sommerhalbjahr eine starke Zunahme der Algengehalte und als Folge eine hohe Sauerstoffproduktion statt. Während des Hochwassers 2013 sanken die Algengehalte, da die Algen durch eine geringere Aufenthaltszeit weniger Zeit zum Wachstum hatten. Gleichzeitig war das Algenwachstum durch die erhöhte Schwebstofffracht (vgl. auch Kapitel 4.1) und damit schlechtere Lichtverhältnisse stark verringert. Entsprechend wurde weniger Sauerstoff von den Algen produziert, und als Folge waren deutlich geringere Sauerstoffgehalte in Schnackenburg zu messen (Abb. 4.13 rechts).

In der Tideelbe bei Seemannshöft hingegen lagen während des Hochwassers 2013 höhere Sauerstoffgehalte als im 10-jährigen Mittel vor (Abb. 4.13 rechts). Ursächlich hierfür war, dass im Gegensatz zu den normalen Sommerbedingungen während des Hochwassers weniger organisches Material (lebende Algen und algenbürtiges organisches Material) aus der Mittelelbe eingetragen wurde und damit die Sauerstoffzehrung in der Tideelbe deutlich geringer war. Zudem waren durch den hohen Abfluss die Wasseraufenthaltszeiten in der oberen Tideelbe stark verkürzt und die Zehrungsvorgänge nicht wie im Normalfall auf diesen Abschnitt in der Tideelbe konzentriert.

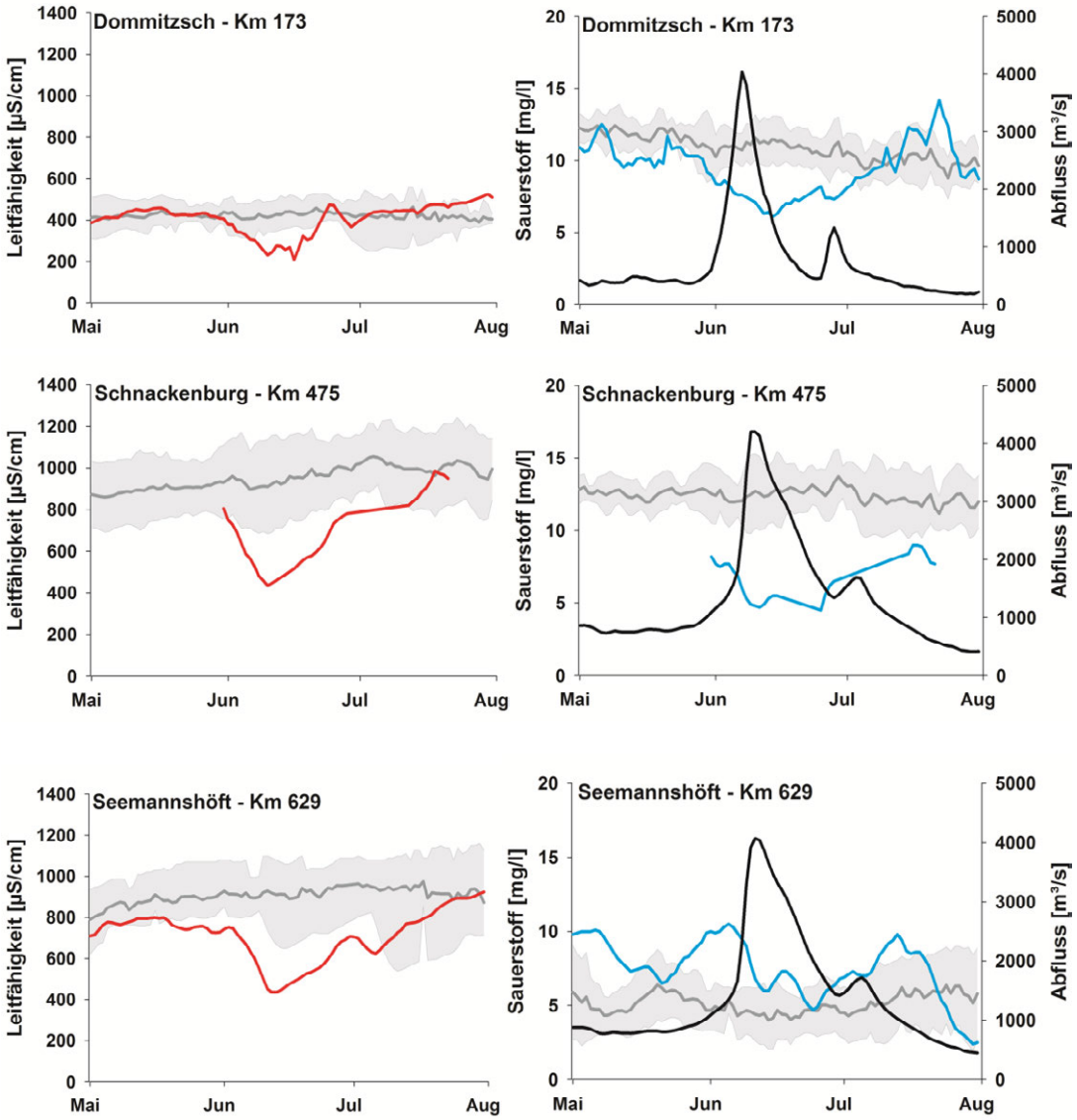


Abb. 4.13: Tagesmittelwerte Mai bis Juli 2013 von Leitfähigkeit (links, rote Kurve) und Sauerstoffgehalt (rechts, blaue Kurve) in Dommitzsch (Elbe-km 173), Schnackenburg (Elbe-km 475) und Seemannshöft (Elbe-km 629, Daten der FGG Elbe)
sowie des Abflusses Mai bis Juli 2013 (schwarze Kurve) von Torgau (Elbe-km 154), Wittenberge (Elbe-km 454) und Neu Darchau (Elbe-km 536, Daten der WSV). Dargestellt sind auch Mittelwert (dunkelgraue Kurve), Minima und Maxima der Tagesmittelwerte (hellgraue Fläche) der Güteparameter 2003-2012.

Die aus der Mittelelbe eingetragenen Algengehalte nehmen im Tidebereich deutlich ab. In der Tideelbe steigt die Wassertiefe bis auf Seeschifftiefe deutlich an, was zur Verschlechterung des Lichtklimas und damit zum Absterben der aus der Mittelelbe eingetragenen Algen führt. Diesen Rückgang in den Algengehalten in der Tideelbe stromabwärts zeigt ein Vergleich der langjährigen Messwerte von Mai bis Juli 2003-2012 mit einem Mittelwert von 63,2 µg Chla/l in Bunthaus (Elbe-km 609) und von 18,9 µg Chla/l in Seemannshöft (Elbe-km 629) (Abb. 4.14).

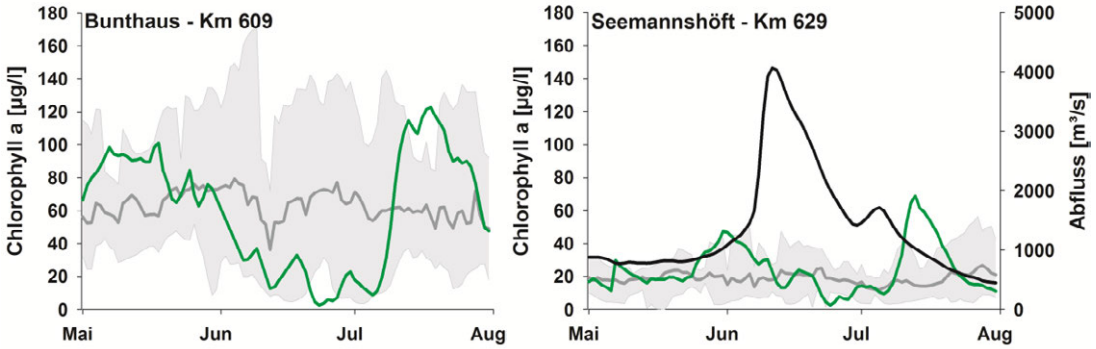


Abb. 4.14: Mittelwert der Tagesmittelwerte (dunkelgraue Kurve), Minima und Maxima der Tagesmittelwerte (hellgraue Fläche) in den Monaten Mai bis Juli 2003-2012 sowie 2013 (grüne Kurve) des Chlorophyll-a-Gehalts in Bunthaus (Elbe-km 609) und Seemannshöft (Elbe-km 629, Daten der FGG Elbe). Abfluss (schwarze Kurve) des Pegels Neu Darchau (Elbe-km 536, Daten der WSV).

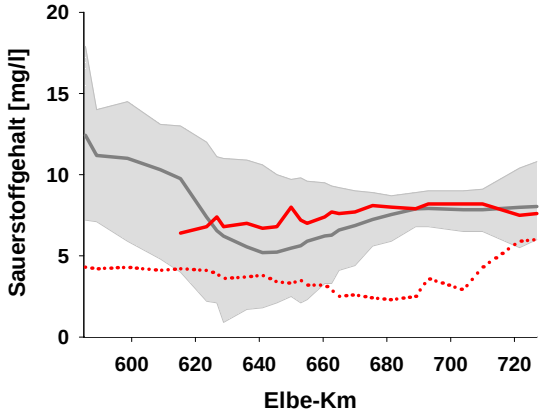


Abb. 4.15: Punktuelle Längsprofile des Sauerstoffgehalts in der Tideelbe im August 2002 (gestrichelte rote Kurve) und Juni 2013 (durchgezogene rote Kurve) sowie Mittelwert (dunkelgraue Kurve), Minima und Maxima der Tagesmittelwerte (hellgraue Fläche) Mai bis August 2003-2012 auf Basis der FGG-Elbe-Hubschrauberbefliegungen.

Während des Hochwassers im Juni 2013 wurden relativ hohe Sauerstoffgehalte in der gesamten Tideelbe gemessen (Abb. 4.13 und Abb. 4.15). Als Folge der durch das Hochwasser veränderten Belastung zeigten die Sauerstoffgehalte im Längsverlauf der Tideelbe nicht den typischen Sauerstoffrückgang („Sauerstofftal“) im Bereich von Elbe-km 620 bis Elbe-km 650 (Abb. 4.15), da wie beschrieben weniger Algen aus der Mittelelbe in die Tideelbe eingetragen worden sind. Anders war die Situation während des Hochwassers im August 2002.

Damals wurden entlang der gesamten Tideelbe sehr geringe Sauerstoffgehalte unter 5 mg/l gemessen. Bei diesem Ereignis war die Mittelelbe mit stark zehrungsfähigem Material belastet, das durch das Hochwasser in die Tideelbe eingetragen wurde (ARGE Elbe 2003). Quellen der Belastung waren neben der Remobilisierung zehrungsfähiger Flusssedimente und Einleitungen durch Kläranlagenüberläufe auch Abtrag aus überströmten Ackerflächen (BÖHME 2005). Zusätzlich waren die Wassertemperaturen im August 2002 sehr viel höher als im Juni 2013, was zu einer geringeren Löslichkeit des Sauerstoffs in Wasser und zu einem verstärkten, sauerstoffverbrauchenden mikrobiellen Abbau des organischen Materials führte. Das Hochwasser 2013 führte daher im Gegensatz zum Hochwasser 2002 zu keiner Absenkung des Sauerstoffgehaltes in der Tideelbe.

4.2.5 Fazit

Der Vergleich der vier Flüsse Weser, Rhein, Donau und Elbe zeigt, dass der Stoffhaushalt und damit die Gewässergüte eines Flusses durch ein Hochwasser sehr unterschiedlich überformt werden. Die Wasserinhaltsstoffe werden verdünnt, was mehr oder weniger große direkte Auswirkungen auf die Milieubedingungen der Organismen hat. Ihre Toleranzfähigkeit hängt von der Stärke und Dauer der Änderungen ab. Der Sauerstoffgehalt wird in der Mittelelbe stark von der Sauerstoffproduktion der Algen geprägt, entsprechend veränderte sich der Sauerstoffgehalt in der Elbe durch das Hochwasser 2013 am stärksten. In den Flüssen Weser, Rhein und Donau, deren Sauerstoffgehalt im Sommer deutlich weniger durch den Algengehalt geprägt ist, führte das Hochwasser 2013 nur zu geringen Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt. Diese beispielhaft genannten indirekten Auswirkungen des Hochwassers sind sehr komplex. Dadurch ist eine genaue Analyse der Gewässergüteverhältnisse in den verschiedenen Flüssen notwendig.

4.3 Schadstoffbelastung der Binnenelbe

4.3.1 Das Messprogramm Extremereignisse

Um bei extremem Hoch- oder Niedrigwasser rechtzeitig und abgestimmt ereignisspezifische Sondermessungen der Wasserbeschaffenheit durchführen zu können, wurde unter dem Dach der FGG Elbe das „Messprogramm für hydrologische Extremereignisse an der Elbe“ entwickelt, das von der BfG koordiniert wird (FGG Elbe 2012). Der erste Praxistest für dieses Messprogramm begann am 03.06.2013 nach Überschreitung der Auslöseschwellen an den Pegeln Schöna (Elbe), Halle-Trotha (Saale) und Bad Düben (Mulde). In den folgenden Wochen, maximal bis zum 01.07.2013, wurden in ein- bis mehrtägigen Abständen Wasser- und Schwebstoffproben entnommen. Einen Überblick über die an der Elbe und den Unterläufen von Mulde, Saale und Havel gelegenen Messstellen gibt Abb. 4.16.

Die Wasserproben (Einzelproben) wurden auf Feldkenngrößen, Nährstoffe, Metalle, Schwermetalle, Arsen, organische Spurenstoffe (u.a.) und die möglichst zeitgleich mit der Zentrifuge gewonnenen Schwebstoffe auf Schwermetalle, Arsen, schwerflüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe sowie zinnorganische Verbindungen (u.a.) untersucht. An Saale und Havel waren die Standorte zur Schwebstoffbeprobung (Zentrifugenbetrieb) hochwasserbedingt bzw. aus logistischen Gründen nicht erreichbar. Probenahmen und Laboranalysen erfolgten durch die zuständigen Landesbehörden in Sachsen (BfUL), Sachsen-Anhalt (LHW), Brandenburg (LUGV, LLBB), Niedersachsen (NLWKN), Hamburg (HU) sowie durch das UFZ und die BfG.

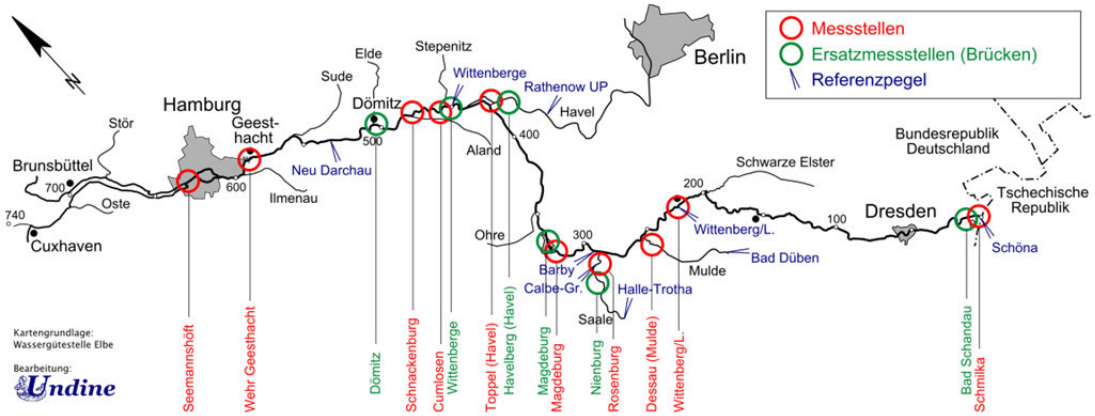


Abb. 4.16: Karte der Messstellen/Ersatzmessstellen und Referenzpegel des Messprogramms Extremereignisse an der Elbe

4.3.2 Datengrundlagen/Methodik

Im Rahmen des Messprogramms Extremereignisse wurden umfangreiche Daten zur Gewässerbelastung der Elbe während des Juni-Hochwassers gewonnen und zeitnah auf der Informationsplattform Undine (http://undine.bafg.de/) veröffentlicht Die hier vorgenommene Auswertung dieser Daten fokussiert auf die Schadstoffsituation der Binnenelbe während des Hochwassers, hinsichtlich der Tideelbe wird auf Kapitel 4.4 verwiesen. Es wird insbesondere auf solche Stoffe bzw. Stoffgruppen eingegangen, für die außergewöhnliche Konzentrationen und/oder Frachten ermittelt wurden. Eine ausführliche Auswertung zum Messprogramm Extremereignisse während des Juni-Hochwassers 2013 findet sich in SCHWANDT & HÜBNER (eingereicht), Teilergebnisse wurden in SCHWANDT & HÜBNER (2014) veröffentlicht.

Zur Einordnung wurden die Ergebnisse zum einen mit dem Jahr 2012 verglichen, in dem bei insgesamt leicht unterdurchschnittlicher Wasserführung kein extremes Hoch- oder Niedrigwasser auftrat. Zum anderen erfolgte ein Vergleich mit den außergewöhnlichen Hochwasserereignissen der Jahre 2002 und 2006, sofern dafür Daten verfügbar waren. Die Vergleichsdaten zur Wasser- und Schwebstoffbeschaffenheit wurden dem FIS-Datenportal der FGG Elbe (FGG Elbe o.J.) entnommen, ergänzend dienten Berichte/Messwerte aus den Ländern und der BfG als Datenquelle (BfG 2002, BfG o.J., LfULG o.J., LHW 2006a/b).

Für den intensiv beprobten Zeitraum vom 03.-20.06.2013 wurden Tagesfrachten für abfiltrierbare Stoffe sowie Schwermetalle und Arsen „geschätzt“, deren Konzentrationen in unfiltrierten Wasserproben gemessen wurden. Obgleich die Frachten aus Konzentration und Durchfluss berechnet wurden, wird hier von „Frachtschätzung“ gesprochen. Damit sollen die Unsicherheiten zum Ausdruck gebracht werden, die mit der Übertragung einer räumlich und zeitlich punktuell ermittelten Stoffkonzentration auf den täglichen Stoffstrom im gesamten Gewässerquerschnitt verbunden sind. Bei Tagen ohne Messwert wurde linear interpoliert, Konzentrationen unter der Bestimmungsgrenze wurden mit der Hälfte dieser Grenze angenommen. Der Frachtschätzung liegen Tagesmittelwerte des Durchflusses der WSV und des Landes Sachsen-Anhalt (Pegel Priorau, Mulde) zugrunde. Für die Havel erfolgte keine Frachtschätzung, da die Strömung am Bezugspegel Havelberg-Stadt vom 07.-12. Juni 2013 flussaufwärts gerichtet war. In Tab. 4.1 sind die Bezugspegel derjenigen Messstellen aufgeführt, für die Frachtschätzungen vorgenommen wurden.

Tab. 4.1: Bezugspegel für Messstellen der Wasser- und Schwebstoffbeschaffenheit an Elbe, Mulde und Saale

	Schmilka/ Bad Schandau (Elbe)	Wittenberg (Elbe)	Magdeburg (MD) (Elbe)	Schnacken-burg/Dömitz* (Elbe)	Dessau (Mulde)	Rosenburg (Saale)
Bezugs-pegel	Schöna	Wittenberg	MD-Strombrücke	Wittenberge	Priorau	Calbe-Grizehne
* In Kapitel 4.3.3 wird der Wasserstand am Pegel Dömitz zugrundegelegt.						

4.3.3 Schadstoffkonzentration

Schwermetalle und Arsen

Da viele Schwermetalle im Gewässer überwiegend partikulär gebunden vorliegen, wird in Abb. 4.17 die Konzentration der abfiltrierbaren Stoffe während des Hochwassers an Messstellen der Binnenelbe dargestellt. Wie es typischerweise zu beobachten ist (vgl. Kap. 4.1), trat die höchste Konzentration abfiltrierbarer Stoffe bereits vor Eintritt des Hochwasserscheitels auf und sank anschließend wieder schnell auf ein wesentlich geringeres Niveau. Die Konzentration war bei Schmilka/Bad Schandau am höchsten (bis 220 mg/l) und nahm im weiteren Lauf der Elbe bis Schnackenburg/Dömitz deutlich ab. Der Verlauf der in Abb. 4.17 ebenfalls dargestellten Quecksilberkonzentration folgt weitgehend dem Konzentrationsverlauf der abfiltrierbaren Stoffe. Dementsprechend trat die höchste Quecksilberkonzentration im Elbewasser bei Schmilka/Bad Schandau auf (0,13 µg/l; Maximum 2012: 0,04 µg/l).

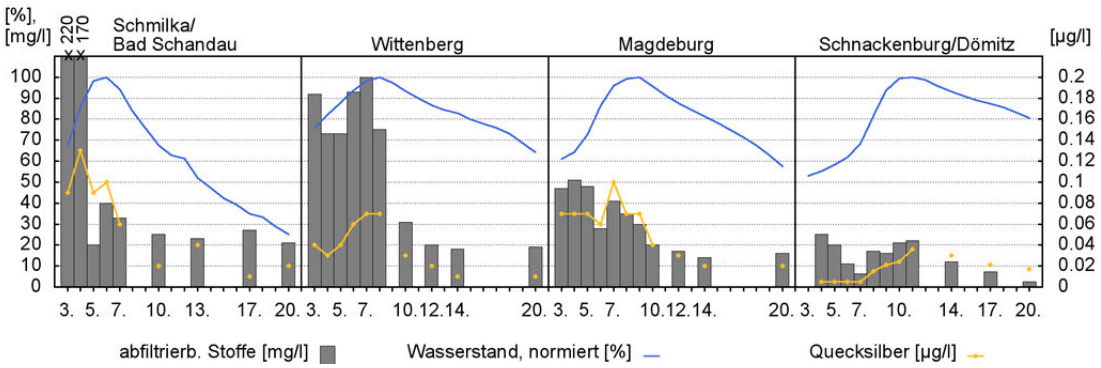


Abb. 4.17: Konzentration von abfiltrierbaren Stoffen und Quecksilber im Wasser (unfiltriert) der Binnenelbe im Vergleich zum normierten Wasserstand an den Bezugspegeln im Zeitraum 03.-20.06.2013

Auch die Spitzenkonzentration zahlreicher weiterer Schwermetalle und von Arsen im unfiltrierten Elbewasser war bei Schmilka/Bad Schandau während des Hochwassers um ein Vielfaches höher als das Maximum des Jahres 2012. Insgesamt traten im Juni 2013 in den unfiltrierten Wasserproben der Elbe und ihrer Zuflüsse im Vergleich zum Vorjahr meist erhöhte Schwermetall- bzw. Arsenkonzentrationen auf. In einzelnen Fällen (Cadmium, Chrom und Blei) waren die Konzentrationen zudem auch höher als bei den vorausgegangenen Hochwasserereignissen 2002 und 2006. In diesen Fällen (Konzentrationsmaximum Hochwasser 2013 > Jahresmaximum 2012 und > Maximum Hochwasser 2002/2006) wird hier von „stark erhöhten“ Konzentrationen gesprochen (Abb. 4.19).

Die Analysen filtrierter Wasserproben vom Juni 2013 auf Schwermetalle und Arsen ergaben eine stark erhöhte Konzentration für Nickel in der Elbe bei Schmilka/Bad Schandau (6,7 µg/l; Maximum 2012: 2,6 µg/l; vgl. Abb. 4.19).

Nicht zuletzt fanden sich in den Schwebstoffproben stellenweise stark erhöhte Gehalte von Schwermetallen und Arsen. Zum Vergleich mit dem Jahr 2012 mussten allerdings Monatsmischproben aus Absetzbecken herangezogen werden (Tab. 4.2).

Zu den Schwermetallgehalten im Schwebstoff standen für die Messstelle Magdeburg Vergleichsdaten der Hochwasserereignisse 2002 und 2006, für Wittenberg und Dessau-Mulde Daten zum Hochwasser 2006 und für Schnackenburg/Dömitz keine Vergleichsdaten zur Verfügung. Im Juni 2013 übertrafen der Arsengehalt im Schwebstoff der Elbe bei Wittenberg sowie der Arsen- und Bleigehalt des Schwebstoffs der Mulde in Dessau sowohl den Vorjahresgehalt als auch den Höchstgehalt beim Vergleichshochwasser 2006 (Abb. 4.19).

Tab. 4.2: Maximale Gehalte [mg/kg TS] von Schwermetallen und Arsen im Schwebstoff der Elbe und Mulde im Jahr 2012 (Monatsmischproben aus Absetzbecken) und beim Juni-Hochwasser 2013 (HW´13; Zentrifugenproben); größere Gehalte im Juni 2013 sind **fett** gedruckt, k.D.: keine Daten

	Wittenberg (Elbe)		**Magdeburg (Elbe)**		**Schnackenburg/ Dömitz (Elbe)**		**Dessau (Mulde)**	
	2012	**HW´13**	**2012**	**HW´13**	**2012**	**HW´13**	**2012**	**HW´13**
Cd	4,1	2,9	7,6	5,2	6,7	5,6	23,9	12,8
Cu	81	77	87	**102**	90	**113**	102	**137**
Hg	1,1	0,8	2,9	2,6	1,9	**4,6**	1,9	1,3
Zn	742	543	1 490	757	1 100	910	1 770	1 130
Ni	73	63	49	**66**	55	**59**	120	80
Pb	82	**112**	139	**246**	140	**195**	218	**585**
Cr	84	**147**	78	**124**	85	**122**	80	**115**
U	k.D.	4,6	2,7	**8,7**	3,0	**5,5**	15,0	**20,0**
As	30	**52**	28	**120**	41	**88**	168	**281**

Organische Spurenstoffe

Verschiedene organische Schadstoffe wurden in den Schwebstoffproben vom Juni 2013 in stark erhöhten Gehalten nachgewiesen.
Tab. 4.3 stellt die zur Hochwasserzeit ermittelten maximalen Gehalte des Schwebstoffs an Isomeren des Hexachlorcyclohexans (HCH) den Höchstgehalten des Jahres 2012 gegenüber, wobei für 2012 wiederum nur auf Mischproben aus Absetzbecken zurückgegriffen werden konnte. Für die Elbe bei Wittenberg und Magdeburg wurden im Juni 2013 wesentlich größere Gehalte von HCH im Schwebstoff nachgewiesen als im Vorjahr, die teilweise auch größer waren als bei den Hochwasserereignissen 2002/2006 (vgl. Abb. 4.19).

Tab. 4.3: Maximale Gehalte [µg/kg TS] von HCH im Schwebstoff der Elbe und Mulde im Jahr 2012 (Monatsmischproben aus Absetzbecken) und beim Junihochwasser 2013 (HW´13; Zentrifugenproben); höhere Konzentrationen im Juni 2013 sind **fett** gedruckt; k. D.: keine Daten

	Wittenberg (Elbe)		Magdeburg (Elbe)		Schnackenburg/ Dömitz (Elbe)		Dessau (Mulde)	
	2012	HW´13	2012	HW´13	2012	HW´13	2012	HW´13
α-HCH	1,5	**48**	7,0	**450**	7,7	<2,5	59	47
β-HCH	0,9	**72**	20	**120**	11	5,4	590	490
γ-HCH	0,5	**1,5**	<3,0	**51**	<2,5	<2,5	7	4,3
δ-HCH	k.D.	5,1	<3,0	**67**	<2,5	<2,5	34	10

Auch bei p,p´-DDD und p,p´-DDE, den Neben- bzw. Abbauprodukten des DDT, wurden während des Juni-Hochwassers 2013 stellenweise stark erhöhte Gehalte im Schwebstoff gemessen (vgl. Abb. 4.19). Abb. 4.18 zeigt exemplarisch die Gehalte des p,p´-DDE im Schwebstoff von Elbe und Mulde zur Hochwasserzeit. Wie dort zu erkennen ist, wurden die Mittelwerte der Monatsmischproben des Jahres 2012 an allen Messstellen überschritten, mit Ausnahme der Messstelle Magdeburg auch die Höchstgehalte.

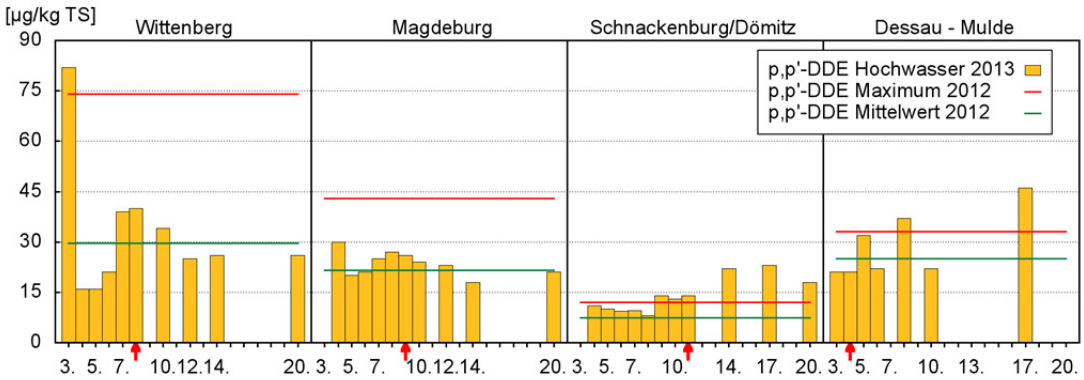


Abb. 4.18: Gehalt des p,p´-DDE im Schwebstoff (Zentrifugenproben) von Elbe und Mulde vom 03.-20.06.2013 im Vergleich zum Mittel- und Höchstwert des Jahres 2012 (Monatsmischproben aus Absetzbecken); die roten Pfeile zeigen den Tag des Hochwasserscheitels am Bezugspegel.

Bemerkenswert hohe Gehalte an zinnorganischen Verbindungen traten im Schwebstoff der Elbe an der Messstelle Schnackenburg/Dömitz auf. Die aus Monatsmischproben ermittelten Höchstgehalte des Jahres 2012 wurden dort im Juni 2013 bei Dibutylzinn(-Kation) 3-fach, bei Tributylzinn(-Kation) 2-fach und bei Tetrabutylzinn mehr als 6-fach überschritten. Vergleichswerte zu den Hochwasserereignissen 2002/2006 standen für Schnackenburg/Dömitz nicht zur Verfügung.

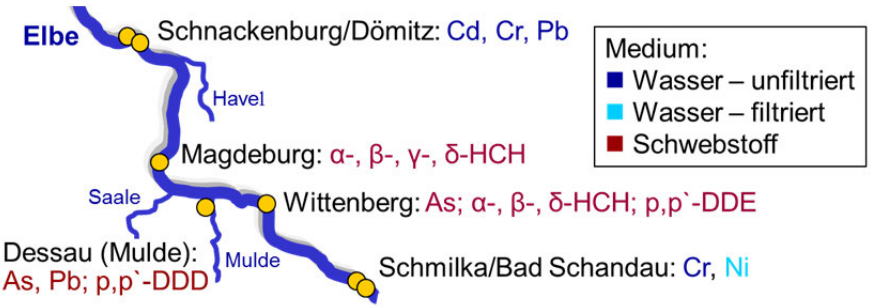


Abb. 4.19: Spurenstoffe mit „stark erhöhten“ Konzentrationen/Gehalten an Messstellen im Elbegebiet während des Juni-Hochwassers 2013
(Schriftfarbe der Stoffe signalisiert das betreffende Medium; keine Vergleichswerte aus 2012 für δ-HCH bei Wittenberg)

4.3.4 Frachtschätzung

Die größten Frachten der abfiltrierbaren Stoffe im Hochwasserzeitraum (03.-20.06.2013) wurden für die Elbe bei Wittenberg und Schmilka/Bad Schandau errechnet, und damit oberhalb der Mündung von Mulde und Saale (Tab. 4.4). Die starke Abnahme der Fracht abfiltrierbarer Stoffe zwischen Magdeburg und Schnackenburg/Dömitz spiegelt sich auch in den Frachtberechnungen anhand des WSV-Schwebstoffmessnetzes wider (Kap. 4.1).

Mit Ausnahme von Uran und Cadmium nahm die Schwermetall- und Arsenfracht der Elbe zwischen Schmilka/Bad Schandau und Wittenberg ab, bis Magdeburg infolge von Einträgen aus Mulde und Saale dann in allen Fällen wieder zu (Tab. 4.4). Die Summe der Frachten an abfiltrierbaren Stoffen sowie Schwermetallen und Arsen der Elbe bei Wittenberg, der Mulde bei Dessau und der Saale bei Rosenburg überstieg mit Ausnahme von Uran die für die Elbe in Magdeburg geschätzte Fracht deutlich. Dies weist auf erhebliche Schadstoffausträge in die Auen bzw. Seitenstrukturen zwischen Wittenberg und Magdeburg hin. Dennoch traten in der Elbe bei Magdeburg mit Ausnahme von Blei die größten Schwermetall- und Arsenfrachten auf. Unterhalb von Magdeburg ist ebenfalls von bedeutenden Schadstoffausträgen auszugehen, da die Frachten von Schwermetallen und Arsen bis Schnackenburg/Dömitz erheblich abnahmen.

Tab. 4.4: Frachtschätzung von abfiltrierbaren Stoffen (AFS), Schwermetallen und Arsen an Messstellen der Elbe, Mulde und Saale im Zeitraum 03.-20.06.2013 (Zahlen gerundet; die größten Frachten sind **fett** gedruckt)

		Schmilka/ Bad Schandau (Elbe)	Wittenberg (Elbe)	Magdeburg (Elbe)	Schnacken-burg/ Dömitz (Elbe)	Dessau (Mulde)	Rosenburg (Saale)
AFS	[t]	143 000	**171 000**	123 000	62 200	33 900	23 900
Cd	[kg]	470	470	**800**	540	480	120
Cu	[kg]	25 600	19 200	**26 300**	19 500	6 900	4 900
Hg	[kg]	160	120	**230**	*	40	100
Zn	[kg]	106 000	74 700	**125 000**	108 000	40 600	29 300
Pb	[kg]	**23 900**	16 300	23 000	12 700	14 000	3 600
U	[kg]	2 600	3 200	**6 700**	4 600	1 200	2 200
As	[kg]	14 600	13 300	**24 800**	17 300	11 100	2 300
* keine plausible Frachtschätzung möglich							

Die geschätzte Fracht von Schwermetallen und Arsen während des Hochwasserzeitraums 03.-20.06.2013 (= 18 Tage oder 5 % des Jahres) wird in Abb. 4.20 als Anteil der Jahresfracht 2012 angegeben. Dieser Anteil weist für die Messstellen an der Elbe eine Spannweite von rund 15 % - 160 % auf, mit deutlich abnehmender Tendenz von Schmilka/Bad Schandau bis Schnackenburg/Dömitz. Die höchsten Anteile von rund 105 %, 160 % bzw. 80 % ergeben sich für Cadmium, Blei und Zink bei Schmilka/Bad Schandau. In der Mulde bei Dessau erreicht die Hochwasserereignisfracht aller Schwermetalle und des Arsens einen höheren rechnerischen Anteil an der Jahresfracht 2012 als an der Saale. Die Quecksilber- und Bleifracht der Mulde betrug im betrachteten Hochwasserzeitraum 2013 das 1,5- bzw. 2,7-fache der Jahresfracht 2012.

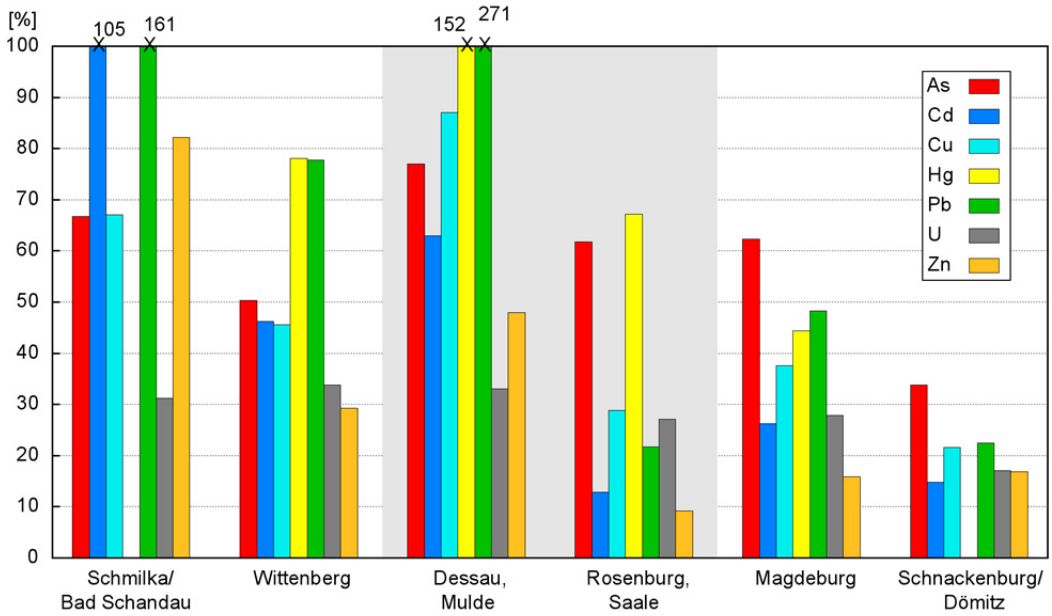


Abb. 4.20: Geschätzte Fracht von Schwermetallen und Arsen in der Elbe, Mulde und Saale im Zeitraum 03.-20.06.2013 als prozentualer Anteil der Jahresfracht 2012

Um die Schwermetall- bzw. Arsenfracht während des Junihochwassers 2013 mit den vorausgegangenen Hochwasserereignissen 2002 und 2006 vergleichen zu können, sind in Tab. 4.5 7-Tages-Frachten der Elbe bei Magdeburg rund um den Hochwasserscheitel (3 Tage vor dem Scheitel, Scheiteltag, 3 Tage nach dem Scheitel) zusammengestellt. Enthalten sind auch die Fracht der abfiltrierbaren Stoffe sowie die Durchflussmenge der 7-tägigen Hochwasserzeiträume. Letztere war im Jahr 2013 deutlich größer als bei den Hochwasserereignissen 2002 und 2006. In der betreffenden Juniwoche 2013 wurde jedoch lediglich im Fall des Cadmiums die größte Fracht transportiert, die auch nur wenig größer war als beim Hochwasser 2002. Die Frachten waren 2013 abgesehen von den abfiltrierbaren Stoffen und von Zink größer als beim Hochwasser im Jahr 2006, aber mit Ausnahme der abfiltrierbaren Stoffe und von Cadmium niedriger als beim Hochwasser 2002.

Tab. 4.5: Vergleich der Frachtschätzungen von abfiltrierbaren Stoffen, Schwermetallen und Arsen der Elbe bei Magdeburg über 7 Tage während der Hochwasserereignisse 2002, 2006 und 2013 (Zahlen gerundet; die größten Frachten sind **fett** gedruckt; k.D.: keine Daten)

Zeitraum (Hochwasserscheitel*)		**16.-22.08.2002 (19.08.2002)**	**02.-08.04.2006 (05.04.2006)**	**06.-12.06.2013 (09.06.2013)**
Durchflussmenge*	[1 000 m³]	2 044 000	2 032 000	**2 597 000**
abfiltrierbare Stoffe	[t]	56 500	**82 200**	71 700
Arsen	[kg]	**20 400**	8 200	15 400
Blei	[kg]	**21 000**	13 500	15 500
Cadmium	[kg]	420	380	**430**
Kupfer	[kg]	**15 600**	k.D.	14 900
Quecksilber	[kg]	**180**	110	150
Zink	[kg]	79 200	**92 400**	69 000
* nach Tagesmittelwerten des Durchflusses am Pegel Magdeburg-Strombrücke				

4.3.5 Fazit

Mit dem Messprogramm Extremereignisse konnte eine Fülle von Daten der Wasser- und Schwebstoffbeschaffenheit zum Hochwasser der Elbe im Juni 2013 gewonnen und zeitnah der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. In den Wasser- und Schwebstoffproben wurden in einigen Fällen stark erhöhte Konzentrationen von Schwermetallen/Arsen nachgewiesen. Im Schwebstoff war der Gehalt organischer Schadstoffe (wie HCH, DDD, DDE) stellenweise stark erhöht. Während des Hochwassers wurden große Schadstofffrachten transportiert, bei den Schwermetallen in einzelnen Fällen mehr als 100 % der Jahresfracht 2012. Die Frachten von Schwermetallen und Arsen waren in der Elbe bei Magdeburg abgesehen von Blei am größten. Beim Vergleich der Schwermetall- und Arsenfracht der Elbe bei Magdeburg über jeweils 7 Tage rund um den Scheitel der Hochwasser 2002, 2006 und 2013 wurde trotz größerer Durchflussmenge im Jahr 2013 nur für Cadmium eine größere Fracht geschätzt als bei beiden vorausgegangenen Ereignissen.

4.4 Schadstoffbelastung in der Tideelbe und Tideweser

4.4.1 Tideelbe

Die Entwicklung der Schadstoffbelastung in Feststoffen der Tideelbe wird von der BfG teilweise seit 1980 an vier Dauermessstationen (DMS) (Wedel, Elbe-km 642, Bützfleth, Elbe-km 657,5, Brunsbüttel, Elbe-km 696,3 und Cuxhaven, Elbe-km 726,5) erfasst. Außerdem werden Daten an einer DMS direkt oberhalb des Ästuareingangs bei Geesthacht (Elbe-km 585,9) erhoben. Die dafür in der Regel monatlich erfolgende Entnahme von Schwebstoffen und schwebstoffbürtigen Sedimenten wird mittels Sedimentationsbecken oder Van-Veen Greifer von den Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSÄ) Hamburg und Cuxhaven durchgeführt. Die ausgewählten Schadstoffe sind vornehmlich an die Feinkornfraktionen der Sedimente gebunden. Entsprechend werden Spurenmetalle in der Fraktion <20 µm untersucht und die Gehalte der in der Gesamtfraktion <2 000 µm gemessenen organischen Schadstoffe auf die Fraktion <63 µm normiert. Mit Beginn des Hochwassers am Bezugspegel Neu Darchau (Elbe-km 536,5) wurde die Probenahmefrequenz an den fünf o.g. DMS der BfG erhöht.

Aufgrund der aus früheren Messungen bekannten zeitlichen Verzögerung des Transportes der Feststoffe im Ästuar und damit des zum Hochwasserscheitel verzögerten Erreichens der maximalen Schadstoffgehalte wurden bis September an den Stationen Geesthacht Wehr, Wedel und Bützfleth wöchentlich und in Brunsbüttel und Cuxhaven zweiwöchentlich Proben entnommen. Bei den im Folgenden beschriebenen Schadstoffen handelt es sich um Stoffe, die fast ausschließlich aus dem Oberlauf der Elbe in die Tideelbe eingetragen werden (ausgenommen Tributylzinn (TBT) mit Quelle im Hamburger Hafen) und somit die Auswirkungen eines Hochwasserereignisses auf das Ästuar gut abbilden können. Die untersuchten zum Teil schon lange weltweit oder zumindest in vielen Ländern verbotenen Substanzen Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT) mit seinen Abbauprodukten Dichlordiphenyldichlorethan (DDD) und Dichlordiphenyldichlorethen (DDE) (erste Verbote seit 1972) sowie das Hexachlorbenzol (HCB, Verbot als Pflanzenschutzmittel seit den 1980er-Jahren) und die Summe der 7 Polychlorierten Biphenyle ($\sum_7$PCB, PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180; weltweites Verbot seit 2001) lagern zum Teil noch in Buhnenfeldern der Ober- und Mittelelbe oder an alten Industriestandorten und können bei einem Hochwasserereignis verstärkt mobilisiert werden.

Wie in Abb. 4.21 für Wedel am Beispiel von p,p‘-DDD dargestellt, zeigt der Schadstoffgehalt eine Abhängigkeit vom Oberwasserzufluss (Bezugspegel in Neu Darchau). Steigende Oberwasserzuflüsse führen in der Regel zu steigenden Schadstoffgehalten in Feststoffen der Tideelbe und umgekehrt, sofern diese ihre Hauptquelle im Oberlauf haben.

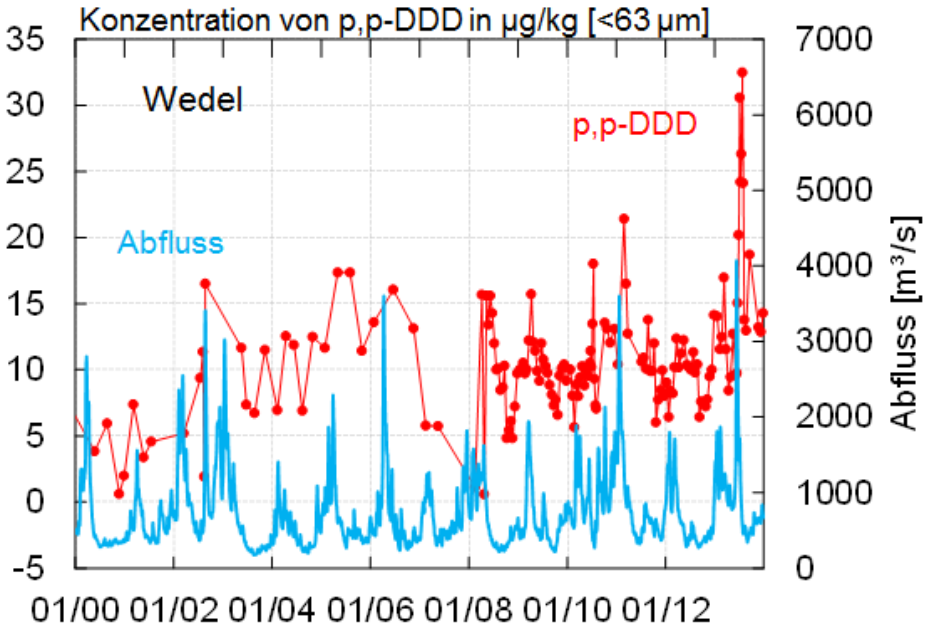


Abb. 4.21: Zeitliche Entwicklung (2000-2014) der Gehalte des p,p`-DDD an der DMS Wedel an der Elbe und des Oberwasserabflusses am Bezugspegel Neu Darchau, Elbe-km 536,5.

Bereits im Januar/Februar 2013 konnten höhere Oberwasserzuflüsse registriert werden und die Schadstoffgehalte reagierten mit einem Anstieg, der je nach Schadstoff anschließend wieder zurückging oder auf dem erhöhten Niveau verblieb. Auf das Hochwasserereignis im Juni 2013 folgte an den Stationen im Elbeästuar, nämlich Geesthacht, Wedel Brunsbüttel und Cuxhaven, erneut ein Anstieg der Schadstoffgehalte, so dass zum Teil die bereits erhöhten

Schadstoffgehalte für die vorangegangenen hohen Oberwasserzuflüsse noch weiter stiegen (fast ausschließlich organische Schadstoffe). Am deutlichsten sind die Konzentrationsanstiege am Ästuareingang in Geesthacht und in Wedel zu beobachten. Der Hochwasserscheitel in Neu Darchau wurde am 11.06.2013 erreicht. Im Zeitraum 01.07.2013-05.07.2013 kam es zu einem zweiten kleinen Anstieg des Oberwasserzuflusses in Neu Darchau. In Geesthacht sowie im Ästuar an der Station Wedel sind auch bei den Schadstoffgehalten zwei Anstiege zu erkennen (Abb. 4.22). Bei einigen Schadstoffen sind die Gehalte beim zweiten Anstieg sogar höher als beim ersten Anstieg. Der erste Konzentrationsanstieg am Ästuareingang (Geesthacht) erfolgte im Zeitraum 13.06.-20.06.2013 und damit relativ zeitnah zum Hochwasser. Nach einem kurzen Absinken der Schadstoffgehalte erfolgte der zweite Anstieg 4 Wochen nach dem ersten Anstieg. In Wedel traten die Anstiege der Schadstoffkonzentrationen etwas zeitversetzt (erster Anstieg nach 3 Wochen, zweiter Anstieg nach 7 Wochen) auf (Abb. 4.23). In Cuxhaven ist nur ein Anstieg der Schadstoffgehalte nach ca, 3-4 Wochen zu erkennen. Wegen eines Probenausfalls in der zweiten Julihälfte wurde das Maximum der Schadstoffbelastung bei Cuxhaven evtl. nicht erfasst. Während des Hochwassers übersteigen in Wedel die maximalen Gehalte der im Oberlauf noch in stark erhöhten Konzentrationen vorliegenden Schadstoffe p,p‘-DDE und p,p`-DDD das 3-Jahresmittel von 2010-2012 um das 3-fache. Die Gehalte des p,p‘-DDT am Wehr Geesthacht zeigen während des Hochwassers im Juni 2013 einen relativ geringen Anstieg und liegen in der gewöhnlichen Schwankungsbreite im Vergleich zum 3-Jahresmittelwert 2010-2012, obwohl die Gehalte dieses Schadstoffes im Schwebstoff des Oberlaufs der Elbe erhöht sind (siehe Kap. 4.3). Allerdings handelt es sich bei den Jahren 2010 und 2011 um sehr abflussreiche Jahre, in denen immer wieder hohe p,p`-DDT-Konzentrationen in Schwebstoffen bei Geesthacht gemessen wurden. Gegenüber dem hohen 3-Jahresmittelwert von 2010-2012 fiel der Anstieg der p,p-DDT-Gehalte gering aus. Die auffallend erhöhten Konzentrationen des p,p`-DDT in den Jahren 2010 und 2011 ohne gleichzeitige Erhöhung der Konzentrationen in derselben Größenordnung der Metabolite p,p`-DDD und p,p`-DDE und anderer Schadstoffe ist momentan noch nicht geklärt und muss weiter untersucht werden. Die Gehalte des p,p`-DDD und p,p`-DDE stiegen auch bei Cuxhaven deutlich an und lagen höher als die Maxima der vorangegangenen Hochwasserphasen. Für die übrigen Schadstoffe waren dagegen während des Hochwasserereignisses 2013 nur leicht erhöhte Gehalte in ähnlicher Größenordnung wie bei den Hochwasserereignissen 2002 und 2006 zu beobachten.

In Wedel übersteigen die Maximalgehalte der $\sum_7$PCB sowie der Gruppe der Hexachlorcyclohexane (HCH’s) das 3-Jahresmittel um das 2- bis 3-fache.

Organozinnverbindungen wie das TBT, Dibutylzinn (DBT) und das Monobutylzinn (MBT) haben durch ihre frühere Verwendung als Schiffsanstriche ihre Hauptquelle im Hamburger Hafen. Die höchsten Gehalte dieser Schadstoffgruppe liegen daher im Bereich des Hamburger Hafens und nicht wie bei den übrigen betrachteten Schadstoffen am Wehr Geesthacht. Während des Juni-Hochwassers 2013 wird aber am Ästuareingang in Geesthacht das 3-Jahresmittel aller Organozinnverbindungen (TBT, DBT, MBT) um das 2-3-fache überschritten. Die Gehalte an der Station Geesthacht sind sogar höher als in Schwebstoffen bei Wedel. Im weiteren Verlauf der Elbe sind die Anstiege der Gehalte der Organozinnverbindungen nicht so deutlich.

Die Maximalgehalte der Spurenmetalle zeigen an den betrachteten Stationen im Vergleich zum 3-Jahresmittel einen Konzentrationsanstieg um das 1,3- bis 1,5-fache (Arsen 2-fach in Geesthacht), liegen also in der natürlichen Schwankungsbreite.

An den Stationen Brunsbüttel und Cuxhaven sind kaum noch Konzentrationsanstiege aufgrund des hohen Oberwasserzuflusses im Juni 2013 zu verzeichnen. Durch den hohen marinen Anteil an diesen Stationen werden die durch das Hochwasser bedingten erhöhten Schadstoffeinträge zu sehr verdünnt. Lediglich einige chlororganische Schadstoffe lassen einen Anstieg im Konzentrationsniveau erkennen.

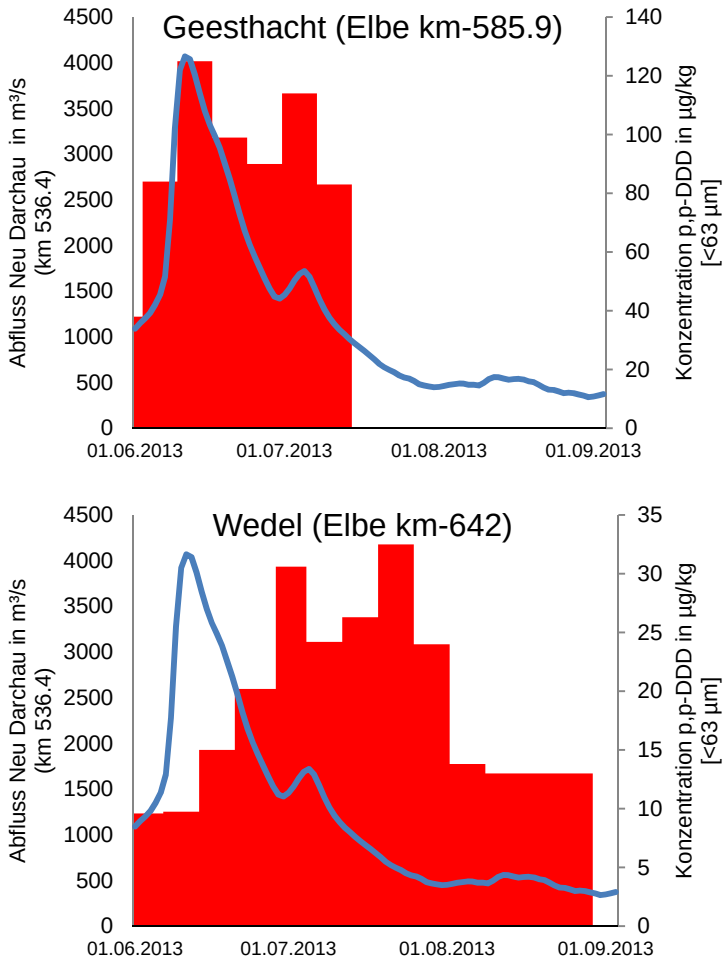


Abb. 4.22: Ausschnittsvergrößerung des Konzentrationsverlaufs von p,p-DDD an den DMS Geesthacht und Wedel und des Oberwasserabflusses am Bezugspegel Neu Darchau

Für die verschiedenen Probenahmezeiträume wurden die Schadstofffrachten am Ästuareingang in Geesthacht während des Hochwassers im Jahr 2013 aus den bei Hitzacker ermittelten Schwebstofffrachten (siehe Kap. 4.1) und den bei Geesthacht gemessenen Schadstoffgehalten berechnet (Tab. 4.6). Wie schon beim Oberwasserzufluss und den Schadstoffgehalten können auch bei den Frachten zwei Anstiege beobachtet werden. So steigt die Schadstofffracht zu Beginn des Hochwassers an, verringert sich dann ab dem 20.06.2013, um dann ab dem 04.07.2013 wieder anzusteigen.

Die transportierte Fracht im Zeitraum 03.06.2013-20.06.2013, also im Zeitraum des Hochwasserscheitels, entspricht für die Spurenmetalle rund 17-30 %, für die organischen Schadstoffe (ausgenommen p,p`-DDT mit 18 %) rund 56-64 % der Jahresfracht 2012. Da in Geesthacht vom 06.06.-10.06. keine Daten vorliegen, ist davon auszugehen, dass es hier zu einer leichten Frachtunterschätzung kommt.

Tab. 4.6: Schadstofffrachten [kg] am Wehr Geesthacht während des Hochwassers im Juni und Juli 2013

	03.06.-06.06.	10.06-13.06.	13.06.-20.06.	20.06.-27.06.	27.06.-04.07.	04.07.-11.07.	Jahresfracht 2012
Cadmium [kg] < 20 µm	56	175	208	72	35	40	2 540
Quecksilber [kg] < 20 µm	17	86	144	41	17	20	810
Kupfer [kg] < 20 µm	861	2 807	3 663	1 229	567	764	37 460
HCB [kg] < 63 µm	0,44	2,92	2,85	0,79	0,55	0,61	11
p,p-DDT [kg] < 63 µm	0,24	0,78	3,35	0,48	0,08	0,45	24
p,p-DDD [kg] < 63 µm	0,47	2,61	4,14	1,15	0,67	0,94	12
p,p-DDE [kg] < 63 µm	0,24	0,78	1,29	0,41	0,22	0,26	3,6

Die Schadstoffkonzentrationen in den Sedimenten von den DMS im Ästuar und von Geesthacht während des Junihochwassers im Jahr 2013 sind auf einem ähnlichen Niveau wie die Konzentrationen des Hochwasserereignisses im Jahr 2002. Im Ästuar werden die höchsten gemessenen Konzentrationen während der drei Hochwasserereignisse von 2002, 2006 und 2013 für einige Schadstoffe im Jahr 2006 registriert.

4.4.2 Tideweser

Die Entwicklung der Schadstoffbelastung in Feststoffen der Tideweser wird von der BfG teilweise seit 1987 an vier DMS (Bremen Insel, Weser-km 7,3; Farge, Weser-km 26,13; Nordenham, Weser-km 56,8 und Bremerhaven Nordschleuse, Weser-km 69,79) erfasst. Außerdem werden Daten an einer DMS direkt oberhalb des Ästuareingangs bei Hemelingen (Weser-km 360,95) erhoben. Die Probenahmen und die Untersuchung auf Schadstoffe erfolgten auf die gleiche Art und Weise wie schon für die Elbe beschrieben. Das Hochwasser an der Weser erreichte den Bezugspegel Intschede (Weser-km 331,3) ca. am 28.05.2013 und hielt bis zum 10./11.06.2013 an. An der Weser wurde die Probenahmefrequenz während des Hochwassers nicht erhöht, so dass Monatsmischproben aus Juni bis Oktober vorliegen. Während des Hochwassers musste außerdem der Probensammler am Ästuareingang in Hemelingen entfernt werden, so dass hier keine Schadstoffdaten vorliegen. An den in Abb. 4.23 gezeigten Stationen Farge und Bremerhaven ist in der Zeit des Hochwasserereignisses ein deut-

licher Anstieg der Konzentration, hier: p,p-DDD, zu erkennen. Gegenüber dem 3-Jahresmittel 2010-2012 sind die Gehalte der Schwermetalle und der organischen Schadstoffe der Monatsmischprobe aus dem Juni an der Station Farge um das 1,2- bis 1,4-fache nur gering erhöht und liegen in der natürlichen Schwankungsbreite. Nur die Gehalte des p,p`-DDD und p,p`-DDE aus dem Juli übersteigen das 3-Jahresmittel um das fast 3-fache. Im Mündungsbereich des Weserästuars bei Bremerhaven sind die Auswirkungen des Hochwassers geringer und nur bei einzelnen Schadstoffen kann ein Anstieg in den Gehalten beobachtet werden (p,p`-DDE und p,p`-DDD, HCB und Kupfer).

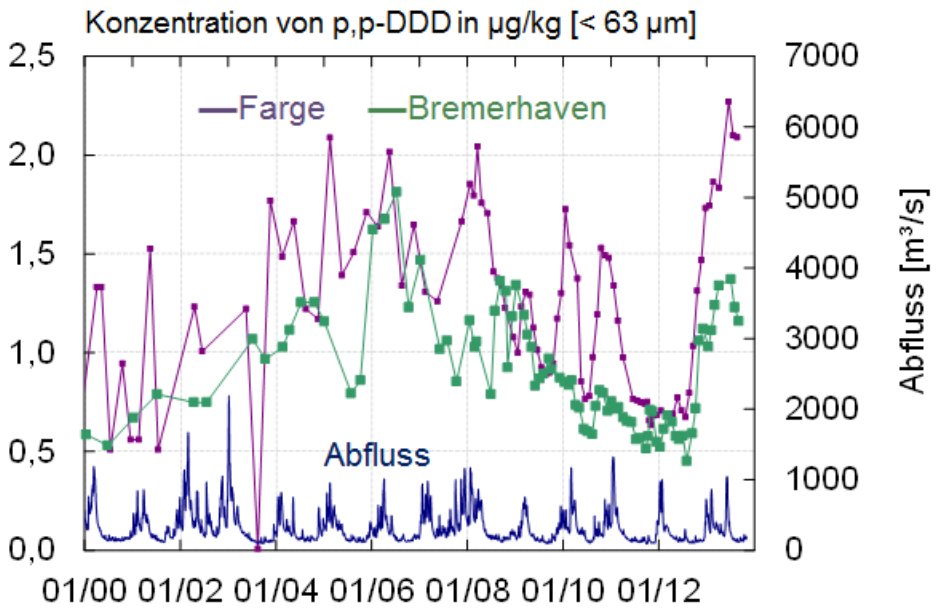


Abb. 4.23: Zeitliche Entwicklung (2002-2013) der p,p-,-DDD-Gehalte an zwei Dauermessstationen der Tideweser (Farge und Bremerhaven) mit dem Oberwasserabfluss am Bezugspegel Intschede, Weser-km 331,3.

4.4.3 Fazit

Das Hochwasser im Juni 2013 an der Elbe führte zu deutlichen Konzentrationsanstiegen der Schadstoffe in Schwebstoffen und schwebstoffbürtigen Sedimenten in der Tideelbe. Die organischen Schadstoffe zeigten dabei einen stärkeren Anstieg der Gehalte als die Schwermetalle. Im Vergleich zu den Hochwasserereignissen 2002 und 2006 liegen die Schadstoffgehalte in etwa auf dem Niveau von 2002. Die Frachtberechnungen zeigen, dass die mit dem Hochwasser transportierte Schadstoffmenge einen beträchtlichen Anteil der Jahresschadstofffracht ausmachen kann. Die transportierte Fracht von organischen Schadstoffen im Zeitraum 03.06.-20.06.2013 beträgt bis zu 64 % der Jahresschadstofffracht 2012. Der Anteil für Schwermetalle ist deutlich geringer (bis 30 %).

Auch an der Weser sind für den Zeitraum des Hochwassers Konzentrationsanstiege der Schadstoffe zu erkennen, allerdings liegen diese Anstiege in der natürlichen Schwankungsbreite, so dass hier keine besonderen Auffälligkeiten zu verzeichnen sind. Nur das p,p`-DDD und p,p`-DDE zeigen in der Mischprobe aus dem Juli eine Erhöhung der Gehalte um das 3-fache.

5 Ereigniserfassung und Hydrometrie

Matthias Adler, Björn Baschek, Jörg Uwe Belz, Herbert Brockmann, Norbert Busch, Jochen Claes, Katja Daedlow, Marcus Hatz, Dietmar Mothes

5.1 Wasserstandsmessung an den Bundeswasserstraßen im Juni 2013 und ihre Kommunikation

Das hydrologische Messnetz in Deutschland ist aufgeteilt auf das übergreifende Pegelnetz des Bundes, betrieben durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV), sowie auf 16 Bundesländer, auf kommunale Gebietskörperschaften und auf Dritte (z.B. Trinkwasserversorger).

Es umfasst rund 4 250 gewässerkundliche Pegel, davon ca. 3 000 Pegel mit Durchflussermittlung. Beobachtet und dokumentiert wird dabei das gesamte Binnengewässersystem (bis hinunter zu Gräben) mit einer Gesamtlänge von rund 500 000 km.

Die großen, schiffbaren Fließgewässer in den Stromgebieten von Rhein, Donau, Elbe, Oder, Weser und Ems werden durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes betreut. Hier betreibt die WSV neben zahlreichen Messanlagen zu Betriebs- und Steuerungszwecken rund 620 gewässerkundliche Pegel, davon 163 Stationen mit Ab- bzw. Durchflussermittlung.

Nicht zuletzt aufgrund der Erfahrungen aus den vorangegangenen Hochwassern der jüngeren Vergangenheit wurde das Pegelmessnetz des Bundes grundlegend modernisiert, unter anderem um Betriebssicherheit auch in Extremsituationen zu gewährleisten. Dazu gehört auch die Höherlegung von Stationen auf hochwassersichere Niveaus oder auch die Vorhaltung redundanter Einrichtungen zu Wasserstandsmessung und Datenübertragung (vgl. Qualitätszirkel Gewässerkunde 2009). Damit sollten die Dienststellen der WSV besser in die Lage versetzt werden, im Ereignisfall gemäß § 35 WaStrG den Hochwassermelde- und Informationsdienst durchzuführen.

Beim Juni-Hochwasser 2013 standen die Bundeswasserstraßen Donau und Elbe besonders im Fokus (vgl. Kap. 3), in beiden Fällen konfrontiert mit vielfach überschrittenen HHW und Spitzenabflüssen in der Größenordnung jenseits eines HQ_{100}. Den hier zuständigen Behörden der WSV oblag neben der Bereitstellung hochwasserrelevanter Informationen für Schifffahrt und schifffahrtsaffines Gewerbe auch die kontinuierliche Bereitstellung von Wasserstandsinformationen für den Hochwasser- und Katastrophendienst der Bundesländer. Darüber hinaus wurden durch die WSV, die Bundesoberbehörden BfG und BAW sowie Messtrupps der Länder umfängliche Abflussmessungen über das gesamte Abflussspektrum, insbesondere entlang von Elbe und Saale durchgeführt (vgl. Kap. 5.3) und Hochwasserstäbe der Länder bei ihrer Aufgabenwahrnehmung (z.B. Erstellung der Hochwasservorhersage, Flutung Havelpolder) umfassend unterstützt.

Der Hochwasserdienst der WSV umfasste neben der Datenbereitstellung auch den Betrieb und die Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der bundeseigenen Messanlagen sowie der jeweiligen Datenübertragungswege. Konkret gewährleisteten die jeweiligen Dienststellen während des Hochwasserereignisses eine stündlich aktualisierte Bereitstellung der Wasserstände (Rohdaten) für die hochwasserrelevanten Pegel an den Bundeswasserstraßen. Der Melde- und Informationsdienst erfolgte dabei für als solche vorab bestimmte Hochwasser-Meldepegel, Hochwasser-Vorhersagepegel und Pegel für spezielle Anforderungen (Polderflutung zur Scheitelkappung, Deichbrüche etc.). Aber auch für die übrigen Pegel der WSV an den betroffenen Gewässern konnte die Datenaktualität weitestgehend gewährleistet werden.

Die Datenbereitstellung für die zuständigen Landesdienststellen und Dritte erfolgte in erster Linie über PEGELONLINE, ein gewässerkundliches Informationssystem der WSV (vgl. Kap. 5.2.3, www.pegelonline.wsv.de). Zusätzlich ist in den Hochwasservorhersagezentralen der Länder der direkte Datenabruf der hochwasserrelevanten Pegel möglich.

Allgemein ist festzuhalten, dass die Aufgabenerfüllung der WSV-Dienststellen beim Juni-Hochwasser 2013 trotz knapper Personalressourcen mit großer Zuverlässigkeit erfolgte. Das war nur durch die außerordentliche Einsatzbereitschaft der eingesetzten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, teils im Schichtbetrieb rund um die Uhr, möglich. Hervorzuheben ist auch die kollegiale Unterstützung der Belegschaft an den Brennpunkten durch Personal aus nicht oder weniger hochwasserbetroffenen Dienststellen aus anderen Landesteilen.

Im Folgenden werden die flussgebietsspezifischen Erfahrungen beim Pegelbetrieb unter derart extremen Bedingungen, wie sie an Elbe, Saale und Donau vorgeherrscht haben, zusammengefasst.

5.1.1 Donau

Erstmals konnten sich die im Rahmen der Pegelmodernisierung durchgeführten Aus- und Umbaumaßnahmen im Zuständigkeitsbereich der Außenstelle Süd der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) einer Bewährungsprobe unterziehen. Dabei hat sich die redundante (d.h. mit gedoppelten Systemen durchgeführte) Messwerterfassung, -speicherung und -übertragung grundsätzlich sehr bewährt. Vor diesem Hintergrund soll dies, wo noch nicht geschehen, an allen für die Hochwassererfassung relevanten Pegelstandorten fortgeführt und vervollständigt werden.

Auch die Zusammenarbeit der Dienststellen an der Schnittstelle zwischen Bund und Ländern zur Datenbereitstellung im Hochwassernachrichtendienst verlief gut.

Verbesserungsmöglichkeiten ergaben sich entsprechend der Praxiserfahrungen an den Bundeswasserstraßen Main und Donau in zweifacher Hinsicht:

Eine unvollständige Messwertplausibilisierung im Zusammenspiel der Original- mit der Redundanzmesseinheit hat in einigen Fällen am Main und an der Donau zu Fehlinformationen bei den im Internet unter PEGELONLINE veröffentlichten Daten geführt. Entsprechende Schritte zur Optimierung sind eingeleitet.

Gemäß den einschlägigen Vorgaben (vgl. Qualitätszirkel Gewässerkunde 2009) sollten gewässerkundliche Messstellen mit ihrer digitalen Messwerterfassung sowie auch Pegel für den Hochwassernachrichtendienst mindestens bis zum Wasserstandsniveau eines HQ_{200} ausgebaut sein. Für extreme Situationen, wie zum Beispiel in Passau/Donau mit darüber hinausgehenden Durchflüssen der Größenordnung eines 200-500-jährlichen Wiederkehr-

intervalls war es deshalb nicht verwunderlich, dass die digitale Messwerterfassung ca. 70 cm unter dem Scheitel ausfiel. Auch eine außerordentliche Beobachtung gelang erst in engem Zusammenwirken zwischen Wasserwirtschaftsamt und WSV nach dem provisorischen Anbringen einer verlängerten Pegellatte. Insofern wäre aufgrund dieser Erfahrungen möglicherweise zu überprüfen, welche Ausbaustandards für den Pegelbetrieb bei Extremhochwasser erforderlich bzw. gewünscht sind. Dies gilt gleichermaßen für die digitale Messwerterfassung wie für die außerordentlichen Beobachtungen.

5.1.2 Elbe

Nach dem August-Hochwasser 2002 begann im Bereich der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle Ost die Ausrüstung der Hochwasserpegel mit redundanter Mess- und Übertragungstechnik. Seit 2010 sind mit der Umsetzung der Pegelmodernisierung gemäß Qualitätszirkel Gewässerkunde (2009) alle hochwasserrelevanten Pegel im hiesigen Zuständigkeitsbereich mit redundanter Technik zur Datenerfassung, -speicherung und -übertragung sowie Energieversorgung ausgestattet. Dieses Konzept hat sich während des Juni-Hochwassers 2013 bewährt. Mit der schrittweisen Umrüstung der Anlagen auf IP-basierte Übertragung der Messwerte (push-Betrieb) wird eine weitere Optimierung der Datenbereitstellung erzielt werden können.

Inwieweit die Notwendigkeit zur Anpassung der vorhandenen baulichen Anlagen für die Messtechnik als Folge des Hochwasserereignisses besteht, wird derzeit geprüft. Um im Fall zukünftiger Hochwasserextremereignisse, die oberhalb der Bemessungsgrenzen der baulichen Anlagen der Messtechnik liegen, eine kontinuierliche Messwerterfassung zu gewährleisten, werden schnell installierbare Ersatzmessgeräte vorrätig gehalten.

Auch bei Ausfall bzw. Abschaltung der öffentlichen Strom- und Telekommunikationsversorgung (Festnetz) blieben die mit redundanter Energie- und Übertragungstechnik ausgestatteten Pegel erreichbar bzw. wurden rund um die Uhr mit Notstromaggregaten im Einsatz gehalten. Zusätzliche Messtechnik wurde als Folge des Komplettausfalls einzelner Messanlagen (nach Überschreitung des HHW um mehr als einen Meter) bzw. vorsorglich zur Absicherung der Verfügbarkeit der jeweiligen Messstelle eingerichtet.

Die Zusammenarbeit mit den Landesdienststellen war ganz überwiegend gut. Im Bereich der oberen Elbe kam es vereinzelt zu Kommunikationsproblemen mit örtlichen Behörden im Hinblick auf die Durchführung von Durchflussmessungen (Pegel Schöna) oder die Instandsetzung defekter Pegeltechnik (Pegel Dresden), die teilweise Folgen des WSV-umstrukturierungsbedingten Personalmangels sind. Dergestalt erkannten Optimierungsmöglichkeiten wird im Rahmen der Überarbeitung und Fortschreibung bestehender Verwaltungsvereinbarungen mit den Ländern zum Hochwassermelde- und -informationsdienst nachgegangen.

Neben einer Überprüfung, ob und inwieweit sich die Zusammenarbeit mit den Hochwasserzentralen der Länder weiter verbessern lässt, haben die Erfahrungen aus dem Hochwasser 2013 gezeigt, dass der Kontakt zu den Katastrophenstäben von besonderer Bedeutung ist. Der Informationsaustausch bei besonderen Situationen, wie beispielsweise Deichbrüchen, muss gewährleistet sein, damit die Erreichbarkeit der Pegelstandorte und Durchflussmessstellen für Fahrzeuge der WSV und externer Fachkräfte im Auftrag der WSV abgesichert ist.

5.1.3 Internetgestützte Pegeldatenkommunikation

Mittels der Systeme PEGELONLINE (www.pegelonline.wsv.de) und ELWIS (www.elwis.de) werden aktuelle WSV-Pegeldaten intern und extern via Internet verteilt. Beide Applikationen verzeichneten die höchsten jemals gemessenen Zugriffe auf deren Webseiten und Dienste. Insbesondere durch die Einbindung von PEGELONLINE-Diensten auf Webseiten anderer Medien (bild.de, stern.de, nzz.ch, tagesschau.de etc.) stiegen die Zugriffszahlen gegenüber dem (nahezu landesweiten) 2011er-Hochwasser um ca. 400 %.

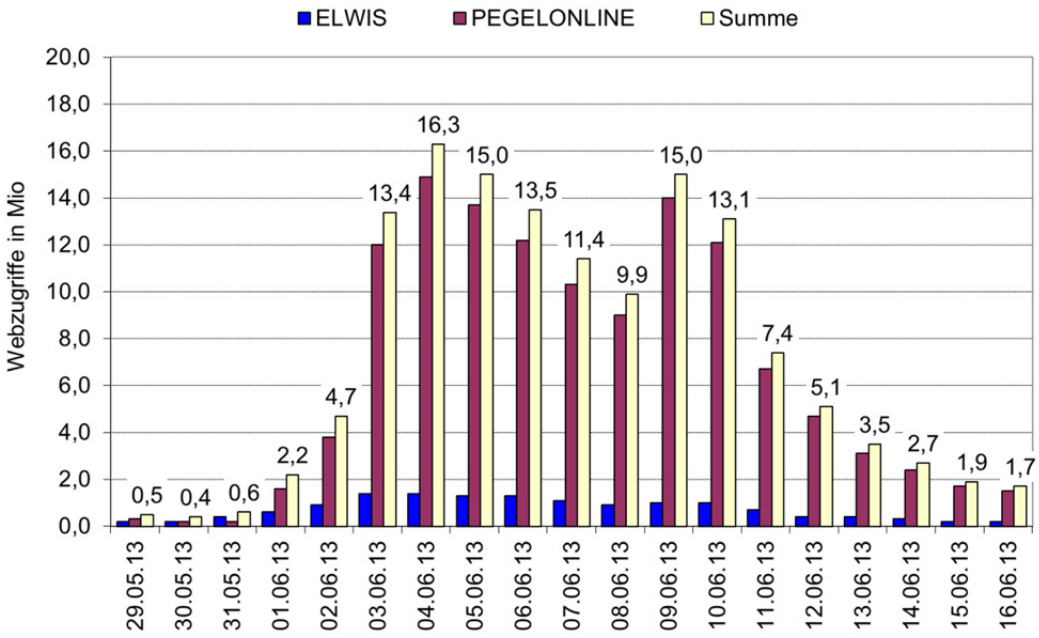


Abb. 5.1: Tägliche Webzugriffe (pages) vom 29.05. bis 16.06.2013 auf ELWIS und PEGELONLINE sowie deren Summen

Die Webzugriffe lassen sich wie folgt zusammenfassen:

> innerhalb 19 Tagen 138,28 Mio. Zugriffe (ELWIS und PEGELONLINE)

> maximaler Zugriff pro Tag: 16,3 Mio. Webseitenaufrufe (pages), 04.06.2013

> maximaler Zugriff pro Stunde: 1,2 Mio. = ∅ 333/sec. (05.06.2013, 11-12 Uhr)

> maximale Zugriffe pro Sekunde: mehrfach bis zu 600 pages/sec.; ~350 Mbit/sec.

> In der Woche lag der Anteil mobiler Geräte (Tablets, Smartphones) bei 10-15 %. An Wochenenden stieg deren Anteil auf 20-25 % (davon jeweils 52% iOS, 45 % Android).

> Von allen öffentlichen PEGELONLINE-Diensten verzeichnen folgende die meisten Zugriffe: SOAP 46 %, REST 20 %, Ganglinien 20 %, einbettbare Karte 7 %.

> Analysiert man die Dienste, über die die meisten Daten (KB Download) abgegeben wurden, so ändern sich die Rangfolge: REST 32 %, Kartenkacheln 24 %, SOAP 7 %, Ganglinien 4 %.
Da die Lieferung von Kartenkacheln wie ein REST funktioniert, stellen die REST-Dienste mit zusammen 56 % die dominierende Technik dar. OGC-Dienste wie WMS (1,1 %) oder WFS (0,1 %) spielen eine geringe Rolle.

Insgesamt hat die Bereitstellung von gewässerkundlichen Daten via PEGELONLINE und ELWIS sehr gut funktioniert. Mittels 24-h-Bereitschaftsdiensten konnten über 4 Wochen die meisten Probleme umgehend gelöst werden. Auch aus gegebenem Anlass neu gesetzte Pegel (Ersatzpegel) konnten schnell in die vorhandene Dateninfrastruktur eingebunden werden.

Die Datenbereitstellung dominieren leichtgewichtige und einfache nutzbare Dienste wie REST, die vielfach durch externe Webseiten und APPs angesprochen werden. Es ist damit zu rechnen, dass bei einem zukünftigen Hochwasser nochmals wesentlich höhere Webzugriffe auftreten.

5.2 Abflussmessungen an Bundeswasserstraßen

Die WSV betreibt an frei fließenden und staugeregelten Flüssen 163 Pegel mit kontinuierlicher Abflussermittlung. Die jeweils zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämter (WSÄ) führen regelmäßig bei unterschiedlicher Wasserführung Abflussmessungen durch, um mit den gewonnenen Daten die Abflusskurven der Pegel zu aktualisieren. Die Abflusskurve stellt die funktionale Abhängigkeit des Abflusses vom Wasserstand dar. Sie dient dazu, kontinuierliche Wasserstandsganglinien in kontinuierliche Abflussganglinien zu transformieren (Abb. 5.2).

Abflussmessungen haben unter günstigen Randbedingungen eine Unsicherheit von 5 %. Die Abflusskurve stellt als Ausgleichslinie die bestmögliche Anpassung an die Messwerte dar. Sie hat eine höhere Genauigkeit als die Einzelmessungen (rote Punkte in der mittleren Grafik in Abb. 5.2).

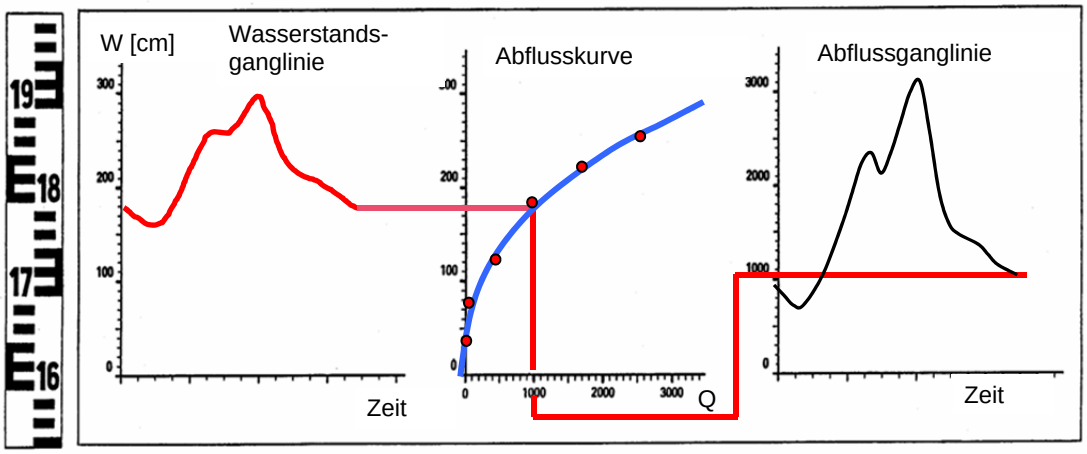


Abb. 5.2: Prinzip der kontinuierlichen Abflussermittlung

Vom Hochwasser im Juni 2013 waren die Bundeswasserstraßen sehr unterschiedlich betroffen. Während an Elbe, Saale, Donau, Werra, Ober- und Mittelrhein hohe bis extrem hohe Abflüsse auftraten, gab es an Niederrhein, Mosel, Saar, Lahn, Main, Neckar, Fulda, Weser, Aller und Oder keinen hochwasserbedingten Anlass für verstärke Messaktivitäten.

Besonders intensiv wurde an Elbe und Saale gemessen. Auf der Grundlage der gewonnenen Daten wurden sämtliche Abflusskurven der Pegel dieser beiden Flüsse überarbeitet und zum Teil deutlich im Bereich extremer Wasserstände erweitert. Die Ergebnisse sind im Bericht

„Neue Abflusskurven an Elbe und Saale auf der Grundlage von Durchflussmessungen während des Extremhochwassers im Juni 2013“ (BfG 2014) detailliert dargestellt.

Abflussmessungen an den anderen vom Hochwasser betroffenen Flüssen fanden nur in geringem Umfang statt und führten nicht zur Revision der bestehenden Abflusskurven. Die Messaktivitäten an Donau, Werra, Ober- und Mittelrhein sind in Abschnitt 5.2.2 tabellarisch zusammengefasst.

Sämtliche Messungen an Bundeswasserstraßen wurden mit Ultraschall-Doppler-Geräten, Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP), ausgeführt.

5.2.1 Abflussmessungen an Elbe und Saale

Während des Hochwasserereignisses im Einzugsgebiet der Elbe im Juni 2013 erfolgten durch die jeweiligen Bundes- und Landesbehörden umfängliche Durchflussmessungen entlang der Gewässer Elbe und Saale. Mit Hilfe der Messungen wurde eine erhebliche Qualitätsverbesserung für die einzelnen Abflusskurven erreicht. So konnten die durch Messungen belegten Hochwasserabschnitte der Abflusskurven zum Teil deutlich erhöht werden. Im Verlauf des Hochwassers im Juni 2013 wurde der Abfluss an der Elbe 139-mal und an der Saale 44-mal ermittelt. An den Messungen beteiligt waren:

> die Bundesanstalt für Gewässerkunde
> die Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle Ost
> das Wasser- und Schifffahrtsamt Brandenburg
> das Wasser- und Schifffahrtsamt Magdeburg
> das Wasser- und Schifffahrtsamt Dresden
> der Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt
> Rijkswaterstaat Zuid-Nederland (Ministerium für Verkehr und Wasserbau Süd-Niederlande)
> Český hydrometeorologický ústav (Tschechisches Hydrometeorologisches Institut)
> das Ingenieurbüro Schmid (im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau)

Nicht nur im Bereich extremer Wasserstände, sondern auch im mittleren Hochwasserbereich lieferten die Messungen an verschiedenen Pegeln die Grundlage für Korrekturen. Besonders die bisher gültigen Saale-Abflusskurven konnten erheblich verbessert werden. Damit wird sich zukünftig auch die Qualität von Hochwasservorhersagen, hydraulischen Modellen, Extremwertstatistiken sowie Sediment- und Schadstofffrachtberechnungen deutlich verbessern lassen.

An einigen Abflussmessstellen waren Messungen auch aus sicherheitstechnischen Gründen nicht über den Verlauf des gesamten Hochwasserereignisses möglich. Bei Aken und Barby z.B. konnten Teildurchflüsse in unzugänglichen Waldbeständen bzw. Umfluten nicht erfasst werden. Um auch für Abflussmessstellen mit wenig neuen Messwerten die Abflusskurven zu überarbeiten, wurde in der BfG eine Software zum Pegelbezugslinienverfahren entwickelt. Damit besteht die Möglichkeit, die Abflusskurve an einem Pegel aus der Abflusskurve eines benachbarten Pegels abzuleiten.

Zur Plausibilisierung der Abflussbilanzen entlang der Elbe und der Saale wurden die Abflussfüllen des Juni-Hochwassers einschließlich des Vor- und Nachlaufs bis zum Abklingen auf Mittelwasser für alle Pegel mit den neuen Abflusskurven berechnet.

Messtechnische und naturbedingte Unsicherheiten

Unter guten Randbedingungen hat eine ADCP-Messung Unsicherheiten von +/-3 %. Diese Qualität ist erreichbar bei ausreichender Wassertiefe von mehr als 0,7 m, stabiler Gewässersohle ohne starken Geschiebetrieb und ohne Vegetation sowie homogener Strömung ohne starke Turbulenzen oder stark wechselnde Strömungsgeschwindigkeiten im Querschnitt. Die Unsicherheit bzw. die Qualität einer ADCP-Messung hängt damit weniger von dem Verfahren selbst als vielmehr von den Eigenschaften und Randbedingungen der jeweiligen Messstelle ab. Die Auswirkungen auf die Qualität der Abflusskurven der einzelnen Pegel sind in BfG (2014) erläutert.

Für die Abflussmessstellen Riesa und Tangermünde an der Elbe sowie Calbe-Grizehne an der Saale (Abb. 5.3) gibt es besondere Unsicherheiten:

Bei einem Wasserstand von 900 cm am Pegel Riesa begann 1,5 km stromauf das Überströmen des Deiches. Ein Teil des Gesamtabflusses erfolgte somit nicht im Hauptgerinne, sondern binnenwärts hinter dem Deich (sog. Deichhinterlandabfluss). Dieser ist überschlägig in der neuen Durchflusskurve berücksichtigt. Beim Wasserstand von 940 cm kam es 2 km stromauf des Pegels zum Deichbruch (Ortslage Promnitz) und damit zu einer plötzlichen Verstärkung des Deichhinterlandabflusses und einem Wasserstandsabfall um 5 cm in 2 h am Pegel. Die Wasserstände am Pegel wären ohne Deichbruch höher und bei einer größeren Bresche im Deich niedriger gewesen. Oberhalb des Wasserstandes von 900 cm am Riesaer Pegel ist die neue Durchflusskurve deshalb für zukünftige Ereignisse nur eingeschränkt anwendbar bzw. mit großen Unsicherheiten (> 20 %) behaftet.

Auch im Bereich des Pegels Tangermünde trat ein Deichbruch auf (bei W = 838 cm), der Wasserstand stieg dort anschließend nicht weiter an. Die Abflusskurve Tangermünde endet deshalb bei W = 838 cm und repräsentiert dort die Verhältnisse bis zum Deichbruch[7].

Der Bruch des Saaledeiches nahe Breitenhagen beeinflusste den Wellenverlauf der Elbe auch im Bereich Barby[8], die neue Abflusskurve endet hier gleichfalls im Bereich des Scheitelwertes.

Der mündungsnahe Saalepegel Calbe Grizehne liegt bei Elbe-Hochwasser im Rückstaubereich. Die Abflusskurve für den Pegel ist deshalb ereignisabhängig. Sie gilt streng genommen nur für das abgelaufene Hochwasser im Juni 2013. Wie groß die Variationsbreite der Abflusskurve bei anderen Verhältnissen ist, kann bei der aktuellen Datenlage nur durch mathematische Modellrechnungen abgeschätzt werden. Dies ist ebenfalls bei der Abflusskurve Barby der Fall, da diese möglicherweise durch die Inbetriebnahme des Pretziener Wehrs beeinflusst wird (vgl. Kap. 3.5.4).

Einige Elbepegel weisen die Tendenz zu jahreszeitlich unterschiedlichen Abflüssen bei gleichen Hochwasserständen auf. Es ist zu prüfen, in welchem Maße die Durchflussleistung in den Vorländern durch die Sommervegetation eingeschränkt ist. Im Auftrag der WSV soll diese Frage am Beispiel der Abflusskurve des Pegels Dresden mit einem 2-dimensionalen Modell geklärt werden. Im Ergebnis der Untersuchungen wird entschieden, ob die Notwen-

[7] Vgl. Kap. 3.5.4: Der Deichbruch erfolgte nach derzeitigem Erkenntnisstand nach Scheiteldurchgang, wenngleich eine abschließende Untersuchung über seine Scheitelwirksamkeit noch aussteht.

[8] Vgl. Kap. 3.5.4: Der Deichbruch erfolgte nach derzeitigem Erkenntnisstand nach Scheiteldurchgang, wenngleich eine abschließende Untersuchung über seine Scheitelwirksamkeit noch aussteht.

digkeit besteht, zukünftig die Abflussbestimmung auf der Grundlage von saisonalen Abflusskurven(-abschnitten) durchzuführen.

Abflussmessstellen und Bezugspegel der WSV an der Elbe

Im deutschen Abschnitt der Elbe befinden sich 13 Abflussmessstellen (Abb. 5.3 und Tab. 5.1). Die erste Abflussmessstelle unterhalb der tschechisch-deutschen Grenze befindet sich am Pegel Schöna und repräsentiert ein Einzugsgebiet von ca. 50 000 km². Bis zur letzten Abflussmessstelle in Neu Darchau vergrößert sich das Einzugsgebiet etwa um das 2,6-fache auf ca. 130 000 km². Zwischen Neu Darchau und dem stromab gelegenen Wehr Geesthacht gibt es keine weiteren Abflussmessstellen. Durch das Wehr ist die Elbe in diesem Bereich rückstaubeeinflusst. Eine qualifizierte Abflussermittlung ist somit nicht möglich. Unterhalb des Wehres Geesthacht liegt die Elbe unter Tideeinfluss, weshalb auch dort keine W-Q-Beziehung aufgestellt werden kann.

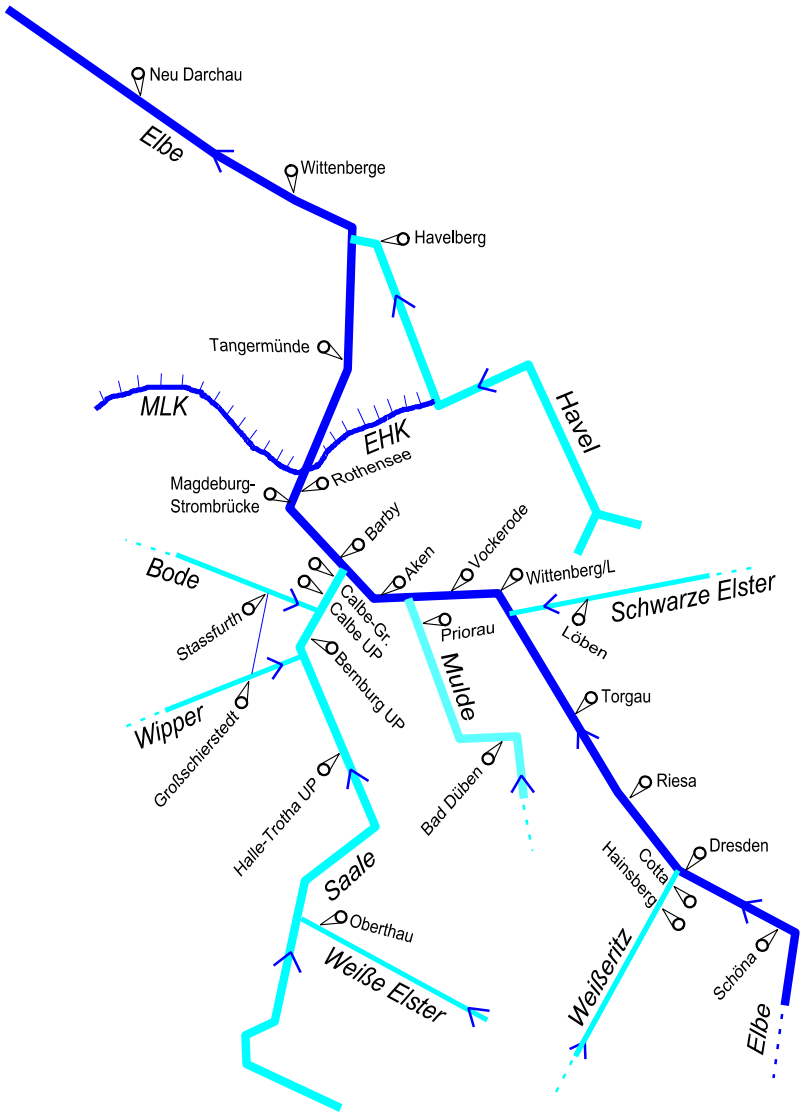


Abb. 5.3: Systemskizze von Elbe und Saale mit WSV-Pegeln und den wichtigsten Nebenflüssen und Pegeln

Zwischen dem Bezugspegel der Abflussmessstelle Schöna und dem Bezugspegel der Messstelle Neu Darchau liegen 534 km Flussstrecke. Ab dem Pegel Coswig, der unweit des in Abb. 5.3 abgebildeten Pegels Vockerode etwa auf halber Strecke liegt, wurden beim Hochwasser im Juni 2013 neue Höchstwasserstände (eisfrei) beobachtet (vgl. Kap. 3.5.2). Die entsprechenden Werte sind in Tab. 5.1 grau unterlegt.

In die Abflussbilanzierung beim Juni-Hochwasser 2013 wurden die Zuflussganglinien der größeren Nebenflüsse einbezogen (Tab. 5.2). Die Zuflussganglinien von Weißeritz, Schwarzer Elster und Mulde wurden von den zuständigen Landesdienststellen zur Verfügung gestellt. Die Zuflussganglinie der Saale basiert auf der überarbeiteten Abflusskurve des Pegels Calbe-Grizehne. Die Zuflussganglinie der Havel, Pegel Havelberg-Stadt, wurde vom WSA Brandenburg zugearbeitet.

Tab. 5.1: Eckdaten zu Abflusspegeln der WSV an der Elbe

	alte Abflusskurven		Lage	Aeo	PNP	NNW	HSW	HHW
	Nr.	gültig ab	km	km²	m NHN	cm	cm	eisfr. cm
Schöna	8	01.01.2008	2,05	51 391	116,180	30	-	1 204
Dresden	12	01.11.2010	55,63	53 096	102,680	5	500	940
Riesa	4	01.11.2010	108,40	54 485	88,010	81	-	947
Torgau	21	01.11.2010	154,15	55 211	75,150	20	620	949
Wittenberg	12	01.11.2010	214,14	61 879	62,440	91	550	706
Vockerode	7	01.11.2010	245,62	62 141	55,933	62	-	792
Aken	11	01.11.2010	274,75	70 093	50,200	45	-	791
Barby	5	01.03.2006	294,82	94 060	46,110	42	570	762
Magdeburg-Strombrücke	*4 (PW offen)**	*01.03.2006*	*326,67*	94 942	39,880	48	550	747
Magdeburg-Rothensee	*4*	01.03.2006	333,12	94 950	37,190	76	745	901
Tangermünde	*4*	01.03.2006	388,26	97 780	27,550	86	620	838
Wittenberge	*2*	01.11.1998	453,98	123 532	16,720	45	610	785
Neu Darchau	2a	01.07.2002	536,44	131 950	5,680	67	-	792

Lage: Elbe-Kilometrierung ab tschechisch-deutscher Grenze mit km 0
HHW eisfr.: neue Höchstwasserstände beim Juni-Hochwasser 2013
* PW offen = Pretziener Wehr geöffnet

Tab. 5.2: Eckdaten der wichtigsten Nebenflüsse der Elbe und ihrer mündungsnahen Pegel

Fluss	Mündung bei Elbe-km	Pegel	Lage des Pegels stromauf der Mündung in die Elbe bei km	Aeo [km²]
Schwarze Elster	198,6	Löben	21,60	4 327
Mulde	259,6	Bad Düben	68,10	6 170
		Priora	23,90	6 990
Saale	290,8	Calbe-Grizehne	17,43	23 719
		Calbe UP	19,67	23 714
Havel	438,0 (Gnevsdorfer Vorfluter)	Havelberg-Stadt	21,10	23 812

Abflussmessstellen und Bezugspegel der WSV an der Saale

Mit einer Länge von 434 Kilometern ist die Saale nach der Moldau der zweitlängste Nebenfluss der Elbe. Die ersten 162 Saale-km von der Mündung in die Elbe bis Merseburg sind Bundeswasserstraße. An dieser Strecke betreibt die WSV vier Abflussmessstellen (Tab. 5.3). Die mündungsnächste Abflussmessstelle bei Saale-km 17,43 ist Calbe-Grizehne. Die Abflussmessstelle Halle-Trotha bei km 89,15 markiert die Eingangsabflussmessstelle für die Bundeswasserstraße Saale. Hier hat die Saale mit ca. 18 000 km² etwa 75 % ihres gesamten Einzugsgebietes von 24 100 km² erreicht. Der Abfluss der oberhalb mündenden Weißen Elster ist an dieser Messstelle bereits mit enthalten.

An allen vier hier behandelten Pegeln Halle-Trotha, Bernburg, Calbe UP und Calbe-Grizehne wurden beim Hochwasser im Juni 2013 neue Höchstwasserstände erreicht. Die entsprechenden Werte sind in Tab. 5.3 grau unterlegt.

Tab. 5.3: Eckdaten zu Abflusspegeln der WSV an der Saale

Pegel	Abflusskurve Nr.	Abflusskurve gültig ab	Lage km	Aeo km²	PNP m NHN	NNW cm	HSW cm	HHW eisfr. cm
Calbe-Grizehne	5	01.11.1984	17,43	23 719	49,36	112	-	802
Calbe UP	1	01.11.1990	19,90	23 714	48,09	288	690	965
Bernburg UP	8	01.11.1990	36,05	19 660	55,11	16	-	653
Halle-Trotha UP	7	01.11.1993	89,15	17 988	69,33	72	440	816

Lage: Saale-Kilometrierung ab Mündung in die Elbe mit km 0
HHW eisfr.: neue Höchstwasserstände beim Juni-Hochwasser 2013

In die Bilanzierung der Abflüsse während des Hochwassers im Juni 2013 wurde die Zuflussganglinie der Bode einbezogen (Tab. 5.4). Da die Wipper nur 2 % des Gesamteinzugsgebietes der Saale ausmacht und zudem eine Überleitung von der Wipper in die Bode existiert, wurde der Beitrag der Wipper zur Saale-Abflussbilanz nicht ausgewiesen.

Tab. 5.4: Eckdaten der wichtigsten Nebenflüssen der Saale und ihrer mündungsnahen Pegel

Fluss	Mündung bei Saale-km	Pegel	Lage des Pegels stromauf der Mündung in die Saale bei km	Aeo [km²]
Weiße Elster	102,6	Oberthau	17,8	4 939
Wipper	37,7	Großschierstedt	17,8	544
Bode	27,6	Stassfurth	16,8	3 200

Messergebnisse und Abflusskurven

Historische Messergebnisse und Ergebnisse von Durchflussmessungen beim Juni-Hochwasser 2013 sind in der gewässerkundlichen Datenbank der GDWS, Außenstelle Ost für alle WSÄ gespeichert und im Bericht BfG-1823 (BfG 2014) im Kontext der neuen Abflusskurven grafisch dargestellt.

Abflussmessstellen – Elbe

An den 13 Abflussmessstellen der Elbe wurden im Zeitraum vom 30.05.2013 bis 30.06.2013 139 Messungen durchgeführt. Wie erwähnt konnte die Abflussermittlung an einigen Messstellen aus sicherheitstechnischen bzw. messtechnischen Gründen nicht über den gesamten Verlauf des Hochwasserereignisses durchgeführt werden. So ist zum Beispiel an der Messstelle Aken bei extremem Hochwasser ein signifikanter Abflussanteil im durchströmten bewachsenen Vorlandbereich messtechnisch mit vertretbarem Aufwand nicht erfassbar.

An sieben Abflussmessstellen konnte der durch Messungen belegte Bereich der Abflusskurven deutlich erweitert werden. Die Erweiterungen liegen zwischen 15 % und 33 %. An vier Messstellen konnte u.a. aus o.g. Gründen nicht über das gesamte Abflussprofil (Abflussereignis) gemessen werden. In diesen Fällen wurden zunächst die Abflusskurven der ober- bzw. unterliegenden Abflussmessstellen überarbeitet und dann mit dem Pegelbezugslinienverfahren (Software PBL) auf die Pegel mit wenig neuen Messungen übertragen.

Tab. 5.5: Durchflussmessungen an der Elbe beim Extremhochwasser im Juni 2013

Pegel	**Anzahl der Messungen beim HQ 2013**	**Höchster gemessener Abfluss Qmax [m³/s]**		**Erweiterung des durch Messungen belegten Bereichs der Abflusskurve**	
		vor HQ2013	**beim HQ2013**	**deltaQ [m³/s]**	**deltaQ [%]**
Schöna	6 *	-	-	-	-
Dresden	8	4 488	3 936	-	-
Riesa	5	2 911	3 448	537	18 %
Torgau	7	4 346	4 042	-	-
Wittenberg/L	7	3 085	4 116	1 031	33 %
Vockerode	8	3 835	3 784	-	-
Aken	4	-	-	-	-
Barby	7	3 110	3 486	376	12 %
Magdeburg-Strombrücke	19	4 160	5 167	1 007	24 %
Magdeburg-Rothensee	5	-	-	-	-
Tangermünde	2	3 600	4 410	810	22 %
Wittenberge	13	3 230	4 259	1 029	32 %
Neu Darchau	48	3 630	4 188	558	15 %
SUMME	**139**				

* davon 5 Messungen durch ČHMÚ in Hřensko bzw. Děčin

Mehr oder weniger deutliche Unterschiede zwischen Sommer- und Wintermessungen wurden vor allem an den Messstellen oberhalb der Saalemündung zwischen Dresden und Vockerode beobachtet. Bei gleichen Hochwasserständen wurden im Winter höhere Q-Werte als im Sommer gemessen. Ursache dafür könnte der höhere Fließwiderstand in den Vorländern durch Sommervegetation (natürlicher Bewuchs und landwirtschaftliche Nutzung) sein. Die überarbeiteten Abflusskurven basieren im Hochwasserabschnitt auf den Sommermessungen.

Abflussmessstellen – Saale

An den vier Abflussmessstellen der WSV wurden im Zeitraum 29.05.2013-30.06.2013 44 Messungen durchgeführt (Tab. 5.6). Der durch Messungen belegte Bereich der Abflusskurven konnte deutlich erweitert werden (24 % bis zu 152 %).

Tab. 5.6: Durchflussmessungen an der Saale beim Extremhochwasser 2013

Pegel	Anzahl der Messungen beim HQ 2013	Höchster gemessener Abfluss Qmax [m³/s]		Erweiterung des durch Messungen belegten Bereichs der Abflusskurve	
		vor HQ2013	beim HQ2013	deltaQ [m³/s]	deltaQ [%]
Halle-Trotha UP	17	726	903	177	24
Bernburg UP	17	367	902	535	146
Calbe UP	6	404	1 020	616	152
Calbe-Grizehne	4 (9) *	432	1 020	588	136
SUMME	**44**				

* In Calbe-Grizehne wurden 4 Messungen durchgeführt. Zusätzlich erfolgte eine Umrechnung von Messergebnisse der Messstelle Calbe-UP. Die Angaben zu Qmax sind das Ergebnis der Umrechnung.

Wie an der Elbe lieferten die Messungen nicht nur im Bereich extremer Wasserstände, sondern auch im mittleren Hochwasserbereich die Grundlage für erhebliche Korrekturen an den bisher gültigen Saale-Abflusskurven. Im Gegensatz zur Elbe konnten aber bei der Saale im mittleren Hochwasserbereich keine signifikanten Unterschiede zwischen Sommer- und Wintermessungen festgestellt werden. Im extremen Hochwasserbereich fehlen die für einen Vergleich notwendigen entsprechenden Wintermessungen.

Qualitätskontrolle

Zur Plausibilisierung der neuen Abflusskurven wurden die Abflussganglinien, -summenlinien, Abflussfüllen und -scheitel für aufeinanderfolgende Pegel an Elbe und Saale auf Stimmigkeit untersucht. Die Ergebnisse für die Abflussfüllen an der Elbe werden im Folgenden dargestellt. Weitere Analysen für Elbe und Saale finden sich in BfG (2014).

Abflussfüllen an den Elbepegeln

Ein Indikator für die Qualität der Abflusskurven ist die stimmige Bilanz der Abflussfüllen. Zu ihrer Berechnung wurden die neuen Abflusskurven auf die Wasserstandsganglinien der Pegel angewendet und in Abflussganglinien transformiert.

Gewählt wurde der Zeitraum vom 01.05.2013 bis zum 31.08.2013. Durch Abtrennen des Basisabflusses von der Hochwasserganglinie ergibt sich der Direktabfluss. Das Verfahren ist in Abb. 5.4 beispielhaft für den Pegel Neu Darchau dargestellt. Das Volumen unter der Direktabflussganglinie ergibt die Abflussfülle.

Der Verlauf der Abflussfüllen entlang der Elbe vom ersten Pegel Schöna bis zum letzten Pegel Neu Darchau ist in Abb. 5.5 dargestellt. Eine stimmige Bilanz der Füllen liegt vor, wenn die Summe aus den Abflussfüllen eines Nebenflusses und des nächsten Elbepegels stromauf der Mündung dieses Nebenflusses (orangefarbenen Säulen) etwa gleiche Beträge haben wie die stromab folgenden Abflussfüllen (blaue Säulen). Das ist bis auf eine kleine Abweichung bei Barby[9] der Fall. Aufeinanderfolgende Elbepegel ohne bedeutende Zuflüsse

[9] abschließend noch im Zusammenhang mit der Folgenanalyse von Deichbruch Breitenhagen und Wehröffnung Pretzien (vgl. Hinweise in Kap. 3) zu klären

im Zwischeneinzugsgebiet sollten Füllezuwächse etwa proportional der Zwischeneinzugsgebietsgröße haben. Das ist bis auf Neu Darchau überall der Fall. Dort ist der Zuwachs etwas stärker als erwartet. Er baut sich allerdings erst sehr spät im abfallenden Ast der Hochwasserwelle ab dem 06.07.2013 auf. Ursache hierfür könnte der angenommene Verlauf des Basisabflusses sein, der nur plausibel abgeschätzt werden kann und deshalb mit Unsicherheiten behaftet ist.

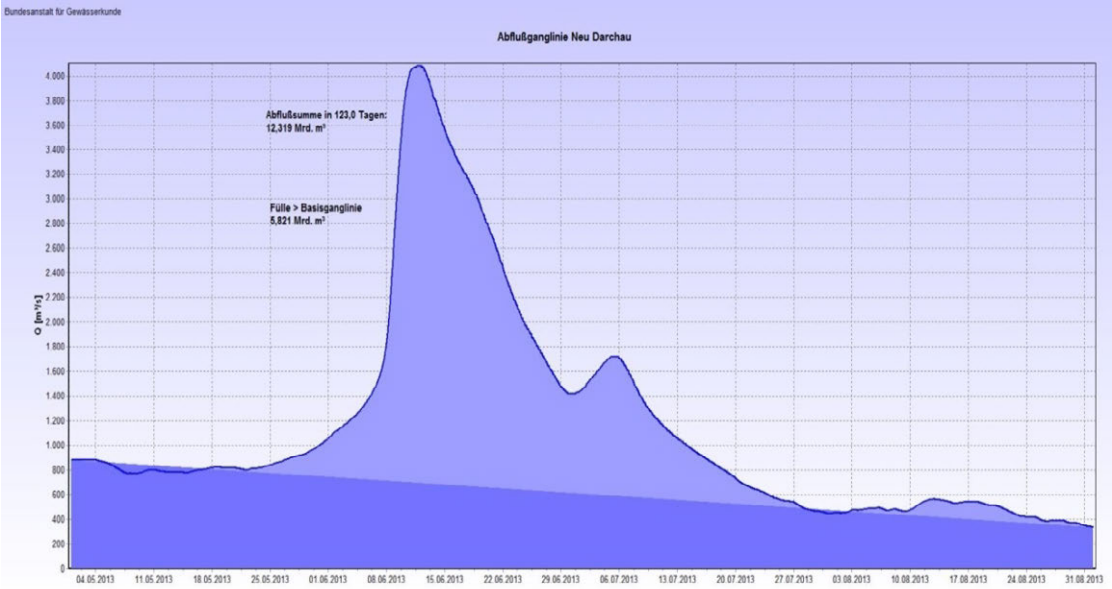


Abb. 5.4: Hochwasserganglinie der Elbe am Pegel Neu Darchau mit Basisabfluss (dunkelblau)

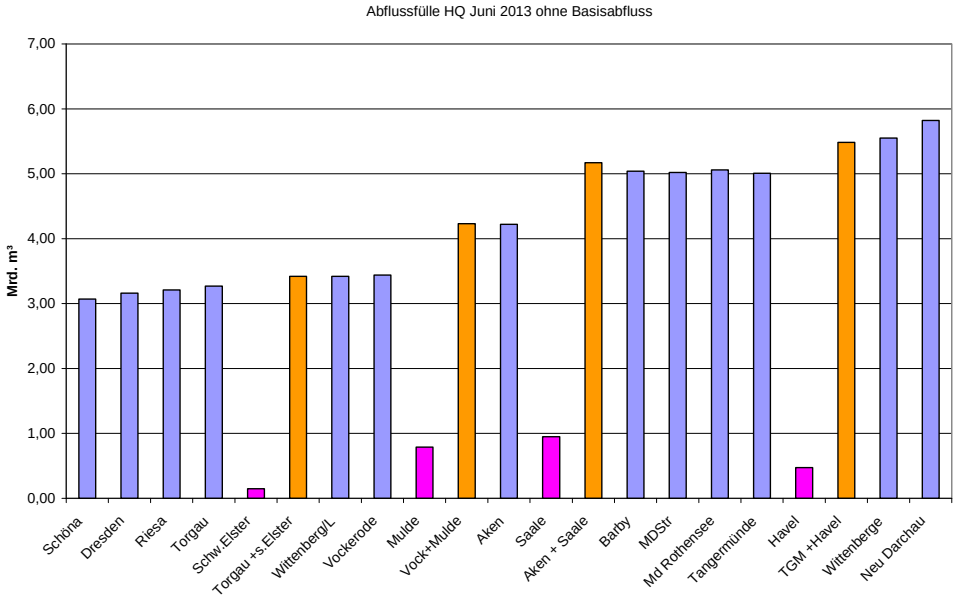


Abb. 5.5: Abflussfüllen des Juni-Hochwassers 2013 entlang der Elbe

(blaue Säulen: Abflussfüllen an den Elbepegeln, magenta: Abflussfüllen der wichtigsten Nebenflüsse, orange: Summe aus Abflussfülle eines Nebenflusses plus Abflussfülle des Elbepegels oberhalb der Mündung des Nebenflusses)

5.2.2 Abflussmessungen an Donau, Werra, Ober- und Mittelrhein

Abflussmessungen an den ebenfalls von Hochwasser betroffenen Flüssen Donau, Werra, Ober- und Mittelrhein fanden nur in geringem Umfang statt und führten nicht zur Revision der bestehenden Abflusskurven. Die Messaktivitäten an Donau, Werra, Ober- und Mittelrhein sind in Tab. 5.7 bis Tab. 5.10 zusammengefasst.

Tab. 5.7: Abflussmessungen an der Donau im Juni 2013

Pegel	Datum der Messung	Wasserstand am Pegel	Abfluss	Scheitelwasserstand zum Vergleich
Schwabelweis	04.06.2013	690 cm	2 640 m³/s	694 cm am 04.06.2013 um 18:53
Pfelling	04.06.2013 05.06.2013	898 cm 899 cm	2 680 m³/s 2 781 m³/s	899 cm am 05.06.2013 um 06:11
Vilshofen	05.06.2013 06.06.2013	712 cm 714 cm	3 430 m³/s 3 537 m³/s	728 cm am 04.06.2013 um 10:39

Tab. 5.8: Abflussmessungen an der Werra im Juni 2013

Pegel	Datum der Messung	Wasserstand am Pegel	Abfluss	Scheitelwasserstand zum Vergleich
Heldra	02.06.2013, 11:34 02.06.2013, 13:00	477 cm 476 cm	344 m³/s 313 m³/s	488 cm am 03.06.2013 um 04:50
Allendorf	02.06.2013, 09:41 03.06.2013, 14:50	426 cm 444 cm	294 m³/s 328 m³/s	452 cm am 04.06.2013 um 04:25
Letzter Heller	03.06.2013, 15:45	456 cm	319 m³/s	488 cm am 04.06.2013 um 20:53

Tab. 5.9: Abflussmessungen am Main im Juni 2013

Pegel	Datum der Messung	Wasserstand am Pegel	Abfluss	Scheitelwasserstand zum Vergleich
Trunstadt	30.05.2013 31.05.2013 01.06.2013 02.06.2013 03.06.2013 04.06.2013 05.06.2013 06.06.2013 07.06.2013	315 cm 368 cm 420 cm 510 cm 542 cm 521 cm 484 cm 373 cm 308 cm	419,53 m³/s 575,47 m³/s 660,05 m³/s 862,34 m³/s 898,07 m³/s 861,00 m³/s 753,94 m³/s 516,11 m³/s 387,44 m³/s	542 cm am 03.06.2013 von 12:45 - 17:00
Schweinfurt	01.06.2013 02.06.2013	439 cm 463 cm	693,41 m³/s 748,61 m³/s	527 cm am 04.06.2013 von 08:00 - 09:15
Kleinheubach	03.06.2013 04.06.2013 05.06.2013 06.06.2013 07.06.2013	431 cm 431 cm 452 cm 446 cm 423 cm	914,57 m³/s 922,89 m³/s 1 003,27 m³/s 952,46 m³/s 894,52 m³/s	461 cm am 02.06.2013 von 14:45 - 16:30

Tab. 5.10: Abflussmessungen an Ober- und Mittelrhein im Juni 2013

Pegel	Datum der Messung	Wasserstand am Pegel	Abfluss	Scheitelwasserstand zum Vergleich
Rheinweiler	01.06.2013	706 cm	2 260 m³/s	792 cm am 01.06.2013 um 21:45
	01.06.2013	726 cm	2 320 m³/s	
	01.06.2013	730 cm	2 320 m³/s	
	05.06.2013	480 cm	1 060 m³/s	
	05.06.2013	482 cm	1 060 m³/s	
Hartheim	01.06.2013	579 cm	1 600 m³/s	727 cm am 02.06.2013 um 00:30
	01.06.2013	582 cm	1 620 m³/s	
	01.06.2013	589 cm	1 660 m³/s	
	01.06.2013	671 cm	2 080 m³/s	
	01.06.2013	673 cm	2 110 m³/s	
	05.06.2013	470 cm	1 070 m³/s	
	05.06.2013	469 cm	1 040 m³/s	
Kehl Kronenhof	22.05.2013	292 cm	1 590 m³/s	515 cm am 03.06.2013 um 03:00
	28.05.2013	264 cm	1 450 m³/s	
	29.05.2013	280 cm	1 540 m³/s	
Iffezheim	06.06.2013	478 cm	2 830 m³/s	594 cm am 02.06.2013 um 04:50
Plittersdorf	03.06.2013	731 cm	3 310 m³/s	737 cm am 03.06.2013 um 12:39
	05.06.2013	678 cm	2 690 m³/s	
	06.06.2013	653 cm	2 640 m³/s	
Illingen	03.06.2013	580 cm	3 160 m³/s	606 cm am 02.06.2013 um 09:03
	05.06.2013	521 cm	2 730 m³/s	
Maxau	04.06.2013	852 cm	3 990 m³/s	870 cm am 2.6.2013 um 11:22
	04.06.2013	853 cm	3 880 m³/s	
	05.06.2013	814 cm	3 650 m³/s	
	05.06.2013	814 cm	3 520 m³/s	
Speyer	05.06.2013	810 cm	3 690 m³/s	840 cm am 4.6.2013 um 3:23
	05.06.2013	808 cm	3 780 m³/s	
Worms	06.06.2013	615 cm	3 870 m³/s	708 cm am 3.6.2013 um 12:19
Mainz	03.06.2013	659 cm	5 450 m³/s	682 cm am 5.6.2013 um 6:12
Kaub	10.06.2013	496 cm	3 680 m³/s	719 cm am 5.6.2013 um 5:59
Andernach	13.06.2013	479 cm	3 760 m³/s	723 cm am 4.6.2013 um 12:16

5.2.3 Fazit Wasserstands- und Abflussmessungen beim Hochwasser 2013

Die Wasserstands- und Abflussmessungen an den am stärksten vom Hochwasser betroffenen Bundeswasserstraßen Donau und Elbe wurden unter erschwerten Bedingungen, zum Teil auch außergewöhnlichen individuellen und technischen Belastungen, durchgeführt. Dabei bewährte sich grundsätzlich die Einsatzbereitschaft des WSV-Personals ebenso wie die Zusammenarbeit mit den Vertretern anderer Behörden. Auch die in den zurückliegenden Jahren vorgenommene technische Ertüchtigung der Messanlagen sowie der IT-Kommunikationsinstrumentarien zeigte sich den Anforderungen gewachsen.

Besonders hervorzuheben ist die Leistung des messtechnischen Personals an der Elbe. Durch die umfänglichen Abflussmessungen an Elbe und Saale konnte die Qualität der hydrologischen Grundlagen im Elbegebiet deutlich verbessert werden. Die Abflusskurven der Saale

wurden im Anschluss daran komplett überarbeitet und viele Abflusskurven an der Elbe konnten im Hochwasserbereich deutlich erweitert werden. Dadurch ergeben sich wertvolle Qualitätssprünge bei den Grundlagen für die hydraulische Modellierung, Abflussbilanzierung, Hochwasservorhersage, Hochwasserstatistik und Klimaforschung. Optimierungspotenzial zeigt sich im Hinblick auf die hochwasserbezogene Umsetzung bestehender Messkonzepte sowie vereinzelt im Hinblick auf die Kommunikation mit anderen betroffenen Behörden vor Ort. Zudem verweisen Messergebnisse von einigen Messstellen nach deren Auswertung auf weiteren Untersuchungs- und Forschungsbedarf, dem auch unter Einbeziehung verschiedener Modellierungsinstrumentarien nachzugehen ist. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden erste konkrete Verbesserungsschritte bereits durch die GDWS, Außenstelle Ost eingeleitet.

An der Donau fanden während des Hochwasserereignisses bedauerlicherweise nur wenige Abflussmessungen statt. Optimierungspotenzial zeigt sich hier im Hinblick auf die Überarbeitung des bisherigen Messkonzeptes. Bei dessen praxisgerechter und ressourcenschonender Aufstellung böte sich hier eine Kooperation von Bundes- und Länderbehörden an.

5.3 Wasserspiegelfixierungen an Bundeswasserstraßen

5.3.1 Übersicht zu den vorgenommenen Messungen

Alle gemessenen Wasserstände, ob kontinuierlich an Pegeln (Kap. 5.1) oder sporadisch in Messkampagnen im Flusslängsprofil durch Treibfahrten mit Messschiffen, durch Einmessungen von Geschwemmsellinien (beides sog. „klassische“ Wasserspiegelfixierungen) bzw. durch flächenhafte Befliegung (Kap. 5.4) erhoben, dokumentieren gleichermaßen das hydrologische und morphologische Gedächtnis der Gewässer. Deshalb sind für umfassende Untersuchungen gemessene Wasserstände im Flusslängsprofil ebenso wertvoll wie die an Pegeln gemessenen Wasserstände. Im Rahmen der Dokumentation von Hochwasserereignissen werden mit dem vorliegenden Bericht zum Hochwasser 2013 in Deutschland erstmals Längsschnittmessungen von Wasserspiegellagen thematisiert und untersucht.

Wasserstands- und Abflussmessungen an Pegeln sowie die Wasserspiegelfixierungen bilden seit jeher das Rückgrat des klassischen hydrometrischen Messkonzepts der WSV. Insbesondere sind diese Daten unverzichtbar für den Betrieb, die Unterhaltung und den Ausbau der Bundeswasserstraßen. Benötigt werden Wasserspiegelfixierungen nicht nur bei niedrigen und mittleren Wasserständen, aus denen die maßgeblichen Größen zur Unterhaltung der Fahrrinne (z.B. GlW) und der Bauwerke an Bundeswasserstraßen abgeleitet werden.

Auch hohe Wasserstände, die den höchsten schiffbaren Wasserstand (HSW) überschreiten, sind in diesem Zusammenhang für die WSV von großem Interesse, da bei Hochwasser in morphologisch aktiven Strecken Sedimentumlagerungen im erheblichen Umfang und somit Sohländerungen erfolgen können. Auch die Verwaltungen der Länder sind an Wasserspiegelfixierungen bei Hochwasser interessiert, da diese die Basis zur Überprüfung der Bemessungswasserspiegellagen für die Unterhaltung des Deichsystems bilden. Wasserspiegelfixierungen werden weiterhin in allen Wasserstandsbereichen zur Kalibrierung und Validierung großräumiger mathematischer Abflussmodelle benötigt.

An mehreren Bundeswasserstraßen, in denen im Verlauf des Hochwassers Juni 2013 bedeutsame Wasserstände eingetreten sind, erfolgten klassische Wasserspiegelfixierungen mit Messschiffen oder durch Einmessungen von Geschwemmsellinien, die die Scheitelwasserstände an den Ufern markieren:

Gewässer	Methode	Strecke [km]	von - bis
Rhein	Messschiff	353-444	Plittersdorf - Worms
Main	Messschiff	84-134	Schweinfurt - Würzburg
Elbe	Geschwemmsel	0-107	Schmilka - Riesa
Elbe	Messschiff	107-584	Riesa - Geesthacht
Elbe	Geschwemmsel	275-474	Aken - Schnackenburg
Elbe	Geschwemmsel	476-585	Schnackenburg - Geesthacht

5.3.2 Auswertungen der Wasserspiegelfixierungen an Elbe und Rhein

Daten von Wasserspiegelfixierungen werden dezentral in den Dienststellen der WSV und seit vielen Jahrzehnten auch in der BfG gesammelt. Die seit 2013 in der Datenbank des flusshydrologischen Fachdienstes FLYS der BfG (www.bafg.de/FLYS) gespeicherten Datensätze umfassen neben vielen anderen auch die Messdaten der großen Rheinhochwasser vom März 1988, Dezember 1993 und Januar 1995 sowie für die Elbe die Daten der bedeutsamen Hochwasser vom August 2002, April 2006, Januar 2011 und Juni 2013.

Üblicherweise werden gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen im Längsprofil der Gewässer dargestellt, so dass sich Gewässerstrecken mit steilen und flachen Gefällen der Wasserlinie identifizieren lassen. In der Abb. 5.6 sind die an der unteren Mittelelbe zwischen Wittenberge und Geesthacht nahezu im Wellenscheitelzeitpunkt des Hochwassers Juni 2013 gemessenen Wasserstände dargestellt, die aus einer mit einem Messschiff vorgenommenen Fixierung stammen. Diese rote Linie markiert hier die höchsten jemals in Wasserspiegelfixierungen gemessenen Wasserstände an der unteren Mittelelbe. Zur Orientierung enthält die Abb. 5.6 weitere gemessene und berechnete Wasserspiegellinien.

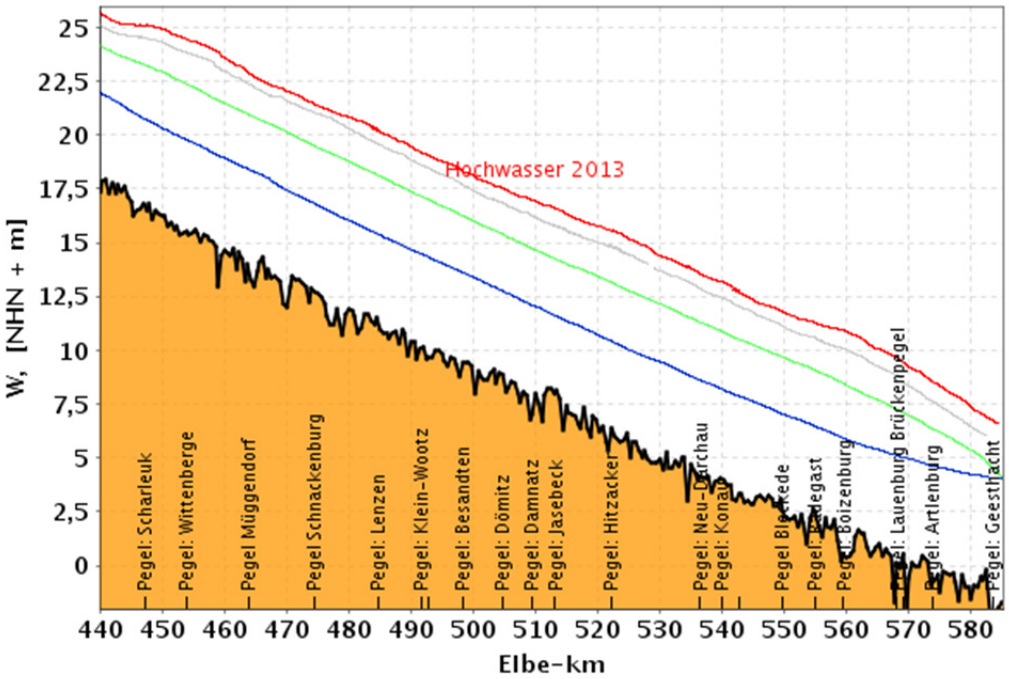


Abb. 5.6: Wasserspiegelfixierungen der Hochwasser von August 2002 (grau) und Juni 2013 (rot) an der Mittelelbe, berechnete Wasserspiegellinien für MQ (blau) und MHQ (grün) sowie Talweg 2004

Deutlich ist im Längsprofil dieser Elbestrecke die weitgehende Parallelität im Verlauf der Wasserspiegelfixierungen der Hochwasser von August 2002 und Juni 2013 zu erkennen. Es lässt sich aber auch eine lokale Annäherung der beiden Linien im Bereich des Pegels Schnackenburg (Elbe-km 474,6) feststellen, die ihre Ursache in der merklich abgesenkten Wasserspiegellinie des Hochwassers 2013 infolge der im Jahre 2009 fertiggestellten Deichrückverlegung Lenzen hat (vgl. Kapitel 3.5.4).

Wasserspiegelfixierungen sollten möglichst bei stationären Abflusszuständen vorgenommen werden, da nur dann in den Messstrecken eindeutige Beziehungen zwischen dem gemessenen Wasserstand und dem vorherrschenden Abfluss existieren. Tatsächlich werden sie aber insbesondere aus logistischen Gründen teilweise bei instationären Verhältnissen durchgeführt. Deshalb sollten nach Abschluss der Messungen die Daten zunächst vermessungstechnisch und anschließend hydrologisch plausibilisiert werden, indem jedem gemessenen Wasserstand der Fixierung der zum Messzeitpunkt vorhandene Abfluss zugeordnet wird.

Im Fall der Wasserspiegelfixierung beim Elbehochwasser im Juni 2013 konnte weitgehend der stationäre Wellenscheitel eingemessen werden. Jedoch beeinflussten die Deichbrüche bei Breitenhagen an der Saale und in Fischbeck bei Tangermünde nicht nur den unterstromigen Wellenablauf sondern auch die laufende Wasserspiegelfixierung. In der Abb. 5.7 sind für den Zeitraum zwischen dem 05. und 17.06.2013 die gemessenen, normierten Wasserstandsganglinien an ausgewählten Pegeln zwischen Torgau und Neu Darchau grafisch dargestellt. Der Zeitpunkt der Passage der Wasserspiegelfixierung (d.h. des Messschiffs) an diesen Pegeln ist durch einen blauen Punkt hervorgehoben. Es lässt sich feststellen, dass im Zuge dieser von der BAW beauftragten Wasserspiegelfixierung nahezu überall an der Mittelelbe die höchsten Wasserstände des Hochwassers 2013 gemessen werden konnten. Nur im Bereich der Pegel Barby und Tangermünde erfolgten instationäre Messungen zu Zeitpunkten bei durch Deichbrüche um 20-30 cm abgesenkten Wasserständen.

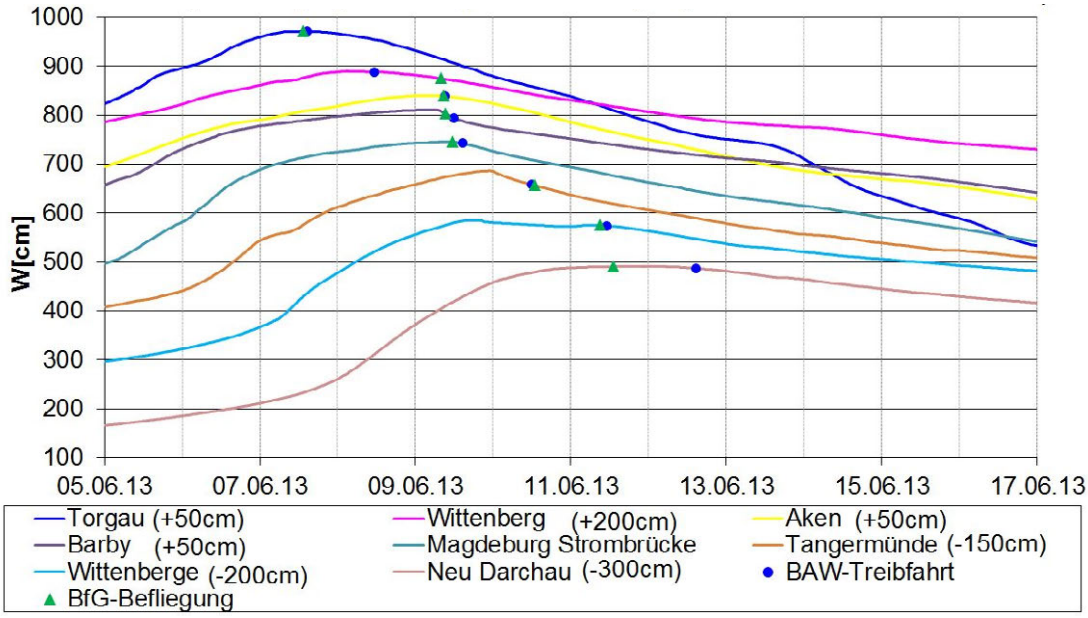


Abb. 5.7: Normierte Wasserstandsganglinien und Zeitpunkte der Passage der Wasserspiegelfixierungen an Pegeln sowie Befliegungszeitpunkte während des Hochwassers 2013 an der Elbe

An der Elbe wurden während des Hochwassers, neben den mehrtätigen Messungen mit einem Messschiff, auf Initiative des WSA Dresden und verschiedener Behörden der Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein bereichsweise zusätzlich die Scheitelwasserstände aufgrund der späteren Einmessungen von Geschwemmsellinien erfasst. Somit stehen für verschiedene Teilstrecken der Elbe mit unterschiedlichen Methoden erhobene Scheitelwasserstände für Vergleichszwecke zur Verfügung. Die Abb. 5.8 zeigt für einen Elbeabschnitt bei Hitzacker diese mit „klassischen“ Methoden gemessenen Wasserstände. Auf die aus Befliegungen abgeleiteten Wasserspiegelhöhen wird in Kap. 5.4 eingegangen.

Bei Auswertung der vorliegenden Wasserspiegellinien sind die den unterschiedlichen Messmethoden anhaftenden Messungenauigkeiten zu berücksichtigen. Diese werden bei der Geschwemmselmethode durch Wellenschlag und Windeinflüsse im Vergleich zur DGPS-gestützten Schiffsmessung als wesentlich größer eingestuft. Insgesamt werden die Geschwemmsellinienmessungen jedoch als wertvolle Ergänzungen der Schiffsmessungen im Stromstrich angesehen.

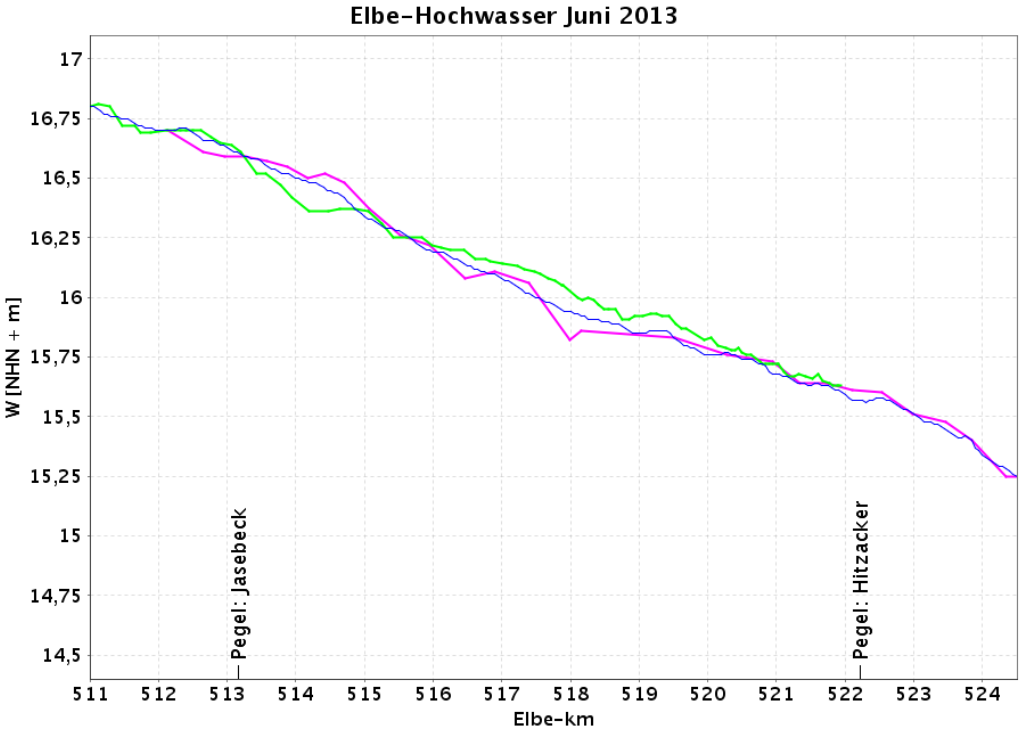


Abb. 5.8: Scheitelwasserspiegellinie beim Juni-Hochwasser 2013 an der Elbe durch Wasserspiegel fixierungen mit Messschiff (blau) und Geschwemmselmethode (grün: linkes Ufer) und (violett: rechtes Ufer)

Am Verlauf der Wasserspiegellinien in Abb. 5.8 erkennt man Streckenabschnitte, in denen nahezu identische Höhen der Scheitelwasserspiegellinie gemessen wurden (z.B. Elbe-km 520-524). In einigen Abschnitten deuten die Messungen jedoch auf signifikante Querneigungen des Wasserspiegels in der Größenordnung von ca. 15 cm zwischen linkem und rechtem Elbufer hin, die in Krümmungseffekten bei Kurven begründet sein könnten. Berechnungen mit einem 2D-Modell in der BfG bestätigen dies. Die Geschwemmsellinie kann zur

Validierung von 2D-Strömungsmodellen verwendet werden, sie erscheint jedoch wegen der im Vergleich zur Schiffsmessung größeren Unsicherheit ungeeignet für die Kalibrierung von hydraulischen Modellen.

Wasserspiegelfixierungen stellen einen besonderen Datenschatz für die Bundeswasserstraßen dar, der bisher in hydrologischen und morphologischen Untersuchungen nicht gebührend gewürdigt wurde. Dies hängt im Wesentlichen mit Problemen der Archivierung dieser Messdaten und dem Fehlen anerkannter gewässerkundlicher Auswertemethoden zusammen. Auf Initiative von gewässermorphologischen Fachdisziplinen wurde in der BfG zum Zweck des langfristigen Wasserstandsmonitorings in morphologisch aktiven Wasserstraßen eine neue Auswertemethode entwickelt, die auf ein bewährtes Verfahren zur Auswertung von Abflussmessungen zurückgreift. Vorliegende aus einer Epoche stammende gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen werden in der neuen Auswertemethode zusammen mit ihren Abflüssen für Hektometerstationen wie Abflussmessungen ausgewertet und durch Abflusskurven angepasst. Mit dieser in den BfG-Fachdienst FLYS implementierten Auswertemethode lassen sich somit epochenbezogene Wasserspiegellinien ermitteln. Abb. 5.9 zeigt ein Beispiel für die stationsbezogenen Auswertung von Wasserspiegelfixierungen am Rhein (Rhein-km 375).

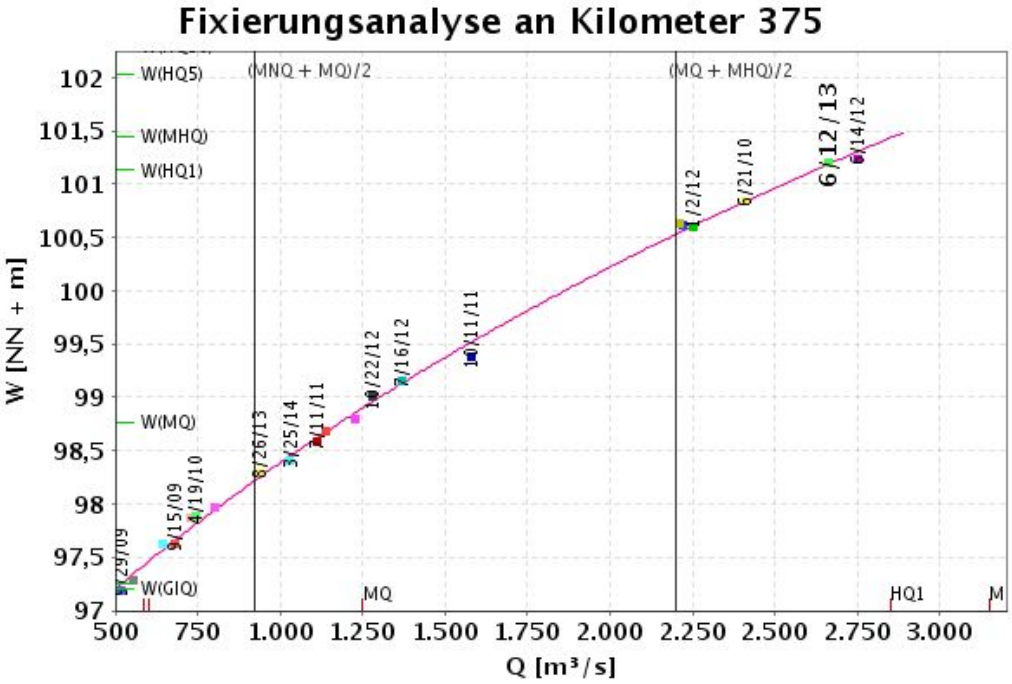


Abb. 5.9: Auswertung von Wasserspiegelfixierungen des Zeitraums 2009-2014 bei Rhein-km 375 mit FLYS

Am südlichen frei fließenden Oberrhein wurde während des Juni-Hochwassers, das hier am 12.06.2013, also einige Tage nach Scheiteldurchgang, größenordnungsmäßig noch eine Jährlichkeit von ca. HQ_1 aufwies, durch das WSA Mannheim eine Wasserspiegelfixierung vorgenommen. Der bei Rhein-km 375 gemessene Wasserstand kann dem W-Q-Diagramm der Abb. 5.9 entnommen werden. Insgesamt lassen sich die in zahlreichen Wasserspiegelfixierungen nach 2009 vorgenommenen Messungen sehr gut durch die dargestellte Abfluss-

kurve anpassen. Eventuell vorhandene Auswirkungen instationärer Effekte auf gemessene Wasserstände werden bekanntlich durch die angepasste Abflusskurve ausgeglichen. Mit der Eröffnung des Online-Fachdienstes FLYS der BfG zum 01.07.2013 steht den registrierten Teilnehmern diese neue Berechnungsart zur Verfügung, mit dem auf Basis von Wasserspiegelfixierungen für benutzerdefinierte Zeiträume und Abflüsse die entsprechenden Wasserspiegellinien berechnet werden können (www.bafg.de/FLYS).

5.3.3 Fazit

Im Verlauf des Hochwassers 2013 wurden an mehreren Bundeswasserstraßen von unterschiedlichen Institutionen durch Einsatz verschiedenartiger Messarten Einmessungen von Wasserständen im Längsprofil vorgenommen. Diese Datensätze dokumentieren mehrheitlich die eingetretenen Scheitelwasserstände zwischen den Pegeln und stellen somit eine wertvolle Ergänzung zu den gemessenen Wasserständen an Pegeln dar. Zur Plausibilisierung dieses umfangreichen Datenbestands sollten unter Einbeziehung von hydraulischen Modellberechnungen vergleichende Untersuchungen und Auswertungen vorgenommen werden. In Zukunft sollte eine übergeordnete Instanz eingerichtet werden, die in Zusammenarbeit mit den die Messungen veranlassenden Dienststellen des Bundes und der Länder bundesweit diese Datenbestände aggregiert und bereitstellt. Es sollten zudem Vereinbarungen zur Dokumentation, Plausibilisierung und Auswertung dieser Messungen getroffen werden, um die Nachhaltigkeit der Messdaten zu gewährleisten.

5.4 Fernerkundungseinsätze

Vor allem zur mittel- und großräumigen Erfassung räumlicher Informationen von Hochwasserereignissen bieten sich Fernerkundungsaufnahmen an. In Abhängigkeiten von den fachlichen, organisatorischen und zeitlichen Anforderungen geschehen die Datenerfassungen und -auswertungen satelliten- und/oder flugzeuggestützt. So erfolgten im Kontext der Hochwasserereignisse Juni 2013 u.a. per Flugzeug ereignisnahe Aufnahmen zur Deichdurchfeuchtung (Elbe) durch die Ölüberwachungsflugzeuge des Havariekommandos und – unabhängig davon durch beauftragte Firmen – zur Bereitstellung von photogrammetrisch prozessierten Überschwemmungsgrenzen und Wasserspiegellagen mit georeferenzierten Bilddokumentationen (Elbe/Mulde/Saale, Donau, Rhein, Weser). Dazu werden die Sachverhalte im Folgenden insbesondere methodisch und mit Beispieldaten beschrieben und einer ersten Bewertung unterzogen.

5.4.1 Ereignisnahe Informationen zur Deichdurchfeuchtung an der Elbe

Sensorik und Vorgehensweise

Ein mit dem Multisensorsystem Medusa ausgestattetes Flugzeug vom Typ Do228, die „57+04“, kam beim Juni-Hochwasser 2013 an der Elbe zum Einsatz. Dieses Flugzeug der „Ölüberwachung“ hat als prioritäre Aufgabe die Überwachung der deutschen Gewässer von Nord- und Ostsee auf Verschmutzungen durch Öl. Es wird vom Havariekommando (HK) stellvertretend für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) eingesetzt und durch das Marinefliegergeschwader 3 „Graf Zeppelin“ (MFG3) betrieben.

Der Einsatz wurde vom MFG3 unter Begleitung jeweils eines zusätzlichen Operators von verschiedenen geografischen Fachstellen der Bundeswehr durchgeführt. Die Ausrüstung ist zwar auf die Erkennung und Charakterisierung von Öl optimiert, kann aber bei Verfügbarkeit vielseitig eingesetzt werden. Auch schon bei vergangenen Hochwasserereignissen, wie z.B. im August 2002 ebenfalls an der Elbe, kamen Ölüberwachungsflugzeuge zum Einsatz, um großflächig und schnell auf Stellen wahrscheinlicher Deichdurchfeuchtungen hinzuweisen.

Die für die Detektion wahrscheinlich durchfeuchteter Stellen relevanten Sensoren sind der Infrarot-Scanner (IR) und das Mikrowellenradiometer (MWR) sowie die Foto- und Videodokumentation. Der Infrarot-Scanner misst mit einer räumlichen Auflösung von 3,5 x 3,5 m² bei Standardflughöhe auf einer Breite von ca. 500 m die Strahlungstemperaturen der Wasser- bzw. der Geländeoberfläche im Bereich des thermischen Infrarot (8-12 µm Wellenlänge). Die Strahlungstemperatur wird bestimmt durch die eigentliche „kinetische“ Temperatur und die vom beobachteten Material abhängige sogenannte Emissivität, dem Abstrahlvermögen im Vergleich zu einem idealen schwarzen Körper. Das MWR misst entsprechend die Strahlungstemperaturen bei drei Frequenzbereichen um 18 / 36 / 89 GHz (entsprechend einer Wellenlänge von ca. 1,6 / 0,8 / 0,3 cm). Zudem wurden Videos aufgenommen, die zum besseren Vergleich mit den IR- und MWR-Daten in Zeilenbilder umgewandelt werden können, und eine umfangreiche Fotosammlung wurde erstellt.

Ergänzt durch Aufnahmen im sichtbaren Bereich stehen so insgesamt vier Kanäle zur Verfügung, in denen die Strahlungstemperatur zwischen Flusswasser und dem Gelände hinter dem Deich verglichen werden kann. Fallen die Werte des Hinterlandes gleich oder etwas kühler aus, so ist es wahrscheinlich, dass sich dort Wasser aus dem Fluss befindet. Durch die Zuhilfenahme mehrere Kanäle und zusätzlicher Aufnahmen im sichtbaren Bereich können andere Oberflächentypen wie z.B. Bäume besser ausgeschlossen werden. Wesentlich ist auch ein Vergleich mit aktuellen Referenzdaten, um Bereiche, in denen sich auch bei niedrigeren Wasserstandesniveaus Wasser befindet und neuere Wasseransammlungen voneinander unterscheiden zu können. Zu diesen wahrscheinlichen Durchfeuchtungsstellen kann eine erste Rückmeldung direkt aus dem Flug erfolgen.

Ein detaillierterer Bericht wurde innerhalb weniger Stunden nach Landung erstellt und die Ergebnisse über eine zentrale Einrichtung der Bundewehr an die betroffenen Lagezentren der Kreise verteilt. Der BfG stehen die Daten dieses Hochwassereinsatzes zur Verfügung, da sie das HK zu Ausrüstung und zum Einsatz der Fernerkundungssensorik berät. Eine systematische Auswertung der Rückmeldungen als Validierung bzw. als Beitrag zu einer weiteren Optimierung konnte bisher nicht erfolgen, ist aber im Rahmen eines beantragten Projektes geplant.

Befliegungsdaten

Ein Überblick über die durch die Do 228 überflogenen Gebiete findet sich in der Abb. 5.10. Im Zeitraum von 09. bis 16.06.2013 fand täglich ein Flug statt, insgesamt waren es 8 Flüge mit über 35 Flugstunden. Beflogen wurde die Elbe insbesondere im Gebiet zwischen Magdeburg und Hamburg. Wenn Gebiete mehrfach parallel beflogen wurden – wie zum Beispiel über dem Deichbruchgebiet bei Fischbeck – so ist das in der Abbildung an den Verdickungen der grünen Linie der Flugroutendarstellung zu erkennen.

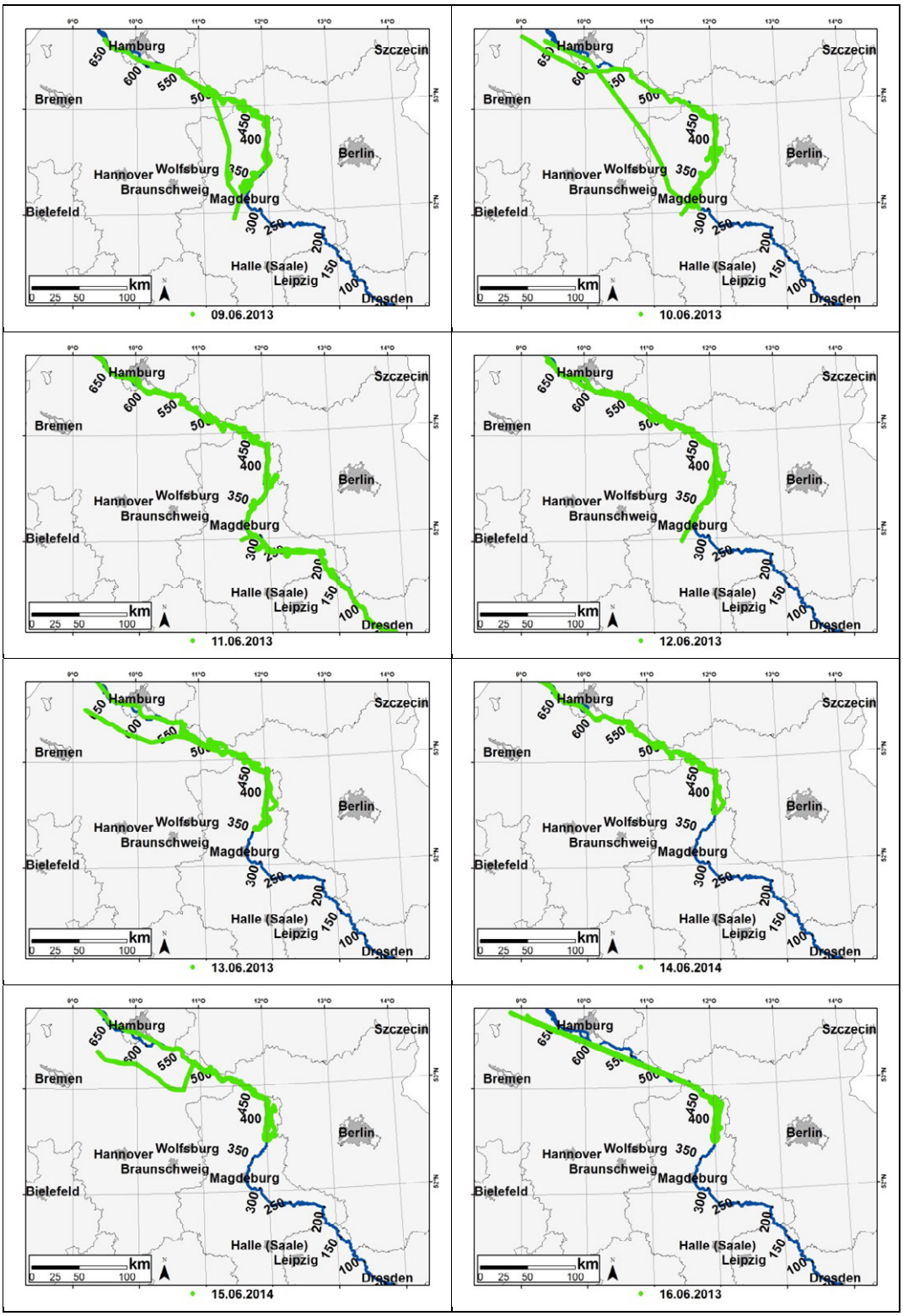


Abb. 5.10: Flugrouten der Deichbefliegungen der Elbe durch die Ölüberwachungsflugzeuge aufgeteilt nach den einzelnen Tagen.
Verdickungen in den Linien lassen intensiver beflogene Gebiete erkennen. (Datenquelle: Havariekommando)

Die Abb. 5.11 zeigt ein konkretes Beispiel für ein Sensordatenset, mit dessen Hilfe eine wahrscheinliche Durchfeuchtung gemeldet wurde. Hier ist der gleiche Abschnitt in fünf Kanälen gezeigt:

a) im Bereich des sichtbaren Lichtes (in Zeilendarstellung umgewandeltes, nach unten schauendes „NADIR“-Videobild),
b) im Infrarot und
c) MWR mit drei Kanälen.

Man sieht in der Mitte des Bildes den Deich und rechts die Elbe.

Beim Kanal im sichtbaren Bereich erscheinen in der linken Bildhälfte Teile des Landes dunkler. Dass diese durchfeuchtet oder überflutet sind, ist hier relativ schwer zu erkennen. Viel deutlicher kommen diese Wasseransammlung im Infrarotbild (IR, b) als blau dargestellte Flächen hervor, die mit den Pfeilen markiert wurden. Die drei Kanäle des MWR bestätigen dies. Im jeweiligen Vergleich mit den Strahlungstemperaturen aus der Elbe (rechts im Bild) und im Abgleich mit Referenzdaten konnten diese Stellen als wahrscheinliche Deichdurchfeuchtungs- bzw. Überflutungsstellen identifiziert und entsprechend gemeldet werden.

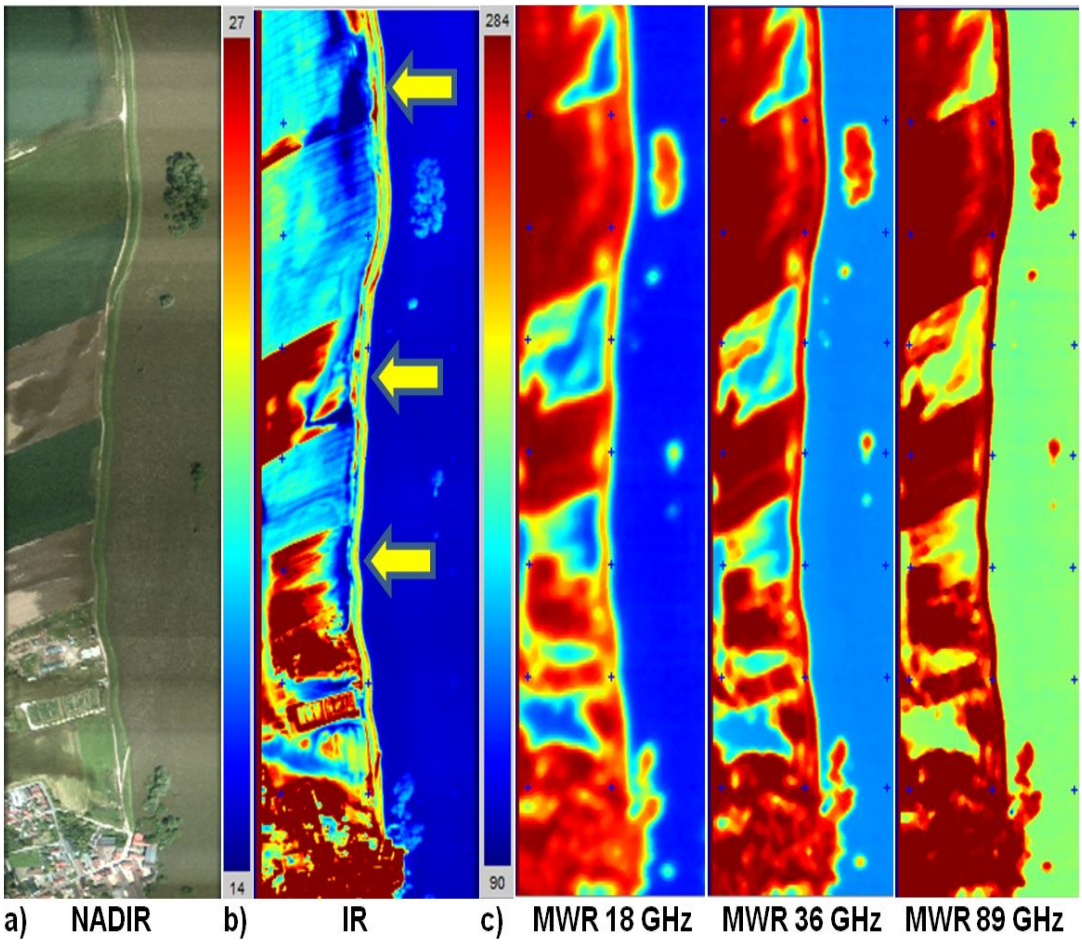


Abb. 5.11: Sensordatenset einer gemeldeten wahrscheinlichen Durchfeuchtungsstelle (Datenquelle: Havariekommando)

5.4.2 Photogrammetrische Erfassung von Überschwemmungsgrenzen und Wasserspiegellagen

Veranlassung und Nutzeranforderungen

Um aussagekräftige Analysen abgelaufener Hochwasser und zukunftsorientierte Bearbeitungen gewässerkundlicher, wasserbaulicher und wasserwirtschaftlicher Fragestellungen, z. B. zur Verbesserung der Hochwasservorsorge (Kalibrierung von Simulations- und, Vorhersagemodellen, Volumenbilanzierungen etc.) ausführen zu können, sollten heute dreidimensionale Wasser-Land-Grenzen (Überschwemmungsgrenzenfestlegung) und Wasserspiegelhöhen (Wasserspiegelfixierungen) mit georeferenzierten Bilddokumentationen eine wesentliche Voraussetzung sein. Dies gilt insbesondere für scheitelnah erfasste Daten im Kontext mit seltenen Extremereignissen. So wurden unabhängig von den „klassischen“ Wasserspiegelfixierungen (vgl. Kapitel 5.3) und den vorgenannten Befliegungen des Havariekommandos umfangreiche stereophotogrammetrisch auswertbare Befliegungen zur flächendeckenden und einheitlichen Erfassung der Hochwasserereignisse Juni 2013 von der BfG und der WSV in Auftrag gegeben. Die Beauftragungen erfolgten größtenteils binnen eines Tages. Beflogen wurden (vgl. Abb. 5.12):

> Elbe (tschechische Grenze bis Geesthacht) mit einmaliger Erfassung der Deichbruchsituation Fischbeck
> Mulde (ab Vereinigung Freiberger und Zwickauer Mulde)
> Saale (ab Hohenwartetalsperre) mit dreimaliger Erfassung der Deichbruchsituation Breitenhagen (Ortslage Klein Rosenburg)
> Donau (Kelheim bis Jochenstein)
> Ober- und Mittelrhein (Basel bis Bonn)
> Ober- und Mittelweser (Hannoversch Münden bis Bremen/Hemelingen)

Damit waren Dokumentationen sichergestellt, die bedarfsorientiert eine räumliche Auswertung jederzeit im Nachgang ermöglichen. Aufgrund der Ausprägung der Ereignisse wurden vorerst die Auswertungen für die Strecken Elbe/Saale/Mulde mit Deichbruchsituationen und Donau beauftragt. Die Festlegung der in Tab. 5.11 gelisteten und zu erstellenden Produkte erfolgte in Abstimmung mit den Nutzern (WSV, BAW, BfG).

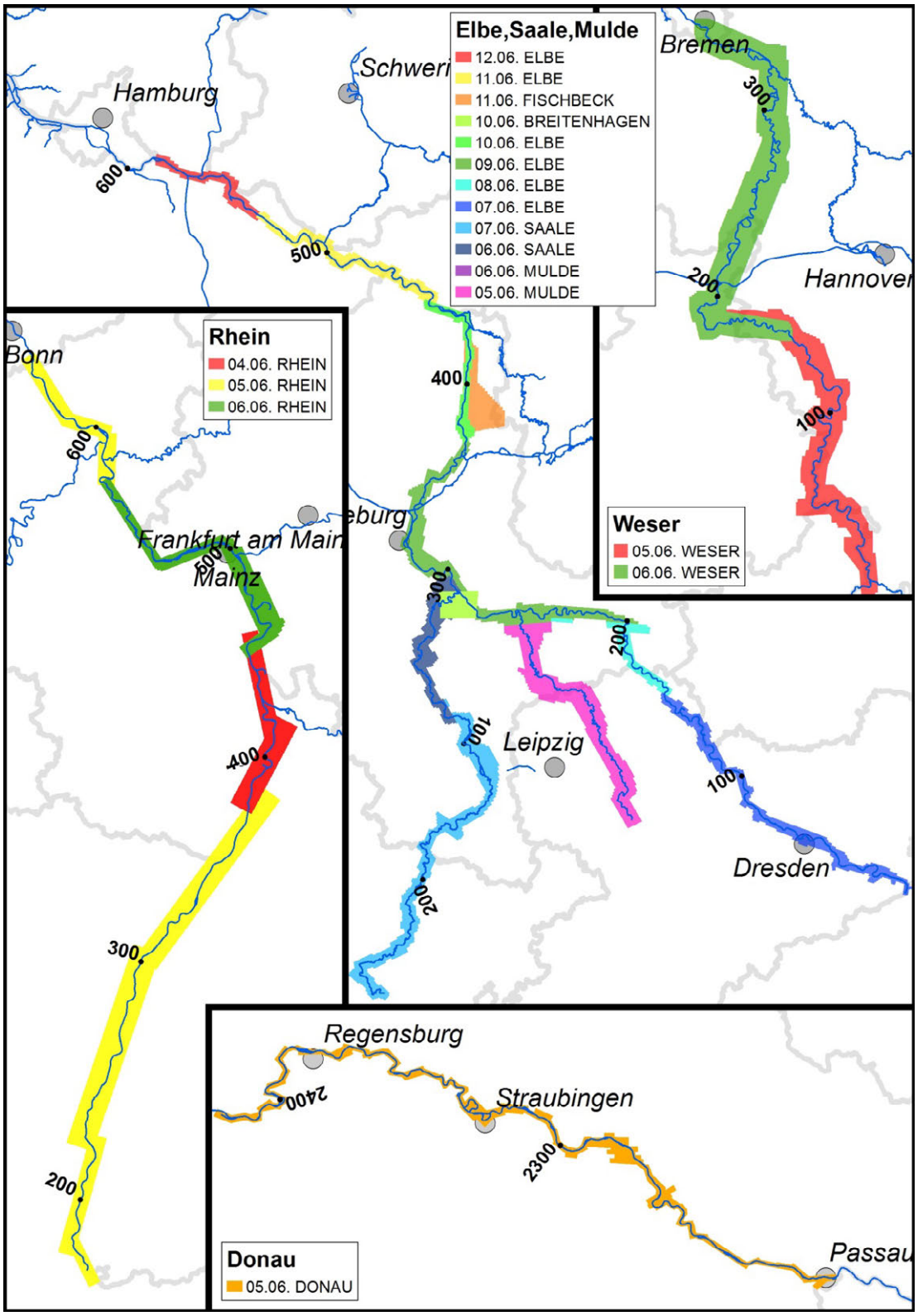


Abb. 5.12: Befliegungsübersichten der stereophotogrammetrisch auswertbaren Hochwassererfassungen 06/2013 an Elbe/Saale/Mulde, Donau, Rhein und Weser

Tab. 5.11: Zusammenstellung der geforderten Produkte und Spezifikationen, s. Abb. 5.13

Produkte
Produktspezifikationen
dreidimensional gemessene attributierte Punkte der Wasser-Land-Grenzen (3D-WLG-Punkte)
• maximaler Punktabstand: 25 m • anzustrebende absolute Lageunsicherheit von $U_x = U_y \leq 40$ cm (Sicherheitswahrscheinlichkeit 95 %, DIN 1995) • anzustrebende absolute Höhenunsicherheit von $U_H \leq 10$ cm • Attribute: 1 - WLG-Punkt sicher (sichere Lage- und sichere Höhenmessung, z.B. WLG am frei sichtbaren Deich) 2 - WLG-Punkt ungenau (unsichere Lage- und sichere Höhenmessung, z.B. WLG auf überschwemmten flachen Feldern und Flächen) 3 - WLG-Punkt unsicher (sichere Lage- und unsichere Höhenmessung, z.B. WLG an Hauswänden und Kaimauern) oder 4 - WLG-Punkt interpoliert (unsichere Lage- und unsichere Höhenmessung, z.B. WLG zum Schließen der Fläche am äußeren Modellrand oder WLG-Verlauf innerhalb vom starken Bewuchs oder unter Brücken sofern breiter als 25 m)
aus 3D-WLG-Punkten abgeleitete dreidimensionale attributierte Wasser-Land-Grenzen **(**3D-WLG-Linien**)**
• gradlinige Verbindung zweier aufeinanderfolgender 3D-WLG-Punkte • Attribute: jeweils mit Zuordnung des „niedrigeren“ o.g. WLG-Punktattributes (z.B. 1 und 3 ergibt 3)
aus den 3D-WLG-Linien abgeleitete stationsbezogene dreidimensionale attributierte Wasserspiegellagen **(**3D-Wspl-Punkte**)**
• Wspl-Punkte auf linker und rechter WLG: Lage: Schnitt von 3D-WLG-Linie mit Ordnungsquerprofil Höhe: Interpolation des Schnittpunktes auf der WLG • Wspl-Punkte auf Verkehrs-/Gewässernetzlinie: Lage: Schnitt von 3D-WLG-Linie mit Ordnungsquerprofil Höhe: abstandsgewichtete Berechnung zu den berechneten Wspl-Punkten linke und rechte WLG • Ordnungsprofilabstand: 100 m • Attribute: Wspl-Punkt, linke WLG oder Wspl-Punkt Verkehrs-/Gewässernetzlinie oder Wspl-Punkt rechte WLG jeweils mit Zuordnung des „niedrigeren“ o.g. WLG-Linienattributes (s.o.)
3D-Wasserspiegelkontrollpunkte
photogrammetrisch sicher messbare 3D-Punkte des Wasserspiegels (wenn örtlich bedingt möglichst zehn Punkte pro 1-km-Strecke)

Produkte
Produktspezifikationen
Digitale Orthophotos der überschwemmten Gebiete (Echtfarb-DOP als verzerrungsfreie und maßstabsgetreue Abbildungen)
• Bodenauflösung (GSD): 20 cm • Abdeckung: 250 m über die WLG hinaus • Farbtiefe: 8 Bit • anzustrebende absolute Lageunsicherheit: $U_x = U_y \leq 40$ cm

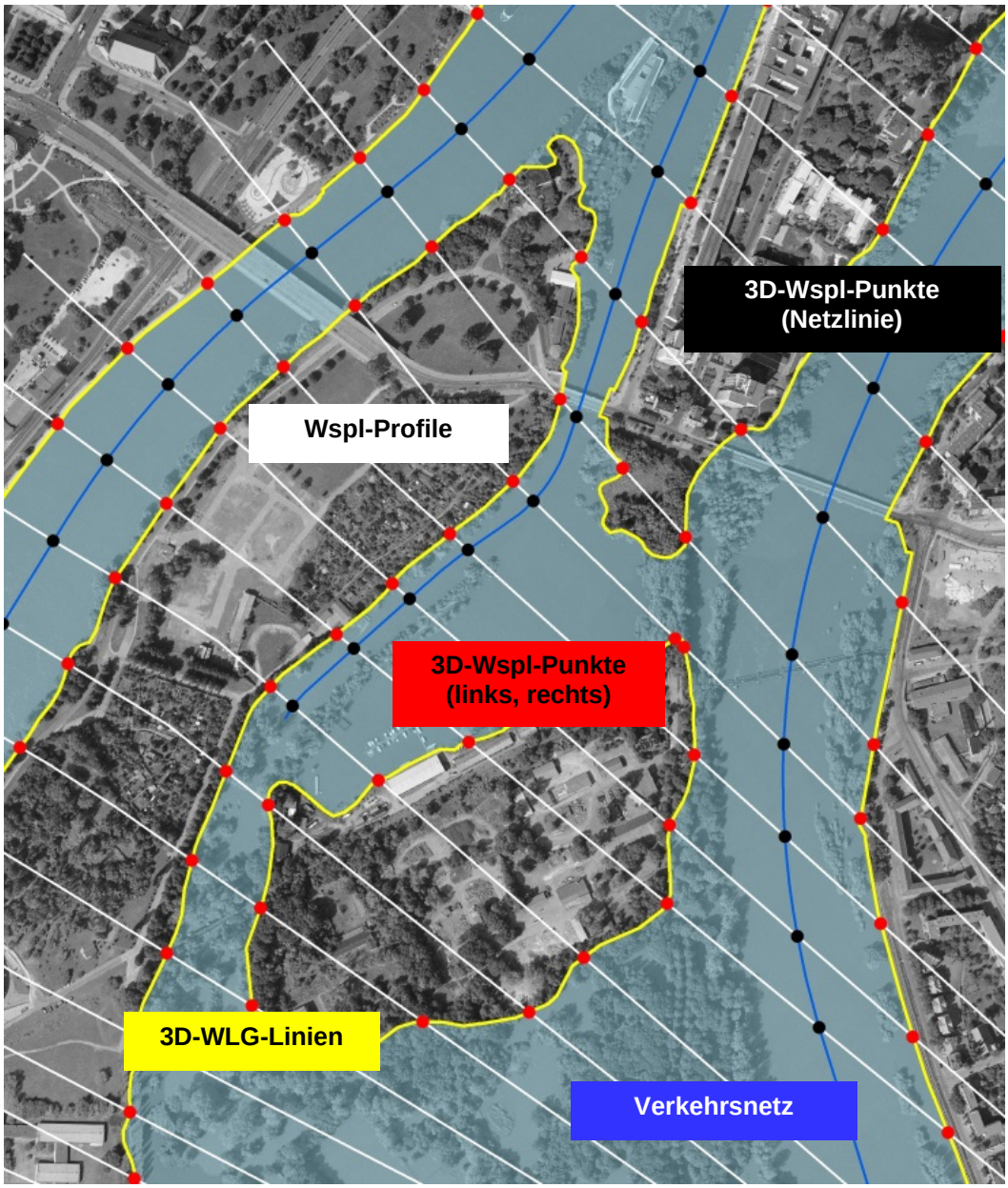


Abb. 5.13: Gesuchte Wasser-Land-Grenzen- und Wasserspiegellageninformationen (Bildquelle: BfG)

Befliegungen

Um die vorgenannten Anforderungen zu erfüllen, erfolgten umfangreiche flugzeuggestützte RGB-Bilddatenerfassungen (Aufnahmen in den Farbkanäle rot, grün und blau zur Erzeugung eines Echtfarbbildes) zur photogrammetrischen Standardauswertung (s. Tab. 5.12 und Abb. 5.12). Die Erfassung am Hochwasserscheitel bzw. in Scheitelnähe konnte auf einer Vielzahl von Streckenabschnitten realisiert werden, setzte allerdings kontinuierliche enge Abstimmungen zwischen den Auftraggebern und den Flugfirmen voraus. Einschränkungen ergaben sich insbesondere durch die Wetter- und Wolkensituationen (mangelnde Sicht- und Lichtverhältnisse durch Regen bzw. zu niedrige Wolkenhöhen), einschränkende Vorgaben der Flugsicherung (Überflugverbote) sowie Deichbrüche (kurzfristige Wasserstandsänderungen).

Tab. 5.12: Zusammenstellung der Bilddatenerfassungen von den Hochwasserereignissen Juni 2013

Gewässerstrecke	Flugzeitraum	Beflogene Fläche	Luftbild-anzahl (ca.)	Boden-auflösung (GSD)
Elbe, km 0-587/ Deichbruch Fischbeck (1 Situation)	07.-12.06.2013/ 11.06.2013	2 020 km²/ 300 km²	7 000/ 950	10 cm/ 10 cm
Mulde, km 0-147	05.-06.06.2013	900 km²	3 200	10 cm
Saale, km 0-250/ Deichbruch Breitenhagen (3 Situationen)	06.-07.06.2013/ 09.-10.06.2013	1 100 km²/ 140 km²	4 307/ 1 094	10 cm/ 10 cm
Donau, km 2 224-2 415	05.06.2013	300 km²	1 000	6-8 cm
Rhein, km 165-642	04.-06.06.2013	3 100 km²	5 500	10 cm
Weser, km 0-363	05.-06.06.2013	1 200 km²	2 900	10 cm

Darüber hinaus wurden die Deichbruchsituationen im Saalemündungsbereich bei Breitenhagen (zwei Situationen am 09.06.2013 und eine am 10.06.2013) und an der Elbe bei Fischbeck (eine Situation am 11.06.2013) zu ausgewählten Wasserständen im Auftrag der BfG entsprechend aufgenommen (s. Tab. 5.12 und Abb. 5.12). Unter Abwägung von fachlichen und wirtschaftlichen Kriterien erfolgten keine weiteren Befliegungen.

Geliefert wurden als Befliegungsergebnisse alle RGB-Luftbilder (s. Abb. 5.14) als orientierte Luftbilder (digitale Luftbilder mit allen erforderlichen Parametern für eine stereoskopische Auswertung, den Koordinaten der Bildmitten im übergeordneten Koordinatenreferenzsystem und den Drehwinkeln des Luftbildsensors) mit den Bildmittenübersichten (s. Abb. 5.15) und teilweise genähert georeferenzierte Luftbildmosaike für zeitnahe Übersichtszwecke (s. Abb. 5.16).

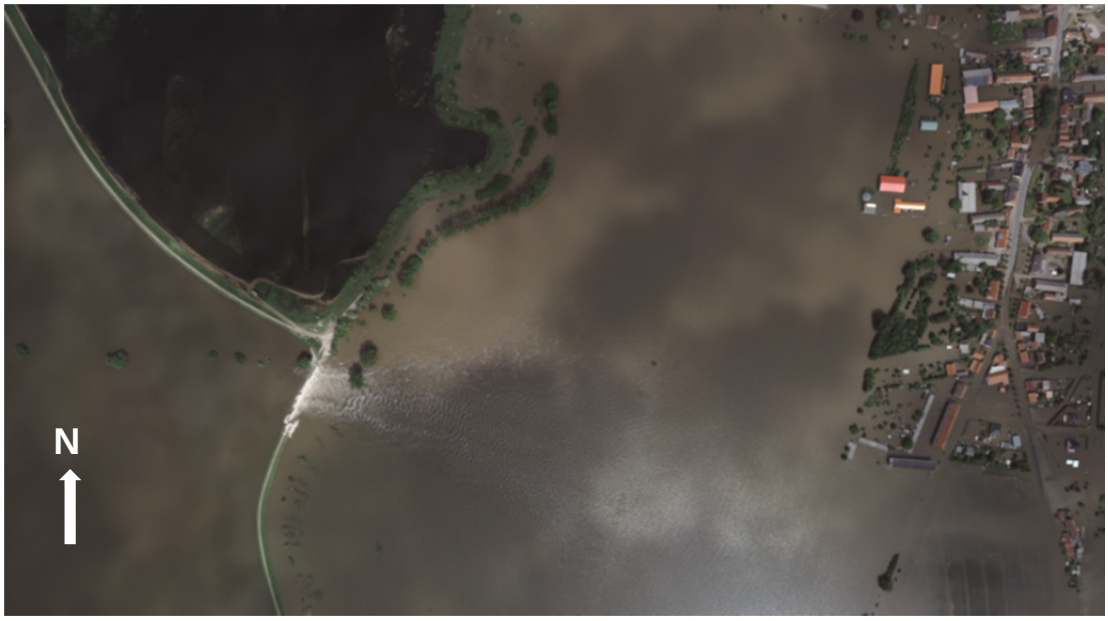


Abb. 5.14: Luftbild: Elbedeichbruchsituation Fischbeck, Elbe-km 388, 11.06.2013 (Bildquelle: BfG)

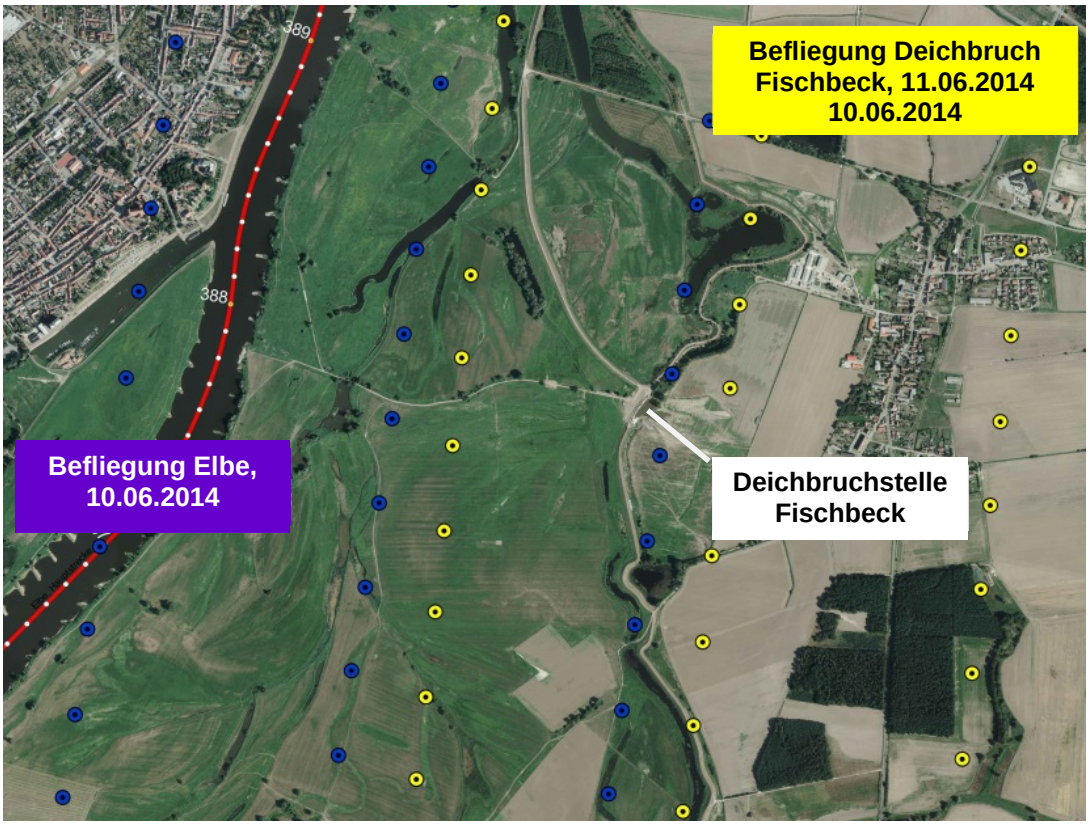


Abb. 5.15: Bildmittenübersicht Elbe-km 387-389 (Bildquelle: BfG)

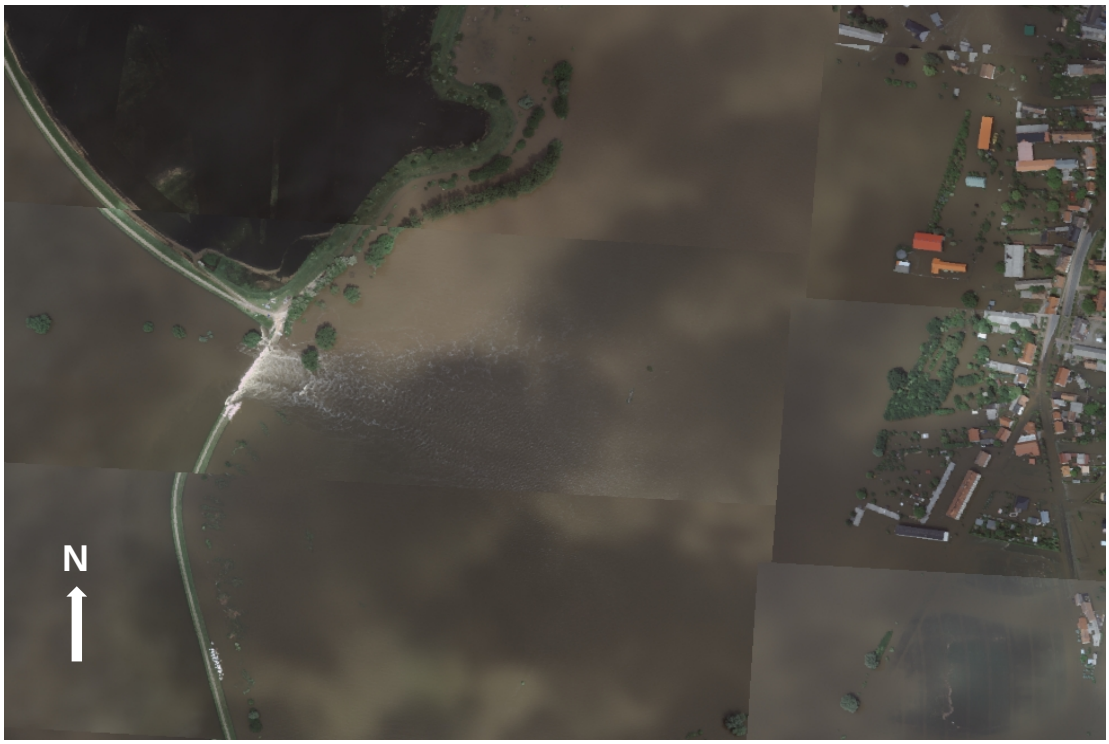


Abb. 5.16: Luftbildmosaik, Elbedeichbruchsituation Fischbeck, Elbe-km 388, 11.06.2013 (Bildquelle: BfG)

Auswertungen und finale Produkte

Entsprechend der Bedarfslage wurden vorerst vier Ingenieurfirmen mit der photogrammetrischen Auswertung von acht Losen an Elbe/Saale/Mulde und Donau (Tab. 5.13) beauftragt. Die jeweilige Bearbeitung war in zwei Leistungsphasen auszuführen. In der ersten Leistungsphase musste pro beauftragte Ingenieurfirma ein repräsentativer Testabschnitt ausgewertet werden. Dieses Vorgehen diente der Erarbeitung einer optimierten und vereinheitlichten Vorgehensmethodik für alle auszuführenden Arbeiten. Darauf aufbauend konnten erst die finalen Ergebnisse in der zweiten Leistungsphase flächendeckend prozessiert werden.

Wesentliche Basisprodukte für die stereophotogrammetrische Auswertung waren die Ergebnisse der Aerotriangulation (räumlich mathematische Verknüpfungen aller benötigten Luftbilder zu einem Luftbildverband über identische Bild- und örtlich eingemessenen Passpunkte, ca. 1 Punkt pro km-Gewässerstrecke). Sie erlauben u.a. eine erste zuverlässige Aussage zu den erreichten Messpunktgenauigkeiten. Die entsprechenden Ergebnisse der mittleren Differenzen in den Passpunkten vor und nach der Aerotriangulation, zwischen den terrestrisch gemessenen und ausgeglichenen Passpunkten, zeigen gute innere Genauigkeiten pro Los und insgesamt an, s. Tab. 5.13.

Entsprechend den oben dargelegten Spezifikationen stehen die folgenden finalen Nutzerprodukte zur Verfügung:

> dreidimensionale attributierte Punkte der Wasser-Land-Grenzen und Wasser-Land-Grenzen (3D-WLG-Punkte, 3D-WLG-Linien, Abb. 5.17) für alle Lose
> stationsbezogene dreidimensionale attributierte Wasserspiegellagen und Kontrollpunkte (3D-Wspl-Punkte, 3D-Kon-Punkte, Abb. 5.18) für die Lose 1 bis 5 und 8
> digitale Orthophotos (Echtfarb-DOP, Abb. 5.17 und Abb. 5.18) für alle Lose

Tab. 5.13: Zusammenstellung der photogrammetrischen Ergebnisdaten

Los	Gewässer-strecke	Mittlere Differen-zen in Pass-punkten [cm]			Wasser-Land-Grenzen (WLG)		Wasser-ser-spiegel-lagen-profile	1 km-Echtfarb-DOP-Kacheln
		Δ_x	Δ_y	Δ_H	km	Mess-punkte		
1	Mulde	3,1	2,5	2,5	520	53 500	1 550	340
2	Saale	3,9	3,8	2,7	1 027	115 000	2 935	626
3	Elbe-Süd, El-km 0,0–198,9	3,2	3,6	1,9	769	96 850	2 021	570
4	Elbe-Mitte, El-km 197,5–376,4	3,2	2,6	1,7	654	73 600	1 216	692
5	Elbe-Nord, El-km 374,9–587,0	2,7	2,4	1,9	543	63 700	2 108	653
6	Saale-Deichbruch Breitenhagen	3,9	2,7	2,9	137	174 000	–	106
7	Elbe-Deichbruch Fischbeck	3,3	2,6	2,9	265	56 900	–	192
8	Donau	2,9	3,8	3,8	630	98 700	1 997	450

Fachliche Ergebnisbewertungen

Bei der Abnahme wurde verstärkt auf die Plausibilität der Ergebnisse der Aerotriangulation geachtet, da es sich bei den erfassten Flächen zwangsläufig um umfangreiche Wasserflächen handelte und auf Wasseroberflächen stereophotogrammetrisch keine Punkte messbar sind. Somit standen diese Bereiche auch nicht für die Passpunktauswahl zur Verfügung. Die Verknüpfungen der Luftbilder musste über eine Vielzahl an manuell festgelegten in den jeweiligen Bildern identischen Punkten sichergestellt werden, die aus den überschwemmten Flächen herausragten, z.B. ortsfeste Punkte an Bäumen oder Schildern. Vor diesem Hintergrund bestätigen die in Tab. 5.13 aufgelisteten mittleren Differenzen in den Passpunkten vor und nach der Aerotriangulation für diese Verhältnisse gute, kaum zu steigernde Voraussetzungen für die photogrammetrische Auswertung.

Weitere Messungen der Wasserspiegellagen erfolgten an der Elbe u.a. durch den Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt, den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, das Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein, das Wasser- und Schifffahrtsamt Dresden sowie die Bundesanstalt für Wasserbau als voneinander unabhängige Einmessungen von Geschwemmsellinien und sichtbaren Scheitelhöhen an Objekten wie Häusern, Bäumen etc. im Anschluss an das Ereignis bzw. Wasserspiegelfixierungen während des Hochwassers (vgl. Kap. 5.3). Eingesetzt wurden zur Erfassung der 3D-Punkte sowohl an der Geschwemmsellinie als auch in Strommitte die GNSS-Technik (Globales Navigationssatellitensystem, bei Nutzung des Satellitenpositionierungsdienstes SAPOS, Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service). Diese Daten wurden bereits in Kap. 5.3 vorgestellt und dort auch exemplarisch für einen Abschnitt der unteren Mittelelbe ausgewertet. Die durch flugzeuggestützte Fernerkundungseinsätze gewonnenen Daten ergänzen diese klassischen Wasserspiegelfixierungen um die weiteren photogrammetrisch erfassten Informationen.

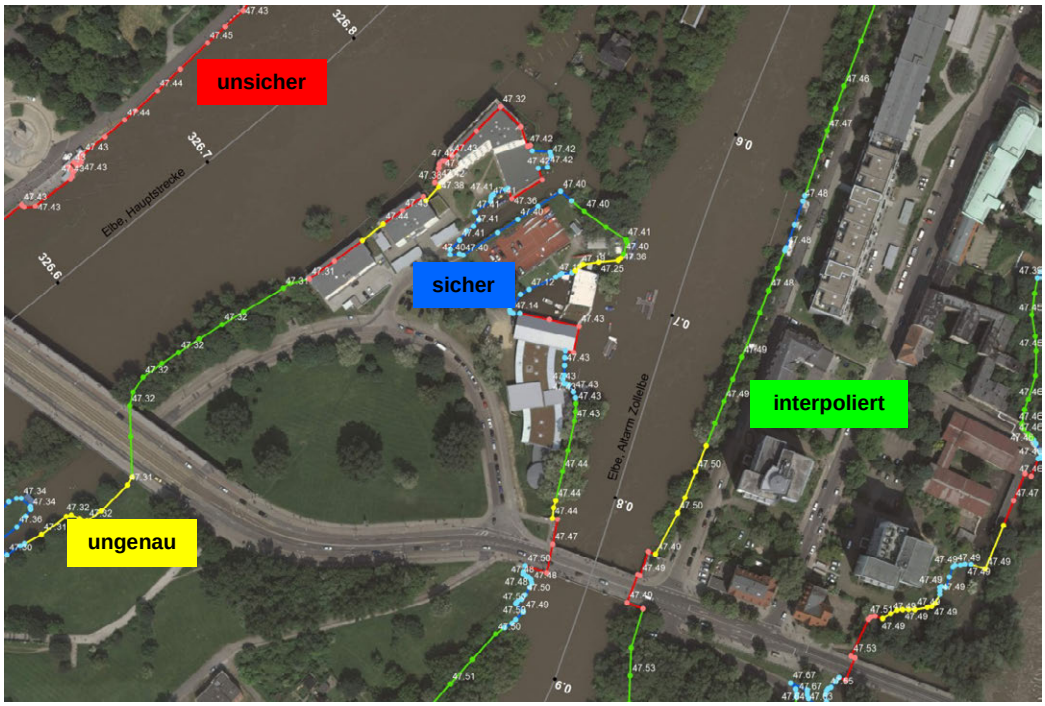


Abb. 5.17: Produkte 3D-WLG-Punkte und 3D-WLG-Linien mit m-Höhenangabe und Attributen der Messung, Elbe-km 326, Magdeburg, 09.06.2013, 12:21 MESZ (Bildquelle: BfG)

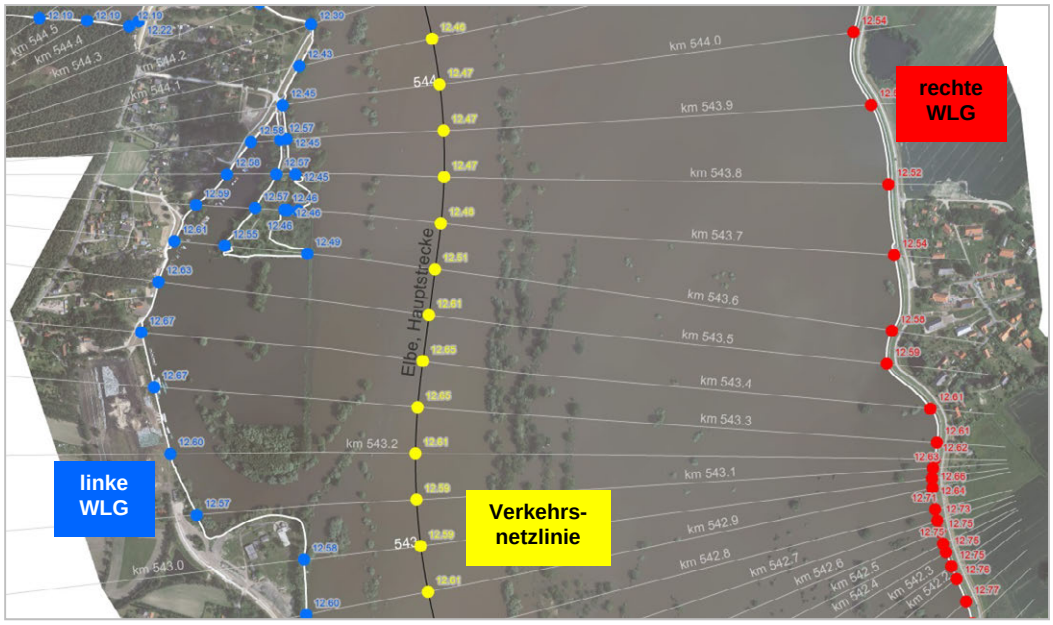


Abb. 5.18: Produkt 3D-Wspl-Punkte mit m-Höhenangabe, Elbe-km 543, Neu Garge/Alt Garge, 12.06.2013, 08:00 MESZ (Bildquelle: BfG)

Zur Beurteilung der Qualität der ermittelten 3D-WLG-Punkte und -Linien und Wasserspiegellagen ist die Vergleichbarkeit der Messergebnisse im Kontext mit den jeweiligen Erfassungszeitpunkten ein fundamentales Kriterium. Um einen Vergleich aller drei Verfahren zu ermöglichen, wird als erste Bezugsgröße die Scheitelsituation angesetzt. Zur entsprechenden Einschätzung der BAW-Wasserspiegelfixierung und der BfG-Befliegung können die Erfassungszeitpunkte der Pegelpassagen herangezogen werden. Dazu sind in der Abb. 5.7 im

Kap. 5.3 die Wasserstandsganglinien und die jeweiligen Erfassungszeitpunkte der Pegelpassagen an acht charakteristischen Elbepegeln dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass die Aufnahmen nicht immer während des unmittelbaren Scheitels erfolgten, die Zeitabstände beider Messungen zum Scheitelzeitpunkt aber durchaus vergleichbar sind. Dies ist verfahrens- und situationsbezogen begründbar. Als Einflussfaktoren seien insbesondere Tageszeit, Wetterverhältnisse, Befahrungs- bzw. Überfluggenehmigungen sowie kurzfristige Beeinflussungen durch Deichbrüche genannt.

In Abhängigkeit von der Datenlage und der -vergleichbarkeit sind erste grobe verfahrenbezogene Einschätzungen zu den erreichten Auflösungen und Unsicherheiten möglich:

> Vergleich der Bestimmung der 3D-WLG-Punkte durch terrestrische GNSS-Geschwemmsellinienaufnahmen und der Bestimmung durch photogrammetrische Auswertungen:
  - Die angestrebte eindeutige Messpunktfestlegung ist bei beiden Verfahren nicht durchgängig möglich. Bei beiden Verfahren wird die Festlegung der Punkte und damit das endgültige Messergebnis vor allem durch die Landbedeckung und die Geländeneigung beeinflusst. Zusätzlich sind bei der Einmessung von Geschwemmsellinienpunkten Verwitterungseinflüsse und bei photogrammetrischer Auswertung ggf. nicht optimale Kontraste in den Luftbildern von der Wasser- zur Geländeoberfläche zu berücksichtigen.
  - Photogrammetrisch sind unter wirtschaftlichen und zeitlichen Gesichtspunkten wesentlich kleinere Messpunktabstände in ausreichender Anzahl realisierbar. Die im Ereignisnachgang erfassten Geschwemmsellinien sind aufgrund der vorgenannten Einflussfaktoren nicht immer mit dem notwendigen Punktabstand erfassbar.
  - Messtechnisch betrachtet sind bei photogrammetrischer Messung Unsicherheiten von $U_x = U_y \leq 40$ cm in der Lage, $U_H \leq 10$ cm in der Höhe realisierbar. Bei GNSS-Messungen sind Unsicherheiten von $U_x = U_y = U_H \leq 5$ cm in der Lage und der Höhe zu erwarten. Allerdings werden die Unsicherheiten häufig um Größenordnungen erhöht, da keine eindeutige Festlegung der Messpunkte, die den wahren Verlauf der Wasser-Land-Grenze darstellen, möglich ist.

> 3D-WLG-Linien abgeleitet aus 3D-WLG-Punkten bestimmt durch terrestrische GNSS-Geschwemmsellinienaufnahmen und photogrammetrische Auswertungen:
  - Aus den erreichten GNSS-Messpunktdichten (Geschwemmsellinienpunkte) kann nur eine sehr grob angenäherte 3D-WLG-Linie abgeleitet werden.
  - Ansonsten sind die vorgenannten Aussagen zu den 3D-WLG-Punkten übertragbar.

> stationsbezogene 3D-Wspl-Punkte in Strommitte bestimmt mittels GNSS-Technik bei Treibfahrt und interpoliert auf der Basis der photogrammetrisch abgeleiteten 3D-WLG-Linien:
  - Die jeweils erreichten Messpunktabstände sind absolut ausreichend.
  - Die mittels GNSS-Technik bei Treibfahrt bestimmten Wasserspiegelhöhen dürften überschlägig mit Unsicherheiten von $U_H \leq 5$ cm bestimmt worden sein.

    - Verlässliche Genauigkeitsangaben zu den interpolierten Wasserspiegellagen sind derzeit nicht realistisch möglich. Eine Übertragung der Genauigkeitsangaben zu den 3D-WLG-Punkten auf die Wasserspiegellagen in der Strommitte ist schon aufgrund der Wasseroberflächentopographie nicht zulässig. Dazu bedarf es noch intensiver Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.
- digitale Orthophotos:
    - Die angeforderten Lageunsicherheiten von $U_x = U_y \leq 40$ cm wurden erreicht.
    - Eine flächendeckend gleichbleibende radiometrische Bildqualität war aufgrund der teilweise sehr unterschiedlichen Lichtverhältnisse zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten nicht realisierbar. Dies begründet sich vor allem mit der teilweise vorherrschenden Wolkenbedeckung zu den Befliegungszeitpunkten in Scheitelnähe.

Von der BfG sind gesonderte Untersuchungen zur Angabe präziserer qualitativer und quantitativer Aussagen zur Bestimmung von 3D-WLG-Punkten und -Linien sowie 3D-Wspl-Punkte vorgesehen. Dabei sollen alle o.g. Messergebnisse und auch Informationen, die zum Zeitpunkt des Elbehochwassers satellitengestützt erfasst wurden und für die BfG verfügbar sind, mit einbezogen werden. Ebenso ist eine Evaluierung der fachlichen und wirtschaftlichen Leistungsmerkmale aller relevanten Messverfahren avisiert.

5.5 Messprogramm „Hochwasserereigniserfassung“

Bis dato wurden und werden im Kontext mit Hoch- und auch Niedrigwasserereignissen i.d.R. umfangreiche Datenerfassungen durch verschiedenste Institutionen/Verwaltungen unmittelbar vor oder während des eingetretenen Ereignisses angefordert. Ein großes fachliches wie auch wirtschaftliches Manko ist dabei grundsätzlich das Erfordernis sehr kurzer Reaktionszeiten zur

- abgestimmten Formulierung verfahrensunabhängiger Anforderungen im notwendigen Detaillierungsgrad, die bis dato nicht erfolgt ist, und
- Realisierung der entsprechenden Anforderungen in Eigenregie der betroffenen Verwaltungen und/oder per Vergabe von Ingenieurleistungen, ebenfalls verbunden mit sehr kurzen Rüstzeiten.

Alle bisher gelaufenen Kampagnen bestätigen, dass es in derartigen Situationen in der Regel unmöglich ist, alle berechtigten Anforderungen fachlich und organisatorisch zu berücksichtigen, die Einzelmaßnahmen mit den wirtschaftlichsten Methoden umzusetzen und umfangreiche Mehrfacharbeiten zu vermeiden. Dies betrifft selbstverständlich nicht nur die Geofachdaten der Wasser-Land-Grenzen der Überschwemmungsflächen, der Wasserspiegelhöhen und der bildhaften georeferenzierten Dokumentation sondern auch die ereignisabhängigen hydrologischen Grundlagendaten wie Abflüsse etc. Um die Mängel wesentlich zu reduzieren (denn vollständig abstellen lassen sie sich situationsbedingt nicht), ist es geboten, wasserstraßen- bzw. einzugsgebietsbezogene realisierbare Messprogramme aufzustellen. Diese Messprogramme mit den

- übergeordneten fachlichen Anforderungen,
- messtechnischen Umsetzungen und
- organisatorischen Durchführungsvorgaben

sollten mit allen Bedarfsträgern abgestimmt sein. Dies gilt auch für die Festlegung der Ausführungsverantwortungen und Finanzierungslösungen, so dass entsprechende Vorkehrungen, wie z.B. der Abschluss von Rahmenvereinbarungen zur Ausführung von Ingenieurleistungen, getroffen werden können.

Übertragen auf den Hochwasserfall sollte ein überregionales Bund-Länder-Messkonzept für ein „Hochwassermessprogramm“ erstellt werden, das anschließend flussgebietsweise, unter Berücksichtigung der Eigenheiten des jeweiligen Gebietes, in stromgebietsspezifische Messprogramme mit Umsetzungsplanungen zu überführen ist.

5.6 Fazit Fernerkundungseinsätze beim Hochwasser 2013

Die auf die Erkennung von Ölverschmutzung auf dem Meer optimierte Sensorik des Ölüberwachungsflugzeugs Do228 konnte beim Juni-Hochwasser 2013 an der Elbe eingesetzt werden, um Hinweise auf wahrscheinliche Deichdurchfeuchtungs- bzw. Überflutungsstellen zu liefern. Eine systematische Auswertung der Rückmeldungen als Validierung bzw. als Beitrag zu einer weiteren Optimierung soll im Rahmen eines beantragten Projektes erfolgen.

Zur Nutzung stehen flächendeckend hoch auflösende Daten, dreidimensionale attributierte Wasser-Land-Grenzen und Wasserspiegelhöhen sowie hoch aufgelöste georeferenzierte Bilddokumentationen vom Hochwasserereignis Juni 2013 an der Elbe, Saale, Mulde und Donau zur Verfügung. Bei Bedarf können entsprechende Daten von den parallelen Ereignissen am Rhein und an der Weser erzeugt werden.

Das fachliche und wirtschaftliche Erfordernis eines möglichst zwischen allen Bedarfsträgern abgestimmten Messprogramms „Hochwasserereigniserfassung“ wurde bestätigt.

6 Hochwasservorhersagen für die betroffenen Bundeswasserstraßen

Dennis Meißner, Silke Rademacher

Hochwasservorhersagen sind seit vielen Jahren fester Bestandteil operationeller Hochwasserwarn- und -informationssysteme. Sie stellen im akuten Hochwasserereignis in Ergänzung zu hydrologischen und hydrometeorologischen Beobachtungsdaten die wichtigste Informationsquelle dar, um eine rechtzeitige und ereignisoptimierte Einleitung und Durchführung von Schutzmaßnahmen vorzunehmen. Zu diesen Maßnahmen zählen grundsätzlich die Information, Warnung und Alarmierung von Behörden und Rettungsdiensten/Feuerwehren sowie der betroffenen Bevölkerung und Gewässernutzer (z.B. Schifffahrt, Industrie). Darüber hinaus haben die Hochwasservorhersagen im Rahmen des Juni-Hochwassers 2013 zur rechtzeitigen Errichtung mobiler Hochwasserschutzelemente (z.B. am Neckar), zum optimierten Einsatz gesteuerter Rückhalteräume (z.B. am Oberrhein, an der Mittelelbe/Havel) und zur Vorentleerung von Speichern (z.B. Schweizer Seen, tschechische Talsperren) beigetragen.

Die Zuständigkeit für die Hochwasservorhersage in Deutschland liegt bei den Bundesländern. Gleichwohl leistet auch der Bund einen Betrag, in dem im Bereich von Bundeswasserstraßen die BfG z.T. das für die Bedürfnisse des Bundes entwickelte Wasserstandsvorhersagesystem WAVOS zur Verfügung stellt und die Hochwasservorhersage mitunter in Kooperation mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes durchgeführt wird (LAWA 2014a). Darüber hinaus unterhält die WSV, soweit möglich und zumutbar, einen Wasserstands- und Hochwassermeldedienst im Benehmen mit den Ländern, um zu einer rechtzeitigen und zuverlässigen Hochwasserwarnung und -vorhersage beizutragen.

Diese föderale Struktur, in der jede Hochwasserzentrale die Vorhersagen für die Einzugsgebiete und Gewässer in ihrer Zuständigkeit erstellt und anschließend an die benachbarten Zentralen weiterreicht (Abb. 6.1), ermöglicht eine Kombination detaillierter Vorortkenntnisse mit den auf die lokalen Gegebenheiten abgestimmten Modellwerkzeugen der regionalen Zentralen. Die jeweiligen Berechnungsergebnisse werden automatisiert an eine oder mehrere flussabwärts gelegene Zentralen weitergegeben. Um innerhalb dieser Struktur zu einer reibungslosen und konsistenten Hochwasservorhersage über die Staats- und Ländergrenzen hinweg zu gelangen, ist eine klare Definition und kontinuierliche Pflege der umfassenden Schnittstellen auch in Zukunft durch die Vorhersagezentralen sicherzustellen. Die Landschaft der Vorhersagemodelle und -systeme ist in Deutschland entsprechend heterogen, wobei sich in mehreren Einzugsgebieten/Bundesländern identische Modellsysteme etabliert haben, wie z.B. LARSIM (BREMICKER et al. 2013) oder WAVOS (RADEMACHER et al. 2004). Neben einer Heterogenität in der Organisation, Durchführung und Publikation der Hochwasservorhersage gibt es auch in Bezug auf die personelle und technische Ausstattung der Zentralen erhebliche regionale Unterschiede.

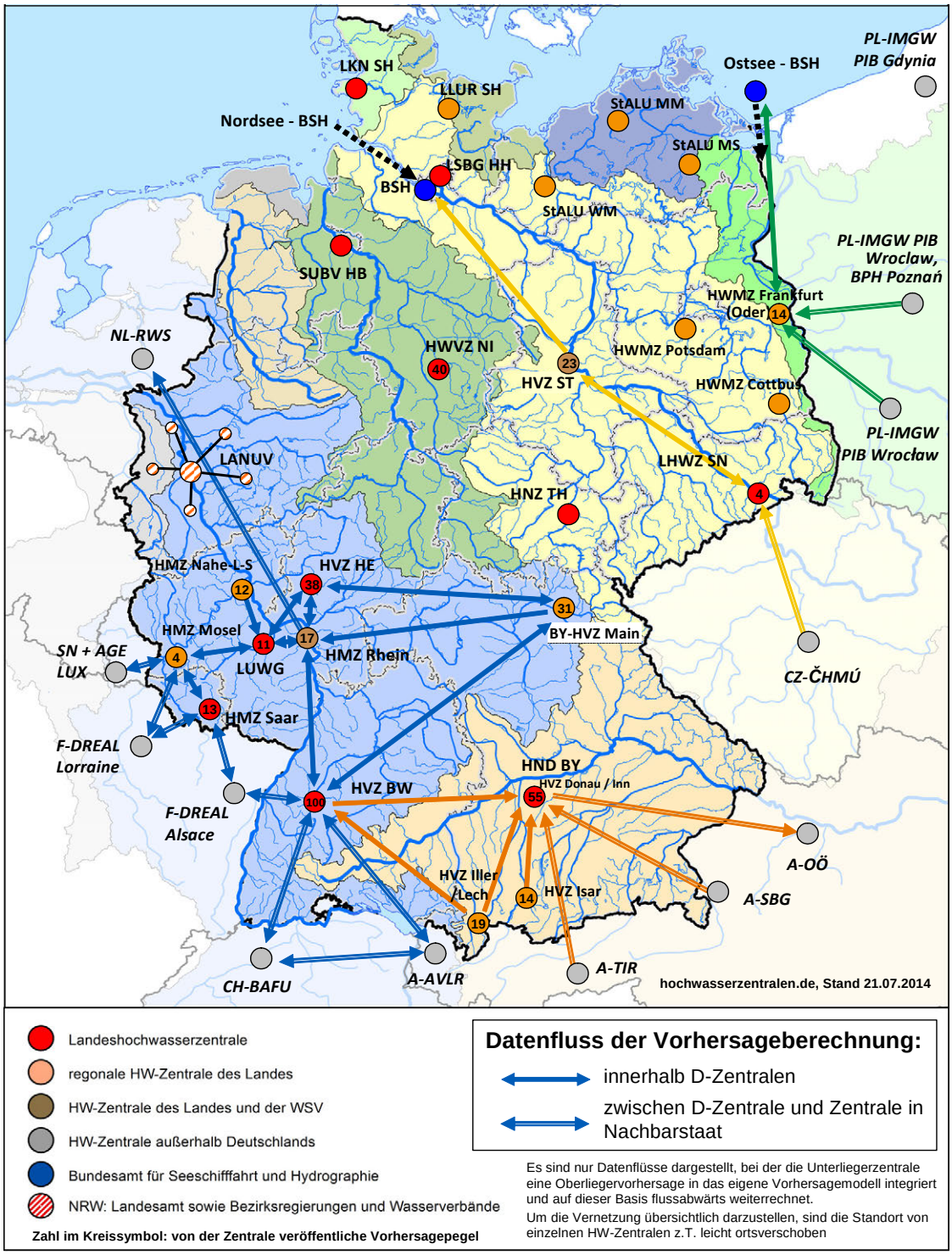


Abb. 6.1: Nationale und internationale Vernetzung der Hochwasservorhersageberechnungen für deutsche Binnengewässer (Quelle: LAWA 2014a)

Das länderübergreifende Hochwasserportal (www.hochwasserzentralen.de) ermöglicht seit 2009 eine aktuelle Übersicht zur Hochwasserlage an derzeit über 1 000 Pegeln in Deutschland und bietet einen zentralen Zugang zu den individuellen, detaillierten Hochwasserinformationen der Landeshochwasserportale. Das Portal wird von den Hochwasserzentralen der Länder

technisch redundant an Serverstandorten in Karlsruhe und München betrieben und von einer Expertengruppe der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) fachlich betreut sowie inhaltlich fortgeschrieben. Das Internet ist auch in Bezug auf Hochwasserinformationen das wesentliche Medium für die Öffentlichkeit geworden, wenn auch weiterhin die traditionellen Informationswege wie Radio und Videotext bedient werden. Aufgrund der enormen Zugriffszahlen auf die Landeshochwasserportale stellt im Ereignisfall die Gewährleistung einer möglichst störungsfreien und aktuellen Informationsbereitstellung eine immerwährende IT-technische Herausforderung für die Hochwasserzentralen dar. So lag beispielsweise beim Hochwasser 2013 die Zahl der Zugriffe auf das Internetangebot des bayerischen Hochwassernachrichtendienstes am Sonntag, dem 02.06.2013 bei etwa 14,5 Millionen (LfU 2013).

Die Erstellung von Hochwasservorhersagen basiert in der Regel auf der Anwendung von prozessbasierten, numerischen Modellen. Diese berechnen auf der Grundlage (vereinfachter) physikalischer und statistischer Gesetzmäßigkeiten ausgehend von einem vorgegebenen Anfangszustand (Ist-Situation zum Beginn der Vorhersage) die zeitliche Entwicklung der jeweiligen Zustandsgröße (z.B. Abfluss) unter dem Einfluss äußerer Randbedingungen (z.B. Niederschlag). Zur Nachbildung der Hochwasserwirkungskette werden zumeist unterschiedliche Modelle in Form einer Modellkette betrieben. Numerische Wettervorhersagemodelle (z.B. des DWD) beschreiben die wesentlichen meteorologischen Prozesse in der Atmosphäre und am Erdboden und ihren Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Modellvariablen wie Luftdruck, Temperatur, Wind, Wasserdampf, Wolken und Niederschlag. Die Ergebnisse dieser numerischen Wettervorhersagemodelle, wie z.B. die Regionalmodelle COSMO-DE und COSMO-EU oder das Globalmodell GME des DWD, werden vom Wetterdienst u.a. für die Auslösung von Wetterwarnungen genutzt und den Hochwasserzentralen zur weiteren Berechnung der Hochwasservorhersagen zur Verfügung gestellt (STEIN, MALITZ et al. 2013).

Die meteorologischen Modelle generieren die Randbedingungen / Antriebsdaten für die Wasserhaushaltsmodelle, die diese unter Berücksichtigung der Einzugsgebietscharakteristiken in Abflüsse transformieren. Diese Abflüsse aus den Teileinzugsgebieten werden, insbesondere bei größeren Gewässern, an hydrodynamische Modelle weitergereicht, die die Translation und Verformung der Abflusswellen im Gewässersystem unter Berücksichtigung der sich aus unterschiedlichen Einzugsgebietsteilen überlagernden Abflussverläufe simulieren und letztlich die Wasserstände an den Vorhersagepegeln ermitteln.

Unsicherheiten der Hochwasservorhersage entstehen zwangsläufig in jeder Komponente der Vorhersagekette. Dies betrifft bereits die operationellen – und damit als ungeprüfte Rohdaten vorliegenden – meteorologischen wie hydrologischen Beobachtungsdaten, die insbesondere durch Ungenauigkeiten oder Ausfälle in der Messwerterfassung, der Umrechnung von Wasserständen in Abflüsse sowie der räumlichen Interpolation entstehen. Beobachtungsdaten dienen im operationellen Betrieb in erster Linie der Initialisierung der Modelle, besitzen jedoch auch im Kontext von Datenassimilationsmethoden und Post-Prozessingverfahren einen hohen Stellenwert. Zudem werden die Vorhersagemodelle außerhalb des operationellen Einsatzes anhand von Beobachtungsdaten kalibriert, d.h. hinsichtlich ihrer Struktur und Parameter so angepasst, dass gemessene Ereignisse der Vergangenheit bestmöglich reproduziert werden. Dabei ist zu bedenken, dass für Hochwasserereignisse aufgrund ihrer Seltenheit nur vergleichsweise wenige Beobachtungsdaten zur Kalibrierung zur Verfügung stehen. Zugleich sind Messdaten im Hochwasserbereich (s. Kap. 5) häufig mit größeren Unsicherheiten behaf-

tet, was sich entsprechend auch auf die Modelle überträgt. In Bezug auf die Kalibrierung und den späteren Einsatz der Modelle ist zu unterscheiden, ob das jeweilige Hochwasserereignis innerhalb oder außerhalb des zur Modellkalibrierung herangezogenen Ereigniskollektivs liegt. Prinzipiell wächst die Unsicherheit, wenn Modelle in (extremen) Bereichen betrieben werden, für die nur wenig oder gar keine Beobachtungsdaten zur Kalibrierung verfügbar waren, so dass die Modelle quasi extrapolieren. Die Größe und damit Seltenheit des Hochwasserereignisses trägt also entscheidend zur Unsicherheit seiner Vorhersagen bei. Dies gilt es bei der Bewertung der Vorhersagen im Juni 2013, insbesondere im Donau- und Elbegebiet, in denen es zu deutlichen Überschreitungen bisher gemessener Wasserstände kam, zu bedenken (vgl. Kap. 3.4 und 3.5).

Aber auch die Vorhersagemodelle selbst sind mit Unsicherheiten behaftet. Sie stellen stets eine Vereinfachung und Abstraktion der Natur dar – sowohl hinsichtlich der physikalischen Prozesse wie auch der raum-zeitlichen Struktur. Die sogenannte „strukturelle Modellunsicherheit“ entsteht durch die vereinfachte Abbildung der Realität im Modell, in der evtl. entscheidende Prozesse nicht oder nicht adäquat abgebildet werden, und die Diskretisierung des Modells. Parameterunsicherheit entsteht aus der Kalibrierung des Modells, da viele Modellparameter nicht direkt gemessen werden können und im Allgemeinen lediglich an dem gemessenen Abfluss eines Pegels am Gebietsauslass kalibriert werden müssen.

Beim Juni-Hochwasser 2013 bildeten zudem die unvorhersehbaren, plötzlichen Änderungen im modellierten Natursystem in Form von Deichbrüchen eine zusätzliche, signifikante Unsicherheitsquelle. Selbst wenn es ad-hoc gelingt, diese Änderungen ansatzweise in die operationellen Vorhersagemodelle zu implementieren, ist das Modellverhalten im Weiteren nicht getestet bzw. kalibriert. Hinzukommt, dass zusätzlich erforderliche Daten, welche zur Beschreibung eines Deichbruchs erforderlich sind, wie z.B. die Breite der Deichbresche, als äußerst unsicher einzustufen sind und sich zudem über die Zeit verändern. Geplante Retentionsmaßnahmen, wie sie z.B. am Rhein zum Einsatz kamen, sind hingegen mit ihrer hydraulischen Wirkungsweise und bekannten Abmessungen der Ein- und Auslassbauwerke in den Vorhersagemodellen abgebildet und dort umfassend getestet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass das Juni-Hochwasser 2013 nicht nur in Bezug auf die hydrometeorologischen Rahmenbedingungen sowie die Einordnung in die Hochwasserstatistik in mehreren Teilen Deutschlands besondere Beachtung verdient, sondern dieses Ereignis hat an vielen Gewässern auch die Hochwasservorhersage vor besondere Herausforderungen gestellt. Hinsichtlich der Hochwasservorhersagemodelle wird das Juni-Hochwasser daher weiter wirken und im Rahmen anstehender Optimierungen und Aktualisierungen in das zur Kalibrierung zu berücksichtigende Kollektiv eingehen. Diesbezüglich ist die Vielzahl der während des Ereignisses gewonnenen Messdaten (s. Kap. 5) auch für die Hochwasservorhersage von großem Wert.

6.1 Hochwasservorhersage Rhein

Für die Vorhersage entlang des Rheins sind die Hochwasserzentralen der Schweiz, des Landes Baden-Württemberg und des Landes Rheinland-Pfalz gemeinsam mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes und der Hochwasserzentrale der Niederlande zuständig (BÜRGI et al. 2004). Die beim Bundesamt für Umwelt angesiedelte Hochwasservorhersage-

zentrale der Schweiz erstellt und veröffentlicht die Vorhersagen bis zum Rheinpegel Basel-Rheinhalle. Für den Hochwasservorhersagezeitraum von 72 Stunden werden Abflüsse auf der Basis dreier deterministischer Wettervorhersagen der MeteoSchweiz bzw. des Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) publiziert sowie eine Ensemble-Vorhersage auf Basis der COSMO-LEPS Ensemble (MONTANI et al. 2011). Als hydrologisches Modell kam 2013 HBV (BERGSTRÖM 1995) zum Einsatz. Während des Juni-Hochwassers wurden vom 31.05. bis 02.06. mehrmals täglich Vorhersage- und Warnprodukte (Modellberechnungen, Naturgefahrenbulletins und Warnkarten) im Internet sowie auf der Behördenplattform GIN (Gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren) publiziert. Ab dem 03. Juni bis Anfang Juli wurde das Naturgefahrenbulletin weiterhin alle zwei bis drei Tage aktualisiert (Hochwasserzentralen Rhein 2013).

Für das deutsche Rheingebiet zwischen Bodensee, Hochrhein und dem Oberrhein oberhalb des Pegels Worms wurden von der Hochwasservorhersagezentrale der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) ab dem 30. Mai mehrfach täglich aktualisierte Lageberichte erstellt sowie stündlich aktualisierte Vorhersagen für mehr als 80 Pegel im baden-württembergischen Rheingebiet berechnet und veröffentlicht. Das zentrale Modellwerkzeug der Vorhersage bei der LUBW ist LARSIM (BREMICKER 2000) sowie das Synoptische Modell mit hydrodynamischem Berechnungsmodul. Der Vorhersagezeitraum für die Rheinpegel beträgt im Vorfeld des Hochwassers („Frühwarnzeitraum“) bis zu 7 Tage und wird während des Hochwassers auf einen Zeitraum von 48 Stunden gekürzt, wobei der 2. Vorhersagetag (25.-48. Stunde) als „Abschätzung“ gekennzeichnet ist, um die zunehmende Unsicherheit entlang des Vorhersagezeitraums zu kommunizieren. Im Jahr 2013 wurden noch ausschließlich deterministische Vorhersagen publiziert, seit dem Frühjahr 2014 wird neben einem „best guess“ ein auf Multi-Modell-Vorhersagen basiertes Unsicherheitsband veröffentlicht.

Für den Rhein ab dem Pegel Worms bis zur deutsch-niederländischen Grenze erfolgt die Hochwasservorhersage in dem gemeinsam von der WSV und dem Land Rheinland-Pfalz betriebenen Hochwassermeldezentrum Rhein, angesiedelt bei der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle Südwest, in Mainz. Während des Juni-Hochwassers 2013 war vom 31. Mai bis zum 07. Juni sowie vom 10.-12. Juni der Hochwassermeldedienst eröffnet und es erfolgte eine stündliche Aktualisierung der Messwerte des Wasserstandes sowie eine dreistündliche Aktualisierung der Wasserstandsvorhersagen (LUWG 2013). Mehrmals täglich wurden zudem Hochwasserberichte erstellt. Für 15 Pegel entlang des Rheins wurden deterministische Vorhersagen für die nächsten 24 Stunden sowie Hochwassertendenzen bis zu 48 Stunden publiziert. Das Hochwassermeldezentrum Rhein setzt das Vorhersagesystem WAVOS der BfG mit dem darin integrierten hydrodynamischen Modellwerkzeug SOBEK (STELLING & DUINMEIJER 2003) ein.

Die für die Rheinvorhersage essenziellen, im Hochwasserfall mehrmals täglich erstellten Vorhersagen für die relevanten Rheinzuflüsse werden von folgenden Dienststellen an die jeweiligen Unterlieger weitergegeben (BfG 2013d):

- Bodensee und Zuflüsse: gemeinsame Vorhersage der Hochwasserzentralen von Baden-Württemberg, dem Vorarlberg, und der Schweiz (Modellwerkzeuge: LARSIM und HBV)
- Hochrhein-Zuflüsse Aare und Thur: Hochwasserzentrale des Bundesamtes für Umwelt, Bern (Modellwerkzeug: HBV)

- Neckar sowie Hochrhein- und Bodenseezuflüsse zwischen Konstanz und Mannheim: Hochwasserzentrale Baden-Württemberg (Modellwerkzeug: LARSIM)
- französische Rheinzuflüsse aus dem Elsass: DREAL Alsace (Modellwerkzeug: LARSIM)
- Main und Zuflüsse: Hochwasserzentralen der Länder Bayern, Baden-Württemberg und Hessen (Modellwerkzeuge: LARSIM, WAVOS)
- Nahe: Hochwasserzentrale Rheinland-Pfalz (Modellwerkzeug: LARSIM)
- hessische Rheinzuflüsse: Hochwasserzentrale Hessen (Modellwerkzeug: LARSIM)
- Mosel und Zuflüsse: Hochwasserzentralen der Länder Rheinland-Pfalz, Saarland, Frankreichs/Lothringen, Luxemburg (Modellwerkzeug: LARSIM)
- nordrhein-westfälische Rheinzuflüsse: Hochwasserzentrale Rheinland-Pfalz und Wasserverbände (diverse Modellwerkzeuge, u.a. LARSIM)
- restliche Rheinzuflüsse in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen als Zuflussvorhersagen für das Hochwassermeldezentrum Rhein: BfG (Modellwerkzeug: HBV)

Die Rheinvorhersage flussabwärts der niederländischen Grenze erfolgt durch die Hochwasserzentrale der Niederlanden, angesiedelt beim Dutch Water Management Centre (WMCN) mit einem Vorhersagezeitraum von 96 Stunden. Eingesetzt wird dort für das Rheingebiet das hydrologische Modell HBV in Kombination mit dem hydrodynamischen Modell SOBEK und einem statistischen Verfahren. Zwischen dem 01. und dem 18. Juni wurden beim WMCN tägliche Hochwasserstatusberichte publiziert.

Besonderheiten hinsichtlich der Güte der Vorhersagen für den Rhein waren beim Juni-Hochwasser 2013 nicht zu verzeichnen. Einzig die großflächige Überströmung der Sommerdeiche zwischen Worms und Mainz, die in Kombination mit dem breiten Mainscheitel zu einem langanhaltenden Hochwasserscheitel vom Pegel Mainz an rheinabwärts führte, wurde in den Vorhersagen unterschätzt. Die Folge war eine zeitweise Überschätzung der Scheitelwasserstände ab Mainz, die zwischenzeitlich den Einsatz des rheinland-pfälzischen Polders Bodenheim-Laubenheim sinnvoll erscheinen ließen. Letztlich wurden die Einsatzkriterien des Polders jedoch nicht erreicht (LUWG 2013).

6.2 Hochwasservorhersage Donau

Die Hochwasservorhersagezentrale (HVZ) der LUBW berechnet mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM die Hochwasservorhersage für die Donau bis zur Illermündung und stellt diese im Hochwasserfall dem Hochwassernachrichtendienst Bayern stündlich bereit. Die Vorhersage im bayerischen Teil der Donau und der ihrer Zuflüsse wird durch die Hochwassernachrichtenzentrale des Bayerischen Landesamts für Umwelt mit den HVZ Donau und HVZ Inn (beim Bayerischen Landesamt für Umwelt) sowie der HVZ Isar (beim Wasserwirtschaftsamt Weilheim) und der HVZ Iller-Lech (beim Wasserwirtschaftsamt Kempten/Allgäu) erstellt. Die Vorhersagen im bayerischen Donaugebiet basieren ebenfalls auf LARSIM, wobei an der Donau sowie dem Lech und Inn zusätzlich hydrodynamische Modelle eingesetzt werden, um in erster Linie Kraftwerkseinflüsse und Staueffekte berücksichtigen zu können (VOGELBACHER 2014).

Der Hochwassernachrichtendienst war beim Juni-Hochwasser 2013 bereits ab dem Abend des 26. Mai aktiv und erstellte bis zum 13. Juni vierzig Lageberichte sowie entsprechend der Hochwasserlage laufend aktualisierte Vorhersagen für die betroffenen Bereiche (LfU 2013). Der veröffentlichte Vorhersagezeitraum beträgt derzeit an den Donaupegeln 12 Stunden.

Während es an den bayerischen Donauzuflüssen mitunter zu deutlicheren Über- und Unterschätzungen in den Vorhersagen kam, auch verursacht durch entsprechende Abweichungen in den Niederschlagsvorhersagen, schätzt der Hochwassernachrichtendienst die Güte der Vorhersagen für die Donau selbst als überwiegend zufriedenstellend bis sehr gut (insbesondere der Abschnitt Donauwörth bis Oberndorf) ein. Probleme mit größeren Unsicherheiten in der Folge waren im Abschnitt Neu-Ulm bis Donauwörth zu beobachten, in der das Vorhersagemodell den Einfluss des „Riedstroms“ auf die Retention der Hochwasserwelle unterschätzte. Neben den zeitweise deutlichen Unterschieden in den vorhergesagten und eingetretenen Niederschlagsmengen und ihrer räumlichen Verteilung, stellte der Deichbruch bei Deggendorf die Hochwasservorhersage an der Donau vor eine besondere Herausforderung, da diese Auswirkung mit den Vorhersagemodellen kaum adäquat abbildbar waren (LfU 2013).

6.3 Hochwasservorhersage Elbe

Gemäß der zum 01. Juli 2013 in Kraft getretenen Verwaltungsvereinbarung zwischen der Bundesrepublik Deutschland und den Ländern Brandenburg, Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein zur „Wasserstands-/Hochwasservorhersage für die Bundeswasserstraßen Elbe, Saale und Untere Havel-Wasserstraße (Havelberg Stadt)“ erstellt das Landeshochwasserzentrum des Freistaates Sachsen bei Hochwasser im sächsischen Abschnitt der Elbe Vorhersagen für die Pegel Schöna, Dresden, Riesa und Torgau. Die Hochwasserzentrale beim Landesbetrieb für Hochwasserschutz Sachsen-Anhalt übernimmt nach erfolgter Abstimmung diese Vorhersagen für die gemeinsame Hochwasservorhersage der Elbe.

Im Landeshochwasserzentrum Sachsens werden mit dem Vorhersagesystem WAVOS der BfG und dem konzeptionellen Elbe-Modell des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie die Vorhersagen berechnet. Zu Hochwasserbeginn wurden mit beiden Modellen zuverlässige Ergebnisse errechnet, bis technische Probleme im Informationssystem des Landes nur noch den Einsatz des konzeptionellen Modells ermöglichten.

Entsprechend der während des Juni-Hochwassers noch geltenden Verwaltungsvereinbarung aus dem Jahr 1995 wurden die Hochwasservorhersagen für die Bundeswasserstraßen Elbe (unterhalb des sächsischen Bereiches), Saale und Unterer Havel-Wasserstraße im Hochwasservorhersagezentrum Elbe, das gemeinsam vom LHW Sachsen-Anhalt und dem WSA Magdeburg betrieben wurde, einmal täglich erstellt und veröffentlicht. Die Berechnung der Vorhersagen erfolgte dabei im WSA Magdeburg unter Verwendung des Vorhersagesystems WAVOS Elbe der BfG (BUREK & RADEMACHER 2007). Die veröffentlichten Vorhersage- und Abschätzungszeiträume sind an der Elbe im Vergleich zu anderen großen Flüssen als vergleichsweise lang zu bezeichnen. Sie wachsen sukzessive in Fließrichtung von 2 Tagen (1. Tag Vorhersage, 2. Tag Abschätzung) am Pegel Dresden auf bis zu 8 Tage (1.-4. Tag Vorhersage, 5.-8. Tag Abschätzung) am Pegel Boizenburg an. Das Intervall der Bereitstel-

lung war mit einer Vorhersage pro Tag vergleichsweise gering, was insbesondere im Fall plötzlicher eintretender Veränderungen wie der eingetretenen Deichbrüche, die den Hochwasserverlauf nachhaltig beeinflussen, zur weiteren Abnahme der Güte der Vorhersage geführt hat. Die BfG unterstützte während des gesamten Hochwassers das WSA Magdeburg bei der Berechnung der Vorhersagen. So wurden durch die BfG per Fernzugriff ad hoc die der Vorhersagezentrale bekannten Deichbrüche (vgl. Kap. 3.5) in das Modell im WSA Magdeburg eingebaut. Weiterhin wurden Variantenberechnungen in der BfG in Koblenz durchgeführt. Die Berechnungen wurden im Anschluss dem LHW zur Verfügung gestellt, der diese in Abstimmung mit den anderen Ländern plausibilisiert und ggf. modifiziert hat und im Anschluss die Vorhersage zur Veröffentlichung freigegeben hat (LHW 2014).

Trotz der Schwere des Hochwasserereignisses an der Elbe mit bisher nie gemessenen Wasserständen, was eine Kalibrierung der Modelle im Vorhinein unmöglich macht, und des massiven Einflusses der Deichbrüche konnten während des gesamten Hochwasserverlaufes grundsätzlich sinnvolle Vorhersagen berechnet werden (s. Abb. 6.2). Insbesondere für Vorhersagezeiträume von bis zu 4 Tagen und auch bezüglich der eingetretenen Scheitelhöhen waren die Vorhersagen realistisch. Hier wird es aber eine nähere Betrachtung und Diskussion darüber geben müssen, wie man die Vorhersagen verbessern kann und auch, wie man mit dem Bereich der Abschätzung in Zukunft bei der Herausgabe der Vorhersagen und ihrer Unsicherheiten umzugehen hat. Einen wertvollen Beitrag zur Verbesserung werden mit Sicherheit die in Kap. 5 beschriebenen Messungen liefern.

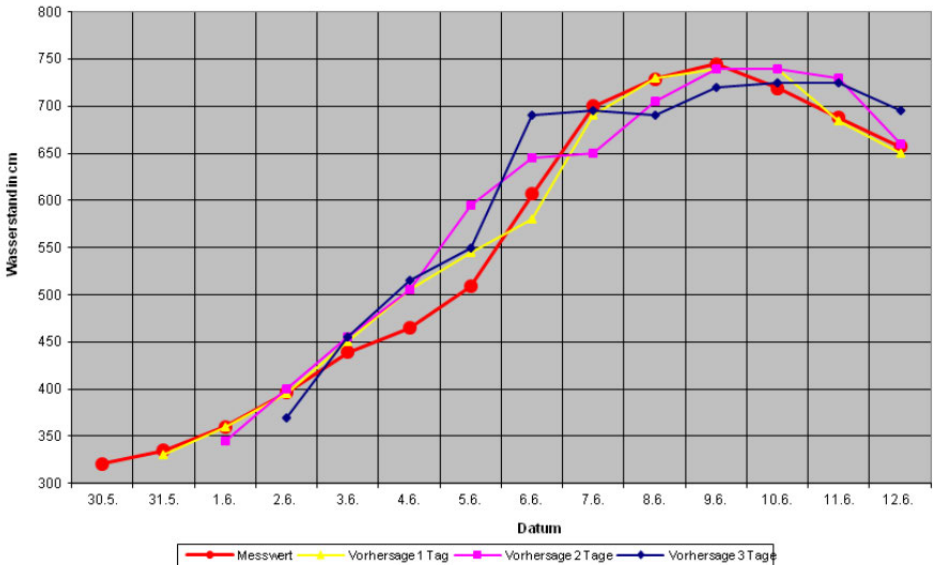


Abb. 6.2: Darstellung der einzelnen Vorhersagewerte in Bezug zum Messwert aus der Hochwasservorhersage für den Pegel Magdeburg-Strombrücke (Quelle: LHW 2014, leicht verändert).

6.4 Fazit Hochwasservorhersage

Das Juni-Hochwasser hat einmal mehr die große Bedeutung der Hochwasservorhersage als Element des Hochwassermanagements deutlich gemacht, indem sie geholfen hat, sowohl technische Schutzmaßnahmen (z.B. die gesteuerten Polder/Speicher an Oberrhein, Donau, Elbe/Havel) optimiert einzusetzen wie auch vorsorgende Maßnahmen (z.B. Räumung ge-

fährdeter Bereiche) rechtzeitig einzuleiten (LfU 2013, LHW 2014, LUBW 2013b). Die Schwere des Hochwassers mit z.T. bis dato nicht beobachteten Wasserständen hat an einigen Gewässern aber auch die Grenzen und den Verbesserungsbedarf der eingesetzten Vorhersagesysteme offenbart. Vielerorts sind die Vorhersagezentralen seit dem Ereignis damit befasst, die gewonnenen Erkenntnisse zielführend zur Verbesserung ihrer Vorhersagesysteme umzusetzen. So wird beispielsweise die BfG im Auftrag der Flussgebietsgemeinschaft Elbe das Vorhersagesystem WAVOS für die Elbe aktualisieren und optimieren.

Eine Expertengruppe der LAWA hat eine flussgebietsübergreifende Synthese der operationellen Hochwasservorhersagesysteme in Deutschland erstellt und diese mit dem Fokus auf Extremereignisse analysiert, um entsprechende Verbesserungsvorschläge beginnend bei den Eingangsdaten bis hin zur Kommunikation der Vorhersagen zu erarbeiten (LAWA 2014a). Diese Vorschläge sollen zukünftig die Grundlage der Weiterentwicklung der Hochwasservorhersagesysteme in den einzelnen Bundesländern bilden, um so den Wert der Hochwasservorhersage weiter zu steigern und die Folgen zukünftiger Extremereignisse zu mindern.

Die Genauigkeitserwartungen in der Öffentlichkeit liegen teilweise über einer möglichen Leistungsfähigkeit der Hochwasservorhersage. Deshalb muss die erforderliche Verbesserung der Vorhersagen mit einer Aufklärung der Öffentlichkeit hinsichtlich der zu erwartenden Vorhersagegenauigkeiten bis hin zu entsprechenden Schulungen der Katastrophenschutzstäbe einhergehen (LHW 2014).

7 Wirtschaftliche Folgen des Hochwassers, insbesondere hinsichtlich der Befahrbarkeit der Bundeswasserstraßen

Jörg Uwe Belz, Dennis Meißner, Michael Mürlebach

Die Verfügbarkeit der Bundeswasserstraßen als Transportweg ist im Hochwasserfall eingeschränkt. Der höchste schiffbare Wasserstand (HSW) markiert den oberen Grenzwert, bis zu dem der Verkehr auf einer Wasserstraße zulässig ist. Dieser Wert ist für einzelne Streckenabschnitte bzw. deren Zeigerpegel festgelegt. Der HSW wird mitunter auch als Marke II (Hochwassermarke II) bezeichnet. Einschränkungen für die Schifffahrt bestehen auch bereits vor der kompletten Einstellung der Schifffahrt. So gibt es häufig (z.B. am Rhein) eine sogenannte Marke I (Hochwassermarke I), bei deren Überschreitung die Fahrrinne für die Schifffahrt im Bereich der Strommitte eingeschränkt und mitunter die zulässige Geschwindigkeit reduziert wird.

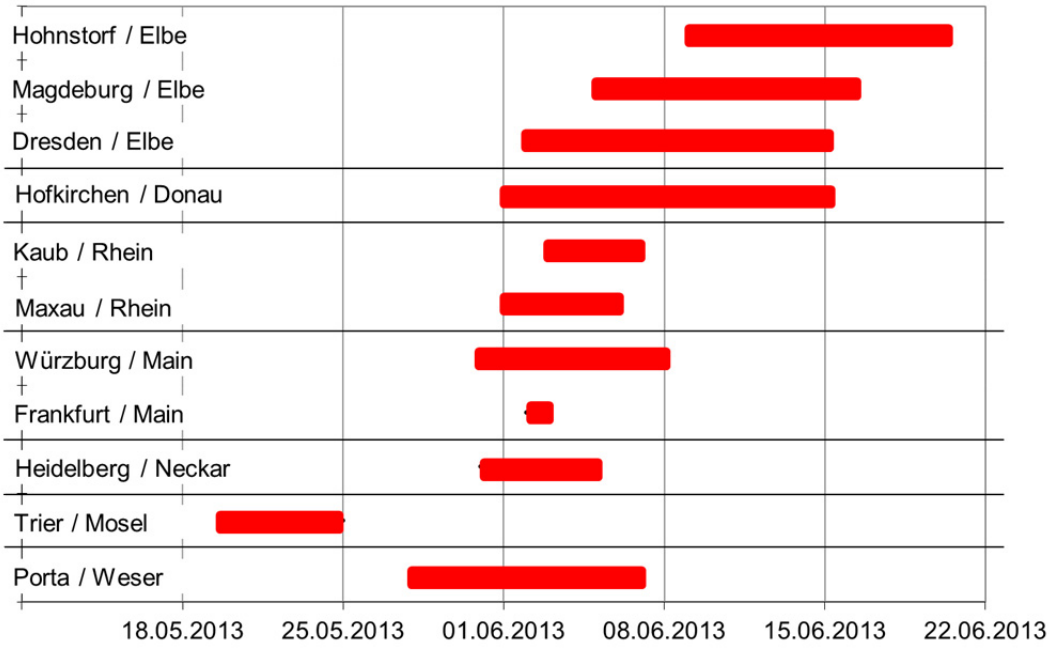


Abb. 7.1: Überschreitungsdauern des HSW (höchster schiffbarer Wasserstand) während des Hochwassers im Mai und Juni 2013

Abb. 7.1 stellt für ausgewählte Pegel an den Bundeswasserstraßen Weser, Mosel, Neckar, Main, Rhein, Donau und Elbe den Zeitraum der HSW-Überschreitungen während des Hochwassergeschehens im Mai/Juni 2013 dar.

Erkennbar wird neben dem zeitlich gestaffelten Auftreten der Hochwasserereignisse in den unterschiedlichen Flussgebieten, dass folgerichtig in den Gebieten, die durch hochwasserinduzierte Schäden besonders betroffen wurden (Elbe und Donau), auch die Einschränkungen für die Schifffahrt am größten ausfielen. Die Dauer der HSW-Überschreitung lag am Donaupegel Hofkirchen bei 15 Tagen, an den Elbpegeln Dresden und Magdeburg bei 14 bzw. 12 Tagen sowie bei Hohnstorf bei 11 Tagen.

Die Bundeswasserstraße Rhein war im Bereich von Ober- und Mittelrhein betroffen. Hier lagen die Zeiten der HSW-Überschreitung im Bereich von 5-6 Tagen. Der besonders verkehrsreiche Niederrhein blieb von Wasserständen, welche die HSW-Marken tangiert hätten, verschont.

Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass die Schifffahrtsbeschränkungen nicht notwendigerweise mit Unterschreitung eines HSW aufgehoben werden. Vielmehr ist in aller Regel im direkten Ereignisanschluss aus Sicherheitsgründen eine Fahrwasserüberprüfung durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung notwendig, um mögliche neu entstandene Hindernisse in der Fahrrinne aufzuspüren und zu beseitigen.

Weitergehende Erhebungen bzw. Angaben zu monetären Einbußen durch Liegezeiten, die durch hochwasserbedingte Schifffahrtssperren verursacht wurden, existieren nach Auskünften zuständiger Stellen nicht[10].

Über den verkehrswasserwirtschaftlichen Aspekt hinaus beziffert die Bundesregierung den Schaden an bundeseigener Infrastruktur durch das Hochwasser 2013 mit 300 Mio. € (Deutscher Bundestag 2014).

Eine wirtschaftlich-finanzielle Gesamtschadensbilanz für die Belange der Bundesländer (LAWA 2014b) ergibt einen Gesamtschadensbetrag in Höhe von 6 581,7 Mio. €. Davon entfielen auf das Rheingebiet 86,8 Mio. €, auf das Donaugebiet 1 300 Mio. € und auf das Elbegebiet 5 194,9 Mio. € (vorläufige Angaben; Stand 2014).

Der volkswirtschaftliche Gesamtschaden beläuft sich nach Angaben der Versicherungswirtschaft (ELLENRIEDER & MAIER 2014) in Deutschland auf rund 10 000 Mio. €, davon 1 800 Mio. € an versicherten Schäden.

[10] gemäß BfG-Recherche im Juli 2014 beim Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, verschiedenen Dienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, beim Bundesverband der deutschen Binnenschifffahrt (Duisburg) und beim Statistischen Bundesamt in Wiesbaden (Fachstelle Güterverkehrsstatistik der Binnenschifffahrt)

Abb. 7.2: Hochwasserschäden an der Verkehrsinfrastruktur des Bundes: Überflutung des Autobahnkreuzes A3/A92 bei Deggendorf (Donau) im Juni 2013

8 Hochwasseranalyse: langfristige Entwicklungen in den betroffenen Flussgebieten

Jörg Uwe Belz, Bastian Klein, Peter Krahe, Maria Larina-Pooth, Enno Nilson

8.1 Vergleich der Hochwasserereignisse der Jahre 2002 und 2013 im Donau- und Elbegebiet

Die Ereignisse der Jahre 2002 und 2013 sind an Donau und Elbe die bedeutendsten Hochwasserextreme zumindest der letzten fünfzig Jahre, teilweise auch deutlich darüber hinaus (vgl. Kap. 3.4.4 und Kap. 3.5.5)[11]. Angesichts des engen zeitlichen Aufeinandertreffens beider Rekordereignisse und vor dem Hintergrund ihrer aktuellen Bedeutung werden sie hinsichtlich ihrer Genese und der dabei aufgetretenen Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Folgenden näher beleuchtet.

8.1.1 Vergleich der Vor- und Randbedingungen der Hochwasserextreme 2002 und 2013 im Donau- und Elbegebiet

Beide Ereignisse lagen in der warmen Jahreszeit (2002: August / 2013: Mai-Juni). Ihnen gemeinsam ist angesichts dessen eine Entstehungsgeschichte, bei der Schneeschmelze nicht bzw. nur von geringer Bedeutung war; die Fließgewässerabflüsse stiegen somit in erster Linie regenbedingt auf die erreichten extremen Niveaus.

Abb. 8.1 zeigt die Verteilung der Niederschlagshöhen im **Donaugebiet** für die jeweils entscheidenden Phasen der beiden Extremereignisse. Gemeinsam waren sie durch großflächig hohe Niederschläge gekennzeichnet. Das Geschehen im Jahre 2013 hatte allerdings seine Schwerpunkte insgesamt weiter westlich und schloss die rechten Donauzuflüsse, insbesondere das Isar- und Inngebiet ein. Die höchsten Niederschlagshöhen des Ereignisses 2002 hatten ihren Schwerpunkt im Bereich der linken Donauzuflüsse auf österreichischem Gebiet.

Aufgrund der räumlichen Niederschlagsschwerpunkte wird im Folgenden das Isar- und Inngebiet (Gebiet „Isar u. Inn“) sowie das übrige Donaugebiet oberhalb der deutsch-österreichischen Grenze (Gebiet „Donau ohne Isar u. Inn“) hinsichtlich der Gebietsniederschlagshöhen und -summenkurven vergleichend betrachtet. Dabei treten weitere Unterschiede und Gemeinsamkeiten hinsichtlich der zeitlichen Abfolge und der Niederschlagsintensität zu Tage (Abb. 8.2)[12]. Als Datengrundlage dient dabei das in Abschnitt 8.3 beschriebene und für Teileinzugsgebiete aggregierte Rasterdatenkomposit für Mitteleuropa.

---

[11] In beiden Fällen gilt dies allerdings nicht für das jeweilige komplette Einzugsgebiet, wohl aber für maßgebliche Teilstrecken der Bundeswasserstraßen und deren Zubringer.

[12] Mit der Aufsummierung der täglichen Niederschlagshöhen wurde dabei sowohl hier bei den Auswertungen für die Donau als auch anschließend für die Elbe stets 30 Tage vor dem letzten Niederschlagstag des hochwasserauslösenden Ereignisses begonnen, so dass insgesamt 31 Tage betrachtet werden. Dieser lange Zeitraum wurde gewählt, um auch die für die Hochwasserabflussbildung wichtige Vorperiode zu berücksichtigen. Für das Ereignis 2013 wurde einheitlich der 03. Juni und für das Ereignis des Jahres 2002 übergreifend der 13. August als Endtermin der initiierenden Niederschlagsperiode festgelegt.

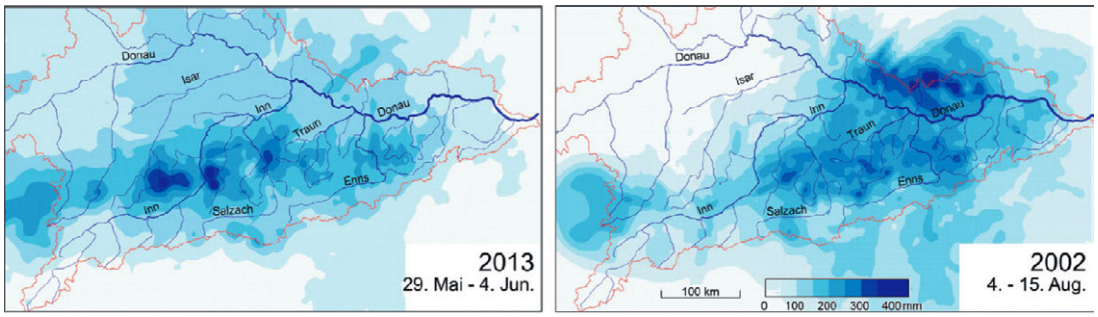


Abb. 8.1: Ereignisniederschläge der Hochwasser der Jahre 2002 und 2013 im Donaugebiet (aus: BLÖSCHL et al. 2013)

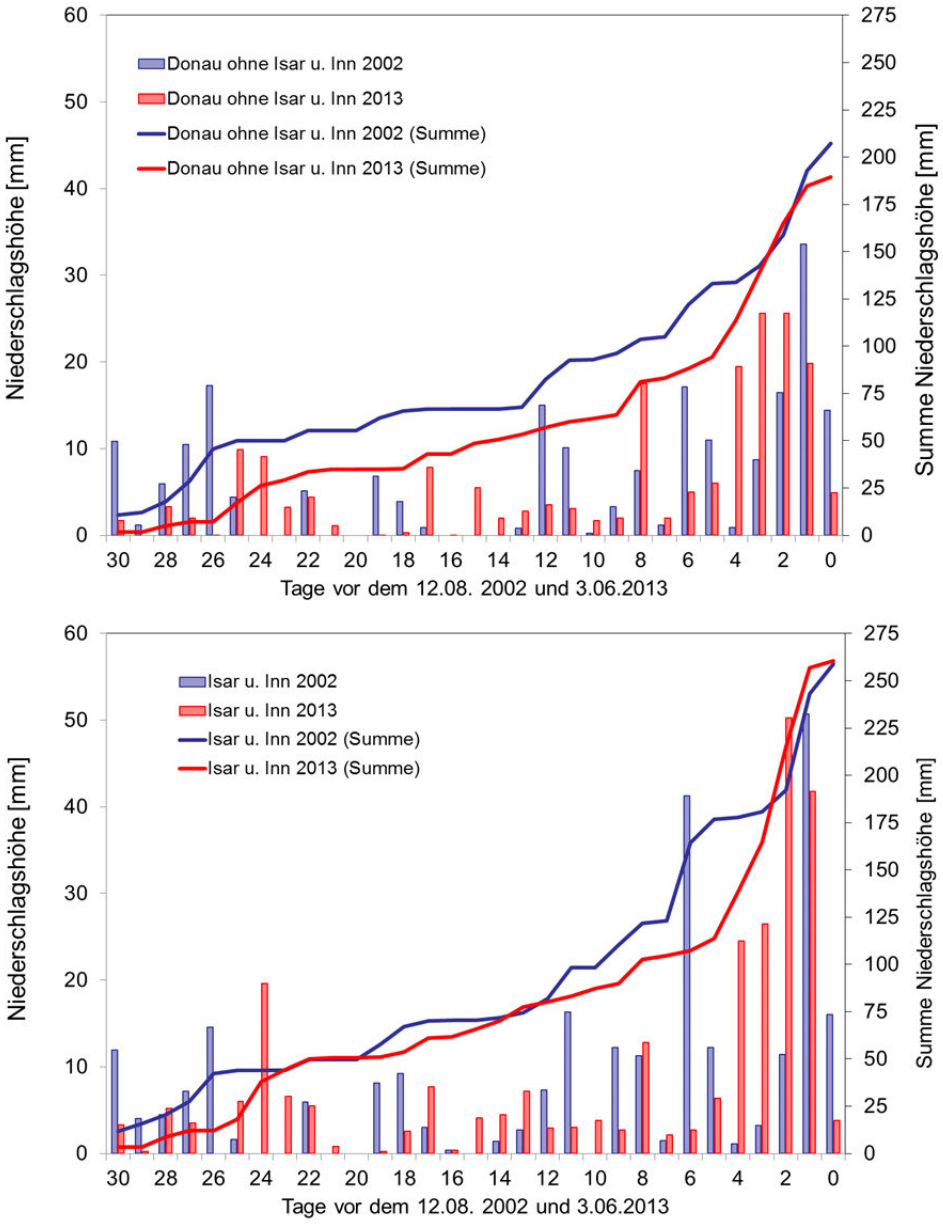


Abb. 8.2: Tägliche und aufsummierte tägliche Gebietsniederschlagshöhen für zwei Teileinzugsgebiete der Donau für einen 30-tägigen Zeitraum vor dem Ende des hochwasserauslösenden Niederschlagsereignisses am 12. August 2002 (blau) bzw. 03. Juni 2013 (rot)

In der Summe unterscheiden sich die Niederschläge in den 30 Tagen vor dem Ende des Niederschlagsereignisses für die beiden Teilgebiete nur geringfügig. Dabei waren die Niederschläge im Gebiet „Donau ohne Isar u. Inn“ 2002 etwas höher als die des Jahres 2013, wogegen sie im Gebiet „Isar u. Inn“ im Jahre 2013 größer waren als 2002.

Der auffälligste und letztlich für die Hochwasser-Abflusscharakteristik hoch relevante Unterschied zwischen beiden Ereignissen ist die deutlich stärkere zeitliche Verdichtung der Niederschlagsereignisse im Jahr 2013. So fielen während des Niederschlagsereignisses 2013 im Einzugsgebiet von „Isar u. Inn“ rd. 150 mm in den letzten 4 Tagen des Ereignisses. Während des Ereignisses 2002 verteilte sich dieselbe Summe auf die letzten 7-8 Tage. Ein vergleichbares Muster findet sich auch im Einzugsgebiet „ Donau oberhalb der Isar“, jedoch in abgeschwächter Form. Die mit den Niederschlägen einhergehende Abflussbildung erstreckte sich somit im Jahr 2013 auf einen kürzeren Zeitraum und erfolgte angesichts vergleichbarer Niederschlagssummen intensiver.

Analog zur vorhergehenden Betrachtung wurde das **Elbegebiet** hier in die beiden Teileinzugsgebiete oberhalb der deutsch-tschechischen Grenze und das Gebiet von der Grenze bis Havelmündung aufgeteilt. Im südlichen Teileinzugsgebiet (Tschechien) weist die Gebietsniederschlagssumme im Jahr 2013 um ~ 50 mm geringere Werte auf als im Jahr 2002 (Abb. 8.3). Dieser Unterschied lässt sich insbesondere durch den Niederschlagsverlauf in den beiden letzten Tagen der Niederschlagsperiode erklären, wo in 2013 deutlich geringere Niederschläge auftraten als in 2002. Höhere Niederschläge finden sich im Jahre 2013 am vierten und am fünften Tag vor dem Ende der Niederschlagsperiode.

Im Einzugsgebiet der Elbe von der tschechisch-deutschen Grenze bis zur Mündung der Havel sind die finalen Niederschlagssummen in beiden Hochwasserjahren vergleichbar. Hier setzt jedoch ab dem fünften Tag vor dem jeweiligen Endtermin eine deutlich unterschiedliche Niederschlagsentwicklung ein. Im Jahr 2013 verteilten sich rd. 80 mm auf vier Tage wohingegen 2002 annähernd dieselbe Summe an zwei Tagen fiel. Die Kernphase der Hochwasserabflussbildung setzte somit in den Einzugsgebieten von Saale und Mulde mehrere Tage früher ein als im Jahr 2002. Damit wurde (trotz der in 2013 im tschechischen Einzugsgebiet aufgetretenen geringeren Niederschlagshöhen) im Weiteren der Wellenaufbau in der Elbe im Gegensatz zum Jahre 2002 kontinuierlich aufgefüllt.

8.1.2 Vergleich der Hochwasserverläufe der Jahre 2002 und 2013 an Donau und Elbe

Die in Kap. 8.1.1 beschriebene Niederschlagscharakteristik wird durch die jeweilige Ausprägung der Hochwasserscheitel an Donau und Elbe widergespiegelt.

Ein Vergleich der eingetretenen Hochwasserscheitel der Jahre 2002 und 2013 an repräsentativen Pegeln der **Donau** zeigt in beiden Fällen ein kontinuierliches Ansteigen stromabwärts, gefördert durch höhere Niederschlagssummen (Abb. 8.4). Jedoch wurden die massiv steigenden Niederschlagsmengen ab Ende Mai 2013 angesichts der in Kap. 2.6 beschriebenen umfassenden Bodensättigung nahezu unmittelbar abflusswirksam. Dies führte trotz ähnlicher

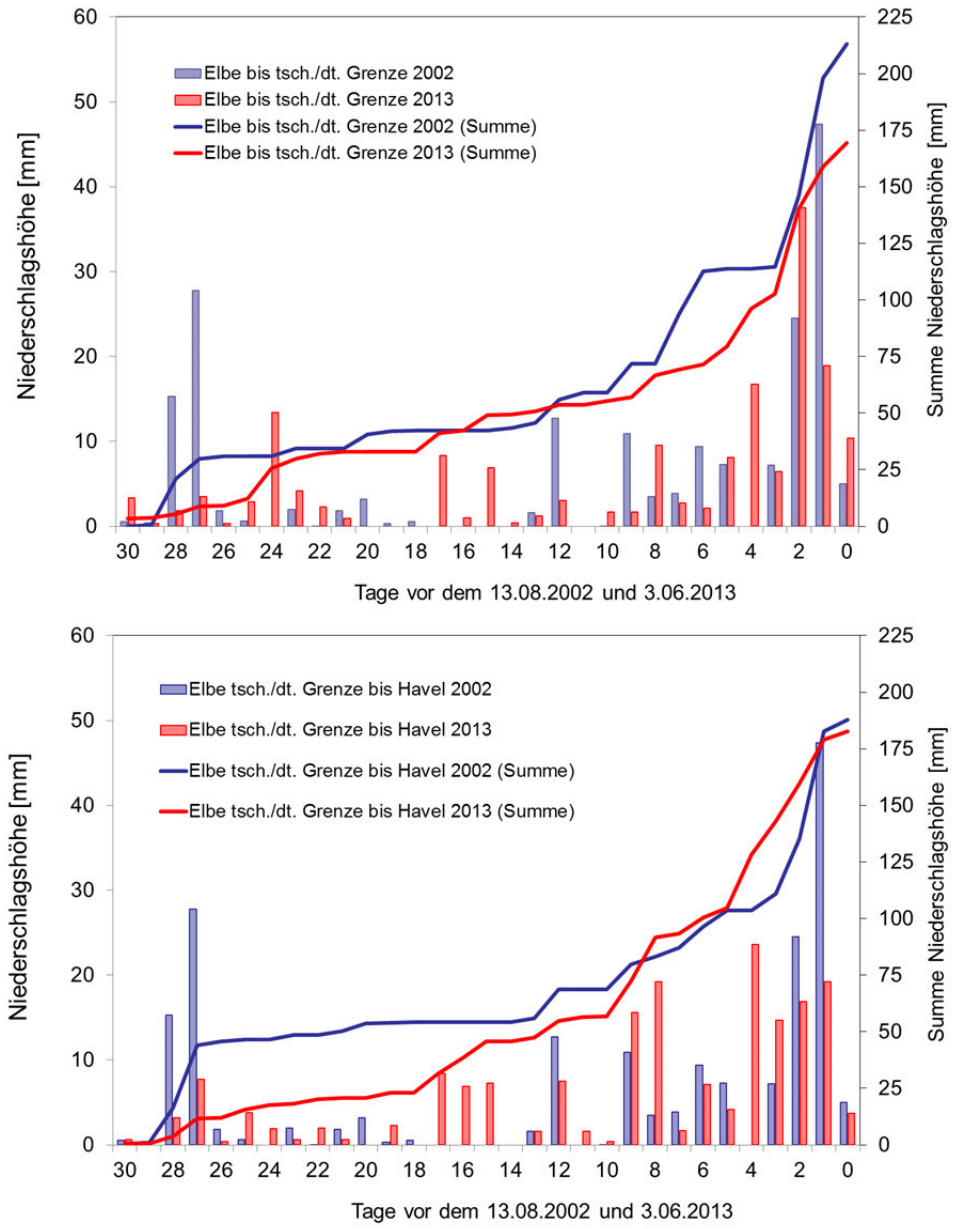


Abb. 8.3: Tägliche und aufsummierte tägliche Gebietsniederschlagshöhen für zwei Teileinzugsgebiete der Elbe für einen 30-tägigen Zeitraum vor dem Ende des hochwasserauslösenden Niederschlagsereignisses am 12. August 2002 (blau) bzw. 03. Juni 2013 (rot)

Niederschlagssummen während beider Ereignisse an der gesamten Bundeswasserstraße Donau zu teils deutlich höheren Durchfluss-Scheitelwerten als im Jahre 2002. Letztlich lag der Abflussscheitel am Pegel Achleiten/Donau am 03. Juni 2013 um 27,3 % über dem des Jahres 2002. Gleichzeitig aber belief sich der Unterschied der 30-tägigen Gebietsniederschlagssumme während des entscheidenden Ereignisses auf 4 % (Donau-Einzugsgebiet bis Achleiten im Jahre 2002: 231 mm, im Jahre 2013: 220 mm). Abb. 8.5 zeigt den ereignisbezogenen Unterschied anhand der Hochwasser-Abflussganglinien am Pegel Achleiten.

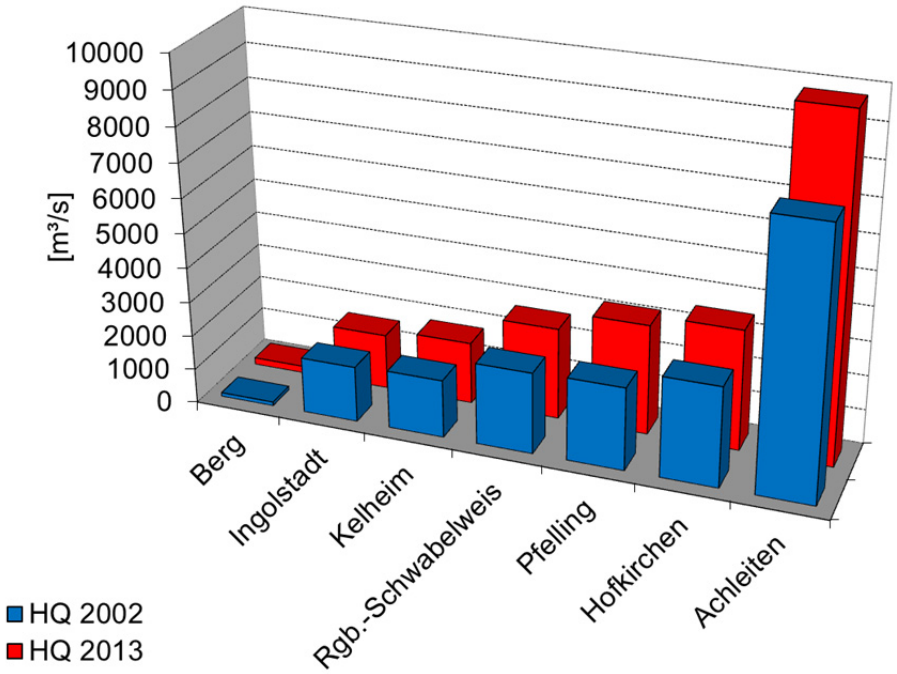


Abb. 8.4: Donau: Vergleich der Hochwasser-Abflussscheitel der Jahre 2002 und 2013 an repräsentativen Pegeln (gemessene Werte)

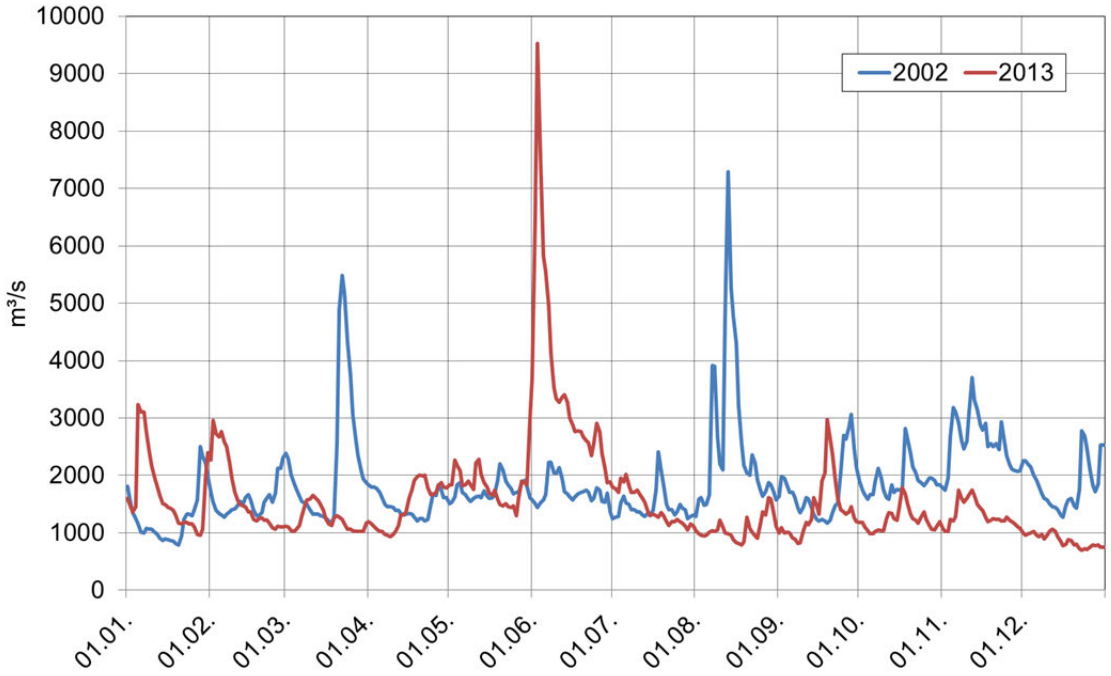


Abb. 8.5: Pegel Achleiten/Donau: Hochwasser-Abflussganglinien der Jahre 2002 und 2013 (gemessene Werte)

An der Oberen **Elbe** baute sich im Jahre 2002, ausgehend von extrem hohen Niederschlagssummen im böhmischen, insbesondere moldauischen Teil des Einzugsgebietes sowie in der Mittelgebirgsschwelle zwischen Fichtelgebirge und Riesengebirge eine große Hochwasserwelle auf (vgl. z.B. Pegel Melnik in Abb. 8.6). Diese verlor vor allem angesichts nicht adäquater Niederschlagssummen im nördlich anschließenden Elbegebietsteil stromabwärts mit Ausnahme des Abschnitts unterhalb der Saalemündung an Umfang und Höhe.

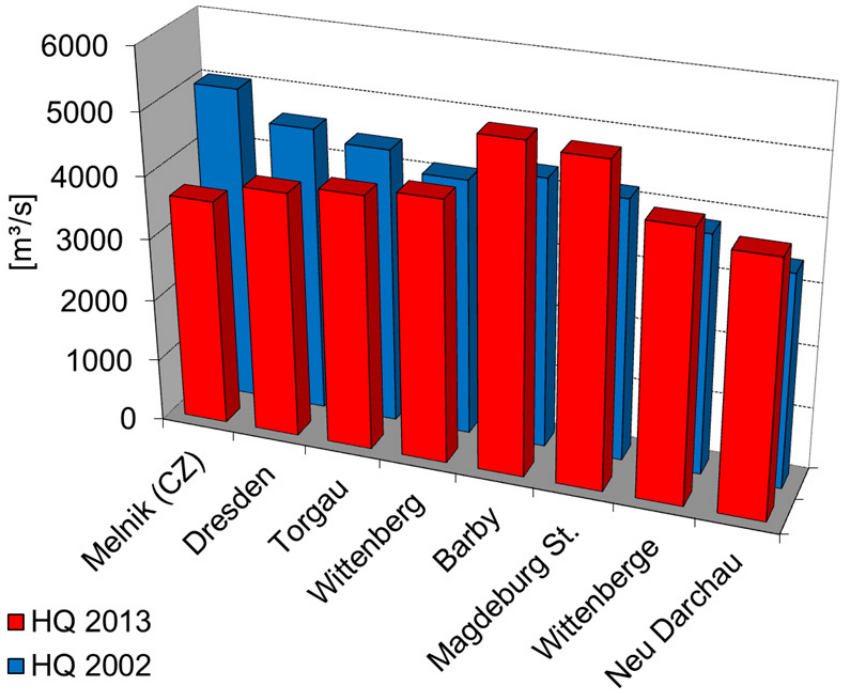


Abb. 8.6: Elbe: Vergleich der Hochwasser-Abflussscheitel der Jahre 2002 und 2013 an repräsentativen Pegeln (gemessene Werte)

Wie auch aus Abb. 8.3 ersichtlich, reichte die Niederschlagsumme des Ereignisses 2013 im südlichen Elbegebiet nicht an das des Jahres 2002 heran, wohl aber im nördlichen Teileinzugsgebiet zwischen Grenze und Havelmündung. Hier wurden insbesondere in der letzten Woche vor Ereigniskulmination zwischenzeitlich deutlich höhere Niederschlagssummen als 2002 registriert (Abb. 8.3) mit der Folge höherer Scheitelwerte z.B. an den Pegeln unterstrom Wittenberg (Abb. 8.6). Die sinkenden Scheitelwerte beider Jahre ab Barby erklären sich durch nachlassende Niederschläge im Hochwasserverlauf stromabwärts im Verein mit diversen gesteuerten und ungesteuerten Retentionseffekten (vgl. Kap. 3).

Das Hochwasser 2002 war vor diesem Hintergrund ein Rekordereignis für die Obere Elbe, während das Geschehen des Jahres 2013 erst an der Mittelelbe kulminierte und dabei eine bislang hier nicht bekannte Größenordnung erreichte.

Die Gegenüberstellung der Abflussganglinien der Jahre 2002 und 2013 (Abb. 8.7) für den Pegel Barby dokumentiert den unterschiedlichen Hochwasserverlauf an der Mittelelbe unterhalb der Saalemündung. An diesem Pegel betrug die scheitelbezogene Abflusserhöhung des Jahres 2013 gegenüber dem Ereignis 2002 rund 21,5 %; dem steht eine um 13 % geringere

Gebietsniederschlagshöhe während des relevanten Niederschlagsereignisses (Elbeeinzugsgebiet bis Barby im Jahre 2002: 201 mm, im Jahre 2013: 176 mm) gegenüber. Ursächlich für die im Ereignisvergleich größere Abflusswirksamkeit des Niederschlagsinputs 2013 ist die in den vorangegangen Kapiteln diskutierte unterschiedliche raum-zeitliche Verteilung der Niederschläge.

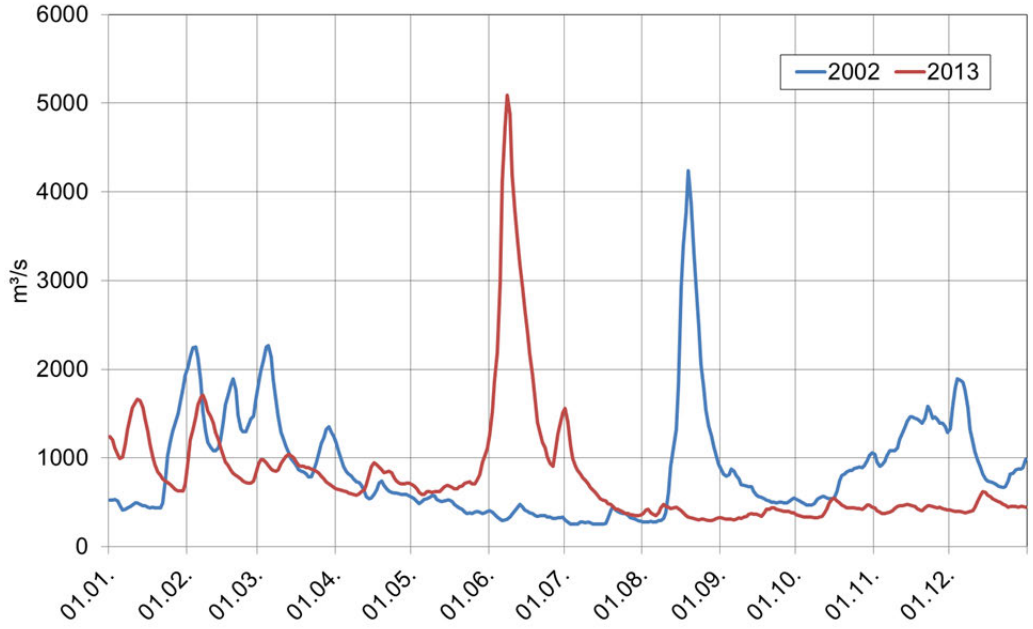


Abb. 8.7: Pegel Barby/Elbe: Hochwasser-Abflussganglinien der Jahre 2002 und 2013 (gemessene Werte)

8.2 Entwicklungen seit Mitte des 20. Jahrhunderts

8.2.1 Intensität der Hochwasserscheitel

Bei der Analyse der zeitlichen Entwicklung von Hochwasserereignissen steht im Allgemeinen die Frage nach der Größenordnung der Hochwasserscheitel im Vordergrund, d.h. es interessiert, ob die Hochwasserereignisse mit der Zeit extremer oder moderater ausfallen. Tab. 8.1 zeigt für einige repräsentative Pegel an den vom Hochwasserereignis 2013 betroffenen Strömen Weser, Rhein, Donau und Elbe die Ergebnisse einer diesbezüglichen Trenduntersuchung.

Diese geschah zur besseren Absicherung der Aussagen zweigleisig: sowohl mit der verbreitet angewendeten Gaußschen Methode der kleinsten Fehlerquadrate ("Least Square Methode", LSM) (vgl. z.B. MILLER 1996) als auch mit der robusteren, weniger durch Singularitäten zu beeinflussenden Methode der sogenannten „Sen-Steigung“ („Sen Slope“) (THIEL 1950). Die Signifikanzberechnung erfolgte dann jeweils mit dem zweiseitigen Mann-Kendall-Test (KENDALL 1975) bei $\alpha = 0{,}05$. Zu Vergleichszwecken wurde die Untersuchungsperiode auf den Zeitraum 1945/2013 (hydrologische Jahre) begrenzt, da nicht alle berücksichtigten Pegel längere Beobachtungsperioden aufweisen. Zur Identifizierung möglicher saisonaler Beson-

derheiten wurde dabei nicht nur der vollständige Jahreslauf (hydrologische Jahre, Nov.-Okt.) untersucht, sondern auch jeweils für sich die Sommer- und Winterhalbjahre (Mai-Sep. bzw. Nov.-April). Die Ergebnisse der Trendanalysen sind in Abb. 8.8 bis Abb. 8.9 exemplarisch für typische oder auffällige Fälle visualisiert und insgesamt in Tab. 8.1 zusammengestellt.

Tab. 8.1: Ergebnisse der Trenduntersuchung der HQ-Scheitel ausgewählter Pegel an Bundeswasserstraßen, Periode 1945-2013 (LSM=kleinste Fehlerquadrate / MK = Mann-Kendall-Test)

Reihenname	alpha	Jahr		Winter		Sommer	
		LSM/MK	SenSlope/ MK	LSM/MK	SenSlope/ MK	LSM/MK	SenSlope/ MK
Intschede / Weser	.05	0/-	0/+	0/-	0/+	0/-	0/-
Maxau / Oberrhein	.05	0/+	**1/+**	0/+	**1/+**	0/+	**1/+**
Köln / Niederrhein	.05	0/+	0/+	0/+	0/+	0/+	0/+
Würzburg / Main	.05	0/+	**1/+**	0/+	**1/+**	**1/+**	**1/+**
Achleiten / Donau	.05	0/+	0/+	0/+	**1/+**	0/+	0/+
Hofkirchen / Donau	.05	0/+	**1/+**	0/+	**1/+**	0/+	**1/+**
Dresden / Obere Elbe	.05	0/+	0/+	0/+	0/+	0/+	0/-
Neu Darchau / Mittelelbe	.05	0/+	0/+	0/+	**1/+**	0/+	**1/-**

1 Mann-Kendall-Test (MK): Trend ist signifikant
0 MK nicht signifikant
+ - steigende bzw. fallende Tendenz

Demnach ergibt sich keinerlei signifikante gerichtete Entwicklung (Trend) am **Weserpegel** Intschede.

Gleiches gilt für den **Niederrheinpegel** Köln, wenngleich hier sowohl mit Jahresbezug als auch bei den Sommer- und Winterhalbjahren ein schwacher Anstieg (Steigungstendenz) zu erkennen ist (Abb. 8.8). Pegel Maxau am **Oberrhein** dagegen weist im Jahres- und im Sommerzeitraum signifikante Anstiegstendenz bei den HQ-Scheiteln auf (Abb. 8.9).

Der **Main** zeigt auf der Strecke bei Würzburg sehr einheitlich signifikante Anstiegstrends für die Hochwasserabflüsse.

An der **Donau** liegen am Pegel Hofkirchen bei Beachtung der Sen-Slope-Methode durchweg signifikant ansteigende Trendentwicklung vor; die Donauhochwasser in diesem Abschnitt werden demnach extremer. Mit Zufluss des Inns schwächt sich diese Aussage für die Donau ab; ein signifikanter Trend am Pegel Achleiten lässt sich dann nurmehr für die Sommerhalbjahre ausmachen.

Am Pegel Dresden (**Obere Elbe)** ist keine klare Entwicklung der Hochwasserscheitel abzulesen. An der unteren **Mittelelbe** weist Pegel Neu Darchau insgesamt Steigungstendenz, aber keine trendgesicherte Entwicklung auf. Hier wird zwar nach beiden Verfahren im Winter steigendes, teils auch signifikantes HQ-Scheitelverhalten festgestellt, im Sommer stehen sich aber je nach dem steigende Tendenz bzw. fallender Trend gegenüber, was eine Beurteilung erschwert.

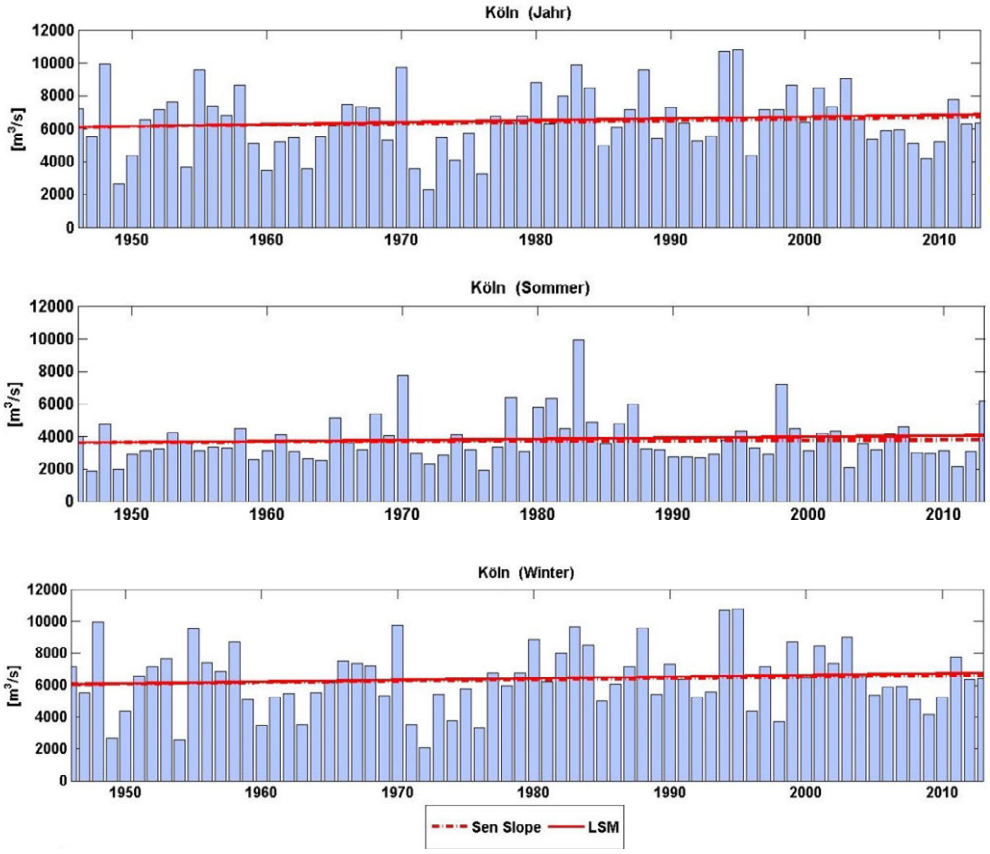


Abb. 8.8: Pegel Köln/Niederrhein: nicht signifikante Anstiegstendenzen der HQ-Scheitel mit Jahresbezug, für Sommer- und Winterhalbjahre

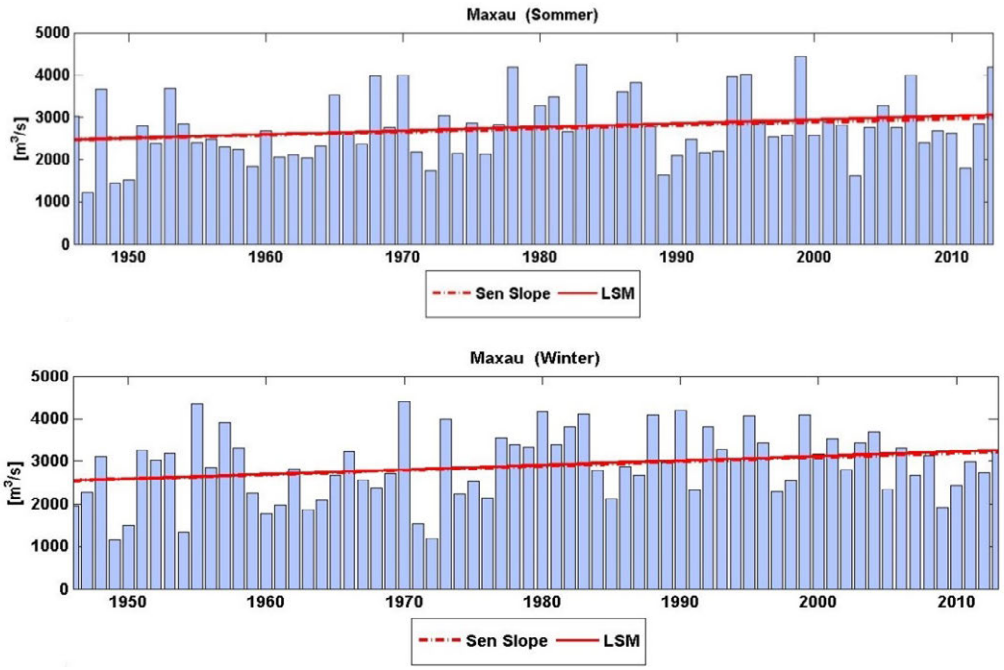


Abb. 8.9: Pegel Maxau/Oberrhein: saisonal gleiche Entwicklung halbjährlicher Hochwasserscheitel, signifikante steigende Trends

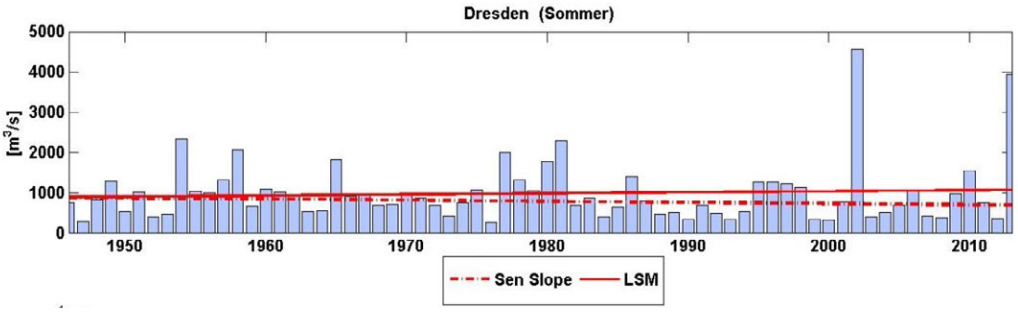


Abb. 8.10: Pegel Dresden/Obere Elbe: gegensätzliche Tendenzaussagen bei sommerlichen Hochwasserereignissen (Mai bis Oktober)

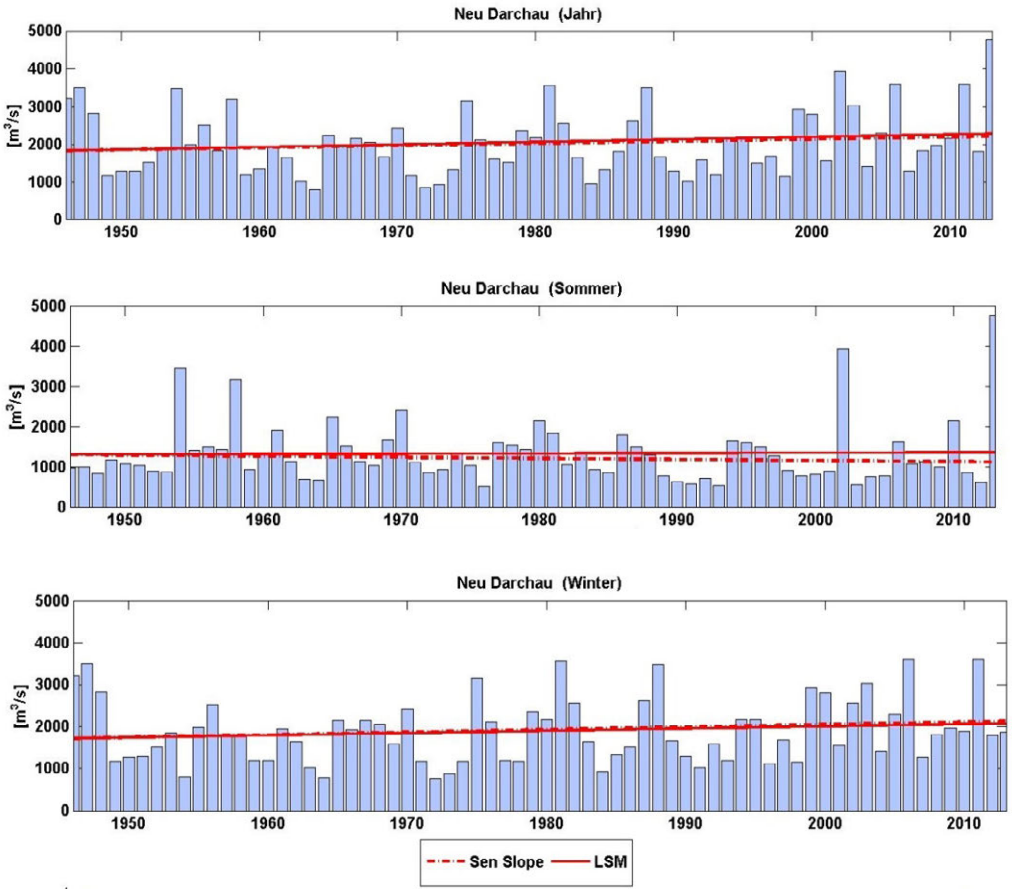


Abb. 8.11: Pegel Neu Darchau/Mittelelbe: signifikant ansteigende Trends der HQ-Scheitel (homogenisierte Werte) mit Jahres- und Winterbezug, Indifferenz im Sommerhalbjahr

Die Unterschiede in der Signalstärke zwischen dem Pegel Dresden im Stromabschnitt Obere Elbe und dem Pegel Neu Darchau im Abschnitt untere Mittelelbe erklären sich zumindest teilweise dadurch, dass Letzterer von beiden deutlich weiter von den nivellierenden Effekten der tschechischen Moldaukaskade entfernt ist.

Für die tendenziell gegensätzlichen Aussagen, die sich bei jedem der beiden Pegel im Sommerhalbjahr gegenüberstehen (Abb. 8.11 und Abb. 8.10), zeichnen methodische Effekte ver-

antwortlich: Während der LSM-Ansatz, beeinflusst durch die beiden großen Sommerereignisse 2002 und 2013, ansteigende Tendenz erkennt, gewichtet der gegenüber Singularitäten robustere Sen-Slope-Algorithmus den Entwicklungscharakter der Gesamtheit der Ereignisse stärker als die beiden Einzeljahre und erkennt demnach absinkende Tendenz bzw. fallenden Trend bei den HQ-Scheiteln.

Die Ergebnisse für den **Rhein** (vgl. Tab. 8.1, sowie Abb. 8.9/Pegel Maxau), die anhand ausgewiesener tendenzieller HQ-Anstiege (nach dem Sen-Slope-Verfahren sind jeweils auch signifikante Trends abzusichern) auf eine Steigerung der Hochwasserintensität hinweisen, passen im Grundsatz zu den Ergebnissen anderer Untersuchungen (AK-KLIWA 2002, BELZ et al. 2007). Derartige anderweitige Untersuchungen bestätigen im Allgemeinen vorliegende Tendenzaussagen, gewichten aber bei Zugrundelegung anderer Beobachtungsperioden die Anstiege im Winter stärker als diejenigen der Sommerhalbjahre.

Nach Literaturlage äußerten sich die klimatischen Entwicklungen in Mitteleuropa während des betrachteten Zeitraums in einer Niederschlagszunahme (dies insbesondere in den ohnehin oft abflussstarken Winterhalbjahren) und dem verstärkten Auftreten von Extremniederschlägen (vgl. z.B. MOBERG & JONES 2005, ZOLINA et al. 2014). Damit einher geht übergreifend eine Tendenz zum Anstieg von Hochwasserabflüssen (z.B. BELZ et al. 2007, BELZ 2012, KOHN et al. 2014, PETROW & MERZ 2009), wenngleich diese in ihrem Ausmaß räumlich sehr heterogen und sicherlich nicht ausschließlich auf direkte Niederschlagsereignisse zurückzuführen ist (vgl. z.B. FREUDIGER et al. 2014).

Diese grundsätzliche Entwicklung wird durch die vorgelegten Ergebnisse bestätigt[13]. Eventuelle Unterschiede, die im Einzelnen zu diesen anderen Untersuchungen bestehen, sind teilweise statistisch-methodisch bedingt, insbesondere durch Festlegung der Untersuchungsperiode sowie die Wahl des Verfahrens zur Trenddetektion.

8.2.2 Saisonalität des Hochwasserauftretens

Saisonalitätsuntersuchungen können Aufschluss darüber geben, ob Hochwasserereignisse in einem Gewässersystem zeitlich konstant sind, d.h. im Sinne einer Regularität mit einiger Regelmäßigkeit immer zu ähnlichen Zeiten im Jahr auftreten, oder nicht. Beim Vergleich von Zeiträumen sind zudem Erkenntnisse darüber zu gewinnen, inwiefern hier Verschiebungen auftreten. Diese können durch Änderungen der hydrometeorologischen Rahmenbedingungen bedingt sein (Stichwort „Klimaänderung“), aber auch durch unmittelbare anthropogene Eingriffe wie Flussbaumaßnahmen mit damit einhergehender Laufzeitverschiebung.

Der Saisonalitätsindex nach BURN (1994) erlaubt eine quantifizierte Aussage darüber, inwieweit an bestimmten Zeitabschnitten im Kalenderjahr gewisse Ereignissen (hier: Hochwasserereignisse) mit größerer Wahrscheinlichkeit auftreten als zu anderen Terminen. Im Ergebnis erhält man das mittlere Eintrittsdatum *MD* für ein Ereignis mit dem Regularitätsmaß $\hat{r}$ dafür, dass das Ergebnis tatsächlich an diesem Tag im Jahr zu registrieren sein wird. Je größer die durch $\hat{r}$ ausgedrückte zeitliche Stabilität, desto sicherer darf erwartet werden, dass das Ereignis immer zum gleichen Zeitpunkt im Jahr auftritt.

[13] Resultate auf Tendenzebene sind im Gegensatz zu gesicherten Trends bei der Interpretation für sich genommen mit hoher Unsicherheit behaftet und nicht als statistischer Beleg tauglich. Allerdings birgt die großräumig-gleichartige Tendenzausweisung für die absolute Mehrzahl der untersuchten Pegel ebenfalls eine gewisse Aussagekraft.

Tab. 8.2: Veränderung des saisonalen Verhaltens (nach BURN 1994) von Hochwasserextremen an repräsentativen Pegeln der Bundeswasserstraßen seit Mitte des 20. Jahrhunderts (MD = mittleres Eintrittsdatum je Bezugsperiode; $\hat{r}$ = Stabilitätsmaß von 0 (niedrig) bis 1 (hoch) für das zeitliche Auftreten)

Reihenname	01.11.1945-31.10.1980		01.11.1980-31.10.2013	
	MD	**$\hat{r}$**	**MD**	**$\hat{r}$**
Dresden/Obere Elbe	25.03.	0,41	08.03.	0,5
Neu Darchau/Mittelelbe	20.03.	0,57	11.03.	0,61
Hofkirchen/Donau	18.03.	0,27	11.04.	0,13
Achleiten/Donau	28.06.	0,68	07.07.	0,34
Maxau/Oberrhein	16.04.	0,09	10.05.	0,18
Köln/Niederrhein	07.02.	0,66	24.01.	0,77
Würzburg/Main	14.02.	0,72	01.02.	0,73
Intschede/Weser	07.02.	0,63	15.02.	0,71

Die entsprechenden Berechnungen wurden für die jährlich höchsten Abflusswerte der bereits aus Kap. 8.1.1 bekannten acht Repräsentativpegel für zwei etwa gleich lange Teilzeiträume (1946/1980 und 1981/2013) angestellt.
In den zugehörigen Grafiken ist der Jahresverlauf in einem Kreisdiagramm dargestellt; die untersuchten Zeiträume unterscheiden sich farblich. Die einzelnen Ereignisse innerhalb dieser Teilzeiträume sind jeweils gemäß ihrem Eintrittsdatum auf der Kreislinie eingetragen. Die Vektoren zeigen zum einen aufgrund ihrer Zielrichtung zur Kreislinie hin das für den jeweiligen Teilzeitraum berechnete wahrscheinlichste Eintrittsdatum der HQ-Extreme an. Zum anderen ist die Länge des Vektors der Indikator für die Variabilität bzw. Stabilität des Eintrittsdatums: Die höchste Eintrittswahrscheinlichkeit $\hat{r}$ =1 (d.h. das Ereignis würde mit stabiler Zuverlässigkeit immer zum selben Zeitpunkt im Jahr eintreten) wird durch eine Vektorlänge entsprechend der vollen Distanz des Kreisradius repräsentiert.
Bei dieser grafisch angelegten Variante der BURNschen Saisonalitätsanalyse interessierte nicht allein die Gegenüberstellung der bereits in Tab. 8.2 erscheinenden Teilzeiträume, sondern als Referenz ist zusätzlich stets auch der Gesamtzeitraum 1946/2013 in die Auswertungen einbezogen.

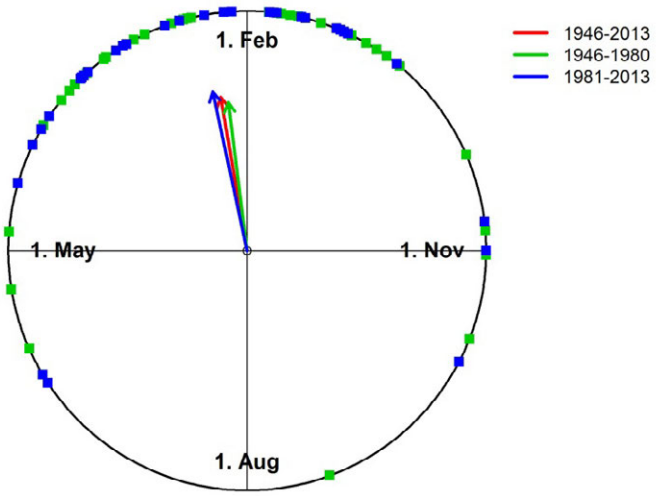


Abb. 8.12: Pegel Intschede (Weser): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Gesamtperiode 1946/2013 und den Teilzeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 (je länger ein Vektor, desto größer die Regularität des Ereignisses)

An der **Weser** (Pegel Intschede) treten die Hochwasserereignisse am häufigsten Mitte des Monats Februar auf; im vieljährigen Durchschnitt ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieses so eintrifft, mittel bis hoch ($\hat{r}$ =0,64). Beim Vergleich der Teilzeiträume 1946/1980 und 1981/2013 zeigt sich eine Verzögerungstendenz um ca. eine Woche; die Eintrittszeitpunkte liegen dann bei nahezu unverändertem $\hat{r}$ eher zu Beginn des zweiten Februardrittels. („Hochwasser später mit unveränderter Eintrittsstabilität“).

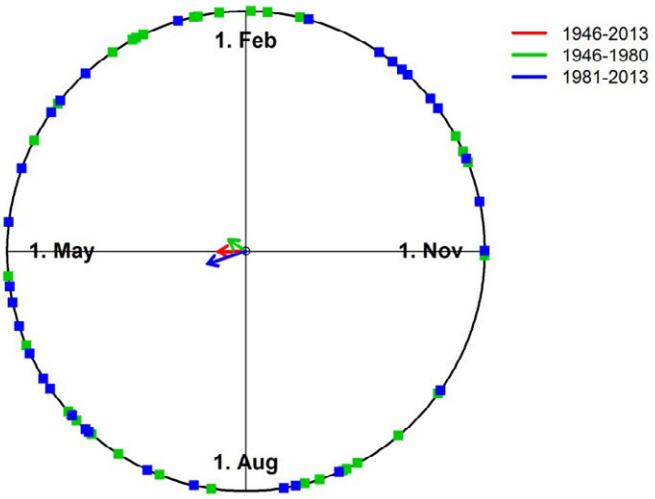


Abb. 8.13a: Pegel Maxau (Oberrhein): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Gesamtperiode 1946/2013 und den Teilzeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 (je länger ein Vektor, desto größer die Regularität des Ereignisses)

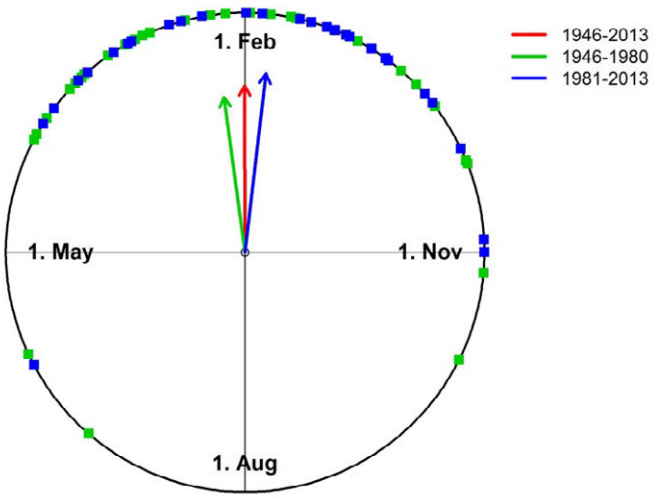


Abb. 8.13b: Pegel Köln (Niederrhein): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Gesamtperiode 1946/2013 und den Teilzeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 (je länger ein Vektor, desto größer die Regularität des Ereignisses)

Der **Rhein** hat im Gegensatz zu Weser oder Elbe kein einheitliches Abflussregime. Im **Oberrhein** (Pegel Maxau, Abb. 8.13a) beginnt die allmähliche Durchdringung des vom Alpenraum her nival geprägten Flusses mit den maritim-pluvialen Elementen des Tief- und

Hügellandes. Sowohl Schneeschmelz- als auch Regenereignisse haben bei der Hochwasserentstehung ähnliche Bedeutung, Hochwasser kann zu jeder Jahreszeit auftreten ($\hat{r}$ = 0,13). Diese saisonal indifferente Situation ändert sich auch nicht über die Zeit („Hochwasser ist immer möglich"). Für den **Niederrhein** (Pegel Köln, Abb. 8.13b) mit seinem eher pluvial geprägten Mischregime gilt, dass Hochwasser im Durchschnitt im Winter (Ende Januar) am häufigsten vorkommt, dies mit mittlerer bis hoher Eintrittswahrscheinlichkeit ($\hat{r}$ = 0,68). Im Laufe der Jahre stellte sich hier eine Vorverlegung der Eintrittszeitpunkte um rund drei Wochen ein („Hochwasser früher mit erhöhter Eintrittszeitpunktsstabilität").

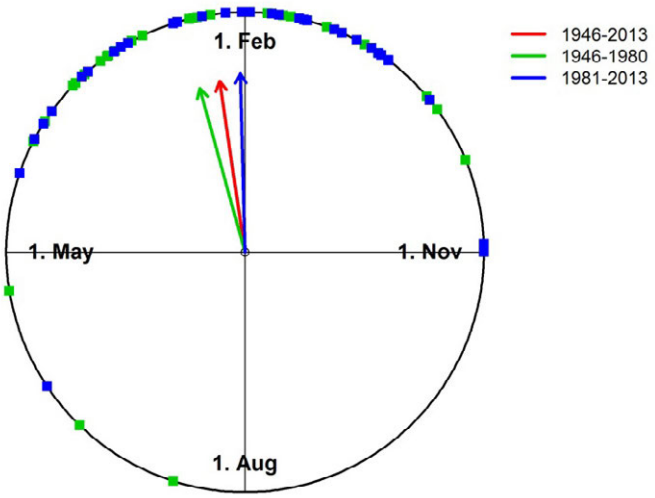


Abb. 8.14: Pegel Würzburg (Main): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Gesamtperiode 1946/2013 und den Teilzeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 (je länger ein Vektor, desto größer die Regularität des Ereignisses)

Hochwasser am **Main** (Pegel Würzburg, Abb. 8.14) kommen mit mittlerer bis hoher Eintrittswahrscheinlichkeit im Winter vor (Anfang zweite Februarhälfte). Der Vergleich der Teilzeiträume zeigt eine Tendenz zu einem um etwa zwei Wochen früheren Hochwassereintreffen auf („Hochwasser früher mit unveränderter Eintrittszeitpunktsstabilität").

Für die **Donau** (Pegel **Hofkirchen**, Abb. 8.15a) gilt Ähnliches wie für den Oberrhein. Angesichts der Überlagerung nivaler und pluvialer Elemente im Abflussregime lassen sich keine Gesetzmäßigkeiten für den Zeitpunkt des Auftretens von Hochwasserereignissen feststellen: Hochwasser kann zu jeder Jahreszeit auftreten ($\hat{r}$ = 0,19). Diese saisonal indifferente Situation ändert sich auch hier nur unwesentlich über die Zeit („Hochwasser ist immer möglich"). Am Pegel **Achleiten** ändert sich diese Aussage unter dem Einfluss des Inns; die Hochwasserereignisse treffen gegenwärtig mit stark verringerter Eintrittsstabilität rund zehn Tage später ein als ehedem („Hochwasser später mit abnehmender Stabilität des Eintrittszeitpunktes"). Möglicherweise macht sich hier bei der Hochwassergenese angesichts langfristiger Erwärmungstendenzen die steigende Bedeutung von Starkregenereignissen versus die im nivalen Regime grundsätzlich bedeutende Schneeschmelze bemerkbar.

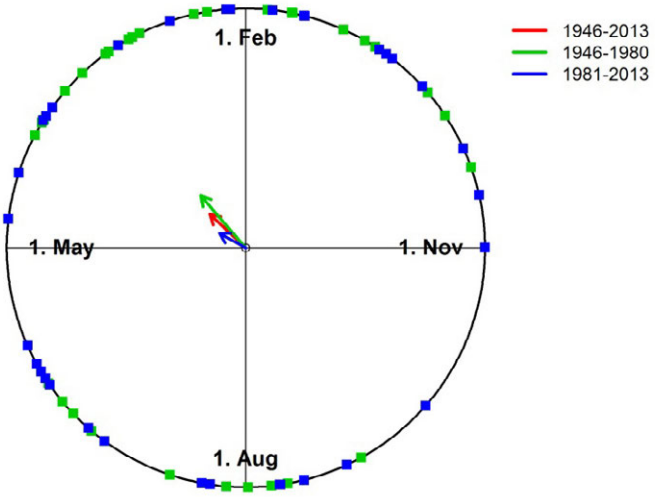


Abb. 8.15a: Pegel Hofkirchen (Donau): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Gesamtperiode 1946/2013 und den Teilzeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 (je länger ein Vektor, desto größer die Regularität des Ereignisses)

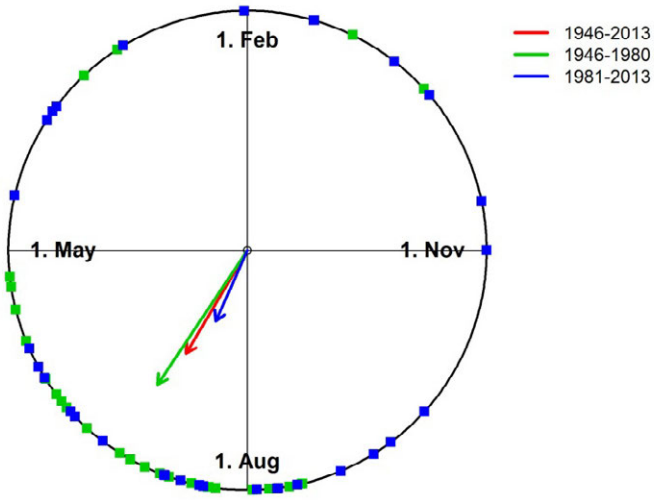


Abb. 8.15b: Pegel Achleiten (Donau): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Gesamtperiode 1946/2013 und den Teilzeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 (je länger ein Vektor, desto größer die Regularität des Ereignisses)

Im Vergleich zwischen Donau und Rhein zeigt sich damit: Sowohl komplexe (Köln, Hofkirchen) als auch vorherrschend nivale (Maxau, Achleiten) Regime weisen bezüglich des Hochwassereintretenszeitpunkts ein unterschiedliches Verhalten auf: je pluvialer geprägt, desto deutlicher die Regularität. Allerdings haben „gleichmäßig-komplexe“ Regime, wie z.B. die Donau bei Hofkirchen, bei denen die nivalen und pluvialen Elemente einander in gleicher Bedeutung gegenüberstehen, ebenfalls wenig stabiles saisonales Verhalten bezüglich ihres Hochwasserauftretens. Die Instabilitäten bei den Regimetypen nivaler Prägung sind möglicherweise vor dem Hintergrund saisonaler Umverteilungsprozesse, die teils klimatischen Ursprungs (Änderungen der Großwetterlagen, Temperaturerhöhung), teils auch anthropogen bedingt sind (Talsperrenbewirtschaftung zur Energiegewinnung in den Alpen), zu interpretieren. Die Stabilisierung bei den pluvialer geprägten Regimen kann mit den in den letzten Jahrzehnten zunehmenden feuchten Großwetterlagen im Winter erklärt werden.

Für beide Elbepegel Dresden (**Obere Elbe**/Abb. 8.16a) und Neu Darchau (**Mittelelbe**/Abb. 8.16b) ist in der Gesamtperiode 1946/2013 einheitlich der ausgehende Winter die typische Hochwasserzeit (Mitte März). Allerdings verweist die dabei vorliegende mittlere Eintrittswahrscheinlichkeit auf deutliche Variabilität im Jahreslauf. Beim Vergleich der Teilzeiträume 1946/1980 und 1981/2013 zeigt sich die Tendenz zur Vorverlegung der Eintrittszeitpunkte bei um rund zwei Wochen (Dresden) bzw. eine Woche (Neu Darchau) bei gleichzeitig leichter Zunahme der Eintrittswahrscheinlichkeit („früher und etwas regelmäßiger“).

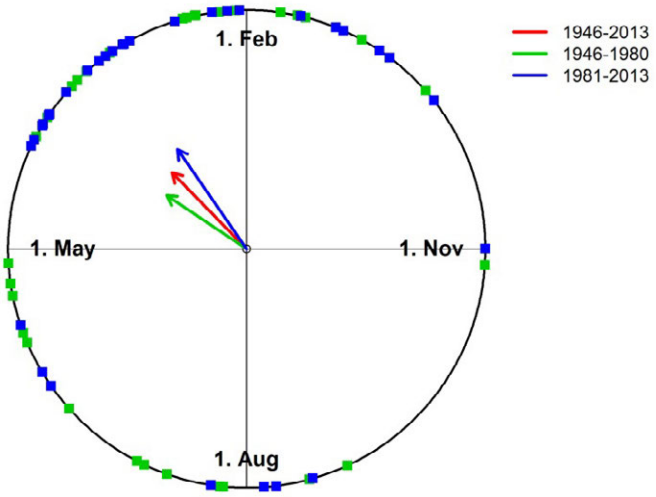


Abb. 8.16a: Pegel Dresden (Obere Elbe): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Gesamtperiode 1946/2013 und den Teilzeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 (je länger ein Vektor, desto größer die Regularität des Ereignisses)

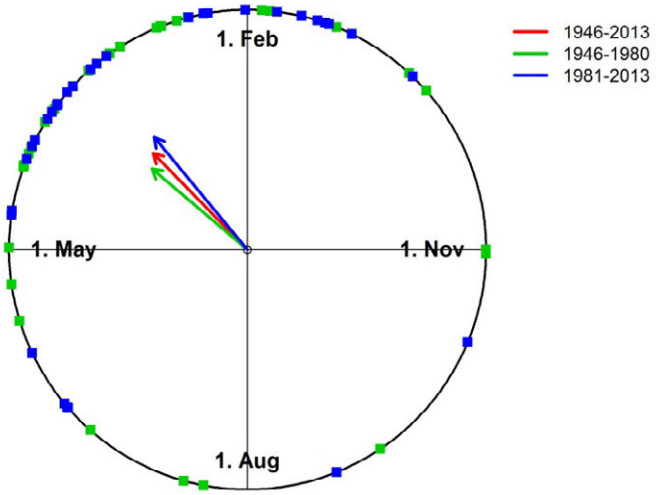


Abb. 8.16b: Pegel Neu Darchau (Mittelelbe): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Gesamtperiode 1946/2013 und den Teilzeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 (je länger ein Vektor, desto größer die Regularität des Ereignisses)

Insgesamt ist festzustellen, dass sich die nival geprägten bzw. mitgeprägten Abflussregimetypen (Oberrhein, Donau) zumindest in den letzten drei Dekaden hochwasserbezogen durch geringe Regularitäten ($\hat{r} < 0{,}5$) auszeichnen. Hier kann jeweils keine typische Hochwassersaison belegt werden. Nur für diese Pegel bzw. Gewässer ist im Ergebnis eine Verspätung bzw. Verzögerung des Hochwassereintretens festzustellen – ein Resultat allerdings, das vor dem Hintergrund des niedrigen $\hat{r}$ für sich keinen Aussagewert hat. Bei den übrigen (pluvial geprägten) Regimetypen besteht dagegen mit Ausnahme der Weser (Pegel Intschede) bei stabileren $\hat{r}$ (immer > 0,5) die Tendenz zu einer Vorverlegung der Hochwassersaison.

8.2.3 Frequenzverhalten von Hochwasserereignissen

Die Wiederkehrzeit in Jahren, ausgerichtet auf einen empirischen Datenbestand, kann als aussagekräftiger Indikator dafür gewertet werden, inwiefern eine regelhafte Häufung von Hochwasserereignissen im Laufe der Zeit eingetreten ist oder nicht. Zur Analyse der Wiederkehrzeit verwendet wurde hier das von JONAS et al. (2005) beschriebene Verfahren der zeitlich gleitenden Extremwertanalyse[14] mit einer Fensterweite von 30 Jahren. Zur differenzierten Erfassung möglicherweise unterschiedlichen zeitlichen Verhaltens größerer oder kleinerer Hochwasserereignisse diente die Definition von drei verschiedenen Intensitätsniveaus (Schwellenwerte Q_s1 bis Q_s3): Das 50-%-Perzentil (mit Bezug auf das HQ der Untersuchungsperiode 1946/2013), vergleichbar dem Median, berücksichtigt mindestens mittlere Hochwasserereignisse; mit dem Q_s2 (= 80-%-Perzentil) und schließlich dem Q_s3 (90-%-Perzentil) wird die Analyse auf zunehmend größere Hochwasserintensitäten fokussiert. Die Stichprobe Q_s1 integriert demnach auch die Ereignisse mit Überschreitung von Q_s2 und Q_s3, diejenige mit Überschreitung von Q_s2 beinhaltet auch die extremeren Ereignisse > Q_s3. Es ist darauf hinzuweisen und aus den dargestellten Hochwasserjährlichkeiten ersichtlich, dass auch die Ereignisse > Q_s3 nicht gleichbedeutend mit den mittleren oder gar "Extremereignissen" nach Hochwasserrisikomanagementrichtlinie sind (Jährlichkeit >100 Jahre gem. Kap. III(3)6; RICHTLINIE 2007/60/EG) und die hier getroffenen Trendaussagen nicht übertragbar sind.

Die Ergebnisse fallen für alle untersuchten Pegel Intschede (Weser), Maxau (Oberrhein), Köln (Niederrhein), Würzburg (Main), Hofkirchen (Donau), Achleiten (Donau), Dresden (Obere Elbe) und Neu Darchau (Mittelelbe) bezüglich der großen und mittelgroßen Hoch-

---

[14] Bei der zeitlich gleitenden Extremwertanalyse (hier nach JONAS 2003 und JONAS et al. 2005) wird der betrachtete Gesamtzeitraum einer Messreihe in zeitlich gleitende Subintervalle (hier: 30-Jahre-Zeiträume) unterteilt. Innerhalb dieser Subintervalle sind Extremwerte diejenigen Werte, die die vorab für den Gesamtzeitraum bestimmten Schwellenwerte überschreiten.

An die Gesamtheit der (Extremwerte innerhalb der Subintervalle können dann sowohl empirische als auch theoretische Häufigkeitsverteilungen angepasst werden. In vorliegender Arbeit wurde als theoretische Wahrscheinlichkeitsverteilung die dreiparametrische Verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV) verwendet. Die Parameterschätzung erfolgte mittels der L-Momentenmethode. Die Anpassung wurde mittels des $n\omega^2$-Testes überprüft.

Aufsetzend auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung wird die Wiederkehrzeit abgeleitet. Die Wiederkehrzeit ist der Erwartungswert der Wartezeitverteilung.

$$\tau = E(g(t))$$

Aufgrund der Anpassung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen an gleitende Zeitfenster sind die ermittelten Parameter sowie die sich daraus ergebenden Kennwerte mit der Zeit veränderlich.

An sämtliche oben genannten Zeitfunktionen wurden lineare Trendgeraden der Form

$$X = B0 + B1 * t$$

ohne Signifikanzprüfung angepasst.

wasserintensitäten (Q_s3 und Q_s2) gleichartig aus: Es besteht im Zeitraum 1946/ 2013 in den vier Stromgebieten insgesamt eine Verringerung der Wiederkehrzeit. Anders formuliert: Die Wahrscheinlichkeit, dass Hochwasser der vorgegeben Größenordnung Q_s3 und Q_s2 an den betreffenden Pegelstandorten bzw. Flussabschnitten auftreten, stieg im Laufe der betrachteten sechs Dekaden (Ausnahme: Rheingebiet, s. u.). Gleichzeitig war eine Erhöhung der Wiederkehrzeit für mindestens mittlere Hochwasserereignisse feststellbar (Q_s1). Dieses ereignisniveaubezogen entgegengesetzte Ergebnis kann angesichts des integrativen Aufbaues der Stichprobe (s.o.) nur daher rühren, dass die numerische Majorität der kleineren Hochwasser die Entwicklungscharakteristik der (selteneren) größeren Ereignisse überlagert; ergo bei den kleineren Hochwasserereignissen eine ausgeprägte Verringerung der Häufigkeit bzw. Eintrittswahrscheinlichkeit stattgefunden hat. Exemplarisch zeigt dies Abb. 8.17 für den Donaupegel Achleiten.

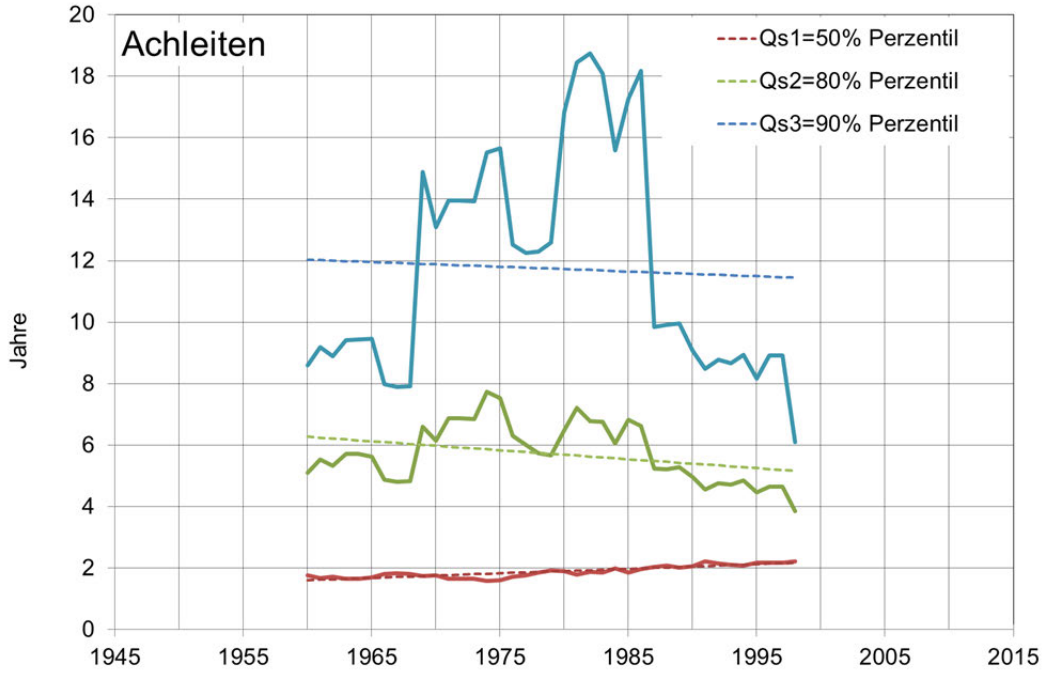


Abb. 8.17: Pegel Achleiten (Donau): zeitlich gleitende Extremwertanalyse (Gleitfensterweite 30 Jahre) anhand der Entwicklung der Wiederkehrzeit [in Jahren] für drei verschiedene HQ-Intensitätsniveaus (Q_s1 bis Q_s3), Periode 1946/2013

Einen Überblick über die Resultate der Frequenzuntersuchung für alle berücksichtigten Pegel zeigt Abb. 8.18. Über die obigen generellen Feststellungen wird hier deutlich, dass die o.g. Ergebnisse (bei einer Ausnahme) stromgebietsübergreifend mit identischer Tendenz für alle drei Schwellenwerte auftraten; allerdings bestehen größere Unterschiede im Ausmaß der Veränderung. So zeigt sich an der Elbe im Durchschnitt der Ereignisse, die über dem 50-%-Perzentil liegen, häufigkeitsbezogen nahezu Gleichverhalten. Allerdings ist bei extremen Ereignissen (die das 90-%-Perzentil überschreiten) eine deutliche Änderung der Wiederkehrzeit festzustellen: Insbesondere an der unteren Mittelelbe (Pegel Neu Darchau) ist das Auftreten großer Hochwasser im Laufe der letzten sechs Dekaden erheblich wahrscheinlicher geworden. Deutlich gemäßigter ist dagegen diese Dynamik am Oberrhein (Pegel Maxau).

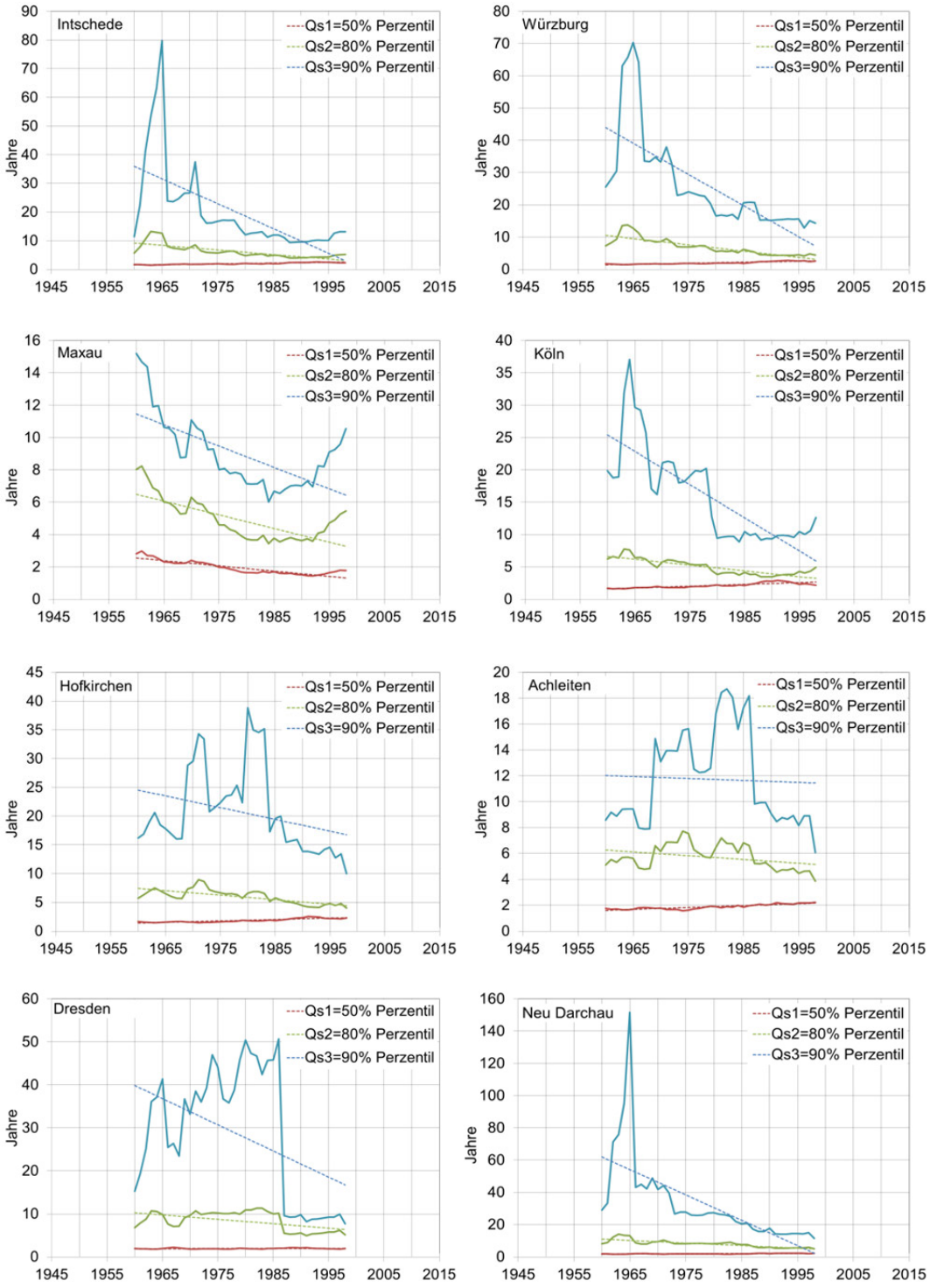


Abb. 8.18: Weser, Rhein, Donau und Elbe: zeitlich gleitende Extremwertanalyse (Gleitfensterweite 30 Jahre) an repräsentativen Pegeln anhand der Entwicklung der Wiederkehrzeit [in Jahren] für drei verschiedene HQ-Intensitätsniveaus (Q_s1 bis Q_s3), Periode 1946/2013 [Man beachte die unterschiedliche Skalierung der y-Achse!]

Auch in anderer Hinsicht unterscheidet sich das Frequenzmuster im Oberrheingebiet von dem der anderen untersuchten Ströme bzw. Stationen: Zum einen ist hier bereits bei Hochwassern > Q_s1), ähnlich der Tendenz bei höheren Ereignisniveaus (> Q_s2 und Q_s3), eine Verringerung der Wiederkehrzeit festzustellen; mithin ist also bei allen untersuchten Hochwasserintensitäten ein häufigeres Auftreten wahrscheinlicher geworden. Gleichzeitig ist – ebenfalls bei allen drei Intensitätsniveaus – spätestens mit Beginn der 90er-Jahre des 20. Jahrhunderts eine Tendenzumkehr offensichtlich: Seitdem steigen die Wiederkehrzeiten wieder an, verringert sich also die Eintrittswahrscheinlichkeit (Abb. 8.18). Im Stromverlauf wird die zunächst nival geprägte Abflusscharakteristik des Rheins allmählich pluvial überprägt. Dies schlägt sich auch bei den Untersuchungen zum Frequenzverhalten nieder; der Niederrheinpegel Köln mit seinem pluvial geprägten Abflussregime zeigt Unterschiede zum Oberrhein insofern, als das hier kleinere Hochwasserintensitäten seltener werden und die für Maxau festgestellte Tendenzumkehr einige Jahre später einsetzt.

8.2.4 Volumenbetrachtung von Hochwasserereignissen

Unter anderem für die Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen, wo es darum geht, Rückhalteraum für potenziell mögliche große Wassermengen zu planen und umzusetzen, ist die Frage nach dem Verhalten der beim jeweiligen Ereignis bewegten Wassermenge über die Zeit von großer Bedeutung.

Zur Berechnung der Fülle der jeweils größten Hochwasserwelle jedes Jahres in der Untersuchungsperiode 1946/2013 wurde deren Abflussvolumen aus den mittleren Tagesabflüssen für eine standardisierte Ereignisdauer berechnet. Diese standardisierte Ereignisdauer lag bei 22 Tagen (7 Tage vor dem Scheitel, 1 Tag des Scheitels und 14 Tage nach dem Scheitel). Die so gewonnene jährliche Serie der Hochwasserfüllen wurde an den Ereignisschwerpunkten des Hochwassers 2013, der Donau (Pegel Hofkirchen und Achleiten) und der Elbe (Pegel Dresden und Neu Darchau) einer Trendanalyse (LSM-Verfahren wie in Kap. 8.2) unterzogen. Die Grafiken in Abb. 8.19 zeigen die Ergebnisse, die sehr einheitlich ausfallen: An allen untersuchten Pegeln besteht im Zeitraum 1946/2013 die Tendenz zu einer Vergrößerung der Hochwasserfüllen. Derartige Tendenzen sind stets allerdings lediglich als undeutliche Veränderungssignale zu werten, da sich in keinem Fall statistische Signifikanz ergab.

Angesichts dessen, dass vor allem für historische Ereignisse (gerade bei extremen Hochwasserintensitäten) häufig Deichbrüche und damit verbunden Reduzierungen des Volumens der Hochwasserwelle auftreten, diese aber oft nicht präzise dokumentiert werden können, sind derartige Füllenstatistiken allerdings mit der gebotenen Vorsicht zu beurteilen.

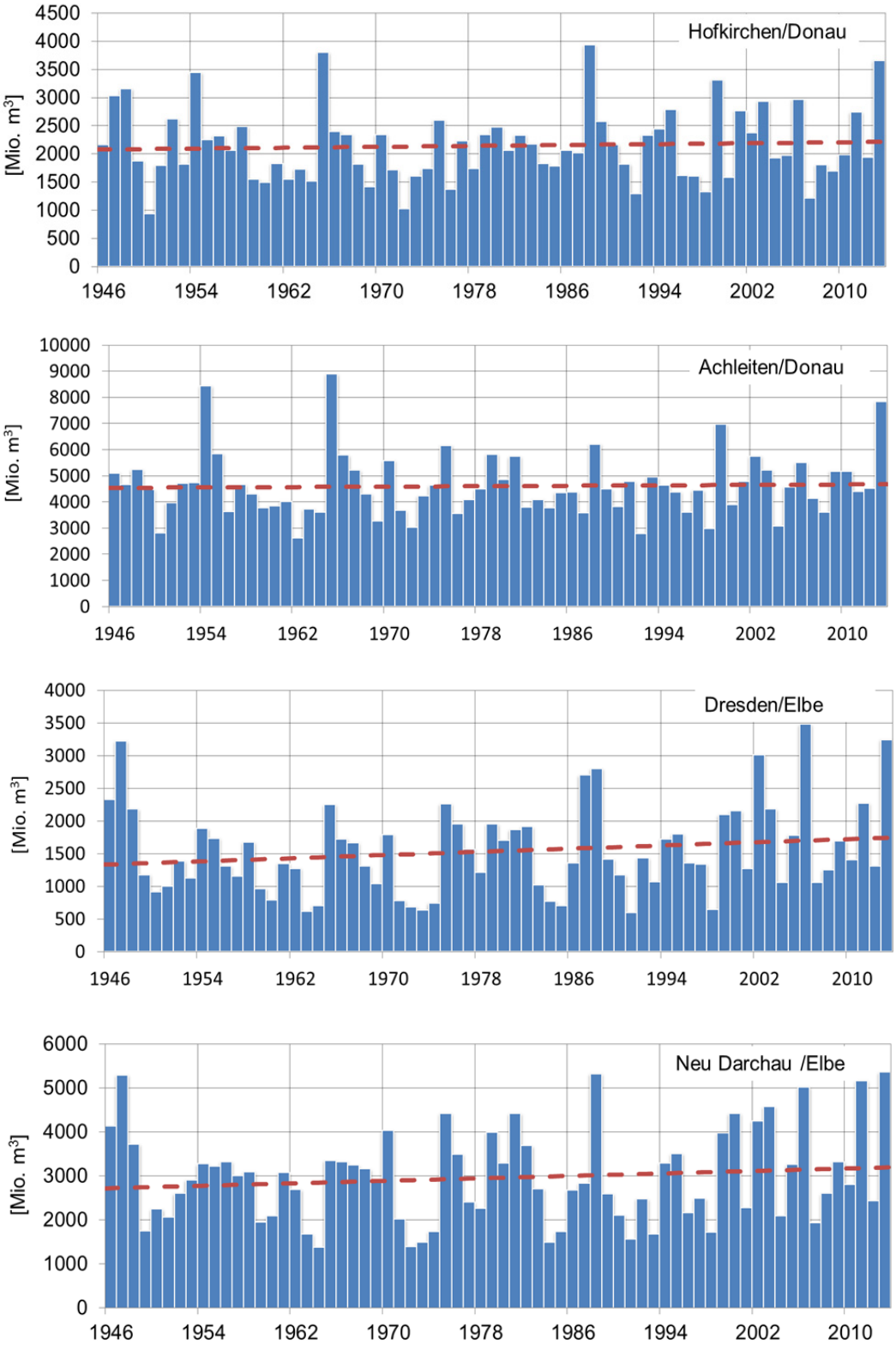


Abb. 8.19: Trendanalyse der Hochwasserfülle bei standardisierter 22-tägiger Ereignisdauer an den Pegeln Hofkirchen (Donau), Achleiten (Donau), Dresden (Obere Elbe) und Neu Darchau (Mittelelbe), Periode 1946/2013
(LSM-Methode und Mann-Kendall-Test, Signifikanzniveau 95 %)

8.2.5 Fazit retrospektive Entwicklungsdynamik von Hochwasserereignissen

Die Intensität von Hochwasserereignissen und die Zeitpunkte ihres Auftretens veränderten sich im Laufe der Untersuchungsperiode 1946/2013. Trotz gegebener räumlicher Heterogenität lässt sich vielerorts eine tendenzielle Erhöhung der jährlichen HQ-Scheitelabflüsse im Zeitverlauf feststellen. Diese Entwicklung fällt überwiegend ohne Trendsignifikanz aus. Gleichzeitig besteht in vielen Fällen eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Tendenz zu einem früheren Auftreten der jährlichen Hochwasser im Jahresverlauf, die allerdings deutschlandweit nicht einheitlich ist. An vielen Bundeswasserstraßen ist festzustellen, dass die Hochwasserhäufigkeit insgesamt geringer ausfiel, dabei allerdings größere Hochwasser immer wahrscheinlicher geworden sind (d.h. im Umkehrschluss: kleinere seltener auftraten). Die Volumina der abgelaufenen Hochwasser (Hochwasserfüllen) weisen an den untersuchten Pegeln im Teilzeitraum 1946/2013 durchweg Zunahmetendenzen, aber keine Trendsignifikanz auf.

Diese Entwicklungsstränge korrespondieren mit den Erkenntnissen der hydrometeorologischen Forschung bezüglich vorliegender Änderungen im Wasserkreislauf. Diese machen sich in Mitteleuropa mit Niederschlagszunahmen vorherrschend im Winter sowie mit Temperaturanstiegen und damit verbundener vorzeitiger Schneeschmelze bemerkbar, was steigende Abflüsse in den Oberflächengewässern nach sich zieht.

Ob die vorstehend genannten Änderungen tatsächlich kausal mit dem klimawandelbedingten Änderungen der Abflussregime zusammenhängen, sind jedoch in der hier angesetzten Untersuchungstiefe nicht allein angesichts der geringen Anzahl der untersuchten Pegel und des relativ kurzen Zeitfensters, sondern auch vor dem Hintergrund nicht untersuchter möglicher Langfristabhängigkeiten nicht dazu geeignet, Belege für die Existenz einer durchgreifenden klimagetriebenen Änderung im jeweiligen Abflussregime zu liefern.

8.3 Klimavariabilität, Klimawandel und Hochwasser

8.3.1 Grundsätzliches und Vorgehensweise

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Änderungen der betrachteten Hochwasserkennwerte können durch längerfristige Schwankungen überlagert sein. Diese sind Bestandteil des gegebenen natürlichen Klimas und seiner Variabilität.

Unter "Klimawandel" (oder "Klimaänderung") versteht man die dauerhafte Änderung des langzeit-statistischen Zustands des Klimasystems, der sich quantitativ fassen lässt, wenn die Mittelwerte und Variabilitätsmaße mindestens 30-jähriger Zeiträume deutlich verschieden sind (vgl. WMO 2011). Dabei beschreiben diese 30 Jahre allerdings nur einen Minimalzeitraum, bei dessen alleiniger Zugrundelegung insbesondere für die Einordnung und Bewertung von Extremereignissen noch erhebliche Unschärfen und Unsicherheiten in Kauf genommen werden müssen. Erst bei Betrachtung längerer Zeiträume sind fundierte Erkenntnisse über die längerfristige Klimavariabilität zu gewinnen, welche zum einen angetan sind, Entwicklungen auch im Bereich von Extremen zu erkennen und zum anderen, diese dem Globalen Klimawandel zuzuschreiben.

Die Frage nach der Entwicklung schadbringender Extremereignisse ist aus den genannten Gründen selbst bei Annahme eines vom Menschen unbeeinflussten Klimas empirisch schwer zu beantworten, da die in den Beobachtungsdaten enthaltenen Trends und Tendenzen (vgl. obige Kapitel) sich nicht einfach in die Zukunft fortschreiben lassen. Zu den genannten Unsicherheiten kommt nun hinzu, dass das globale Klima sich durch die vom Menschen verursachten Emissionen der sog. Treibhausgase in die Atmosphäre ändern wird (IPCC 2007 und 2013). Es ist zu erwarten, dass der Globale Klimawandel auch den regionalen Wasserkreislauf und damit das Abfluss- und Hochwasserabflussregime unserer Flüsse beeinflussen wird. Im Rahmen des Forschungsprogramms *Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen* (FP KLIWAS; BMVBS 2013) wurde die mögliche zukünftige Entwicklung des Abflussregimes der großen Ströme Deutschlands und deren größerer schiffbarer Nebenflüsse untersucht (NILSON et al. 2014). Die Untersuchungen basieren auf einem umfangreichen Modelldatenfundus mit regionalen Klima- und Abflusssimulationen, der den Zeitraum von 1951 bis 2100 umfasst. Dabei wurden Klimaentwicklungen zugrundegelegt, die mit sieben verschiedenen Erdsystem-Modellen (gekoppelte globale Klima- und Ozeanmodelle, AOGCM) unter Annahme von Treibhausgasemissionen nach einem "mittleren" Emissionsszenario (SRES A1B) simuliert wurden. Die großskaligen (oft in 200-km-Gitterweite vorliegenden) Ergebnisse der einzelnen AOGCM wurden jeweils mit mehreren dynamischen regionalen Klimamodellen (RCM) in regionale Klimadaten (rd. 25-km-Gitterweite) überführt. Die Mehrzahl der regionalen Klimaprojektionen entstammen dem EU-Projekt ENSEMBLES (VAN DER LINDEN & MITCHELL 2009). Dieses Ensemble von Klimaprojektionen wurde durch Modellergebnisse aus verschiedenen Forschungsprojekten in Deutschland ergänzt.

Mit Hilfe flussgebietsweiter Wasserhaushaltsmodelle wurden die Klimaprojektionen für mehrere Pegel im Rhein-, Donau- und Elbegebiet in Abflussprojektionen umgerechnet. Insgesamt liegen für diese Einzugsgebiete bis zu 21 Klima- bzw. Abflussprojektionen vor (NILSON et al. 2014). Auf Grundlage dieser Daten werden in den folgenden Abschnitten mögliche Änderungen hochwasserauslösender Niederschlagsereignisse speziell in den Monaten Mai und Juni sowie mögliche Entwicklungen im Auftreten und in der Intensität von Hochwasserereignissen aufgezeigt.

Bei der Interpretation der Klima- und Abflussprojektionen ist zu beachten, dass die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten der angenommenen Ausgangsprojektionen nicht bestimmbar ist; u.a. weil die politischen Entscheidungen zum Klimaschutz die Emissionsentwicklung und damit die zugrundeliegenden Annahmen der Simulationen beeinflussen. Insofern kann die Klimafolgenforschung nur einen „Möglichkeitsraum“ aufzeigen, in dem sich der Stand des aktuellen Wissens widerspiegelt. Die nach wie vor auch zukünftig wirkende natürlicher Klimavariabilität bewirkt weitere Unschärfen. Generell nehmen die Unsicherheiten in den Aussagen zu möglichen zukünftigen Zuständen zu, je kleinräumiger und intensiver die betrachteten Ereignisse sind.

Zur Einordnung und Bewertung der zukunftsbezogenen Ergebnisse und Prognosefähigkeit der hydrologischen Klimafolgenforschung sind die beobachteten hydrometeorologischen und hydrologischen Ereignisse in geeigneter Weise hinzuzuziehen. In BfG (2013c) und STEIN, MALITZ et al. (2013) wurden von ausgewählten Stationen die mehrtägigen Niederschlagssummen extremwertstatistisch laut KOSTRA-DWD-2000 eingeschätzt. Danach lagen die

Jährlichkeiten der Ende Mai bzw. Anfang Juni aufgetretenen größten Niederschläge der Dauerstufe 72 h (3 Tage) bzw. 96 h (4 Tage) an vielen Stationen in der Größenordnung von 50 bis 100 Jahren. An einigen wenigen wurden auch Jährlichkeiten von mehr als 100 Jahren registriert. Der Umstand, dass örtlich vielfach das Wiederkehrintervall von T = 100 a nicht erreicht wurde, ändert nichts an der Bedeutung der Niederschlagsereignisse. Entscheidend für die Hochwasserabflussbildung war auch die große Ausdehnung der Niederschlagsfelder.

Nachstehend erfolgt zunächst eine Einordnung der Gebietsniederschläge in der Periode Mai* 2013 anhand zweier Niederschlagskennwerte. Die Analysen erfolgen wie in Kap. 2 für 50 Teileinzugsgebiete der Stromgebiete Mitteleuropas und der Küstenregionen. Wie in Kap. 2 erläutert, bezieht sich die Notation Mai* 2013 auf den gesamten hochwasserrelevanten Zeitraum, der um den Mai zentriert ist (Zeitraum 26.04.-03.06.2013). Berechnet wurden die größten 5-tägigen und 31-tägigen Niederschlagssummen. Diese Kenngrößen wurden gewählt, da sie die in dieser Jahreszeit und auf der betrachteten Raumskala hochwasserbildenden Phänomene hinsichtlich wichtiger hydrologischer Anfangs- und Randbedingungen gut beschreiben. Die 31-tägige Summe charakterisiert hierbei summarisch den Sättigungsgrad des Bodens und die Intensität der hochwasserauslösenden Niederschlagsereignisse, während die 5-tägige Summe den Aspekt der mehrtägigen Starkniederschlagsintensität isoliert darstellt. Dieselben Kennwerte wurden auch basierend auf ausgewählten Klimaprojektionen für Fragen möglicher zukünftiger Entwicklungen unter dem Einfluss des Globalen Klimawandels ausgewertet (vgl. Kap. 8.2.4).

Die Einordnung der Periode Mai* 2013 erfolgt (1) in Form einer Betrachtung der Anomalien im Vergleich zum vieljährigen Mittelwert der Periode 1961/1990 (vgl. Kap. 8.2.1) und (2) als Trendbetrachtung im Kontext beobachteter Zeitreihen 1950/2013 (Kap. 8.2.2). Ferner (3) werden im Vergleich der Zeitscheiben 2021/2050 bzw. 2071/2100 zu 1961/1990 auf Basis projizierter Klimaänderungen mögliche zukünftige Entwicklungen vor dem Hintergrund des Globalen Wandels dargestellt. Abschließend werden Auswertungen projizierter Änderungen der jährlichen Hochwasser vorgestellt, und zwar hinsichtlich (4) der Anzahl von Hochwassern in den Monaten Mai und Juni sowie (5) der Höhe des Abflusses. Damit wird Fragen nachgegangen, ob sich Frühjahrshochwasser wie 2013 nach Stand des Wissens in Zukunft häufen werden oder ob Hochwasserabflüsse generell zunehmen werden.

8.3.2 Beobachtete Extreme des Gebietsniederschlages im Mai* 2013 und Vergleich mit dem Klimamittel 1961/90

Die Grundlage der Auswertungen in diesem Abschnitt (sowie in Kap. 8.2.3) bildet ein rasterbasierter Niederschlagsdatensatz, der speziell für die hier vorgelegte Untersuchung zusammengestellt wurde. Hierzu wurde die Niederschlagsklimatologie des HYRAS-Datensatzes (RAUTHE et al. 2013) mit den Tageswerten des Niederschlages des EOBS-Datensatzes (HAYLOCK et al. 2008) verschnitten. Da für die tschechischen bzw. polnischen Einzugsgebietsanteile der Oder der HYRAS Datensatz nicht vorliegt, wurde für die Hintergrundklimatologie die GPCC Climatology Version 2011 (SCHNEIDER et al. 2014) und der WorldClim Datensatz (HIJMANS et al. 2005) verwendet. Aus diesen Daten wurde eine Zeitreihe der täglichen Niederschlagshöhen im Zeitraum 1950/2013 für Rasterfelder von 5 km x 5 km abgeleitet. Diese wurden schließlich durch arithmetische Mittelung der Rasterwerte zu den in Kap. 2 beschriebenen 50 Teileinzugsgebieten Mitteleuropas aggregiert.

Die Auswertungen der beiden Niederschlagskennwerte zeigen (s. Abb. 8.20: und Abb. 8.21), dass das Ereignis im Mai* 2013 in einigen Gebieten mehr als das Doppelte (31-Tagessumme) bzw. mehr als das Vierfache (5-Tagessumme) der vieljährigen Mittelwerte 1961/1990 erreichten. Das räumliche Muster entspricht dabei generell dem in Kap. 2 dargestellten. In einzugsgebietsbezogener Betrachtung zeigen sich die folgenden Schwerpunkte:

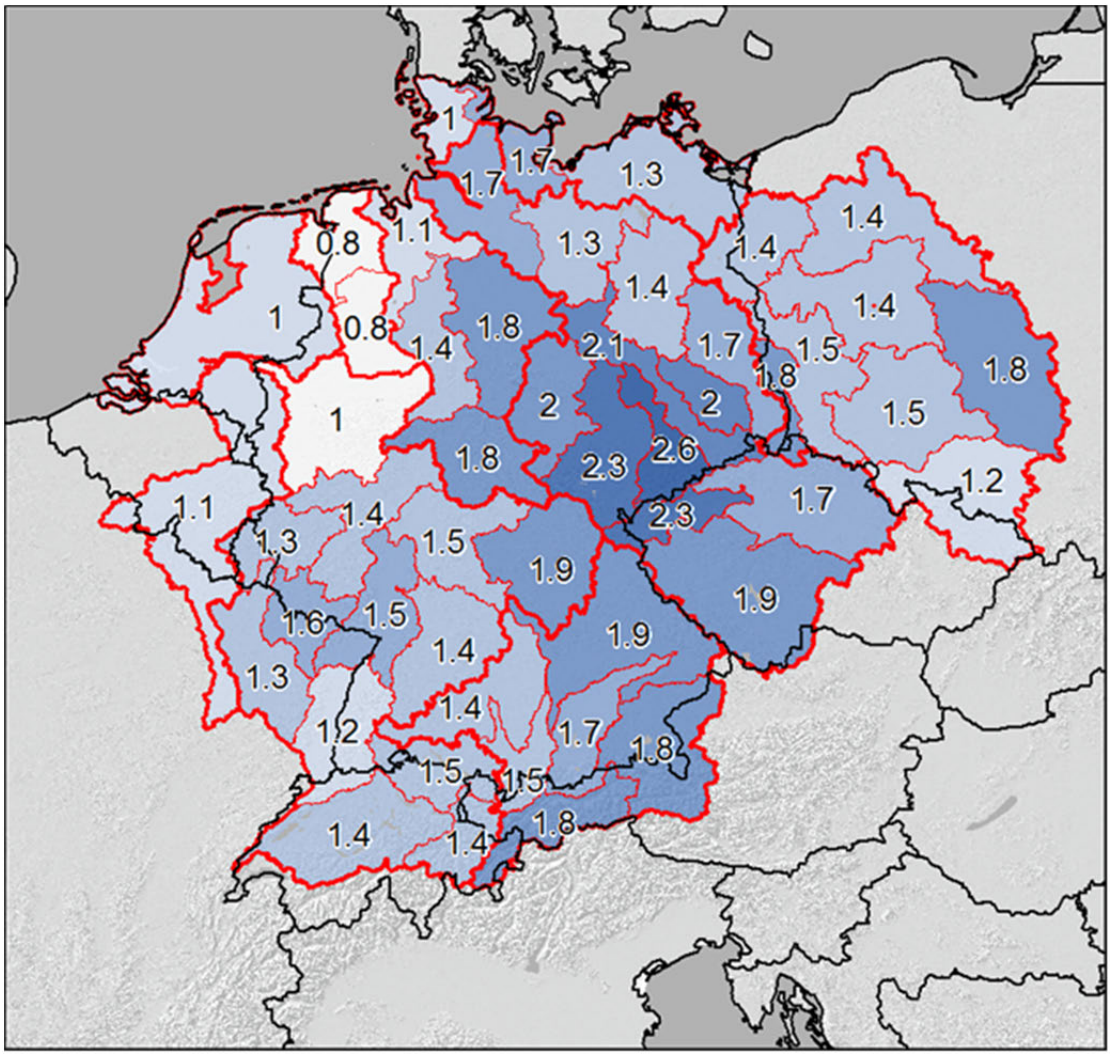


Abb. 8.20: Verhältnis der größten 31-Tagessumme des Niederschlages in der Zeitspanne 15. April bis 15. Juni zum vieljährigen Mittel der größten 31-Tagessumme der Zeitreihe 1961/1990 für 50 Teileinzugsgebiete in Mitteleuropa

Im **Wesergebiet** finden sich die höchsten Werte in den Teileinzugsgebieten Werra/Fulda und Aller/Leine. Während bei den 31-tägigen Summen in beiden Gebieten das 1,8-fache erreicht wird, ragt bei den 5-tägigen Summen das Gebiet von Aller-Leine mit dem 2,4-fachen des Klimamittels heraus.

Im **Rheingebiet** verdeutlichen beide Kennwerte, dass vor allem das Rheingebiet oberhalb des Mains, das Maingebiet selbst und das Einzugsgebiet der Saar betroffen waren. Hier wurde das 1,4-fache bis 1,9-fache der 31-tägigen Summen erreicht. Nur in einigen Teileinzugsgebieten wurde in einem 5-tägigen Zeitraum das 2-fache überschritten (Aare, Bodensee, Neckar und oberer Main.

Im **Donaugebiet** treten bei der 31-tägigen Summe die Einzugsgebiete der unteren Donau (Naab und Regen) sowie des oberen und unteren Inns hervor. Hier wurden das 1,9- bzw. 1,8 fache des vergleichbaren Klimamittels erreicht, während die übrigen Teileinzugsgebiete der Donau das 1,4 bis 1,7-fache aufwiesen. Bei der 5-tägigen größten Niederschlagssumme treten der untere Inn mit dem Faktor 3,4 und das Einzugsgebiet der Isar mit dem Faktor 3,1 hervor. Aber auch die Werte der anderen Teileinzugsgebiete (Faktoren 2,1 bis 2,9) belegen, dass das gesamte Donaugebiet diesem mehrtägigen intensiven Dauerniederschlagsereignis ausgesetzt war.

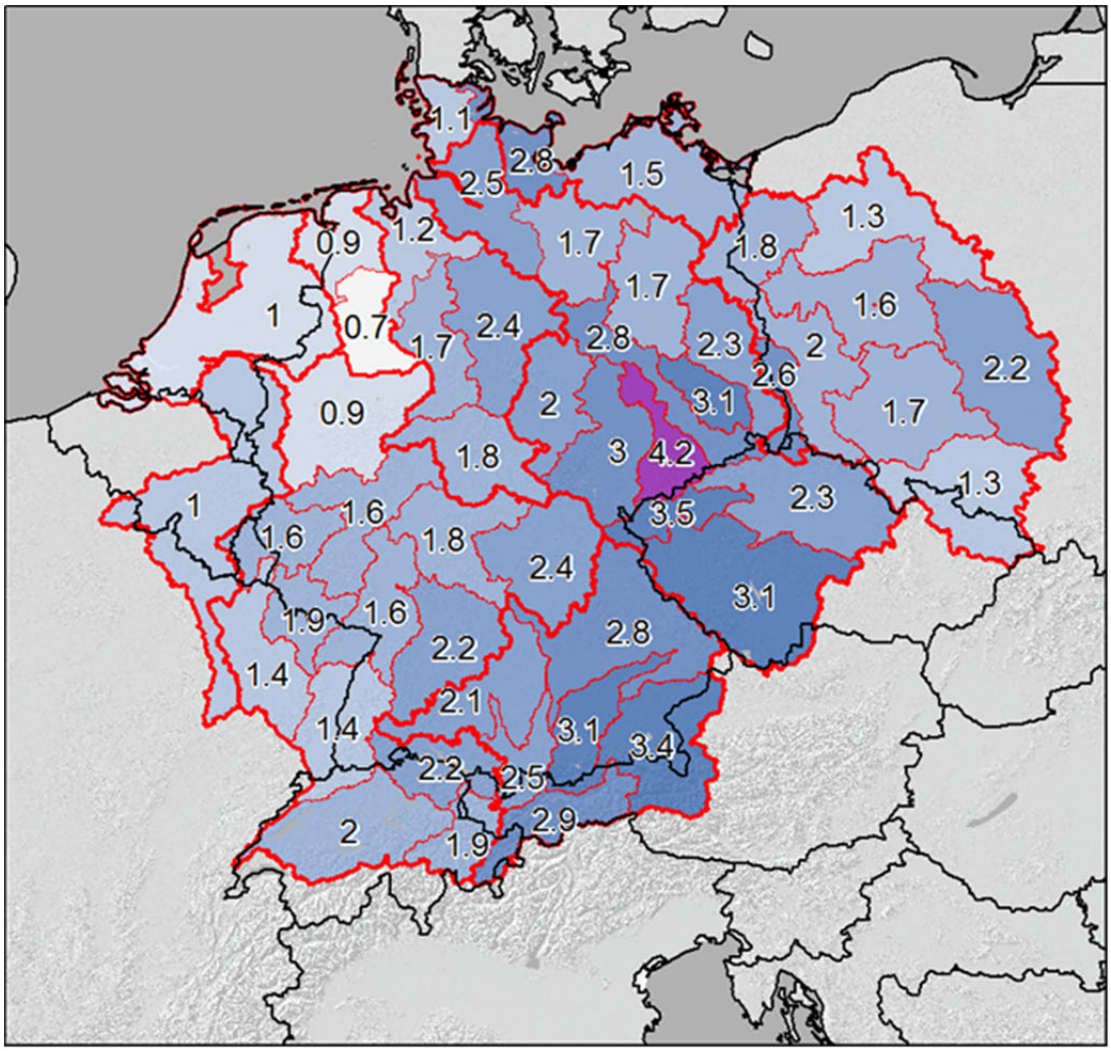


Abb. 8.21: Verhältnis der größten 5-Tagessumme des Niederschlages in der Zeitspanne 25. April bis 05. Juni zum vieljährigen Mittel der größten 5-Tagessumme der Zeitreihe 1961/1990 für 50 Teileinzugsgebiete in Mitteleuropa

Im **Elbegebiet** wurden im Mai* 2013 von allen betrachteten Gebieten bei beiden Kennwerten die höchsten Abweichungen vom Referenzwert erreicht. Auch ist das Elbegebiet flächenmäßig am intensivsten betroffen. So erreichten die 31-tägigen Summen in sieben von dreizehn Gebieten Werte von 1,9 und höher. In fünf Teileinzugsgebieten wurde sogar das 3-fache der 5-tägigen Niederschlagssummen überschritten. Hierbei ragt das Einzugsgebiet der Mulde heraus, wo das 4,2-fache des 5-tägigen höchsten Klimamittelwertes erreicht wurde.

Die Teileinzugsgebiete der **Oder** wiesen ebenfalls großflächig übernormale Werte auf. Für die 31-Tagessummen und 5-Tagessummen wurde das 1,2- bis 1,8-fache bzw. 1,3- bis 2,2-fache (Teileinzugsgebiet Neiße 2,6-fache) erreicht.

Die im Mai* 2013 aufgetretenen Werte des **Emsgebiet**es und einiger **Küstengebiete der Nord- und Ostsee** entsprachen dem Klimamittel der Periode 1961/1990 oder lagen teilweise sogar darunter. Ausnahme hiervon bilden die Einzugsgebiete der Tideelbe und der Trave, deren Werte deutlich oberhalb des Klimamittels lagen.

8.3.3 Entwicklung hoher Niederschlagssummen in der Zeitreihe 1950/2013

Zur Analyse zeitlicher Veränderungen der 31- und 5-Tagessummen des Niederschlags im Mai* 2013 (vgl. Kap. 8.2.1) werden Zeitreihen der Periode 1950/2013 für ausgewählte Teileinzugsgebiete ausgewertet. Als Datengrundlage dient das bereits im vorangegangenen Kap. 8.2.2 beschriebene und für Teileinzugsgebiete aggregierte Rasterdatenkomposit für Mitteleuropa. Für die Stromgebiete von Weser, Rhein, Donau und Elbe wurde jeweils das Teileinzugsgebiet ausgewählt, das die höchste Abweichung der 5-tägigen Niederschlagsumme im Vergleich zum Klimamittel aufweist (vgl. Kap. 8.2.2).

In Abb. 8.22 bis Abb. 8.25 ist zur Orientierung zusätzlich die lineare Trendgerade eingezeichnet, die nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt wurde (LSM-Methode, vgl. Kap. 8.2). An Stelle einer statistischen Signifikanzprüfung (vgl. Kap. 8.2) erfolgt hier eine qualitative Beschreibung des Trendverhaltens sowie eine Einordnung der Niederschlagskennwerte Zeitspanne Mai* 2013 durch Ausweisung des Ranges innerhalb der verfügbaren Beobachtungsreihe.

Die in der Periode Mai* 2013 aufgetretenen Niederschlagswerte (sowohl 31-Tagessummen als auch 5-Tagessummen) sind in allen ausgewählten Teileinzugsgebieten die höchsten der untersuchten Zeitreihe 1950/2013. Im Einzugsgebiet von **Aller und Leine** liegt die 31-tägige Summe des Jahres 2013 nur unwesentlich über einem Ereignis aus dem Jahr 1981 sowie einem weiteren Ereignis aus dem Jahr 1984. Die Trendgerade verweist auf eine leicht abnehmende Tendenz, da in den 50er- und 60er-Jahren vergleichsweise häufig hohe Niederschläge aufgetreten sind. Bei der 5-tägigen Summe ist eine leichte Zunahme der Niederschlagshöhen zu erkennen. Auch hier belegt das Ereignis aus 2013 den höchsten Rang und überragt um ca. 10 % die Ereignisse aus den Jahren 1981, 1984 und 2007.

Im Einzugsgebiet des **oberen Mains** (Quelle bis Pegel Würzburg) teilt sich die 31-tägige Summe des Jahres 2013 den Rang mit einem Ereignis aus dem Jahr 1984. Die Zeitreihe weist eine zunehmende Tendenz auf. Diese ist jedoch einer ca. zehnjährigen Periode zu Beginn der Reihe mit vergleichsweise geringen Werten geschuldet. Vergleichbar mit dem unteren Inn (s.u.) treten aber in den 60er-Jahren ebenfalls häufig hohe Niederschläge auf. Bei der 5-tägigen Summe ist eine eindeutige Zunahme der Niederschlagshöhe zu erkennen. Auch hier belegt das Ereignis aus 2013 den höchsten Rang. Anders als im unteren Inngebiet weicht dieser Wert aber nur minimal von gleich drei Ereignissen ab, die in den Jahren 2004, 2006 und 2007 stattgefunden haben.

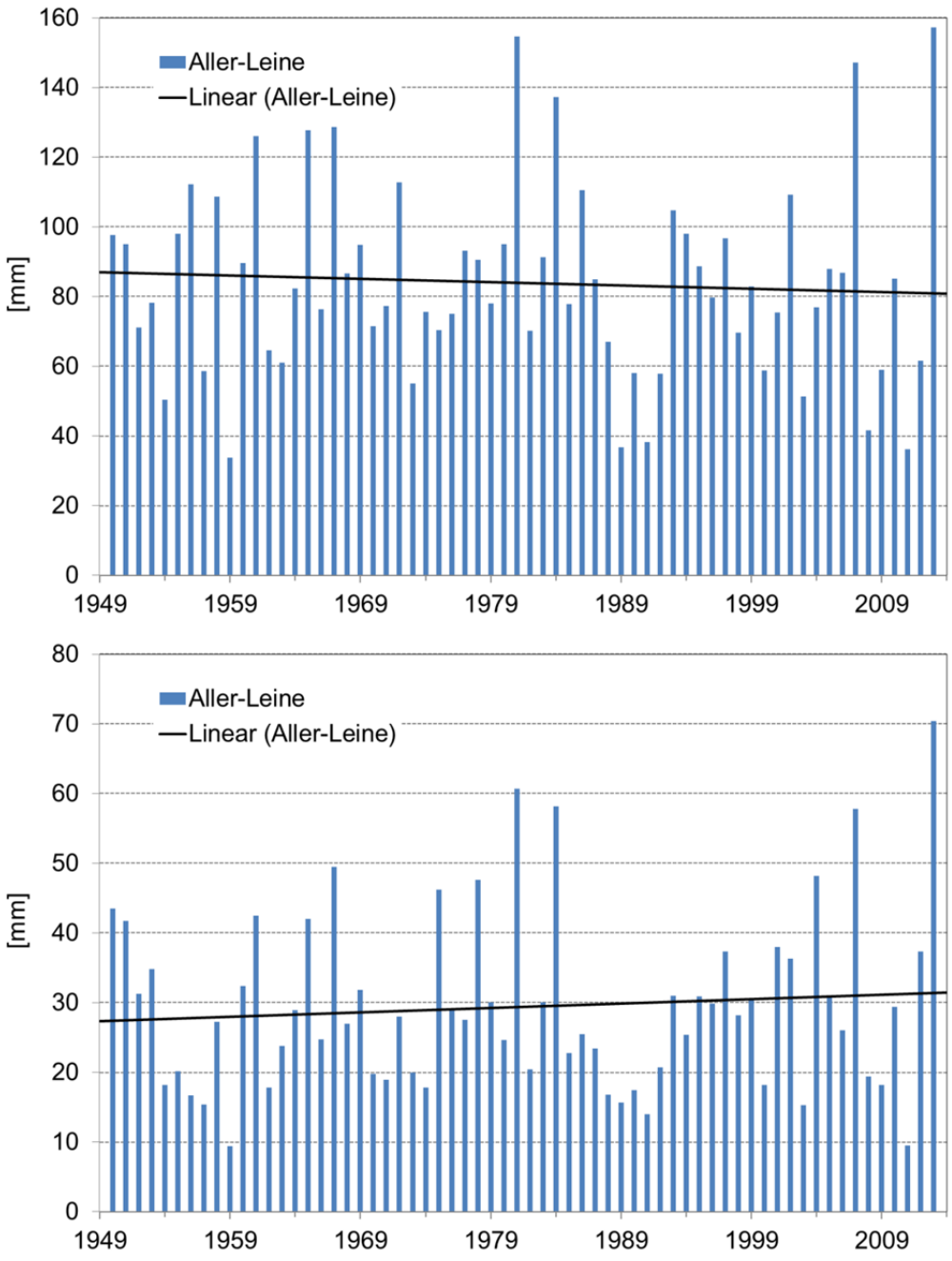


Abb. 8.22: Gebietsmittel Aller-Leine: größte 31- (oben) und 5-Tagessummen (unten) des Niederschlages in den Zeitspannen 15. April bis 15. Juni bzw. 25. April bis 05. Juni im Zeitraum 1950/2013

Auch im Einzugsgebiet des **unteren Inns** (Inngebiet unterhalb der deutsch-österreichischen Grenze bei Oberaudorf bis zur Mündung in die Donau) belegt der Mai* 2013 hinsichtlich beider Niederschlagskennwerte den höchsten Rang. Während für die 31-tägige Niederschlagssumme jedoch noch vergleichbare Werte in den 60er-Jahren aufgetreten sind, überragt die die 5-tägige Niederschlagssumme um ca. 70 % den zweithöchsten im Jahr 2010 beobachteten Wert. Beide Kennwerte weisen eine leichte (31-tägige Summe) bzw. starke zunehmende Tendenz auf (5-tägige Summe). Letztere ist allerdings dem außerordentlich extremen Ereignis im Jahr 2013 zuzuschreiben.

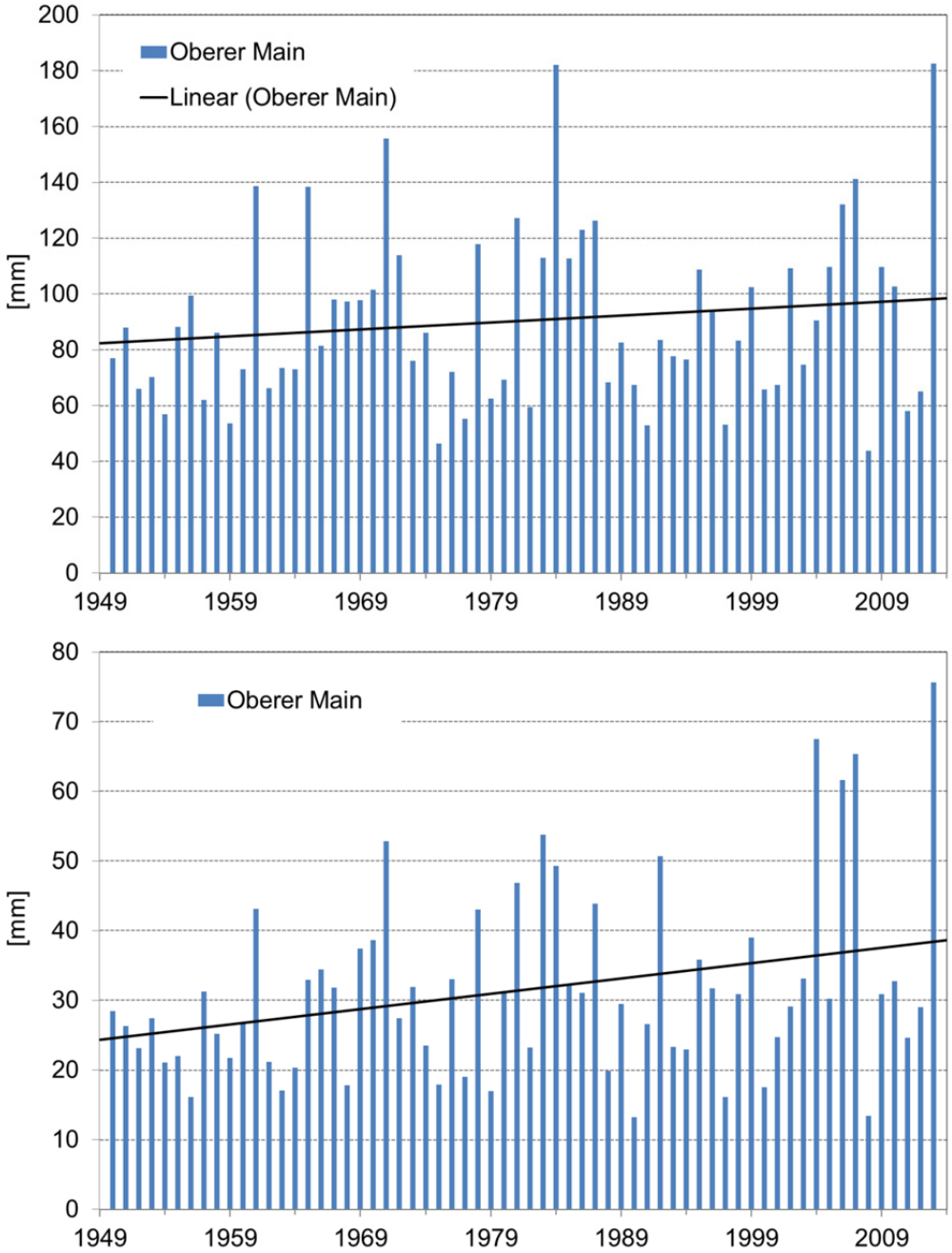


Abb. 8.23: Gebietsmittel oberer Main: größte 31- und 5-Tagessummen des Niederschlages in den Zeitspannen 15. April bis 15. Juni bzw. 25. April bis 05. Juni im Zeitraum 1950/2013

Die Besonderheit des Ereignisses im Einzugsgebiet der **Mulde** ist in beiden Kennwerten im direkten Vergleich mit den übrigen Teileinzugsgebieten zu sehen. In beiden Kennwerten überragt das Ereignis von 2013 deutlich die früheren Werte. Trotzdem weisen die 31-tägigen Summen nur eine leichte Zunahme auf, da die nächst höheren Ereignisse verteilt über die Zeitreihe in den Jahren 1961, 1965, 1986 und 1995 aufgetreten sind. Die 5-tägigen Summen weisen eine deutliche Zunahme in der betrachteten Zeitreihe auf. Dies ist aber auf die herausragende Rolle des Ereignisses im Jahr 2013 zurückzuführen. Den zweiten Rang teilen sich gleich vier Ereignisse aus den 70er- und 80er-Jahren (1978, 1981, 1986 und 1995).

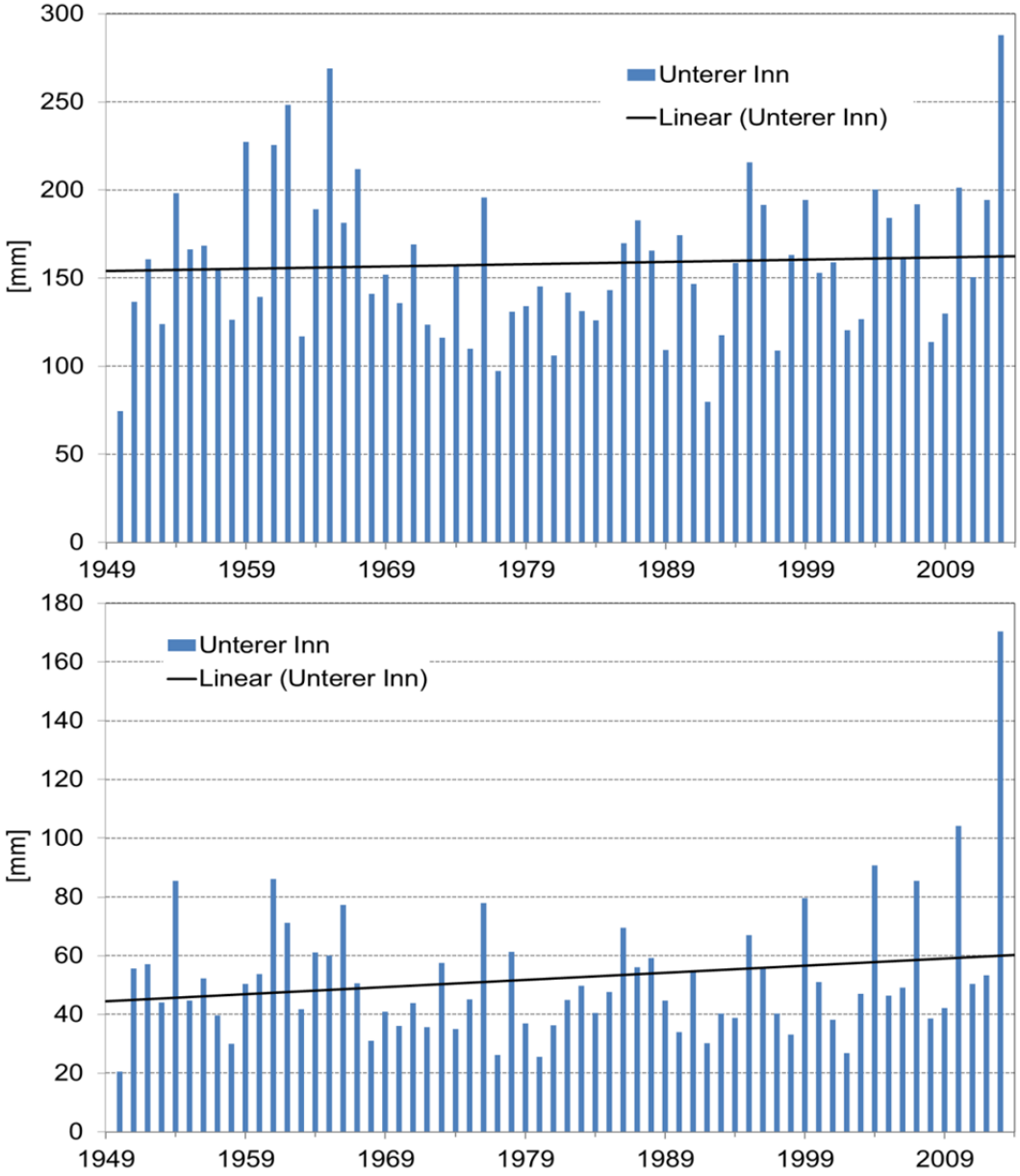


Abb. 8.24: Gebietsmittel unterer Inn: größte 31- und 5-Tagessummen des Niederschlages in den Zeitspannen 15. April bis 15. Juni bzw. 25. April bis 05. Juni im Zeitraum 1950/2013

8.3.4 Mögliche zukünftige Entwicklung hochwasserauslösender Niederschläge in den Monaten Mai und Juni

Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, ob sich die Vorbedingungen für Hochwassersituationen wie der von 2013 in Zukunft häufen könnten. Diese Bedingungen werden wie in den vorangehenden Kapiteln anhand der 31- und 5-tägigen Summe des Niederschlags beschrieben (als Anzeiger für den Sättigungsgrad des Bodens bzw. die Intensität mehrtägiger Niederschlagsereignisse). Anders als bei den obigen Auswertungen wird nun jedoch nicht die Änderung der höchsten Jahreswerte, sondern die Änderung der Überschreitenshäufigkeit

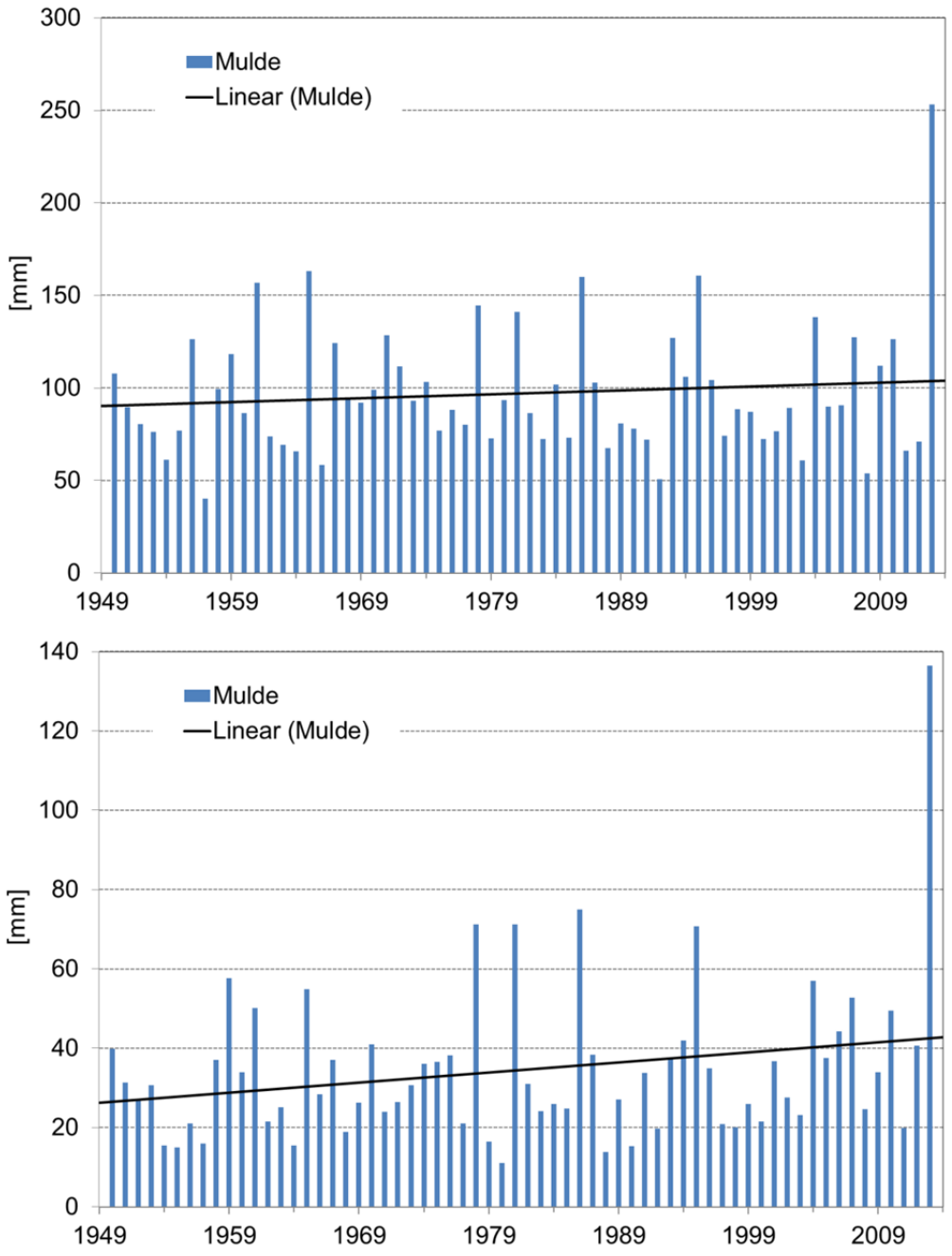


Abb. 8.25: Gebietsmittel Mulde: größte 31- und 5-Tagessummen des Niederschlages in den Zeitspannen 15. April bis 15. Juni bzw. 25. April bis 05. Juni im Zeitraum 1950/2013

eines hohen Grenzwertes in den Monaten Mai und Juni dargelegt. Dieser Grenzwert ist definiert als das 90-%-Perzentil der Gegenwartssituation; d.h. in der 30-jährigen Periode 1961/1990 wird dieser Grenzwert in drei Fällen überschritten. Änderungen werden für die ebenfalls 30-jährigen Zeitperioden 2021/2050 ("nahe Zukunft") und 2071/2100 ("ferne Zukunft") ermittelt und grafisch dargestellt (Abb. 8.26 und Abb. 8.27).

Datengrundlage bilden zwei unterschiedliche Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen ("deutsche" Kombination EH5r3-REMO und "britische" Kombination

HCQ0-HRQ0)[15], die aus dem im FP KLIWAS zusammengeführten Datenkollektiv ausgewählt wurden. Die beiden Kombinationen unterscheiden sich hinsichtlich des globalen Klimamodelllaufs (EH5r3 bzw. HCQ0), des regionalen Klimamodells (REMO bzw. HRQ0) und damit auch in der Charakteristik der simulierten Klimaänderungen. Sie geben einen beträchtlichen Teil der derzeit bekannten Unbestimmtheit und Unsicherheit von Klimaprojektionen wieder (vgl. NILSON et al. 2014). Beide Modellkombinationen werden vom mittleren Emissionsszenario A1B angetrieben. Die Auswertung erfolgte auf einem 50 km x 50 km großen Raster.

Hinsichtlich der Überschreitungshäufigkeit des Schwellenwertes für die 31-tägigen Niederschlagssummen zeigen die beiden Projektionen folgende räumliche Muster. Die "deutsche" Modellkombination EH5r3-REMO Modell weist in der nahen Zukunft eine Zone mit Zunahmen von 3 auf 4-7 Fälle im Osten und Süden Deutschlands auf, während der Rest des Landes keine deutliche Änderung zeigt. In der fernen Zukunft verlagern sich die Regionen der stärksten Änderung in den Nordosten und Südosten Deutschlands, wobei der Osten Deutschlands unverändert betroffen bleibt. Das räumliche Muster der britischen Modellkombination HCQO-HRQ0 gleicht für die nahe Zukunft dem der Modellkette EH5r3-REMO, wobei jedoch HCQO-HRQ0 der Nordwesten einen etwas deutlicheren und der Südwesten einen geringeren Anstieg von Überschreitungsfällen aufweist. In der fernen Zukunft zeigen sich deutliche Unterschiede zur erstgenannten Modellkombination. Hier werden deutlich mehr Rasterzellen und mit höheren Fallzahlen (bis 15 Fälle) ausgewiesen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass beide Modelle eine Zunahme langanhaltender regenreicher Witterungsepisoden im Mai und Juni in Teilen Deutschlands simulieren. Die beispielhaft ausgewählten Modelle weisen jedoch unterschiedliche regionale Schwerpunkte auf, in denen besonders viele Fälle langanhaltender niederschlagsreicher Situationen simuliert werden.

Diese Aussagen treffen im Wesentlichen auch für die Anzahl von Fällen außergewöhnlicher 5-tägiger Niederschlagsummen zu. Es zeigen sich vergleichbare Muster, allerdings ist die Steigerung im Vergleich zum 31-tägigen Kennwert insbesondere für die Modellkette HCQO-HRQ0 in der fernen Zukunft noch stärker. Einzelne Rasterzellen zeigen dass 5-Tagessummen, die in der Gegenwartssimulation 3-mal in 30 Jahren überschritten werden, in der fernen Zukunft bis zu 20-mal überschritten werden könnten.

Generell lässt sich auch für diesen Kennwert eine hohe bis sehr hohe Zunahme intensiver Niederschlagsereignisse für weite Teile Deutschlands feststellen. Dabei ist jedoch anzumerken, dass die durchgeführten Analysen individuell für jede Rasterzelle gelten und keine zeitlichen Zusammenhänge zeigen. Hochwasserfördernd bzw. -auslösend für die großen Ströme werden die Niederschläge jedoch erst, wenn viele Zellen gleichzeitig bei einem Ereignis betroffen sind und darüber hinaus auch weitere hydrologische Rahmenbedingungen gegeben sind (z.B. geringe Verdunstung etc.; vgl. Kap. 2). Da sich diese Zusammenhänge allein auf Basis der vorgestellten statistischen Niederschlagskennwerte nicht erschließen, müssen die Klimaprojektionen mit hydrologischen Modellen gekoppelt werden.

[15] EH5r3 = Dritte Realisierung des AOGCM ECHAM5-MPIOM; HCQ0 = AOGCM HADCM3 in mittlerer Sensitivität (Q0).
Die Modellkombination EH5r3-REMO wurde durch MPI-M und Climate Service Center erstellt (beide Hamburg); die Modellkombination HCQ0-HRQ0 durch das UK MetOffice (Exeter, Vereinigtes Königreich).

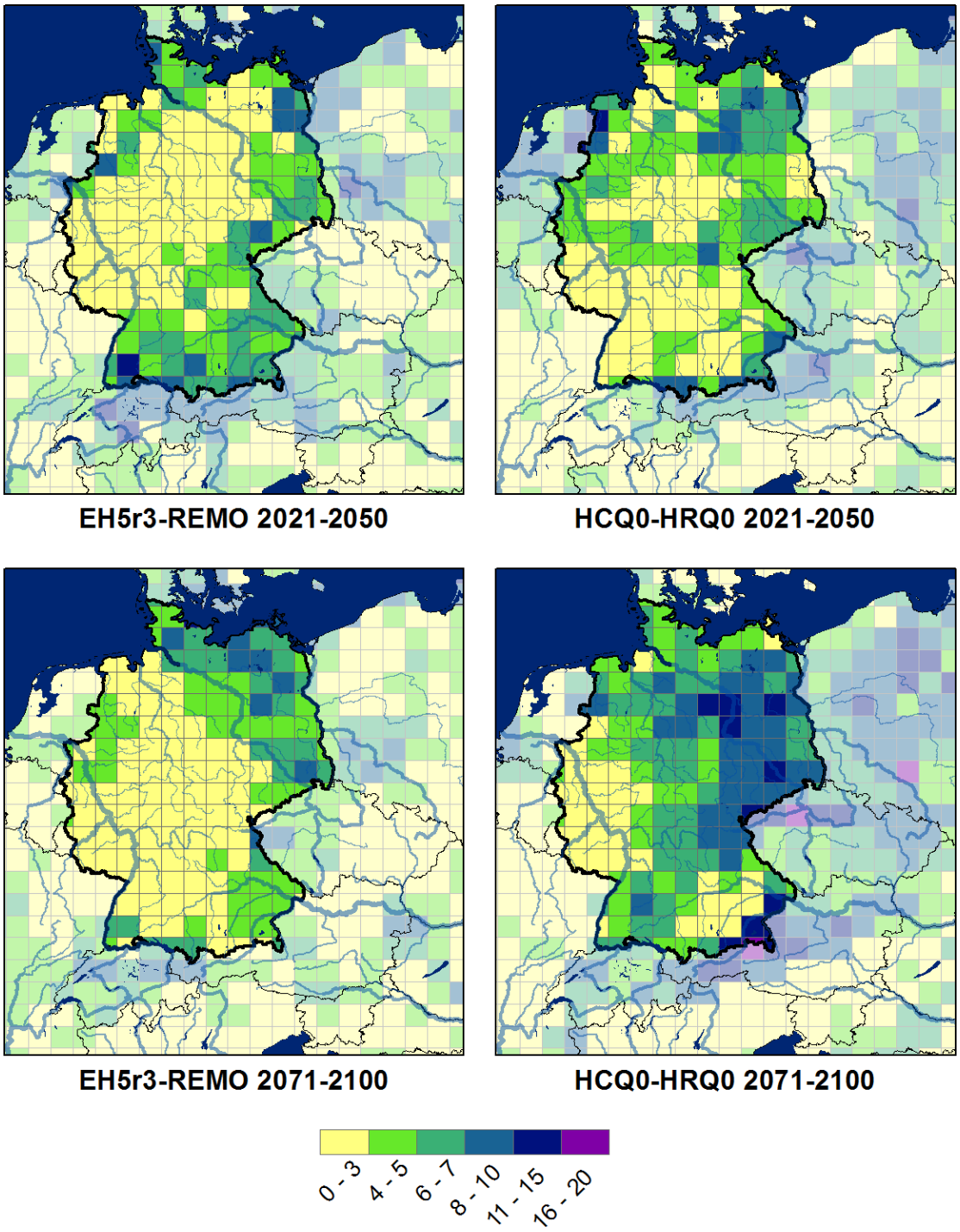


Abb. 8.26: Anzahl der Tage, an denen die über 31 Tage gemittelte größte Niederschlagssumme in den Monaten Mai und Juni einen Grenzwert überschreitet.
Berechnet für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für zwei ausgewählte Klimaprojektionen (alle SRES A1B; VAN DER LINDEN & MITCHELL 2009). Der Grenzwert ist definiert als 90-%-Perzentil der Gegenwartssituation (3 Fälle während der Jahre 1961/1990 der Kontrollsimulation) (Datenquelle: FP KLIWAS BfG)

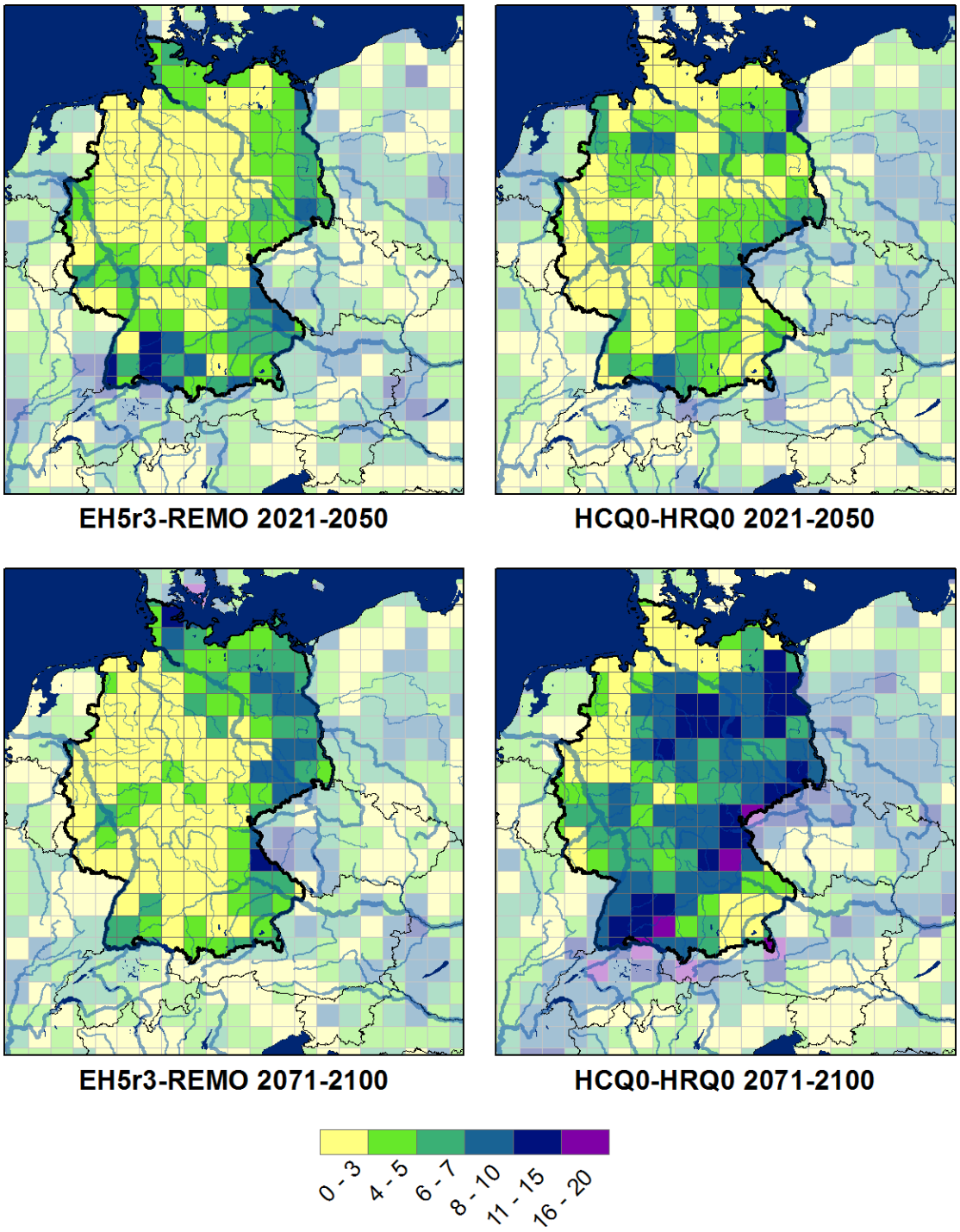


Abb. 8.27: Anzahl der Tage, an denen die über 5 Tage gemittelte größte Niederschlagssumme in den Monaten Mai und Juni einen Grenzwert überschreitet.
Berechnet für die nahe (oben) und ferne Zukunft (unten) für zwei ausgewählte Klimaprojektionen (alle SRES A1B; VAN DER LINDEN & MITCHELL 2009). Der Grenzwert ist definiert als 90-%-Perzentil der Gegenwartssituation (3 Fälle während der Jahre 1961/1990 der Kontrollsimulation), (Datenquelle: FP KLIWAS BfG)

8.3.5 Mögliche zukünftige Entwicklung der Hochwasser im Rhein- und Elbegebiet

Zur Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die jährlichen Hochwasserabflüsse wurden 21 regionale Klimaprojektionen mit hydrologischen Modellen gekoppelt. Die Klimaprojektionen entstammen wie im vorangegangenen Kapitel dem im FP KLIWAS zusammengeführten Datenkollektiv. Zur Berechnung der Abflüsse wurden semidistributive konzeptionelle Wasserhaushaltsmodelle eingesetzt (vgl. NILSON et al., 2014). Auswertungen der resultierenden 21 Abflusssimulationen werden hier beispielhaft für den Rhein am Mittelrheinpegel Kaub und für die Elbe am kurz unterhalb der Saalemündung gelegenen Pegel Barby (Mittelelbe) erläutert. Ergebnisse zu weiteren Pegeln finden sich bei NILSON et al. (2014).

Für die Hochwasseranalyse wurden zwei Abflusskennwerte ausgewählt und aus den berechneten Ganglinien der Abflussprojektionen ermittelt:

> D_HM1Q: Zeitpunkt (Datum) des Auftretens des höchsten Tagesmittelwertes im hydrologischen Jahr (HM1Q) und Auszählung der Werte, die in der Zeitspanne Mai/Juni in 30-jährigen Zeiträumen auftreten

> MHM5Q: größtes 5-tägiges Mittel des Abflusses im hydrologischen Jahr sowie im hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahr, gleitend gemittelt über 31 Jahre

Anhand des Kennwertes D_HM1Q wird der Frage nachgegangen, ob infolge des Klimawandels künftig mit mehr Hochwasserereignissen in der Zeitspanne Mai/Juni zu rechnen ist. Die Ergebnisse der 21 Abflusssimulationen wurden der Übersichtlichkeit halber für 7 Modellfamilien gemittelt, die jeweils das gleiche globale Klimamodell als Antrieb haben. Ferner wurden die Resultate des Gesamtensembles gemittelt. Das Ergebnis ist für den Pegel Kaub in Abb. 8.28 und für den Pegel Barby in Abb. 8.29 dargestellt.

Hinsichtlich der Entwicklung der Anzahl der Hochwasserereignisse in den Monaten Mai/Juni offenbart sich eine große Bandbreite der Ergebnisse. Zwischen den einzelnen durch das antreibende globale Klimamodell identifizierten Modellfamilien zeigen sich systematische Unterschiede. Das Ensemble-Mittel weist auf eine mögliche geringfügige Zunahme in der Häufigkeit von Hochwasserereignissen in diesem Zeitraum am Pegel Barby und auf eine leichte Verringerung am Pegel Kaub hin. Allerdings ist diese Aussage aufgrund der großen Streuung der Ergebnisse noch mit großen Unsicherheiten verbunden und nicht als belastbar einzustufen.

Der Kennwert MHM5Q, angewendet auf die 21 Abflussprojektionen, gibt Aufschluss darüber, ob die jährlichen Hochwasserabflüsse zukünftig höher ausfallen werden oder nicht. In Abb. 8.30 und Abb. 8.31 ist das Änderungssignal für 31-jährig gleitende Zeiträume in der Periode 1950/2100 gegenüber der Klimastandardnormalperiode 1961/1990 dargestellt. Das Änderungssignal ergibt sich als Median (50-%-Quantil) des Gesamtensembles von 21 Abflussprojektionen. Die Werte für die in den vorangehenden Absätzen analysierte "nahe" und "ferne" Zukunft" (2021/2050, 2071/2100) sowie die Bezugsperiode für die Gegenwart (1961/1990) sind für die Auswertungen des hydrologischen Jahres als Punkte hervorgehoben. Die Unsicherheitsbereiche der letztgenannten Werte wurden als sog. Szenarienkorridore für die jährlichen MHM5Q erfasst und betragen (vgl. NILSON et al. 2014):

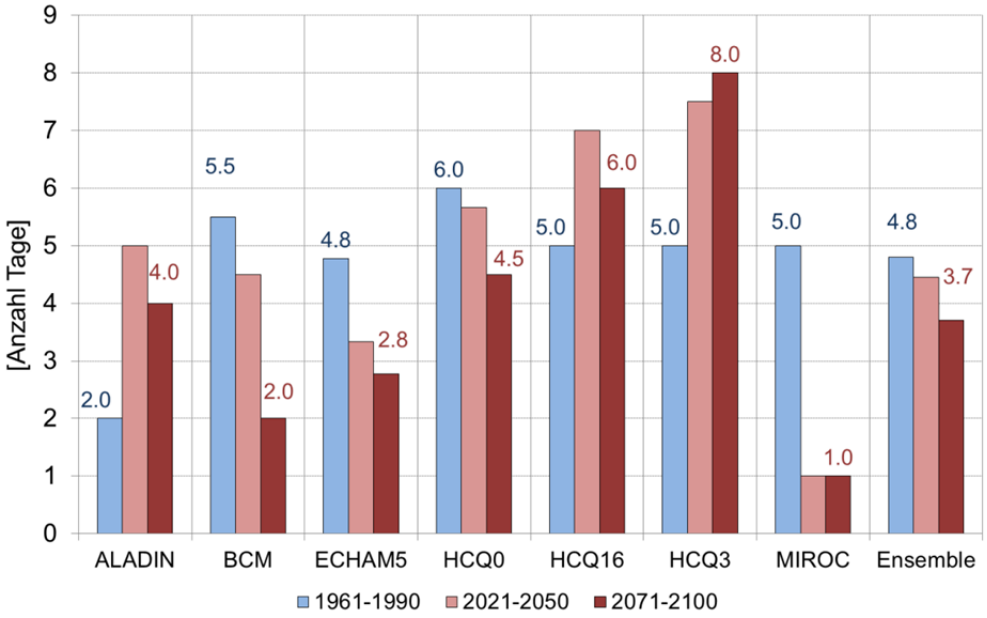


Abb. 8.28: Pegel Kaub/Rhein: Anzahl der jährlichen höchsten Tageswerte des Abflusses (HM1Q) eines hydrologischen Jahres, die im Mai oder Juni in den 30-jährigen Zeitreihen 1961/1990, 2021/2050 und 2071/2100 auftreten

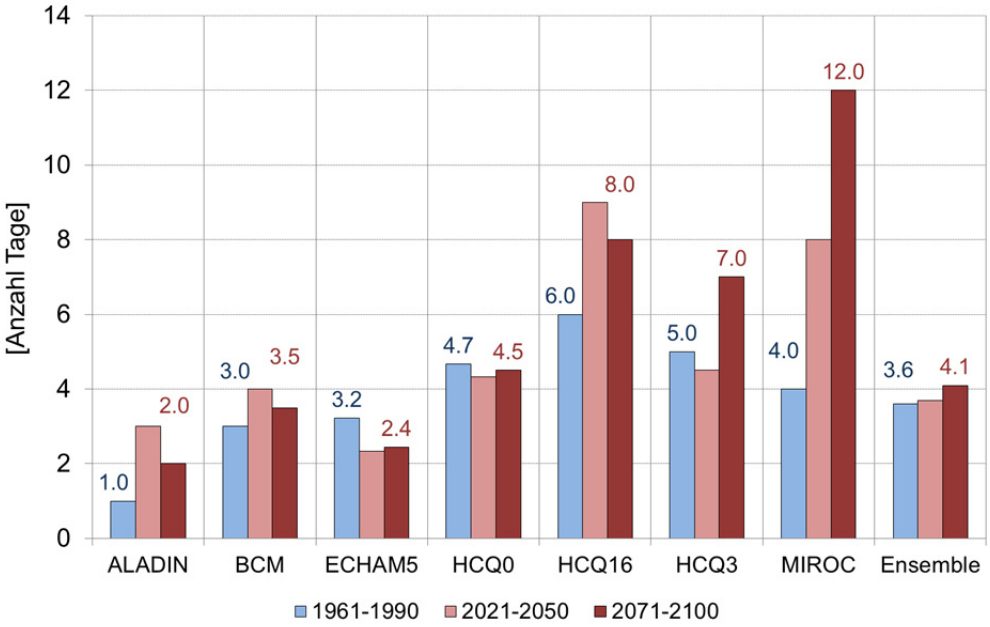


Abb. 8.29: Pegel Barby/Elbe: Anzahl der jährlichen höchsten Tageswerte des Abflusses (HM1Q) eines hydrologischen Jahres, die im Mai oder Juni in den 30-jährigen Zeitreihen 1961/1990, 2021/2050 und 2071/2100 auftreten

Die Ergebnisse beruhen auf dem SRES-A1B-Emissionsszenario und den mit globalen und regionalen Klimamodellketten berechneten Abflussprojektionen. Die verfügbaren 21 Klima- und Abflussprojektionen wurden für das jeweils antreibende globale Klimamodell gemittelt. Die Namen stehen für das eine Modellkette antreibende globale Klimamodell (NILSON et al. 2014, Datenquelle: FP KLIWAS).

> Pegel Kaub: nahe Zukunft; 0 % bis +15 %
ferne Zukunft; 0 % bis +20 %

> Pegel Barby: nahe Zukunft; -15 % bis + 5 %
ferne Zukunft; -15 % bis + 5 %

Die Ergebnisse weisen trotz der erheblichen Bandbreite der Ergebnisse auf Richtungen der Entwicklungen hin. So wird für den Rheinpegel **Kaub** eine Zunahme der mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse projiziert. Für den Pegel **Barby** lassen die Ergebnisse es jedoch sogar möglich erscheinen, dass die mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse in der Jahrhundertmitte (roter Punkt, Periode 2021/2050) abnehmen könnten.

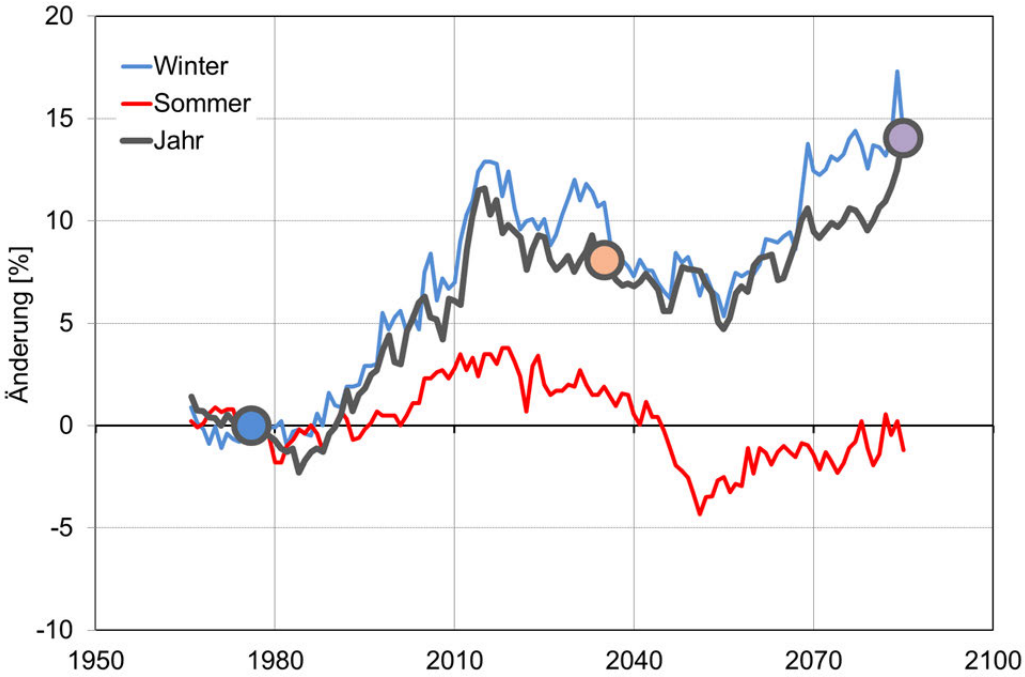


Abb. 8.30: Mögliche Änderungen der höchsten 5-Tagesmittelwerte des Abflusses (HM5Q) am Mittelrheinpegel Kaub für hydrologische Jahre und Halbjahre im Zeitraum 1950/2100 als Reaktion auf den Globalen Klimawandel unter Annahme des A1B-SRES-Emissionsszenarios. Dargestellt ist jeweils das 50-%-Quantil (Median) von 21 Abflussprojektionen der für 31-jährig gleitende Zeiträume berechneten Änderungen gegenüber der Klimastandardnormalperiode 1961/1990. Mit großen Kreisen hervorgehoben sind die Änderungen des hydrologischen Jahres für die nahe und ferne Zukunft (2021/2050, 2071/2100) sowie die Bezugsperiode für die Gegenwart (1961/1990). (Datenquelle: FP KLIWAS)

Den Grafiken zu den möglichen Änderungen der HM5Q ist zu entnehmen, dass dem oben skizzierten Verhalten langperiodische Schwankungen überlagert sind und die Änderungssignale in einigen Dekaden von diesem Verhalten abweichen. Auch zeigt sich ein unterschiedliches Verhalten der Hochwasserentwicklung in den hydrologischen Halbjahren. So deutet eine Mehrzahl der Abflusssimulationen (Median) für den **Mittelrheinpegel Kaub** im hydrologischen Winterhalbjahr auf eine ansteigende Tendenz bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts hin (+ 8 %). Für die zweite Jahrhunderthälfte wird eine weitere leichte Erhöhung (+ 14 %) simuliert. Die Entwicklung im Sommerhalbjahr lässt für die Mehrzahl der Projektionen da-

gegen keine Änderung erwarten. Die Zunahmen des jährlichen HM5Q werden somit an diesem Pegel wesentlich durch die Entwicklung der winterlichen Hochwasser bestimmt.

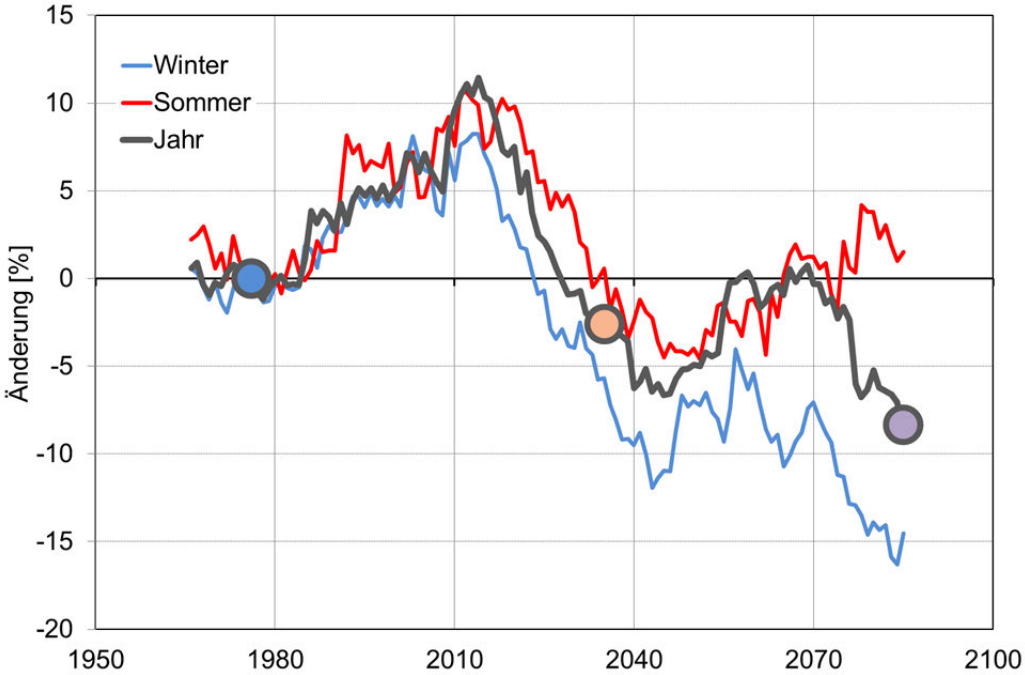


Abb. 8.31: Mögliche Änderungen der höchsten 5-Tagesmittelwerte des Abflusses (HM5Q) an der mittleren Elbe Pegel Barby für hydrologische Jahre und Halbjahre im Zeitraum 1951/2100 als Reaktion auf den Globalen Klimawandel unter Annahme des A1B-SRES-Emissionsszenarios.
Dargestellt ist jeweils das 50-%-Quantil (Median) von 20 Abflussprojektionen der für 31-jährig gleitende Zeiträume berechneten Änderungen gegenüber der Klimastandardnormalperiode 1961/1990. Mit großen Kreisen hervorgehoben sind die Änderungen des hydrologischen Jahres für die nahe und ferne Zukunft (2021/2050, 2071/2100) sowie die Bezugsperiode für die Gegenwart (1961/1990). (Datenquelle: FP KLIWAS)

Auch für die **Mittelelbe (Pegel Barby)** wird im Winterhalbjahr nach einem Anstieg zu Beginn des 21. Jahrhunderts tendenziell ein Rückgang der HM5Q-Werte in der fernen Zukunft berechnet. Die Hochwasserentwicklung im Sommerhalbjahr weist bis zur Mitte des aktuellen Jahrhunderts ein mit dem Winter vergleichbares Verhalten auf. Nach diesem Zeitraum kommt es allerdings wieder zu einem Anstieg der Hochwasserwerte, so dass die Zeitreihe der sommerlichen Hochwasserwerte als zeitlich stationär eingeordnet werden kann. Die Entwicklung der jährlichen HM5Q-Werte liegt zwischen dem sommerlichen und winterlichen Hochwasserereignissen, was darauf hindeutet, dass das Hochwassergeschehen auch zukünftig durch Hochwasser in beiden Jahreszeiten geprägt sein wird.

8.3.6 Fazit Klimawandel und Hochwasser

Bei den gewählten Niederschlagskennwerten lassen sich für die analysierte Zeitspanne Mai* bzw. die Monate Mai und Juni in den Beobachtungsreihen der jüngsten Vergangenheit keine einheitlichen Tendenzen bzgl. einer Zunahme der Niederschlagshöhe erkennen. Antworten

auf die Frage, ob Anzeichen des Globalen Klimawandels bereits erkennbar sind, lassen sich aufgrund der vergleichsweise kurzen Beobachtungsperiode und der hohen Variabilität extremer Niederschläge nicht absichern. Klimamodelle projizieren jedoch für die Zukunft in der hier betrachteten Zeitspanne in einigen Regionen Deutschlands eine Zunahme der Hochwasserereignisse. Die Ergebnisse weisen jedoch eine große Bandbreite auf. Es zeigt sich, dass die Unsicherheiten und die Modelldifferenzen umso größer werden, je räumlich detaillierter die Analysen und je extremer die betrachteten Niederschlagskennwerte sind

Hinsichtlich der projizierten zukünftigen Entwicklung der Hochwasserabflüsse in den Monaten Mai und Juni zeigt sich für die hier exemplarisch betrachteten Pegel und Kennwerte kein einheitliches Bild. Bei Betrachtung des Ensemblemittelwertes lässt sich eine geringe Zunahme in der Auftrittshäufigkeit von Hochwasserereignissen am Pegel Barby und eine Abnahme am Pegel Kaub feststellen. Die Ergebnisse schwanken jedoch je nach betrachteter hydrologischer Klimamodellwirkungskette sehr stark und weisen auch unterschiedliche Vorzeichen auf. Eine große Bandbreite zeigen auch die zukünftigen Entwicklungen der Hochwasserabflüsse. Die Projektionen legen es jedoch nahe, dass die Winterhochwasser am Pegel Kaub/ Rhein zunehmen und sich ab der Mitte des 21. Jahrhunderts auf einem höheren Niveau einpendeln könnten. Die Sommerhochwasser weisen hier jedoch keine wesentlichen Veränderungen auf. Am Pegel Barby/Elbe deutet die Mehrzahl der Projektionen für die nächsten Dekaden auf eine Zunahme der mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse hin. Anschließend wird jedoch eine Abnahme unter das Niveau der Gegenwartssimulation projiziert, die im hydrologischen Winter sogar besonders ausgeprägt ist. Im Sommer ist wie am Pegel Kaub wiederum keine grundsätzliche Änderung erkennbar.

Die getroffenen Aussagen gelten zunächst nur für das mittlere Hochwasserverhalten und für Hochwasser mit vergleichsweise hohen Eintrittswahrscheinlichkeiten (bis ~ HQ_{50}). Änderungen bzgl. Extremhochwasser (> HQ_{50}) erfordern noch intensivere Analysen des vorhandenen Datenmaterials sowie eine Aktualisierung der nunmehr verfügbaren aktuellen globalen und regionalen Klimamodelle.

9 Zusammenfassung / Summary

Zahlreiche Tiefdruckgebiete dominierten im Jahre 2013 das **Wettergeschehen** in Deutschland und Mitteleuropa bereits von der letzten Aprilwoche an; sie behielten diese beherrschende Rolle mit nur wenigen Unterbrechungen bis in die erste Juniwoche hinein und sorgten mit großflächigen Starkniederschlägen und Dauerregen in den verschiedenen Flussgebieten für hohe Regenmengen. In der 39-tägigen, bis zum 03. Juni anhaltendenden Periode fiel in vielen Flussgebieten mehr als das Doppelte bis hin zum Dreifachen der mittleren Niederschlagsmenge. Der Kulminationszeitraum begann am 28. und 29. Mai, als zunächst bundesweit gesehen großflächiger Dauerregen eintrat, der sich im Süden und Südosten Deutschlands vom 30. Mai bis zum 02./03. Juni intensivierte. Hier wurden enorme Niederschlagsmengen von gebietsweise über 200 l/m² beobachtet.

Als begünstigender Faktor für die Hochwasserentstehung ist die kontinuierliche Füllung der **Bodenwasserspeicher** zu nennen, die entsprechend der vorherrschenden Wetterlagen in drei mehrtägigen Perioden (26. April bis 16. Mai, 17. Mai bis 24. Mai und 25. Mai bis 27. Mai) erfolgte. Ende Mai wiesen rund 40 Prozent der Fläche Deutschlands so hohe Bodenfeuchtewerte auf, wie sie seit Beginn der Messungen im Jahr 1962 noch nicht beobachtet wurden.

Die großflächige Überregnung betraf Mitteleuropa beinahe zur Gänze, wies dabei trotzdem eine raum-zeitliche Differenzierung auf: Die Niederschlagsschwerpunkte lagen in den Stromgebieten zeitlich um wenige Tage versetzt, wodurch **Hochwasserablauf und -ausmaß** im Rhein- und Wesergebiet eher gedämpft, dagegen im Einzugsgebiet von Donau und Elbe verschärft wurden. Letzteres war im Donaugebiet durch die allmähliche Verlagerung der Intensivniederschläge von West nach Ost, d.h. in Fließrichtung der Hochwasserwelle der Fall. Im Elbegebiet stellte sich die Situation komplexer dar, weil hier zunächst Teile Böhmens sowie Mulde und Saale betroffen waren, ehe dann eine weitere Überregnung des Gebietes, ähnlich der Donau in stromabwärtiger Richtung, einsetzte.

Die **Weser** war der erste der großen deutschen Ströme, der von den Hochwasserereignissen des Mai und Juni 2013 erfasst wurde. Vom 26.05. an bewegte sich eine langgestreckte Hochwasserwelle mit sattelförmigem, breitem Aufbau den Fluss hinab; ein Scheitelniveau in der Größenordnung eines zweijähr1ichen Ereignisses wurde mit kleineren Schwankungen auf der gesamten Fließstrecke rund 10 Tage lang gehalten. Damit ist hier das Hochwasser des Jahres 2013 an dieser Bundeswasserstraße und ihren großen Nebenflüssen im Vergleich zu den Geschehnissen in den anderen Flussgebieten als von untergeordneter Bedeutung einzustufen.

Entsprechend der raumzeitlichen Niederschlagsverteilung im **Rheingebiet** wurden besonders extreme Hochwassersituationen in der baden-württembergischen Teilregion, insbesondere im oberen Neckargebiet sowie in den Bodenseezuflüssen verzeichnet. Hier traten Scheiteldurchflüsse mit Jährlichkeiten um oder sogar über l00 Jahre auf. Im Rheinstrom selbst lag die höchste Durchfluss-Jährlichkeit bei 30-50 a im Hochrhein zwischen den Einmündungen von Thur und Aare. Der Einsatz von Retentionsmaßnahmen in Frankreich, Baden-Württemberg

und Rheinland-Pfalz führte zu einer Abminderung der Rheinwasserstände je nach Teilstrecke von bis zu 29 cm im mittleren Oberrhein und noch maximal 12 cm im Niederrhein. Damit einher ging eine Verringerung der statistischen Größenordnung der Scheitelabflüsse, die sich zwischen Aare- und Moselmündung in einem Wiederkehrintervall von 10-20 Jahren bewegten. Von der Moselmündung an abwärts waren Rheinstrom und sein weiteres Einzugsgebiet nur mehr in geringem Umfang von diesem Hochwasserereignis betroffen.

Die **Donau**, deren Einzugsgebiet im Juni 2013 nahezu flächendeckend von Hochwasser betroffen war, verzeichnete bei diesem Ereignis insgesamt drei Hochwasserwellen. Stromab der Isarmündung wurden dabei über längere Flussabschnitte neue HHW registriert. Die erste und abflussstärkste Hochwasserwelle, ausgehend vom Inn, baute sich sehr rasch ab dem Bereich Passau mit einem Scheitelwasserstand am 03.06.2013 auf. Ihr Durchflussmaximum betrug 9 800 m³/s, was in der Größenordnung eines 200-500-jährlichen Wiederkehrintervalls liegt (Pegel Achleiten). Die zweite Welle, ausgehend von der oberen Donau, bewegte sich ab dem 02. Juni stromabwärts und gewann aufgrund der Speisung durch die ebenfalls hochwasserführenden Nebenflüsse kontinuierlich an Umfang. Sie erreichte mit ihrem Scheitel den Raum Passau am 06.06.2013. Hinsichtlich der registrierten Wasserstands- und Abflussspitzen und ihrer statistischen Größenordnung blieb sie hinter der ersten Welle zurück (maximal HQ_{100} im Bereich der Isarmündung). Deichbrüche führten ab Deggendorf zu einer effektiven Scheitelkappung, die sich bis Hofkirchen und darüber hinaus deutlich auswirkte. Trotzdem ist festzuhalten, dass die im Juni 2013 registrierten Scheitelwasserstände und -durchflüsse unterhalb von Regensburg an den meisten Pegeln der Bundeswasserstraße Donau zumindest seit Ende des 19. Jahrhunderts noch nicht gekannte historische Höchststände markierten. Eine dritte, größenordnungsmäßig nachrangige Hochwasserwelle entwickelte sich zu Beginn des zweiten Junidrittels in der Donau; es wurden maximal Durchflüsse der Jährlichkeit 2 a verzeichnet.

Mit Ausnahme einiger Regionen an seinem nordöstlichen Rand war im Juni 2013 nahezu das gesamte Einzugsgebiet der **Elbe** von Hochwasser betroffen. Während dabei das obere Elbegebiet trotz enormer Dimensionen die Größenordnung des Rekordhochwassers des Jahres 2002 dennoch unterschritt, baute sich im weiteren Verlauf in der Mittelelbe eine Hochwasserwelle auf einem Niveau auf, das alle bis dato durch regelmäßige Pegelaufzeichnungen dokumentierten früheren Ereignisse in den Schatten stellte. Gestützt durch die Hochwasser in der Mulde und insbesondere in der Saale wurde für die Scheitelabflüsse ab dem Pegel Barby die Größenordnung eines Wiederkehrintervalls von 100-200 Jahren erreicht, die bis zum Wehr Geesthacht Bestand hatte. Zwischen Coswig (Sachsen-Anhalt) und Geesthacht wurden bei Scheiteldurchgang auf einer ununterbrochenen Elbestrecke von rund 350 km neue Pegelhöchststände registriert. Weder Deichbrüche noch die großen gesteuerten Retentionsmaßnahmen (u.a. Talsperren in Tschechien und Deutschland, Rückhalt in der Havelniederung) konnten das Gesamtausmaß des Hochwassers entscheidend beeinträchtigen, wenngleich hieraus lokale Kappungseffekte sowie substanzielle Scheitelabminderungen aufgrund des Zusammenwirkens aller kontrollierten und unkontrollierten Rückhalteeffekte in Höhe von bis zu 75 cm (Pegel Neu Darchau) nachweisbar sind. Angesichts des durch die andauernden und flächendeckenden und intensiven Niederschläge gewaltig anwachsenden Abflussvolumens wurde einmal mehr deutlich, dass hydrologische Ereignisse einer derartigen Dimension nur in begrenztem Umfang beherrschbar sind.

Beim Junihochwasser 2013 wurden in den Flussgebieten von Rhein, Donau, Weser und Elbe erhöhte **Schwebstofffrachten** beobachtet. Als maximale Tagesfracht in den Bundeswasserstraßen wurde eine Schwebstofffracht von ca. 740 000 Tonnen am 03. Juni 2013 an der Donau bei Jochenstein gemessen. Die Gesamtfrachten über das Hochwasserereignis lagen im Rhein im Mittel bei etwa 20 % einer mittleren Jahresfracht. Ähnliches gilt für die Weser. Die Frachten an Elbe und Donau waren, betrachtet in Relation zu den jeweiligen mittleren Jahresfrachten, höher als an Rhein und Weser. An der Donau bei Jochenstein betrug die Hochwasserfracht beispielsweise rund zwei Drittel, an der Elbe im Bereich von Torgau und Aken sogar ca. 80 % einer durchschnittlichen Jahresfracht.

Der Scheitelpunkt der Schwebstofffracht trat in der Regel vor dem Scheitelpunkt des Abflusses auf (ein bis vier Tage). Nach dem Scheiteldurchgang reduzierten sich die Schwebstoffkonzentrationen und -frachten deutlich schneller als der Abfluss. Ein solcher Verlauf ist typisch für Hochwasserereignisse. Eine Ausnahme bildete die untere Mittelelbe, wo beim Juni-Hochwasser 2013 trotz hoher Abflüsse keine erhöhten oder nur gering erhöhte **Schwebstoffkonzentrationen** zu registrieren waren. Dies ist vermutlich vor allem auf die großflächigen Vorlandüberflutungen oberhalb und den damit verbundenen Sedimentrückhalt in den Überflutungsflächen zurückzuführen. Auch das stark reduzierte Wachstum von autochthonem organischem Material (Phytoplankton) sowie Verdünnungseffekte trugen zum Rückgang der Schwebstoffkonzentrationen in der unteren Mittelelbe bei.

In allen betrachteten Bundeswasserstraßen wurde in Teilstrecken ein signifikanter Rückgang der Schwebstofffrachten im Längsverlauf, d.h. in Fließrichtung, beobachtet. Dies ist, analog zu den gemessenen Schwebstoffkonzentrationen, ebenfalls durch Sedimentrückhalt auf Überflutungsflächen oder in Stauhaltungen oder anderen strömungsberuhigten Bereichen zu erklären. Der Rückgang der Fracht lag dabei übers Gesamtereignis betrachtet zum Teil im Bereich von bis zu 50 %. Zu beachten ist, dass der Nettorückgang der Fracht nicht direkt der zurückgehaltenen Sedimentmenge gleichzusetzen ist, da entlang der Fließstrecke beispielsweise über Nebenflüsse zusätzlich Feinsedimente eingetragen werden.

Der ereignisbezogene Vergleich der vier Flüsse Weser, Rhein, Donau und Elbe zeigt, dass der **Stoffhaushalt** und damit die Gewässergüte eines Flusses durch ein Hochwasser sehr unterschiedlich überformt werden. Die Wasserinhaltsstoffe werden verdünnt, was mehr oder weniger große direkte Auswirkungen auf die Milieubedingungen der Organismen hat. Ihre Toleranzfähigkeit hängt von der Stärke und Dauer der Änderungen ab. Der Sauerstoffgehalt wird in der Mittelelbe stark von der Sauerstoffproduktion der Algen geprägt, entsprechend veränderte sich der Sauerstoffgehalt in der Elbe durch das Hochwasser 2013 am stärksten. In den Flüssen Weser, Rhein und Donau, deren Sauerstoffgehalt im Sommer deutlich weniger durch den Algengehalt geprägt ist, führte das Hochwasser 2013 nur zu geringen Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt. Diese beispielhaft genannten indirekten Auswirkungen des Hochwassers sind sehr komplex. Dadurch ist eine genaue Analyse der Gewässergüteverhältnisse in den verschiedenen Flüssen notwendig.

Im Hinblick auf **Schadstoffgehalte in der Binnenelbe** konnte mit dem „Messprogramm Extremereignisse“ eine Fülle von Daten der Wasser- und Schwebstoffbeschaffenheit zum Hochwasser der Elbe im Juni 2013 gewonnen und zeitnah der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. In den Wasser- und Schwebstoffproben wurden in einigen Fällen stark er-

höhte Konzentrationen von Schwermetallen/Arsen nachgewiesen. Im Schwebstoff war der Gehalt organischer Schadstoffe (wie HCH, DDD, DDE) stellenweise stark erhöht. Während des Hochwassers wurden große Schadstofffrachten transportiert, bei den Schwermetallen in einzelnen Fällen mehr als 100 % der Jahresfracht 2012. Die Frachten von Schwermetallen und Arsen (abgesehen von Blei) waren in der Elbe bei Magdeburg am größten. Beim Vergleich der Schwermetall- und Arsenfracht der Elbe bei Magdeburg über jeweils 7 Tage rund um den Scheitel der Hochwasser 2002, 2006 und 2013 wurde trotz größerer Durchflussmenge im Jahr 2013 nur für Cadmium eine größere Fracht geschätzt als bei beiden vorausgegangenen Ereignissen.

Das Hochwasser im Juni 2013 führte zu deutlichen Konzentrationsanstiegen der **Schadstoffe** in Schwebstoffen und schwebstoffbürtigen Sedimenten in der **Tideelbe**. Die organischen Schadstoffe zeigten dabei einen stärkeren Anstieg der Gehalte als die Schwermetalle. Im Vergleich zu den Hochwasserereignissen 2002 und 2006 liegen die Schadstoffgehalte in etwa auf dem Niveau von 2002. Die Frachtberechnungen zeigen, dass die mit dem Hochwasser transportierte Schadstoffmenge einen beträchtlichen Anteil der Jahresschadstofffracht ausmachen kann. Die transportierte Fracht von organischen Schadstoffen im Zeitraum 03.06.-20.06.2013 beträgt bis zu 64 % der Jahresschadstofffracht 2012. Der Anteil für Schwermetalle ist deutlich geringer (bis 30 %).

Auch im **Weserästuar** sind für den Zeitraum des Hochwassers Konzentrationsanstiege der Schadstoffe zu erkennen, allerdings liegen diese Anstiege innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite, so dass hier keine besonderen Auffälligkeiten zu verzeichnen sind. Nur das p,p`-DDD und p,p`-DDE zeigten in der Mischprobe aus dem Juli eine Erhöhung der Gehalte um das Dreifache.

Messungen und Dokumentationen der verschiedenen Aspekte des Hochwasserereignisses fanden zu Wasser, zu Lande und in der Luft statt. Die **Wasserstands- und Abflussmessungen** an den am stärksten vom Hochwasser betroffenen Bundeswasserstraßen Donau und Elbe wurden unter erschwerten Bedingungen, zum Teil auch außergewöhnlichen individuellen und technischen Belastungen, durchgeführt. Dabei bewährte sich grundsätzlich die Einsatzbereitschaft des WSV-Personals ebenso wie die Zusammenarbeit mit den Vertretern anderer Behörden. Auch die in den zurückliegenden Jahren vorgenommene technische Ertüchtigung der Messanlagen sowie der IT-Kommunikationsinstrumentarien zeigte sich den Anforderungen gewachsen.

Besonders hervorzuheben ist die Leistung des messtechnischen Personals an der Elbe. Durch die umfänglichen Abflussmessungen an Elbe und Saale konnte die Qualität der hydrologischen Grundlagen im Elbegebiet deutlich verbessert werden. Die Abflusskurven der Saale wurden im Anschluss daran komplett überarbeitet und viele Abflusskurven an der Elbe konnten im Hochwasserbereich deutlich erweitert werden. Dadurch ergeben sich wertvolle Qualitätssprünge bei den Grundlagen für die hydraulische Modellierung, Abflussbilanzierung, Hochwasservorhersage, Hochwasserstatistik und Klimaforschung. Optimierungspotenzial zeigt sich im Hinblick auf die hochwasserbezogene Umsetzung bestehender Messkonzepte sowie vereinzelt im Hinblick auf die Kommunikation mit anderen betroffenen Behörden vor Ort. Zudem verweisen Messergebnisse von einigen Messstellen nach deren Auswertung auf weiteren Untersuchungs- und Forschungsbedarf, dem auch unter Einbeziehung verschiedener

Modellierungsinstrumentarien nachzugehen ist. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden erste konkrete Verbesserungsschritte bereits durch die Genraldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Außenstelle Ost eingeleitet.

An der Donau fanden während des Hochwasserereignisses bedauerlicherweise nur wenige Abflussmessungen statt. Optimierungspotenzial zeigt sich hier im Hinblick auf die Überarbeitung des bisherigen Messkonzeptes. Bei dessen praxisgerechter und ressourcenschonender Aufstellung böte sich hier eine Kooperation von Bundes- und Länderbehörden an.

Wasserspiegelfixierungen (zur kontinuierlichen Erfassung der Hochwasserscheitelwasserstände auch im Längsprofil der Flüsse über Pegelstandorte hinaus) wurden an verschiedenen hochwasserbetroffenen Bundeswasserstraßen (Rhein, Main, Elbe) im Auftrag mehrerer Bundes- und Landesbehörden durchgeführt. Dies geschah mit Messschiffen oder durch Einmessungen von Geschwemmsellinien, die die Scheitelwasserstände an den Ufern markieren. Deren Ergebnisse stehen unter anderem über den internetgestützten Fachdienst FLYS der BfG zur Verfügung.

Im Rahmen der ereignisnahen **Fernerkundung** zur Unterstützung des Katastrophenstabes an der Elbe kam zur Beschaffung von Hinweisen auf wahrscheinliche Deichdurchfeuchtungs- bzw. Überflutungsstellen die auf die Erkennung von Ölverschmutzung auf dem Meer optimierte Sensorik des Ölüberwachungsflugzeugs Do228 zum Einsatz. Eine nachfolgende systematische Auswertung der Rückmeldungen als Validierung bzw. als Beitrag zu einer weiteren Optimierung konnte bisher nicht erfolgen, ist aber im Rahmen eines beantragten Projektes geplant.

Im Auftrag von WSV und BfG wurden **großräumige systematische Befliegungen** zur Gewinnung stereophotogrammetrisch auswertbaren Bildmaterials in den Hochwassergebieten von Weser, Rhein, Donau und Elbe durchgeführt. Damit stehen flächendeckend anforderungsgerechte Daten (dreidimensionale attributierte Wasser-Land-Grenzen und Wasserspiegelhöhen sowie hoch aufgelöste georeferenzierte Bilddokumentationen) vom Hochwasserereignis des Juni 2013 an diesen Bundeswasserstraßen zur Verfügung. Optimierungspotenzial aus fachlicher und wirtschaftlicher Sicht besteht hier insofern, als dass zur Vorbereitung auf einen möglichen Ereignisfall möglichst zwischen allen Bedarfsträgern abgestimmte flussgebietsspezifische Messprogramme „Hochwasserereigniserfassung“ konzipiert werden sollten.

Das Juni-Hochwasser 2013 hat einmal mehr die große Bedeutung der **Hochwasservorhersage** als Element des Hochwassermanagements deutlich gemacht, indem sie geholfen hat, sowohl technische Schutzmaßnahmen (z.B. die gesteuerten Polder/Speicher an Oberrhein, Donau, Elbe/Havel) optimiert einzusetzen, als auch vorsorgende Maßnahmen (z.B. Räumung gefährdeter Bereiche) rechtzeitig einzuleiten. Die Schwere des Hochwassers mit z.T. bis dato nicht beobachteten Wasserständen hat an einigen Gewässern aber auch die Grenzen und den Verbesserungsbedarf der eingesetzten Vorhersagesysteme offenbart. Vielerorts sind die Vorhersagezentralen seit dem Ereignis damit befasst, die gewonnenen Erkenntnisse zielführend zur Verbesserung ihrer Vorhersagesysteme umzusetzen. Eine Expertengruppe der LAWA hat eine flussgebietsübergreifende Synthese der operationellen Hochwasservorhersagesysteme in Deutschland erstellt und diese mit dem Fokus auf Extremereignisse analysiert, um entsprechende Verbesserungsvorschläge beginnend bei den Eingangsdaten bis hin zur Kommunikation der Vorhersagen zu erarbeiten. Diese Vorschläge sollen zukünftig die Grundlage der

Weiterentwicklung der Hochwasservorhersagesysteme in den einzelnen Bundesländern bilden, um so den Wert der Hochwasservorhersage weiter zu steigern und die Folgen zukünftiger Extremereignisse zu mindern.

Die Genauigkeitserwartungen in der Öffentlichkeit liegen teilweise über einer möglichen Leistungsfähigkeit der Hochwasservorhersage. Deshalb muss die erforderliche Verbesserung der Vorhersagen mit einer Aufklärung der Öffentlichkeit hinsichtlich der zu erwartenden Vorhersagegenauigkeiten bis hin zu entsprechenden Schulungen der Katastrophenschutzstäbe einhergehen.

Die Folgen des Hochwassers in **ökonomischer Hinsicht** werden derzeit gesamtvolkswirtschaftlich auf etwa 10 Mrd. € beziffert. Die betroffenen deutschen Bundesländer kalkulieren vor diesem Hintergrund für ihre Belange eine Schadensumme von fast 6,6 Mrd. €. Mit Ausnahme von lediglich indikatorisch relevanten Überschreitungsdauern der HSW-Marken, welche Befahrbarkeitseinschränkungen bzw. ereignisbedingte Liegezeiten steuern und die im Juni 2013 je nach betroffener Bundeswasserstraße bis zu 15 Tage betrugen, liegen derzeit für den Bereich der wasserstraßenbezogenen Verkehrswasserwirtschaft keine spezifischen Folgekostenaufstellungen vor.

Die **Entwicklungsdynamik von Hochwasser** in den großen Strömen Mitteleuropas wurde in verschiedener Hinsicht für den Zeitraum 1946/2013 an repräsentativen Pegeln von Weser, Rhein, Donau und Elbe untersucht. Die Intensität von Hochwasserereignissen (Scheitelhöhen) und die Zeitpunkte ihres Auftretens veränderten sich im Laufe der Untersuchungsperiode 1946/2013. Trotz gegebener räumlicher Heterogenität lässt sich zumeist eine Erhöhung der HQ-Scheitelabflüsse im Zeitverlauf feststellen. Diese Entwicklung fällt überwiegend ohne Trendsignifikanz aus. Gleichzeitig besteht in vielen Fällen eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Tendenz zu einem früheren Auftreten von Hochwasser im Jahresverlauf, die allerdings deutschlandweit nicht einheitlich ist. Fast überall in den Bundeswasserstraßen zeichnet sich dagegen häufigkeitsbezogen ab, dass größere Hochwasser immer wahrscheinlicher geworden sind, kleinere jedoch etwas seltener auftreten. Die Volumina der abgelaufenen Hochwasser (Hochwasserfüllen) weisen an den untersuchten Pegel im Zeitraum 1946/2013 durchweg Zunahmetendenzen, aber keine Trendsignifikanz auf.

Aussagen zum Thema **Klimawandel und Hochwasser** dürfen nicht nur zukunftsgerichtet sein, sondern müssen prozessbedingt auch die Entwicklung in der Vergangenheit mit berücksichtigen. Bei den gewählten Niederschlagskennwerten lassen sich für die analysierte Zeitspanne Mai* (bzw. die Monate Mai und Juni) in den Beobachtungsreihen seit Mitte des 20. Jahrhunderts keine einheitlichen Tendenzen bzgl. einer Zunahme der Niederschlagshöhe erkennen. Antworten auf die Frage, ob Anzeichen des Globalen Klimawandels bereits erkennbar sind, lassen sich aufgrund der vergleichsweise kurzen Beobachtungsperiode und der hohen Variabilität extremer Niederschläge nicht absichern. Klimamodelle projizieren jedoch für die Zukunft im Zeitraum bis zum Jahre 2100 in einigen Regionen Deutschlands eine Zunahme der Hochwasserereignisse. Die Ergebnisse weisen jedoch eine große Bandbreite auf. Es zeigt sich, dass die Unsicherheiten und die Modelldifferenzen umso größer werden, je räumlich detaillierter die Analysen und je extremer die betrachteten Niederschlagskennwerte sind.

Hinsichtlich der projizierten zukünftigen Entwicklung der Hochwasserabflüsse in den Monaten Mai und Juni zeigt sich für die hier exemplarisch betrachteten Pegel und Kennwerte kein einheitliches Bild. Bei Betrachtung des Ensemblemittelwertes lässt sich eine geringe Zunahme in der Auftrittshäufigkeit von Hochwasserereignissen am Pegel Barby und eine Abnahme am Pegel Kaub feststellen. Die Ergebnisse schwanken jedoch je nach betrachteter hydrologischer Klimamodellwirkungskette sehr stark und weisen auch unterschiedliche Vorzeichen auf. Eine große Bandbreite zeigen auch die zukünftigen Entwicklungen der Hochwasserabflüsse. Die Projektionen legen es jedoch nahe, dass die Winterhochwasser am Pegel Kaub/ Rhein zunehmen und sich ab der Mitte des 21. Jahrhunderts auf einem höheren Niveau einpendeln könnten. Die Sommerhochwasser weisen hier jedoch keine wesentlichen Veränderungen auf. Am Pegel Barby/Elbe deutet die Mehrzahl der Projektionen für die nächsten Dekaden auf eine Zunahme der mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse hin. Anschließend wird jedoch eine Abnahme unter das Niveau der Gegenwartssimulation projiziert, die im hydrologischen Winter sogar besonders ausgeprägt ist. Im Sommer ist wie am Pegel Kaub wiederum keine grundsätzliche Änderung erkennbar.

Die getroffenen Aussagen gelten zunächst nur für das mittlere Hochwasserverhalten und für Hochwasser mit vergleichsweise hohen Eintrittswahrscheinlichkeiten (bis ~ HQ_{50}). Änderungen bzgl. Extremhochwasser (> HQ_{50}) erfordern noch intensivere Analysen des vorhandenen Datenmaterials sowie eine Aktualisierung der nunmehr verfügbaren aktuellen globalen und regionalen Klimamodelle.

Summary

In the year 2013, the **weather in Central Europe and Germany** had been dominated by numerous low-pressure areas since the last week of April. Their dominating influence continued with few interspersed spells of fair weather until the first week of July, so that heavy and continuous precipitation over wide areas brought huge amounts of rainwater into the river basins. In the following 39-day period until 3 June, more than the double, sometimes the threefold of the mean precipitation amount fell in many catchments. The cresting period began on 28 and 29 May, when everywhere in Germany continuous rain set in over wide-areas and intensified in the south and south-east of the country from 30 May to 2/3 June. Enormous amounts of precipitation, regionally exceeding 200 l/m², were recorded.

A factor that favoured the emerging flood situation was the continuous filling of the **soil-water storage** as a consequence of the prevailing weather situations in three intervals of several days duration each (26 April to 16 May, 17 May to 24 May, and 25 May to 27 May). At the end of the month of May, on 40 percent of the German territory the soil-moisture values were as high as never before since the beginning of records in the year 1962.

This **wide-area precipitation** fell over nearly the whole of Central Europe, although one can distinguish differentiations in space and time: The precipitation peaks hit the river basins always a few days shifted, so that the extent and the discharge volumes of the flood were mitigated in the basins of the rivers Rhine and Weser, while they were aggravated in the basins of the Danube and the Elbe. In the Danube basin, this aggravation was advancing when the intensive rainfalls slowly moved from the west towards the east, i.e. in the flow direction

of the flood wave. The situation in the Elbe basin took a more complex course, because at first parts of Bohemia as well as the basins of the rivers Mulde and Saale were affected, before then a wide-area rainfall set in and advanced in downstream direction (just like in the Danube basin).

The **Weser** was the first of the major German rivers that was hit by the flood event in May/ June 2013. Beginning on 26 May, an elongated flood wave with a broad, saddle-shaped structure moved downstream. A peak level in the order of magnitude of a 2-year event was maintained – with slight variations – along the whole course for roughly ten days. This means that for this federal waterway and its major tributaries the flood event of the year 2013 has to be rated as minor in importance.

Following the spatial-temporal distribution of precipitation in the **Rhine basin,** extreme floods affected the sub-basins in Baden-Württemberg, especially the basin of the upper Neckar and of the inflows to the Lake Constance. Here, peak flows with recurrence intervals around and even above l00 years occurred. In the River Rhine itself the highest flow recurrence was 30-50 years in the High Rhine between the inflows of the rivers Thur and Aare. Water retention measures that had been implemented in France, Baden-Württemberg, and Rhineland-Palatinate led to a reduction of the water-levels in the Rhine by up to 29 cm in the middle reach of the Upper Rhine and still 12 cm at maximum in the Lower Rhine. In parallel, the statistical order of magnitude of peak flows was reduced to the range of recurrence intervals from 10 to 20 years between the inflows of the River Aare and the River Mosel. The River Rhine and its catchment downstream from the mouth of the River Mosel were only slightly affected by this flood event.

In the **River Danube,** where nearly the whole catchment was affected by the flood event of June 2013, three flood waves were observed. New HHW values were recorded over longer river reaches downstream of the inflow of the River Isar. The first flood wave that had the highest flows started in the River Inn to increase then rapidly within the Passau region and onwards to a peak water level on 3 June 2013. Its peak-discharge was 9,800 m^3/s, corresponding to a range of recurrence from 200-500 years (gauge Achleiten). The second wave began in the upper Danube and moved downstream after 2 June while growing continuously through the inflows of the also flooded tributaries. Its peak reached the region of Passau on 6 June 2013. Regarding the measured water-levels and flow peaks as well as their statistical order of magnitude, this second wave was lower than the first one (maximum HQ_{100} at the inflow of the River Isar). Dyke failures caused significant reductions of flood peaks that were effective from Deggendorf downstream to Hofkirchen and beyond. Nevertheless, it should be noted that the peak levels and flows recorded in June 2013 at most of the gauges downstream of Regensburg set hitherto (since the end of the 19th century unknown) historical top marks. A third flood wave of less significant magnitude formed at the beginning of the second third of June in the River Danube with maximum flows of 2-year recurrence.

With the exception of some regions on its north-eastern margin, nearly the whole **catchment of the River Elbe** was affected by the flood in June 2013. While, despite enormous dimensions, the flood in upper Elbe basin did not reach the magnitude of the record-breaking flood of the year 2002, a flood wave was building up in the further course of the middle Elbe that outshined all the previous events documented in the regular gauge records. Sustained by the floodflow in the River Mulde and, in particular the River Saale, the peak flows downstream

of the gauge of Barby reached a return interval of 100-200 years and persisted further downstream to the weir of Geesthacht. Between Coswig (Saxony-Anhalt) and Geesthacht, the passage of the peak was documented in form of new gauge maxima along a contiguous stretch of around 350 km. The overall magnitude of this flood event was not essentially reduced by dyke failures or controlled retention of water, although one could note certain local peak-capping effects and substantial peak reductions of up to 75 cm (gauge Neu Darchau) due to the concerted action of all controlled and uncontrolled water retention effects. In view of the enormously increased flow volume due to lasting and widespread precipitation it became once again clear that there are only limited possibilities to control hydrological events in such dimensions.

Increased **suspended loads** were observed during the flood of June 2013 in the river basins of the Rhine, Danube, Weser, and Elbe. A maximum daily transport rate of suspended solids in federal waterways was measured on 3 June 2013 with some 740,000 tonnes in the Danube at Jochenstein. The cumulative load over the whole event amounted in the River Rhine on average to 20 percent of the mean annual load. The situation was similar in the River Weser. The suspended loads in relation to the respective annual means were in the rivers Elbe and Danube higher than in the Rhine and the Weser. In the Danube at Jochenstein, suspended load during the flood amounted to roughly two thirds, in the Elbe near Torgau and Aken even to about 80 % of an average annual load.

The peak of the suspended load transport arrived as a rule before the flow peak (one to four days). After the passage of the peak, the suspended-solids concentrations and loads returned to normal significantly faster than the discharge. Such a pattern is typical for flood events. An exception was the lower Middle Elbe, where during the flood of June 2013 **suspended load concentrations** were not or only slightly increased despite of high discharge values. This is probably due to the widespread flooding over the upstream floodplains and the retention of sediment there. Moreover, the strongly reduced growth of autochthonous organic material (phytoplankton) and dilution effects may also have contributed to the reduced suspended load concentrations in the lower Middle Elbe.

In some reaches of the federal waterways under consideration a significant decrease in suspended loads was observed in downstream direction. This can be explained by sediment retention on flooded riparian areas or in impoundments and other still-water zones. Summarized over the whole event, the decrease of suspended loads was sometimes in the range of 50 %. It should be noted here that the net decrease in transport cannot be directly equalled to the retained amount of sediment, because additional fine sediment is always introduced into the river along its course, for instance, by tributaries.

A comparison between the **oxygen budgets** of the four rivers Weser, Rhine, Danube, and Elbe during the flood event shows that it can be superimposed by other effects in very different ways, so that an individual analysis of the conditions in the individual rivers becomes necessary. In the Middle Elbe, the oxygen level is strongly dominated by algal oxygen production. Accordingly, the oxygen level during the flood 2013 changed most significantly in the River Elbe where algal growth was severely impaired by the flood. In the rivers Weser, Rhine, and Danube, however, where the oxygen levels in summer are much less dependent on algae, the flood of 2013 had only little influence on the oxygen budgets.

As to **contaminant levels in the inland reach of the Elbe**, the „Measuring Programme on Extreme Events“ acquired a wealth of data on the quality of water and suspended solids during the 2013 flood and made them shortly available to the public. In some cases, markedly increased concentrations of heavy metals and arsenic were detected in water and suspended-solids samples. The levels of organic contaminants like HCH, DDD, and DDE in suspended solids were locally increased. Large amounts of contaminants were transported during the flood: heavy metals in some cases more than 100 % of the annual transport rate of 2012. The highest loads of heavy metals and arsenic (except lead) were found in the Elbe near Magdeburg. A comparison of heavy-metal and arsenic loads in the Elbe at Magdeburg over seven days each around the peaks of the floods of 2002, 2006, and 2013, found in 2013 a higher load than in the previous events only with cadmium.

The flood of June 2013 led to distinct increases in **contaminant concentrations** in suspended solids and sediments in the **tidal Elbe**, with organic contaminants showing stronger increases than heavy metals. In the comparison with the flood events of 2002 and 2006, the contaminations were roughly at the levels of 2002. Transport calculations showed that the amount of contaminants transported with the flood may amount to a significant portion of the annual load. The amount of organic contaminants transported in the period from 3 June to 20 June 2013 corresponds up to 64 % of the annual transport in 2012. The portion of heavy metals is significantly lower (to 30 %).

Rising concentrations of contaminants were also observed in the **Weser estuary** during the flood, although these rises remained within the range of the natural variability and did not show any conspicuousness. Only p,p`-DDD and p,p`-DDE had levels increased by the threefold in the composite sample of the month of July.

Different aspects of the flood event were measured and documented from land, from boats and from the air. The **measurements of water levels and flows** in the federal waterways that were most severely affected by the flood, namely the rivers Danube and Elbe, had to be performed under very difficult conditions and posed severe strains on the measuring crews and the equipment. In general, one can say that the operational readiness of the personnel of the Federal Waterways and Shipping Administration (*WSV*) and of the other participating authorities and institutions stood the test. Moreover, the upgrading and renewal of measuring equipment and IT communication tools over the past few years helped to cope with the situation. Special mention is made here of the performance of the measuring personnel on the River Elbe. The comprehensive measurements of streamflow in the rivers Elbe and Saale improved the quality of hydrological databases in the Elbe basin considerably. New potential for optimization was seen in a few aspects of the communication with the local authorities, and with view to the practical implementation of existing measuring schemes. Moreover, some measuring results suggest to the necessity of additional research and analyses, f.e. by utilisation of mathematical modelling. First specific steps of improvement have been initiated by the competent authorithy (“GDWS-Ast Ost”) already.

Regrettably only few measurements of this kind were made on the River Danube. Here, new potential for optimization consists regarding the improvement of the existing measuring scheme. Doing so, under practical and economical aspects co-operation with regional and local authorites seems appropriate.

Water-level datums (used to determine flood-peak levels beyond the gauging sites continuously along the longitudinal profiles of the rivers) were established on several federal waterways (Rhine, Main, Elbe) for several authorities of the federal government and of federal states. This was done with measuring boats or by tracking the lines where floating debris deposited after the flood and thus marked the peak water levels along the river banks. These outputs are accessible, for instance, by the Internet-based service „FLYS“ of the *BfG*.

Real-time **remote sensing** support for the **emergency** team on the Elbe was provided by the oil-spill monitoring aircraft DO 228. Its sensors - that are originally optimized for the detection of oil spills at sea - were tested for the detection of soaked dykes and probable sites of dyke overtopping. The results have not yet been systematically evaluated for validation purposes or further optimization, although it is planned to do so under a newly scheduled project.

Systematic flight missions on a large scale in the flood-affected areas on the Weser, Rhine, and Danube gathered imagery for double-image photogrammetric evaluation on behalf of the *WSV* and the *BfG*. Thus, urgently needed data (three-dimensional attributed land-water delineation and determination of water-level datums as well as geo-referenced imagery in high resolution) of the flood event in June 2013 are available along these federal waterways. There is still potential for optimization in scientific-technical and economic regards: For better preparedness and contingency planning, river-basin specific measuring programmes („Recording of Flood Situations”) should be prepared and harmonized between all agents involved.

The flood in June 2013 has once again highlighted the great significance of **flood forecasting** as a component of flood management. It helps to make optimum use of technical flood defences (e.g. controlled flooding of polders/retention basins on the Upper Rhine, Danube, and Elbe/Havel) and to initiate preventive measures in time (e.g. evacuation of threatened regions). The severity of this flood event with locally unprecedented water levels revealed in some cases the constraints of the forecasting systems and the needs for their upgrading. In the wake of this event, many forecasting centres have been busy to translate the gained experiences into targeted improvements of their systems. A *LAWA* expert group produced a synthetic analysis of operational flood forecasting systems in Germany beyond river-basin limits with a focus on extreme events to derive proposals for improvements from the input data to the communication and dissemination of the forecasts. These proposals will provide a future basis for the upgrading of the flood-forecasting systems of the German Federal States, aiming to increase the value of flood forecasts and to mitigate the impacts of future extreme events.

The expectations of the general public in the accuracy and detailedness of forecasts sometimes go beyond the capacity of the flood-forecasting techniques. That is why the necessary upgrading of the systems must be accompanied by public information campaigns about the degree of accuracy that can be expected from forecasts and by communication training for emergency staffs.

In **national-economic terms** the costs of the 2013 flood are estimated at € 10,000 million. The affected Federal States calculated the damage they suffered at nearly € 6,600 million. Regarding inland navigation, no overview of costs is available.

The **long-term dynamics of flood events** in the major rivers of Central Europe were examined under various aspects at representative gauges on the rivers Weser, Rhine, Danube, and Elbe over the period from 1946 to 2013. The intensities of floods (peak levels) and the times of their occurrences had changed in the course of the study period 1946/2013. Despite of the spatial heterogeneity, one can usually note an increase in HQ peak flows along the timelines of the events, but this development is mostly free of any significant trend. Concurrently, in many cases there is a more or less pronounced tendency towards an earlier occurrence of floods in the course of the year, although this is not equally the case throughout Germany. Nearly all federal waterways, however, show a frequency-related likelihood in the sense that severe floods are becoming more probable, while smaller ones are occurring somewhat rarer. The flow volumes of the flood events in the period 1946/2013 show increasing tendencies at all gauges under study, although without any significance of trend.

Statements on the topic **"climate change and floods"** must not only look to the future but also consider developments in the past. In the selected precipitation parameters and the analysed periods of May* (or May plus June), the time series, starting from middle of the 20th century, do not show uniform tendencies regarding increases in precipitation depths. Statements about the existance of signals of global change cannot be safely made, because of the short observation period and the high variability of extreme precipitation. However, climate models let expect in some regions of Germany an increase in the number of extreme events for the considered months May plus June in the future years until 2100. However, these output data have a wide scatter. In general, it was found that the more detailed the analyses of precipitation extremes become, the greater are the uncertainties and differences between the models.

Concerning future development, the results from the considered gauges and parameters are heterogenous. Considering the mean values of the model-ensemble over the months of May plus June under the assumption of climate change, one finds only a slight increase in the **frequency** of flood events at the gauge of Barby/Elbe, and even a decrease at the gauge of Kaub/Rhine. However, according to the considered hydrological chain of effects of climate models, the results vary strongly and have sometimes opposing leading-signs. The data that were obtained about the future variations of **peak discharges** spread over a wide range, too. Nevertheless, the projections suggest that winter floods at the gauge Kaub/Rhein will increase and may become established at a higher level after the mid-21st century, whereas the summer floods do not indicate any profound change. At the gauge Barby/Elbe, the majority of projections even point at a clear decrease in peak discharges during the hydrological winter, while no fundamental change in summer can be recognized.

These statements first apply only to the mean behaviour of floods and to events with peak-discharges with relative high probabilities of occurrence (up to ~ HQ_{50}). Changes in more extreme flood events (>HQ_{50}) still need intensified analyses of the underlying data material as well as an update of the currently available global and regional climate models.

Literatur

ADLER, M. U. NICODEMUS, U.: AGILA: Ein neues Computermodell zur Verarbeitung der Daten von Akustischen-Doppler-Strömungsmessgeräten (ADCP). Wasserwirtschaft (90) 2000, H. 10, S. 494-498.

ADLER, M., NICODEMUS, U. et al.: Neue Abflusskurven an Elbe und Saale auf der Grundlage von Durchflussmessungen während des Extremhochwassers im Juni 2013, BfG-Bericht 1823, Koblenz 2014.

ADLER, M., NICODEMUS, U.,GEBHARDT, M., BERTRAM, R.: 5. ADCP Anwendertreffen zur Qualitätssicherung von Abflussdaten vom 11.-13. September 2007 in Koblenz, BfG-Bericht 1586, Koblenz 2008.

ADLER, M.: Messungen von Durchflüssen und Strömungsprofilen mit einem Ultraschall-Doppler-Gerät (ADCP). Wasserwirtschaft (83) 1993, H.4, S. 192-196.

AK-KLIWA / Arbeitskreis KLIWA (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Deutscher Wetterdienst) (2002): Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. Karlsruhe.

ALBERGEL, C., DE ROSNAY, P., GRUHIER, C., MUÑOZ-SABATER, J., HASENAUER, S., ISAKSEN, L., KERR, Y. & WAGNER, W., 2012. “Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global groundbased in situ observations,” Remote Sens. Environ, vol. 118, pp. 215-226.

ARGE Elbe (2003): Hochwasser August 2002 - Einfluss auf die Gewässergüte der Elbe. Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe, 80 S.

AWA / Amt für Wasser und Abfall der Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern (2012) (Hrsg.): Regulierung der Jurarandseen – Grundlagen und Vorgehen. Amt für Wasser und Abfall der Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern. Bern.

AWA / Amt für Wasser und Abfall der Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern (2014) (Hrsg.). Hydrologisches Bulletin 2013. Bern.

BAFU / Bundesamt für Umwelt Schweiz (2014): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2013. Abfluss, Wasserstand und Wasserqualität der Schweizer Gewässer. Bern.

BAFU / Bundesamt für Umwelt Schweiz (o.J.): Thema Hydrologische Grundlagen und Daten. Kontinuierliche Internetpublikation http://www.hydrodaten.admin.ch/de/

BELZ, J. U., BRAHMER, G., BUITEVELD, H., ENGEL, H., GRABHER, R., HODEL, H., KRAHE, P., LAMMERSEN, R., LARINA, M., MENDEL, H.-G., MEUSER, A., MULLER, G., PLONKA, B., PFISTER, L. & VAN VUUREN, W. (2007). Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends. Schriftenreihe der KHR I-22, Koblenz und Lelystad. http://www.chr-khr.org/files/RapportI-22.pdf

BELZ, J.U., BUSCH, N., HAMMER, M., HATZ, M., KRAHE, P., MEISSNER, D., BECKER, A., BÖHM, U., GRATZKI, A., LÖPMEIER, F.-J., MALITZ, G. & SCHMIDT, T. (2013): Das Juni-Hochwasser des Jahres 2013 an den Bundeswasserstraßen – Ursachen, Verlauf, Einordnung und fachliche Herausforderungen. In: KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 6, Nr. 11, S. 624-634.

BERGSTROEM, S. (1995): The HBV model. In: V. P. Singh (Ed.): Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO.

BWK (Verein Berliner Wetterkarte e.V., Hrsg.) (2013): Berliner Wetterkarte, Jahrgang 2013, Internet: http://wkserv.met.fu-berlin.de/

BfG / Bundesanstalt für Gewässerkunde (2002) (Hrsg.): Das Augusthochwasser 2002 im Elbegebiet. 49 S., Koblenz (http://elise.bafg.de/servlet/is/3967/); mit unveröffentlichten ergänzenden Analysendaten der BfG.

BfG / Bundesanstalt für Gewässerkunde (2006) (Hrsg.): Modellgestützter Nachweis der Auswirkungen von geplanten Rückhaltemaßnahmen in Sachsen und Sachsen-Anhalt auf Hochwasser der Elbe. BfG-Bericht Nr. 1542. Bundesanstalt für Gewässerkunde: Koblenz.

BfG / Bundesanstalt für Gewässerkunde (2011a) (Hrsg.): Nachweis 2010 der Wirkung von wasserstandsmindernden Maßnahmen auf Extremhochwasserstände des Rheins zwischen Worms und der Nordsee. Abschlussbericht der BfG für die Expertengruppe HVal der IKSR. Koblenz. (unveröffentlicht)

BfG / Bundesanstalt für Gewässerkunde (2011b) (Hrsg.): Ermittlung des Einflusses der Flutung der Havelniederung auf Hochwasser an der Elbe im Bereich des HQ_{100}. BfG-Bericht Nr. 1726. Koblenz

BfG / Bundesanstalt für Gewässerkunde (2012) (Hrsg.): Bewertung von Einflüssen tschechischer und thüringer Talsperren auf Hochwasser an Moldau und Elbe in Tschechien und Deutschland mittels Einsatz mathematischer Abflussmodelle. BfG-Bericht Nr. 1725. Koblenz.

BfG / Bundesanstalt für Gewässerkunde (2013a) (Hrsg.): Wirkung von Deichbrüchen, von gesteuerten und ungesteuerten bestehenden Rückhaltungen sowie von geplanten Maßnahmen auf das Hochwasser im Mai/Juni 2013 an der Elbe. Kurzbericht. Koblenz. (unveröffentlicht)

BfG / Bundesanstalt für Gewässerkunde (2013b) (Hrsg.): 2D-Modellierung der unteren Mittelelbe von Wittenberge bis Geesthacht – Pilotmodelle Dömitz bis Hitzacker. Zwischenbericht. Koblenz. (unveröffentlicht)

BfG / Bundesanstalt für Gewässerkunde (2013c) (Hrsg.): Das Juni-Hochwasser des Jahres 2013 in Deutschland. BfG-Bericht Nr. 1793. Koblenz.

BfG / Bundesanstalt für Gewässerkunde (2013d) (Hrsg.): Länderübergreifende Analyse des Juni-Hochwassers 2013. BfG-Bericht Nr. 1797. Koblenz.

BfG / Bundesanstalt für Gewässerkunde (2014) (Hrsg.): Neue Abflusskurven an Elbe und Saale auf der Grundlage von Abflussmessungen während des Extremhochwassers im Juni 2013. BfG-Bericht Nr. 1823. Auftraggeber: WSA Magdeburg. Koblenz.

BfG / Bundesanstalt für Gewässerkunde (o. J.) (Hrsg.): Analysendaten aus der Radiologischen Messstation Wittenberg.

BLÖSCHL, G., NESTER, T., KOMMA, J., PARAJKA, J. & R.A.P. PERDIGAO (2013): The June 2013 flood in the Upper Danube Basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods. In: hydrology and Earth System Sciences, 17, p. 5197-5212

BLÖSCHL, G., NESTER, T., PARAJKA, J. & KOMMA, J. (2014): Hochwasserprognosen an der österreichischen Donau und Datenassimilation. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 58, H. 2, S. 64-72 DOI: 10.5675/HyWa_2014,2_1

BMVBS (Hrsg.) (2013): KLIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen. Ausgewählte, vorläufige Ergebnisse zur 3. Statuskonferenz am 12./13. November 2013, BMVBS, Berlin. http://www.kliwas.de/KLIWAS/DE/02_Aktuelles/12_statuskonf_2013/kliwas_kompakt_1311.pdf?__blob=publicationFile

BÖHME, M. (2005): Problem mit dem Sauerstoff. In: Geller, W., Ockenfeld, K., Böhme, M. & Knöchel, A. (eds.): Schadstoffbelastung nach dem Elbe-Hochwasser 2002. Endbericht des Ad-hoc-Verbundprojekts. UFZ Leipzig-Halle GmbH, Magdeburg, p. 67-73.

BREMICKER, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, Freiburg, 2000.

BREMICKER, M., DEMUTH, N., BRAHMER, G., HOLLE, F.& HAAG, I. (2013): Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle und deren Anwendung. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall 2013 (60), Nr. 8.

BREMICKER, M. & VARGA, D. (2014): Kommunikation der Verlässlichkeit von Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 58, H. 2, S. 76-83.

BUREK, P. & RADEMACHER, S. (2007): Operationelle Hochwasservorhersage für die Elbe mit dem Wasserstandsvorhersagesystem WAVOS. In: Fünf Jahre nach der Flut. Hochwasserschutzkonzepte - Planung, Berechnung, Realisierung. Dresdner Wasserbaukolloquium 2007. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 35. Technische Universität Dresden. Dresden. S. 25-34.

BÜRGI, T., HOMAGK, P., PRELLBERG, D., SPROKKEREEF, E. & WILKE, K. (2004): Das internationale Hochwasservorhersagesystem am Rhein. Wasserwirtschaft 12/2004, S. 12-19.

BURN, D.H. (1994): Hydrological effects of climatic change in west-central Canada. In: Journal of Hydrology 160, S. 53-70.

ČHMÚ / Český hydrometeorologický ústav (o.J.): Handschriftliche Tabellen von täglichen Wasserstandsaufzeichnungen vom Pegel Magdeburg-Strombrücke für die Zeit vom 17.4.1727 bis 31.12.1880 (ohne die Jahre 1809-1816). Prag.

Deutscher Bundestag (2014): Mittelabfluss aus dem Fluthilfefonds 2013 für Aufbaumaßnahmen. Drucksache 18/2124 (Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Bärbel Höhn, Sven-Christian Kindler, Peter Meiwald, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN). Berlin.

DIN (1995): Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen; Deutsche Übersetzung des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“, Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1. Auflage 1995, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich.

DWD / Deutscher Wetterdienst (2013a): Witterungsreport Express – Witterungsverlauf, Großwetterlagen Mai 2013 und Juni 2013. Offenbach.

DWD / Deutscher Wetterdienst (2013b): Wetterlagenklassifikation, Offenbach, Internet: http://www.dwd.de/GWL

DWD / Deutscher Wetterdienst (2014): Das Klima in Deutschland: Neueste Zahlen zum Jahr 2013 und zu den ersten Monaten des Jahres 2014. Klima-Pressekonferenz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) am 25. März 2014 in Berlin, Internet: www.dwd.de

ELLENRIEDER, T & MAIER, A. (2014): Hochwasser in Mitteleuropa. In: MunichRe (Hrsg.): Topics Geo – Naturkatastrophen 2013, Analysen, Bewertungen, Positionen, Ausgabe 2014. München. S. 16-23.

FAIST, H. (2013): Mitteilung des ehemaligen Dezernatsleiters Hydrologie der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Ost H. Faist per Brief vom 28.07.2013

FGG Elbe / Flussgebietsgemeinschaft Elbe (2013) (Hrsg.): Darstellung des Hochwassers 2013 im Einzugsgebiet der Flussgebietsgemeinschaft (FGG) Elbe. Magdeburg.

FGG Elbe / Flussgebietsgemeinschaft Elbe (2012) (Hrsg.): Messprogramm für hydrologische Extremereignisse an der Elbe. Stand: 10.1.2012 mit Aktualisierung vom 7.3.2012. 27 S.

FGG Elbe / Flussgebietsgemeinschaft Elbe (o. J.) (Hrsg.): FIS-Datenportal der FGG Elbe (http://176.28.42.206/FisFggElbe/content/start/index.jsp).

FREUDIGER, D., KOHN, I, STAHL, K., & WEILER, M. (2014): Large-scale analysis of changing frequencies of rain-on-snow events with flood-generation potential. In: Hydrol. Earth Syst. Sci., 18, 2695-2709. www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/2695/2014/.doi:10.5194/hess-18-2695-2014

Geomer (2013) (Hrsg.): Ermittlung beschreibender Kennwerte potentieller Überflutungsflächen und Volumina entlang der deutschen Elbe und zeitnahe Simulation der Überflutung der Talaue bei den Deichbreschen im Elbe-Saale- und Elbe-Havel-Winkel im Juli 2013. Geomer GmbH: Heidelberg (unveröffentlicht)

GERSTENGARBE, F.-W., WERNER, P. C. & RÜGE, U. (1999): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-1998) nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky, 5. verbesserte und ergänzte Auflage. Potsdam, Offenbach a. M., online: http://www.pik-potsdam.de/~uwerner/gwl/

HARDENBICKER, P. (2014): Phytoplankton dynamics in two large rivers: long-term trends, longitudinal dynamics and potential impacts of climate change. Doktorarbeit, Technische Universität Dresden, 119 S..

HAYLOCK, M.R., HOFSTRA, N., KLEIN TANK, A.M.G., KLOK, E.J., JONES, P.D. & NEW, M. (2008): A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. J. Geophys. Res (Atmospheres), 113, D20119, doi:10.1029/2008JD10201

HEIN, B., WYRWA, J., VIERGUTZ, C., SCHÖL, A. (2014): Projektionen für den Sauerstoffhaushalt des Elbe-Ästuars - Folgen für die Sedimentbewirtschaftung und das ökologische Potenzial. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 3.08. KLIWAS-42/2014, DOI: 10.5675/Kliwas_42/2014_3.08.

HIJMANS, R.J., S.E. CAMERON, J.L. PARRA, P.G. JONES & A. JARVIS, 2005: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25: 1965-1978.

HILLEBRAND, G., HARDENBICKER, P. & FISCHER, H. (2012): Schwebstoffdynamik der Mittelelbe − abiotische und biotische Komponenten. Tagungsband des 1. Ökologischen Kolloquiums der BfG am 14./15. Februar 2012 in Koblenz. Veranstaltungen 6/2012, Koblenz, Juli 2012, S. 37-41. doi: 10.5675/BfG_Veranst_2012.6

HLUG / Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2013): Hochwasser Mai-Juni 2013 in Hessen. Hydrologie in Hessen, Heft 10. ISBN 978-3-89026-710-4

Hochwasserstudiengruppe für die Rheinstrecke Kaub-Rolandswert (1993) (Hrsg.): Der Einfluss des Oberrheinausbaus und der am Oberrhein vorgesehenen Retentionsmaßnahmen auf die Hochwasser am Mittelrhein von Kaub bis Köln. Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein. Ministerium für Umwelt Rheinland-Pfalz: Mainz.

Hochwasserzentralen Rhein (2013): Das Rheinhochwasser Juni 2013 – Bericht der Hochwasserzentralen am Rhein.

IKSE / Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2012): Hydrologische Niedrigwasserkenngrößen der Elbe und bedeutender Nebenflüsse. Magdeburg.

IKSE / Internationale Kommission zum Schutz der Elbe (2014, in Vorbereitung): Hydrologische Auswertung des Hochwassers vom Juni 2013 im Einzugsgebiet der Elbe. Magdeburg.

IKSR / Internationale Kommission zum Schutz des Rheins (2006) (Hrsg.): Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Hochwasserstände im Rhein infolge Umsetzung des Aktionsplans Hochwasser bis 2005. Abschlussbericht. IKSR-Bericht Nr. 153d.: Koblenz.

IPCC (2007) Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt KB., Tignor M., Miller HL. (eds): The physical science basis. Contribution of Working Group I of the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, p 996, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml#1

IPCC (2013): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

KENDALL, M. G. (1975): Rank correlation methods. London.

LAWA / Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2014a): Handlungsempfehlungen zur weiteren Verbesserung von Grundlagen und Qualität der Hochwasservorhersage an den deutschen Binnengewässern.

LAWA / Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (2014b): Zusammenfassende Analyse der Ergebnisse der vom Hochwasser 2013 betroffenen Flussgebietsgemeinschaften. Kiel.

LfU / Bayerisches Landesamt für Umwelt (2013) (Hrsg.): Junihochwasser 2013 – Wasserwirtschaftlicher Bericht.: Augsburg.

LfU / Bayerisches Landesamt für Umwelt (2014a): schriftliche Mitteilungen vom 05.09.2014

LfU / Bayerisches Landesamt für Umwelt (2014b): schriftliche Mitteilungen vom 05.11.2014

LfULG / Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2013) (Hrsg.): Gewässerkundlicher Monatsbericht mit vorläufiger Auswertung des Hochwassers Juni 2013. Dresden.

LfULG/ Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (o. J.) (Hrsg.): Analysendaten zum Hochwasser 2002 und 2006 (Oberflächenwasser).

LfULG / Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2014): Ereignisanalyse Hochwasser Juni 2013 – Stand Oktober 2014. Dresden.

LHW / Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (2006a) (Hrsg.): Ergebnisse der Beschaffenheitsüberwachung der Fließgewässer während des Frühjahrshochwassers 2006. - Stand: 13.04.06. 2 S., 1 Anl.

LHW / Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (2006b) (Hrsg.): Abschlussbericht Hochwasserereignis Frühjahr 2006. - Anlage: Sondermessprogramm Hochwasser 2006. Schwebstoffproben Zentrifuge (http://www.hochwasservorhersage.sachsen-anhalt.de/dokumente/hochwasserberichte.htm).

LHW / Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (2014): Bericht über das Hochwasser im Juni 2013 in Sachsen-Anhalt – Entstehung, Ablauf, Management und statistische Einordnung.

LMBV / Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, AGL Planung Nord (2014): Schriftliche Mitteilung an das LfULG Sachsen vom 12.9.2014.

LTV / Landestalsperrenverwaltung Sachsen (2013) (Hrsg.): Informationsmaterialien (Präsentationsfolien) zum Hochwasserrückhalt im Weiße-Elster-Gebiet während des Junihochwassers 2013. Pirna (unveröffentlicht).

LUBW / Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2013A) (Hrsg.): Kurzbericht zum Hochwasser Mai/Juni 2013 auf Basis von Rohdaten. Fassung vom 16. August 2013. Karlsruhe.

LUBW / Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2013B): Kurzübersicht zur Wirkung der Retentionsmaßnahmen am Oberrhein zwischen Basel und Worms beim Hochwasser Mai / Juni 2013 auf Basis von Rohdaten.

LUWG / Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht (2013) (Hrsg.): Hochwasser im Rhein – Juni 2013. Fassung vom 03. Juli 2013. Mainz.

MANIAK, U.: Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

MILLER, R. G. (1996): Grundlagen der Angewandten Statistik. München und Wien.

Ministerstvo životního prostredí (2014): Vyhodnocení povodní v červnu 2013 (Auswertung des Hochwassers im Juni 2013). Prag.

MOBERG, A. & JONES, P.D. (2005): Trends in Indices for Extremes in daily Temperature and Precipitation in Central and Western Europe 1901–99. In: *Int. J. Climatol.* **25**: 1149-1171, (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/joc.1163

MONTANI, A., CESARI, D., MARSIGLI, C., PACCAGNELLA, T. (2011): Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges, Tellus A, 63, 605-624.

MORGENSCHWEIS, G.: Hydrometrie. Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen. Springer-Verlag Heidelberg 2010

NILSON, E., KRAHE, P., LINGEMANN, I., HORSTEN, T., KLEIN, B., CARAMBIA, M., LARINA, M., MAURER, T (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. KLIWAS-Schriftenreihe 02/2014: DOI: 10.5675/Kliwas_43/2014_4.01

OGewV (2011): Oberflächengewässerverordnung Anhang V: Monitoring und Bewertung.

Pegelvorschrift, Anlage D: Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen. Hrsg. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und Bundesminister für Verkehr (BMV). Parey-Verlag: Hamburg 1991.

PROMNY, M., HAMMER, M. & BUSCH, N. (2014): Untersuchungen zur Wirkung der Deichrückverlegung Lenzen auf das Hochwasser vom Juni 2013 an der unteren Mittelelbe Korrespondenz Wasserwirtschaft 2014 (7), Nr.6.

Qualitätszirkel Gewässerkunde (2009): Handbuch moderne Pegel. Aurich.

RADEMACHER, S. BUREK, P., EBERLE, M. (2004): Niedrigwasser - Vorhersage an Bundeswasserstraßen - Entwicklung und operationeller Betrieb. In: Kleeberg, H.-B. & Koehler, G. (Hrsg.): Niedrigwassermanagement - Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz. Hydrologische Wissenschaften - Fachgemeinschaft der ATV-DVWK.

RAUTHE, M., STEINER, H., RIEDIGER, U., MAZURKIEWICZ A. & GRATZKI, A. (2013): A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), Meteorologische Zeitschhrift Vol. 22(3), p 235-256, DOI:10.1127/0941-2948/2013/0436

SCHÖL, A; EIDNER, R.; BÖHME, M. & KIRCHESCH, V. (2006): Einfluss der Buhnenfelder auf die Wasserbeschaffenheit der Mittleren Elbe. In: Pusch, M. & Fischer, H. (Hrsg.): Stoffdynamik und Habitatstruktur in der Elbe, Bd. 5., Weißensee Verlag, Berlin, 243-263.

SCHNEIDER, U., BECKER, A., FINGER, P., MEYER-CHRISTOFFER, A., ZIESE, M. & RUDOLF, B. 2014: GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. Theoretical and Applied Climatology 115 (1-2), 15-40.

SCHWANDT, D. & HÜBNER, G. (2014): Auf Hochwasser vorbereitet – Ereignisbezogenes Elbe-Messprogramm im Juni 2013. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Veranstaltungen 3/2014: 16-20. Koblenz.

SCHWANDT, D. & HÜBNER, G. (eingereicht): Das Messprogramm Extremereignisse beim Junihochwasser der Elbe 2013 – Schadstoffkonzentration und -frachten. Bericht im Auftrag der FGG Elbe (Hrsg.) mit Unterstützung der AG OW der FGG Elbe. Magdeburg.

SIMON, M. (2010): Untersuchungen zu anthropogenen Beeinträchtigungen der Wasserstände am Pegel Magdeburg-Strombrücke. PIK-Report 118, Magdeburg.

STEIN, C., MALITZ, G., et al. (Hrsg.): Deutscher Wetterdienst) (2013): Das Hochwasser an Elbe und Donau im Juni 2013. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 242, Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.

STELLING, G. S. & S. P. A. DUINMEIJER (2003): A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Volume 43, Issue 12, p. 1329-1354.

THIEL, H. (1950): A rank-invariant method of linear and polynominal regression analysis. In: Indagationes Mathematicae 12, S. 85-91.

TLUG / THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE (2013): Zusammenfassender Bericht zum Hochwasserereignis Mai / Juni 2013. Jena (unveröff.).

VAN DER LINDEN P., MITCHELL J.F.B. (2009): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter.

VOGELBACHER, A. (2014): Zuverlässigkeitsaussagen in der Praxis der Hochwasserwarnung und –vorhersage in Bayern. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung HW 58. 2014, H.2, S. 148-154.

WMO (1992): International Meteorological Vocabulary (WMO-No. 182), Genf.

WMO (2011): Guide to Climatological Practices. WMO-No. 100. 11.S. http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/WMO_100_en.pdf

ZOLINA, O., SIMMER, C., KAPALA, A., SHABANOV, P., BECKER, P., MÄCHEL, H., GULEV, S. & GROISMAN, P. (2014): Precipitation Variability and Extremes in Central Europe: New View from STAMMEX Results. Bull. Amer. Meteor. Soc., 95, 995–1002. doi: http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00134.1

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Mitteleuropa mit den vom Hochwasser 2013 hauptsächlich betroffenen Stromgebieten 7
Abb. 2.1: Flächenmittel der Monatssummen der Sonnenscheindauer in Deutschland..... 10
Abb. 2.2: Abweichung des Flächenmittels der Monatsmitteltemperaturen in Deutschland... 10
Abb. 2.3: Flächenmittel der Monatssummen des Niederschlags in Deutschland..... 11
Abb. 2.4: Tagessummen und -mittel des Gebietsniederschlags (hN) und der bodennahen Lufttemperatur (T2m) 13
Abb. 2.5: Verhältnis der in der Hochwasserperiode Mai*2013 beobachteten Niederschlagssummen zum vieljährigen Mittel der Niederschlagssumme im Mai* 1961/1990 . 15
Abb. 2.6: Prozentuale Anteile des Niederschlags in den ausgewiesenen Niederschlagsphasen an der Niederschlagsmenge des Zeitraumes Mai* 2013 für fünfzig Teileinzugsgebiete Mitteleuropas 16
Abb. 2.7: Mittlere tägliche Gebietsniederschläge für ausgewählte Phasen der hydrometeorologischen Hochwasserperiode 2013 für diesen Zeitraum gültiger Mittelwertes der Referenzperiode 1961/90 für die Stromgebiete Mitteleuropas)..... 17
Abb. 2.8: Bodenwetterkarten mit Luftdruck, Fronten und Bewölkung und Tagessumme des Niederschlages aus kalibrierten Radardaten nach dem Verfahren RADOLAN für den Zeitraum 28.05. bis 30.05.2013..... 19
Abb. 2.9: Bodenwetterkarten mit Luftdruck, Fronten und Bewölkung und Tagessumme des Niederschlages aus kalibrierten Radardaten nach dem Verfahren RADOLAN für den Zeitraum 31.05. bis 03.06.2013..... 21
Abb. 2.10: Bodenfeuchteindex in der Schicht L2 (7-28 cm) in Mitteleuropa an ausgewählten Tagen zu Beginn, während und am Ende der Hochwasserperiode 2013 24
Abb. 2.11: Niederschlag sowie volumetrische Bodenfeuchte in verschiedenen Bodentiefen 25
Abb. 3.1: Ausmaß des Juni-Hochwassers 2013 in den deutschen Bundeswasserstraßen anhand der jeweiligen statistischen Wiederkehrzeiten..... 27
Abb. 3.2: Das Einzugsgebiet der Weser einschließlich wichtiger Pegelstandorte..... 29
Abb. 3.3: Ablauf der Hochwasserwellen im Mai und Juni 2013 an Pegeln der Weser und ihren Quellflüssen Fulda und Werra 30
Abb. 3.4a: Hochwasser-Abflussganglinien vom Juni 2013 an den Weserpegeln Hannoversch Münden, Porta und lntschede..... 31
Abb. 3.4b: Ablauf der Hochwasserwelle vom Juni 2013 an der Weser 31
Abb. 3.5: Edertalsperre: Zufluss (Pegel Schmittlotheim), Abfluss (Pegel Affoldern) und Talsperrenvolumen Ende Mai/Anfang Juni 2013 32
Abb. 3.6: Das Einzugsgebiet des Rheins einschließlich wichtiger Pegelstandorte 34
Abb. 3.7a: Hochwasser-Abflussganglinien vom Juni 2013 an den Rheinpegeln Maxau, Worms, Kaub und Köln 35
Abb. 3.7b: Ablauf der Hochwasserwelle des Rheins vom Juni 2013..... 31
Abb. 3.8: Hochwassersituation an den Fließgewässern und ihren Pegeln in der Schweiz vom 01. bis 03. Juni 2013 36

Abb. 3.9: Verlauf der Hochwasserwellen im Juni 2013 im Rheinabschnitt zwischen Maxau und Worms mit der Neckarmündıng 38
Abb. 3.10: Überschreitung maßgeblicher Wasserstandsmarken an wichtigen Pegel von Rhein, Neckar und Main im Juni 2013 39
Abb. 3.11: Ablauf der Hochwasserwellen im Mai und Juni 2013 in den großen Rhein-Nebenflüssen Neckar, Main und Mosel 40
Abb. 3.12: Wirkung der Polderflutungen am Oberrhein auf den Abfluss am Pegel Maxau .. 42
Abb. 3.13: Fernwirkung der Retentionsmaßnahmen am Oberrhein auf den Niederrhein am Beispielpegel Düsseldorf 44
Abb. 3.14: Statistische Einordnung des Hochwassers im Juni 2013 im Rheingebiet 45
Abb. 3.15: Das Einzugsgebiet der Donau einschließlich wichtiger Pegelstandorte 46
Abb. 3.16a: Hochwasser-Abflussganglinien vom Juni 2013 an den Donaupegeln Ingolstadt, Regensburg-Schwabelweis, Hofkirchen und Achleiten 47
Abb. 3.16b: Ablauf der Hochwasserwelle der Donau vom Juni 2013 47
Abb. 3.17: Pegel Hofkirchen: Hochwasserganglinie der Donau mit deichbruchbedingter Scheitelbeeinflussung 49
Abb. 3.18: Juni 2013: Überschreitungen des HHW im Verlauf der Donau 50
Abb. 3.19: Überschreitung maßgeblicher Wasserstandsmarken an wichtigen Pegeln der Donau während der ersten Juniwoche 2013 51
Abb. 3.20: Hochwasserganglinien mündungsnaher Pegel der maßgeblichen Zuflüsse der deutschen Donau 52
Abb. 3.21: Hochwasser-Abflussganglinien im Juni 2013 an repräsentativen Pegeln des bayerischen Inns 53
Abb. 3.22: Statistische Einordnung des Hochwassers vom Juni 2013 im Donaugebiet 54
Abb. 3.23: Das Einzugsgebiet der Elbe einschließlich wichtiger Pegelstandorte 56
Abb. 3.24a: Ablauf der Hochwasserwelle vom Juni 2013 an der deutschen Elbe an den Pegeln Dresden, Barby, Wittenberge und Neu Darchau 58
Abb. 3.24b: Ablauf der Hochwasserwelle vom Juni 2013 an der deutschen Elbe 58
Abb. 3.25: Überschreitung maßgeblicher Wasserstandsmarken an wichtigen Pegeln der Elbe und Saale im Juni 2013 59
Abb. 3.26: Juni 2013: Überschreitungen des HHW im Verlauf der Elbe und Saale 61
Abb. 3.27: Pegel Magdeburg-Strombrücke (Elbe): Die zehn größten Wasserstandsscheitel pro Jahrhundert seit 1727 63
Abb. 3.28: Hochwasser-Abflussganglinien im Juni 2013 an mündungsnahen Pegeln wichtiger Nebenflüsse der deutschen Elbe 65
Abb. 3.29: Modellierte Scheitelwasserstandsänderungen an der Elbe während des Juni-Hochwassers 2013 für unterschiedliche Szenarienberechnungen 67
Abb. 3.30: Steuerung der Talsperre Orlík beim Hochwasser im Jahr 2013 68
Abb. 3.31: Lagekarte der Havelpolder 70
Abb. 3.32: Längsschnitt der Wasserspiegeldifferenz entlang der Gewässerachse der Elbe aus den Zuständen mit und ohne Deichrückverlegung Lenzen für den Maximalabfluss des Hochwassers 2013. 71
Abb. 3.33: Modellierte Wasserstandsganglinie am Pegel Neu Darchau mit bzw. ohne Deichrückverlegung Lenzen 72
Abb. 3.34: Hochwasserbedingt beschädigte Deiche und Deichbrüche an der sächsischen Elbestrecke 73

Abb. 3.35a: Pegel Barby: Deichbrucheffekt im Bereich des Hochwasserscheitels 74
Abb. 3.35b: Pegel Tangermünde: Deichbrucheffekt im Bereich des Hochwasserscheitels ... 74
Abb. 3.36: Lage des Deichbruchs bei Fischbeck und Ergebnis einer quasi-operationell vorgenommenen Überflutungssimulation der BfG 75
Abb. 3.37: Vergleich von rohdatenbasierten Modellberechnungen am Pegel Tangermünde mit und ohne Berücksichtigung der Deichbrüche Breitenhagen (Saale) und Fischbeck (Elbe)..... 75
Abb. 4.1: Tageswerte der Schwebstofffracht im Rhein zwischen dem 27. Mai und dem 21. Juni 2013. 80
Abb. 4.2: Tageswerte der Schwebstofffracht von Nebenflüssen des Rheins zwischen dem 27. Mai und dem 21. Juni 2013. 80
Abb. 4.3: Tageswerte der Schwebstofffracht der Donau zwischen dem 27. Mai und dem 21. Juni 2013 81
Abb. 4.4: Tageswerte der Schwebstofffracht im Wesergebiet zwischen dem 16. Mai und dem 20. Juni 2013 82
Abb. 4.5: Tageswerte der Schwebstofffracht im Elbegebiet zwischen dem 27. Mai und dem 20. Juni 2013 83
Abb. 4.6: Tageswerte der Schwebstofffracht im Elbegebiet zwischen dem 27. Mai und dem 20. Juni 2013 83
Abb. 4.7: Vergleich der Gesamtschwebstofffracht des Hochwasserereignisses 2013 mit der mittleren Jahresfracht im Längsschnitt der Elbe. 85
Abb. 4.8: Schwebstoffkonzentrationen an der Messstelle Hitzacker und Abflüsse am Bezugspegel Neu Darchau für das Kalenderjahr 2013. 85
Abb. 4.9: Tagesmittelwerte Mai bis Juli 2013 von Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt in Hemelingen (Weser) 88
Abb. 4.10: Tagesmittelwerte Mai bis Juli 2013 von Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt in Koblenz und Lobith (Rhein) 89
Abb. 4.11: Wöchentliche Messungen Mai bis Juli 2013 des Chlorophyll-a-Gehalts 89
Abb. 4.12: Tagesmittelwerte Mai bis Juli 2013 von Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt in Regensburg (Donau) 90
Abb. 4.13: Tagesmittelwerte Mai bis Juli 2013 von Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt in Dommitzsch, Schnackenburg und Seemannshöft (Elbe) 91
Abb. 4.14: Mittelwert der Tagesmittelwerte, Minima und Maxima der Tagesmittelwerte in den Monaten Mai bis Juli 2003-2012 sowie 2013 des Chlorophyll-a-Gehalts in Bunthaus und Seemannshöft (Elbe). Abfluss des Pegels Neu Darchau. 92
Abb. 4.15: Punktuelle Längsprofile des Sauerstoffgehalts in der Tideelbe im August 2002 92
Abb. 4.16: Karte der Messstellen/Ersatzmessstellen und Referenzpegel des Mess-programms Extremereignisse an der Elbe..... 94
Abb. 4.17: Konzentration von abfiltrierbaren Stoffen und Quecksilber im Wasser (unfiltriert) der Binnenelbe im Vergleich zum normierten Wasserstand an den Bezugspegeln im Zeitraum 03.-20.6.2013 95
Abb. 4.18: Gehalt des p,p´-DDE im Schwebstoff von Elbe und Mulde vom 03.-20.06.2013 im Vergleich zum Mittel- und Höchstwert des Jahres 2012 97
Abb. 4.19: Spurenstoffe mit „stark erhöhten“ Konzentrationen/Gehalten an Messstellen im Elbegebiet während des Juni-Hochwassers 2013 98

Abb. 4.20: Geschätzte Fracht von Schwermetallen und Arsen in der Elbe, Mulde und Saale im Zeitraum 03.-20.06.2013 als prozentualer Anteil der Jahresfracht 2012 99

Abb. 4.21: Zeitliche Entwicklung (2000-2014) der Gehalte des p,p`-DDD an der DMS Wedel an der Elbe und des Oberwasserabflusses am Bezugspegel Neu Darchau 101

Abb. 4.22: Ausschnittsvergrößerung des Konzentrationsverlaufs von p,p-DDD an den DMS Geesthacht, Wedel und Bützfleth und des Oberwasserabflusses am Bezugspegel Neu Darchau. 103

Abb. 4.23: Zeitliche Entwicklung (2002-2013) der p,p-,-DDD-Gehalte an zwei Dauermessstationen der Tideweser (Farge und Bremerhaven) mit dem Oberwasserabfluss am Bezugspegel Intschede 105

Abb. 5.1: Tägliche Webzugriffe vom 29.05. bis 16.06.2013 auf ELWIS und PEGELONLINE sowie deren Summen 109

Abb. 5.2: Prinzip der kontinuierlichen Abflussermittlung 110

Abb. 5.3: Systemskizze von Elbe und Saale mit WSV-Pegeln und den wichtigsten Nebenflüssen und Pegeln 113

Abb. 5.4: Hochwasserganglinie der Elbe am Pegel Neu Darchau mit Basisabfluss 118

Abb. 5.5: Abflussfüllen des Juni-Hochwassers 2013 entlang der Elbe 118

Abb. 5.6: Wasserspiegelfixierungen der Hochwasser von August 2002 und Juni 2013 an der Mittelelbe, berechnete Wasserspiegellinien für MQ und MHQ sowie Talweg 2004 122

Abb. 5.7: Normierte Wasserstandsganglinien und Zeitpunkte der Passage der Wasserspiegelfixierungen an Pegeln sowie Befliegungszeitpunkte während des Hochwassers 2013 an der Elbe 123

Abb. 5.8: Scheitelwasserspiegellinie beim Juni-Hochwasser an der Elbe durch Wasserspiegelfixierungen mit Messschiff und Geschwemmselmethode 124

Abb. 5.9: Auswertung von Wasserspiegelfixierungen des Zeitraums 2009-2014 bei Rhein-km 375 mit FLYS 125

Abb. 5.10: Flugrouten der Deichbefliegungen der Elbe durch die Ölüberwachungsflugzeuge aufgeteilt nach den einzelnen Tage. 128

Abb. 5.11: Sensordatenset einer gemeldeten wahrscheinlichen Durchfeuchtungsstelle 129

Abb. 5.12: Befliegungsübersichten der stereophotogrammetrisch auswertbaren Hochwassererfassungen 06/2013 an Elbe/Saale/Mulde, Donau, Rhein und Weser 131

Abb. 5.13: Gesuchte Wasser-Land-Grenzen- und Wasserspiegellageninformationen 133

Abb. 5.14: Luftbild: Elbedeichbruchsituation Fischbeck, Elbe-km 388, 11.06.2013 135

Abb. 5.15: Bildmittenübersicht Elbe-km 387-389 135

Abb. 5.16: Luftbildmosaik, Elbedeichbruchsituation Fischbeck, 11.06.2013 136

Abb. 5.17: Produkte 3D-WLG-Punkte und 3D-WLG-Linien mit m-Höhenangabe und Attributen der Messung, Elbe-km 326, Magdeburg, 09.06.2013 138

Abb. 5.18: Produkt 3D-Wspl-Punkte mit m-Höhenangabe, Elbe-km 543, Neu Garge/Alt Garge, 12.06.2013 138

Abb. 6.1: Nationale und internationale Vernetzung der Hochwasservorhersageberechnungen für deutsche Binnengewässer 143

Abb. 6.2: Darstellung der einzelnen Vorhersagewerte im Bezug zum Messwert aus der Hochwasservorhersage für den Pegel Magdeburg-Strombrücke. 149

Abb. 7.1: Überschreitungsdauern des HSW während des Hochwassers 151
Abb. 7.2: Hochwasserschäden an der Verkehrsinfrastruktur des Bundes: Überflutung des Autobahnkreuzes A3/A92 bei Deggendorf (Donau) im Juni 2013 153
Abb. 8.1: Ereignisniederschläge der Hochwasser 2002 und 2013 im Donaugebiet 155
Abb. 8.2: Tägliche und aufsummierte tägliche Gebietsniederschlagshöhen für zwei Teileinzugsgebiete der Donau für einen 30-tägigen Zeitraum vor dem Ende des hochwasserauslösenden Niederschlagsereignisses am 12. August 2002 bzw. 03. Juni 2013. 155
Abb. 8.3: Tägliche und aufsummierte tägliche Gebietsniederschlagshöhen für zwei Teileinzugsgebiete der Elbe für einen 30-tägigen Zeitraum vor Ende des hochwasserauslösenden Niederschlagsereignisses am 13. August 2002 bzw. 03. Juni 2013 157
Abb. 8.4: Donau: Vergleich der Hochwasser-Abflussscheitel der Jahre 2002 und 2013 an repräsentativen Pegeln 158
Abb. 8.5: Pegel Achleiten/Donau: Hochwasser-Abflussganglinien der Jahre 2002 und 2013 158
Abb. 8.6: Elbe: Vergleich der Hochwasser-Abflussscheitel der Jahre 2002 und 2013 an repräsentativen Pegeln 159
Abb. 8.7: Pegel Barby/Elbe: Hochwasser-Abflussganglinien der Jahre 2002 und 2013..... 160
Abb. 8.8: Pegel Köln/Niederrhein: nicht signifikante Anstiegstendenzen der HQ-Scheitel mit Jahresbezug, für Sommer- und Winterhalbjahre..... 162
Abb. 8.9: Pegel Maxau/Oberrhein: saisonal gleiche Entwicklung halbjährlicher Hochwasserscheitel, signifikante steigende Trends 162
Abb. 8.10: Pegel Dresden/Obere Elbe: gegensätzliche Tendenzaussagen bei sommerlichen Hochwasserereignissen (Mai bis Oktober)..... 163
Abb. 8.11: Pegel Neu Darchau/Mittelelbe: signifikant ansteigende Trends der HQ-Scheitel mit Jahres- und Winterbezug, Indifferenz im Sommerhalbjahr 163
Abb. 8.12: Pegel Intschede (Weser): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Periode 1946/2013 und den Zeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 165
Abb. 8.13a: Pegel Maxau (Oberrhein): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Periode 1946/2013 und den Zeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 166
Abb. 8.13b: Pegel Köln (Niederrhein): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Periode 1946/2013 und den Zeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 166
Abb. 8.14: Pegel Würzburg (Main): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Periode 1946/2013 und den Zeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013..... 167
Abb. 8.15a: Pegel Hofkirchen (Donau): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Periode 1946/2013 und den Zeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 168
Abb. 8.15b: Pegel Achleiten (Donau): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Periode 1946/2013 und den Zeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 168
Abb. 8.16a: Pegel Dresden (Elbe): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Periode 1946/2013 und den Zeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013..... 169
Abb. 8.16b: Pegel Neu Darchau (Elbe): Saisonalitätsverhalten von Hochwasserereignissen in der Periode 1946/2013 und den Zeiträumen 1946/1980 bzw. 1981/2013 169
Abb. 8.17: Pegel Achleiten (Donau): zeitlich gleitende Extremwertanalyse (Gleitfensterweite 30 Jahre) anhand der Entwicklung der Wiederkehrzeit für drei verschiedene HQ-Intensitätsniveaus, Periode 1946/2013 171

Abb. 8.18: Weser, Rhein, Donau und Elbe: zeitlich gleitende Extremwertanalyse (Gleitfensterweite 30 Jahre) an repräsentativen Pegeln anhand der Entwicklung der Wiederkehrzeit für drei verschiedene HQ-Intensitätsniveaus, Periode 1946/2013 172

Abb. 8.19: Trendanalyse der Hochwasserfülle bei standardisierter 22-tägiger Ereignisdauer an den Pegeln Hofkirchen (Donau), Achleiten (Donau), Dresden (Obere Elbe) und Neu Darchau (Mittelelbe), Periode 1946/2013 174

Abb. 8.20: Verhältnis der größten 31-Tagessumme des Niederschlages in der Zeitspanne 15. April bis 15. Juni zum vieljährigen Mittel der größten 31-Tagessumme der Zeitreihe 1961/1990 für 50 Teileinzugsgebiete in Mitteleuropa 178

Abb. 8.21: Verhältnis der größten 5-Tagessumme des Niederschlages in der Zeitspanne 25. April bis 05. Juni zum vieljährigen Mittel der größten 5-Tagessumme der Zeitreihe 1961/1990 für 50 Teileinzugsgebiete in Mitteleuropa 179

Abb. 8.22: Gebietsmittel Aller-Leine: größte 31- (oben) und 5-Tagessummen (unten) des Niederschlages in den Zeitspannen 15. April bis 15. Juni bzw. 25. April bis 05. Juni im Zeitraum 1950/2013 181

Abb. 8.23: Gebietsmittel oberer Main: größte 31- und 5-Tagessummen des Niederschlages in den Zeitspannen 15. April bis 15. Juni bzw. 25. April bis 05. Juni im Zeitraum 1950/2013 182

Abb. 8.24: Gebietsmittel unterer Inn: größte 31- und 5-Tagessummen des Niederschlages in den Zeitspannen 15. April bis 15. Juni bzw. 25. April bis 05. Juni im Zeitraum 1950/2013 183

Abb. 8.25: Gebietsmittel Mulde: größte 31- und 5-Tagessummen des Niederschlages in den Zeitspannen 15. April bis 15. Juni bzw. 25. April bis 05. Juni im Zeitraum 1950/2013 184

Abb. 8.26: Anzahl der Tage, an denen die über 31 Tage gemittelte größte Niederschlagssumme in den Monaten Mai und Juni einen Grenzwert überschreitet 186

Abb. 8.27: Anzahl der Tage, an denen die über 5 Tage gemittelte größte Niederschlagssumme in den Monaten Mai und Juni einen Grenzwert überschreitet 187

Abb. 8.28: Pegel Kaub/Rhein: Anzahl der jährlichen höchsten Tageswerte des Abflusses (HM1Q) eines hydrologischen Jahres, die im Mai oder Juni in den 30-jährigen Zeitreihen 1961/1990, 2021/2050 und 2071/2100 auftreten 189

Abb. 8.29: Pegel Barby/Elbe: Anzahl der jährlichen höchsten Tageswerte des Abflusses (HM1Q) eines hydrologischen Jahres, die im Mai oder Juni in den 30-jährigen Zeitreihen 1961/1990, 2021/2050 und 2071/2100 auftreten 189

Abb. 8.30: Mögliche Änderungen der höchsten 5-Tagesmittelwerte des Abflusses (HM5Q) am Mittelrheinpegel Kaub für hydrologische Jahre und Halbjahre im Zeitraum 1950/2100 als Reaktion auf den Globalen Klimawandel unter Annahme des A1B SRES-Emissionsszenarios. 190

Abb. 8.31: Mögliche Änderungen der höchsten 5-Tagesmittelwerte des Abflusses (HM5Q) an der mittleren Elbe Pegel Barby für hydrologische Jahre und Halbjahre im Zeitraum 1951/2100 als Reaktion auf den Globalen Klimawandel unter Annahme des A1B SRES-Emissionsszenarios. 191

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Großwetterlagen nach Hess & Brezowsky mit Kurzbeschreibung der atmosphärischen Strömung und des Niederschlag- und Wettergeschehens im April, Mai und Juni 2013 12

Tab. 2.2: Niederschlagshöhen der verschiedenen Phasen der hochwasserrelevanten Witterungsperiode Mai* 2013, Phasen in mm und als Vielfaches des Mittelwertes der Periode 1961/1990 für die Einzugsgebiete von Donau, Rhein sowie die tideunbeeinflussten Gebietsanteile von Weser und Elbe 13

Tab. 2.3: Niederschlagsreiche Tage, definiert als Tage mit einer Gebietsniederschlagshöhe ≥ 10 mm und Gebietsniederschlagshöhen in mm in der hydrometeorologischen Hochwasserperiode Mai* 2013 in den Stromgebieten von Donau, Rhein, Ems-Weser, Elbe und Oder (ohne tidebeeinflusste Gebietsanteile). 18

Tab. 3.1: Das Juni-Hochwasser 2013 an wichtigen Pegeln an der Weser im Ereignisvergleich 33

Tab. 3.2: Das Juni-Hochwasser 2013 an wichtigen Pegeln im alpinen und voralpinen Rheingebiet 36

Tab. 3.3: Scheitelwerte beim Juni-Hochwasser 2013 an ausgewählten Pegeln im deutschen Rheineinzugsgebiet 38

Tab. 3.4: Volumina der Retentionsmaßnahmen am Oberrhein 41

Tab. 3.5: Großräumige Reduktionen der Hochwasserscheitel durch die am Oberrhein eingesetzten Retentionsmaßnahmen mit Vergleichsrechnungen 43

Tab. 3.6: Das Juni-Hochwasser 2013 an wichtigen Pegeln am Rhein im Ereignisvergleich .. 44

Tab. 3.7: Gemessene Scheitelwerte an ausgewählten Pegeln im deutschen Donaueinzugsgebiet 48

Tab. 3.8: Das Juni-Hochwasser 2013 an wichtigen Pegeln an der Donau im Ereignisvergleich 55

Tab. 3.9: Gemessene Scheitelwerte an ausgewählten Pegeln im tschechischen Elbegebiet .. 57

Tab. 3.10: Hochwasser-Scheitelwerte an ausgewählten Pegeln im deutschen Elbegebiet 60

Tab. 3.11: HHW-Überschreitungen beim Juni-Hochwasser 2013 an den Bundeswasserstraßen Elbe und Saale 62

Tab. 3.12: Das Juni-Hochwasser 2013 an wichtigen Pegeln an der Elbe im Ereignisvergleich 76

Tab. 4.1: Bezugspegel für Messstellen der Wasser- und Schwebstoffbeschaffenheit an Elbe, Mulde und Saale 95

Tab. 4.2: Maximale Gehalte von Schwermetallen und Arsen im Schwebstoff der Elbe und Mulde im Jahr 2012 und beim Juni-Hochwasser 2013 96

Tab. 4.3: Maximale Gehalte von HCH im Schwebstoff der Elbe und Mulde im Jahr 2012 und beim Juni-Hochwasser 2013 97

Tab. 4.4: Frachtschätzung von abfiltrierbaren Stoffen, Schwermetallen und Arsen an Messstellen der Elbe, Mulde und Saale im Zeitraum 03.-20.06.2013 98

Tab. 4.5: Vergleich der Frachtschätzungen von abfiltrierbaren Stoffen, Schwermetallen und Arsen der Elbe bei Magdeburg über 7 Tage während der Hochwasserereignisse 2002, 2006 und 2013 100
Tab. 4.6: Schadstofffrachten am Wehr Geesthacht während des Hochwassers im Juni und Juli 2013 104
Tab. 5.1: Eckdaten zu Abflusspegeln der WSV an der Elbe 114
Tab. 5.2: Eckdaten der wichtigsten Nebenflüsse der Elbe und der mündungsnahen Pegel . 114
Tab. 5.3: Eckdaten zu Abflusspegeln der WSV an der Saale 115
Tab. 5.4: Eckdaten der wichtigsten Nebenflüssen der Saale und ihrer mündungsnahen Pegel 115
Tab. 5.5: Durchflussmessungen an der Elbe beim Extremhochwasser im Juni 2013 116
Tab. 5.6: Durchflussmessungen an der Saale beim Extremhochwasser 2013 117
Tab. 5.7: Abflussmessungen an der Donau im Juni 2013 119
Tab. 5.8: Abflussmessungen an der Werra im Juni 2013 119
Tab. 5.9: Abflussmessungen am Main im Juni 2013 119
Tab. 5.10: Abflussmessungen an Ober- und Mittelrhein im Juni 2013 120
Tab. 5.11: Zusammenstellung der geforderten Produkte und Spezifikationen 132
Tab. 5.12: Zusammenstellung der Bilddatenerfassungen von den Hochwasserereignissen Juni 2013 134
Tab. 5.13: Zusammenstellung der photogrammetrischen Ergebnisdaten 137
Tab. 8.1: Ergebnisse der Trenduntersuchung der HQ-Scheitel ausgewählter Pegel an Bundeswasserstraßen, Periode 1945/2013 161
Tab. 8.2: Veränderung des saisonalen Verhaltens von Hochwasserextremen an repräsentativen Pegeln der Bundeswasserstraßen seit Mitte des 20. Jahrhunderts 165

Abkürzungen

(j,4,3)	niedrigwasserbezogenes Wasserwirtschaftsjahr
(j,4,9)	niedrigwasserbezogenes Wasserwirtschaftssommerhalbjahr
(j,5,10)	hydrologisches Sommerhalbjahr
(j,10,3)	niedrigwasserbezogenes Wasserwirtschaftswinterhalbjahr
(j,11,10)	hydrologisches Jahr
(j,11,4)	hydrologisches Winterhalbjahr
A	Abflusshöhe
AEO	oberirdisches Einzugsgebiet
APP	application software; Software für mobile Geräte wie Smartphones und Tablets
ARGE	Arbeitsgemeinschaft
B	Bestimmheitsmaß (synonym: R^2)
BfUL	Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
BAFU	Bundesamt für Umwelt (der Schweiz)
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
DBT	Dibutylzinn
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
DDD	Dichlordiphenyldichlorethan
DDE	Dichlordiphenyldichlorethen
DGPS	Differential Global Positioning System
DHHN92	Deutsches Haupthöhennetz 1992
DMS	Dauermessstelle
DOP	Digitales Orthophoto
DRV	Deichrückverlegung
DWD	Deutscher Wetterdienst
E	Gebietsverdunstung
ELWIS	Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice
ET_r	Gras-Referenzverdunstung
E_U	Unterschiedshöhe
EZMW	Europäisches Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage
FGG	Flussgebietsgemeinschaft
FIS	Fachinformationssystem
GlW	gleichwertige Wasserstände
GSD	Ground Sampling Distance (Bodenauflösung im Bild)
GWL	Großwetterlage
hA	Abflusshöhe
HCB	Hexachlorbenzol
HCH	Hexachlorcyclohexan

hETr	Gras-Referenzverdunstungshöhe
HHQ	der höchste bekannte Momentanwert des Durchflusses an einem Pegel
HHW	der höchste bekannte Momentanwert des Wasserstandes an einem Pegel
HK	Havariekommando
hN	(Gebiets-)Niederschlagshöhen
hNmax	höchste Niederschlagshöhe eines Jahres (j) bzw. Halbjahres (w), (s)
HQ	höchster Wert des Durchflusses einer Untersuchungsperiode/innerhalb eines Jahres ($_J$) oder Winter- ($_W$)- oder Sommerhalbjahres ($_S$)
HQ_J	siehe HQ
HQ_S	siehe HQ
HQ_W	siehe HQ
HSW	höchster schiffbarer Wasserstand
HThw	höchster Tidehochwasserstand
HTK	Höhentiefkern
HU	Institut für Hygiene und Umwelt Stadt Hamburg
HVZ	Hochwasservorhersagezentale
HW	höchster Wert des Wasserstands einer Untersuchungsperiode/innerhalb eines Jahres ($_J$) oder Winter- ($_W$)- oder Sommerhalbjahres ($_S$)
HW_J	siehe HW
HW_S	siehe HW
HW_W	siehe HW
iOS	Betriebssystem von Apple für mobile Geräte
IKSE	Internationale Kommission zum Schutz der Elbe
IKSR	Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins
IR	Infrarot oder Infrarot-Scanner
KB	KiloByte, Maßeinheit für eine Datenmenge
KWB	Klimatische Wasserbilanz, Differenz zwischen Niederschlag und Gras-referenzverdunstung
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LHW	Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt
LLBB	Landeslabor Berlin - Brandenburg
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
LSM	Least Square Methode
LTV	Landestalsperrenverwaltung
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
LUGV	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg
LUWG	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
MBT	Monobutylzinn
MELUR	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit
MFG3	Marinefliegergeschwader 3 „Graf Zeppelin“
MGN	Gebietsniederschlagsmittel
MHQ	mittlerer Hochwasserabfluss
MHW	arithmetischer Mittelwert der jeweils höchsten Wasserstände eines Jahres in einer zu definierenden Untersuchungsperiode

mMQ	arithmetischer Mittelwert des Abflusses eines Einzelmonats in einer Untersuchungsperiode (synonym zu MQ(m))
MNQ	arithmetischer Mittelwert der jeweils niedrigsten Abflüsse eines Jahres in einer zu definierenden Untersuchungsperiode
MQ	arithmetischer Mittelwert des Abflusses in einer Untersuchungsperiode/ innerhalb eines Jahres ($_J$) oder Winter- ($_W$)- oder Sommerhalbjahres ($_S$)
MQ_J	siehe MQ
MQ_S	siehe MQ
MQ_W	siehe MQ
MQ(m)	arithmetischer Mittelwert des Abflusses eines Einzelmonats in einer Untersuchungsperiode; hier verwendet in einigen Ergebnisdarstellungen (Grafiken u. Tabellen), synonym zu mMQ (s.o.)
MWR	Mikrowellenradiometer
N	Niederschlag
nGWL_F	Anzahl der Tage mit feuchter Witterung (Niederschlagstage)
nGWL_FT	Differenz der Tage mit feuchter und trockener Witterung
nGWL_HM	Anzahl der Tage mit GWL „ HOCH MITTELEUROPA“
nGWL_T	Anzahl der Tage mit trockener Witterung, d.h. Tage ohne oder nur mit geringem Niederschlag
nGWL_WZ	Anzahl der Tage mit GWL „WEST ZYKLONAL“
NM7Q	niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses von 7 aufeinanderfolgenden Tagen innerhalb eines Jahres (j) oder Winter- (w) und Sommerhalbjahres (s)
NM21Q	niedrigstes arithmetisches Mittel des Abflusses von bzw. 21 aufeinanderfolgenden Tagen innerhalb eines Jahres (j) oder Winter- (w) und Sommerhalbjahres (s)
NN	Normalnull
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
OGC	Open Geospatial Consortium
OP	Oberwasserpegel
$\sum_7$PCB	Summe der 7 Polychlorierten Biphenyle (PCB 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180)
PET	Potenzielle Verdunstung
PNP	Pegelnullpunkt
REST	Representational State Transfer; Programmierparadigma für Webanwendungen
RGB-Bild	Echtfarbbild (rot, grün, blau)
R^2	Bestimmtheitsmaß (synonym: B)
SOAP	Simple Object Access Protocol; Netzwerkprotokoll zum Austausch von Daten und zum Aufruf von Funktionen auf anderen Servern
SumhN	Niederschlagsjahres- (j) oder Winter- (w) und Sommerhalbjahres-summe (s)
TBT	Tributylzinn
TLUG	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
tQ	Tagesmittelwert des Abflusses
TS	Trockensubstanz
UBA	Umweltbundesamt
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
UP	Unterwasserpegel
UTC	Universal Time Coordinated
v	robuster Variationskoeffizient

WFS	Web Feature Service der OGC
WLG	Wasser-Land-Grenze
WMCN	Dutch Water Management Centre
WMO	World Meteorological Organization
WMS	Web Mapping Service der OGC
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
Wspl	Wasserspiegellage
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (Wien)

Abkürzungen der Pegelnamen in den Einzugsgebietskarten

(Abbildungen 1.1 / 3.2 / 3.6 / 3.15 und 3.23)

Kennung	**Pegelname**	Flussgebiet
DORV	Dörverden	Weser
GUNT	Guntershausen	
HANN	Hann-Muenden	
INTS	Intschede	
LETZ	Letzter Heller	
RETH	Rethem	
VLOT	Vlotho	
ANDE	Andernach	Rhein
ANDF	Andelfingen	
BASE	Basel	
COCH	Cochem	
DIEP	Diepoldsau	
EMME	Emmerich	
HDLB	Heidelberg	
KAUB	Kaub	
KOEL	Köln	
MAIN	Mainz	
MAXA	Maxau	
NEUH	Neuhausen Flurlingerbr	
REKI	Rekingen	
RHEI	Rheinfelden Wst	
ROCK	Rockenau-SKA	
RUHR	Ruhrort	
SPEY	Speyer	
TAUB	Tauberbischofsheim	
TRUN	Trunstadt	
UNTE	Untersiggenthal-Stilli	
WORM	Worms	
WUER	Würzburg	

ACHL	Achleiten	Donau
AUGS	Augsburg u.W.	
BERG	Berg	
BURG	Burghausen	
HEIT	Heitzenhofen	
HOFK	Hofkirchen	
INGO	Ingolstadt	
MARI	Marienthal	
OBAU	Oberaudorf	
PAIN	Passau Ingling	
PASS	Passau	
PFEL	Pfelling	
PLAT	Plattling	
ROSM	Rosenheim	
SCHW	Schwabelweis	
WASS	Wasserburg	
WIBL	Wiblingen	
AKEN	Aken	Elbe
BARB	Barby	
BDUE	Bad Dueben	
BERO	Beroun	
CAGR	Calbe Grizehne	
COSW	Coswig	
DECI	Decin	
DRES	Dresden	
GOLZ	Golzern 1	
HAVS	Havelberg-Stadt	
KOST	Kostelec	
MAGD	Magdeburg Strombruecke	
MELN	Melnik	
NESP	Nespeky	
NEUD	Neu Darchau	
PAUL	Hamburg St- Pauli	
PRAH	Prag	
PRIO	Priorau	
RIES	Riesa	
ROPZ	Röpzig	
SCHO	Schöna	
TANG	Tangermünde	
TORG	Torgau	
TROT	Halle-Trotha	
VEST	Vestrev	
WITE	Wittenberge	
WITT	Wittenberg	
ZOLL	Zollenspieker	

Legende zu den Karten der Abbildungen 1.1 / 3.2 / 3.6 / 3.15 und 3.23
(CORINE Bodenbedeckung, UBA 2011).

BEBAUTE FLÄCHEN
STÄDTISCH GEPRÄGTE FLÄCHEN
- 111 Durchgängig städtische Prägung
- 112 Nicht durchgängig städtische Prägung

INDUSTRIE-, GEWERBE- UND VERKEHRSFLÄCHEN
- 121 Industrie- und Gewerbeflächen
- 122 Straßen, Eisenbahn
- 123 Hafengebiete
- 124 Flughäfen

ABBAUFLÄCHEN, DEPONIEN und BAUSTELLEN
- 131 Abbauflächen
- 132 Deponien und Abraumhalden
- 133 Baustellen

GRÜNFLÄCHEN
- 141 Städtische Grünflächen
- 142 Sport- und Freizeitanlagen

LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN
ACKERFLÄCHEN
- 211 Nicht bewässertes Ackerland

DAUERKULTUREN
- 221 Weinbauflächen
- 222 Obst- und Beerenobstbestände

GRÜNLAND
- 231 Wiesen und Weiden

HETEROGENE LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN
- 242 Komplexe Parzellenstrukturen
- 243 Landwirtschaft und natürliche Bodenbedeckung

WÄLDER UND NATURNAHE FLÄCHEN
WÄLDER
- 311 Laubwälder
- 312 Nadelwälder
- 313 Mischwälder

STRAUCH- UND KRAUTVEGETATION
- 321 Natürliches Grünland
- 322 Heiden und Moorheiden
- 324 Wald-Strauch-Übergangsstadien

OFFENE FLÄCHEN OHNE / MIT GERINGER VEGETATION
- 331 Strände, Dünen und Sandflächen
- 332 Felsflächen ohne Vegetation
- 333 Flächen mit spärlicher Vegetation
- 334 Brandflächen
- 335 Gletscher und Dauerschneegebiete

FEUCHTFLÄCHEN
FEUCHTFLÄCHEN IM LANDESINNERN
- 411 Sümpfe
- 412 Torfmoore

FEUCHTFLÄCHEN AN DER KÜSTE
- 421 Salzwiesen
- 423 In der Gezeitenzone liegende Flächen

WASSERFLÄCHEN
WASSERFLÄCHEN IM LANDESINNERN
- 511 Gewässerläufe
- 512 Wasserflächen

MEERESGEWÄSSER
- 521 Lagunen
- 522 Mündungsgebiete
- 523 Meere und Ozeane
- Flächen außerhalb des Bearbeitungsgebietes

Glossar

Benennung	Einheit	Erklärung / Definition	Quelle
Abfluss (Q)	[l/s, m³/s]	a) Allgemein: unter dem Einfluss der Schwerkraft auf und unter der Landoberfläche sich bewegendes Wasser b) Quantitativ: Wasservolumen, das einen bestimmten Querschnitt in der Zeiteinheit durchfließt und einem Einzugsgebiet zugeordnet ist *vgl. → Durchfluss*	DIN 4049-3
Abflusskurve		Bezugskurve zwischen den → Wasserständen (W) und den zugehörigen → Abflüssen bzw. → Durchflüssen für einen bestimmten → Abflussquerschnitt *vgl. → W-Q-Beziehung*	DIN 4049-3
Abflussquerschnitt *(auch: Fließquerschnitt)*	[m²]	Fläche normal zur Hauptströmungsrichtung, die von einer Flüssigkeit durchströmt wird	DIN 4044 DIN 4047-5
Abflussregime		charakteristischer innerjährlicher Verlauf des → Abflusses eines Gewässers mit seinen Höhen und Tiefen, bestimmt durch Einzugsgebiets- und Klimamerkmale	
Akkumulation *(auch: Sedimentation, Auflandung, Verlandung)*	[-]	Ablagerung von Wasserinhaltsstoffen Je nach dem Ort der Ablagerung unterscheidet man zwischen fluvialer, limnischer und mariner Sedimentation.	DIN 4049-3
Bettbildung	[-]	Umgestaltung des Gewässerbettes durch Strömungsangriff und Feststofftransport	
Bewegliche Sohle	[-]	Gewässersohle mit Lockersedimenten, die auflanden und eintiefen kann	
Bezugswasserstand *(auch GIW, RW und MW)*	[cm], [m+NHN]	Wasserstand, auf den sich Regelungsziele beziehen: *niedriger Bezugswasserstand: z.B. GIW zur Festlegung der angestrebten Mindestfahrrinnentiefe* *mittlerer Bezugswasserstand: z.B. MW1971/2000 zur Festlegung der Bauwerkssollhöhe*	
Bodenfeuchteindex		Maß für die Feuchteverhältnisse des Bodens *Hier: Bodenfeuchte der durchwurzelten Zone, ermittelt anhand von Scatterometer-Daten, die nach einem Schema des EZMWF assimiliert wurden (s. Abschnitt 2.6)*	
Bodentief		Gebiet relativ geringen Luftdrucks in geringer Höhe	
Dauerzahl		Zahl, die angibt, von wie viel gleichartigen zeitäquidistanten Werten (z.B. Tageswerte des Abflusses) ein bestimmter Wert innerhalb einer bestimmten Zeitspanne unterschritten (Unterschreitungszahl) bzw. erreicht oder überschritten (Überschreitungszahl) wird	DIN 4049-1

Benennung	Einheit	Erklärung / Definition	Quelle
Deichrückverlegung		Verlegung eines Deiches in weiter vom Fließgewässer entferntes Gelände mit dem Ziel, den Hochwasserrückhalteraum zu vergrößern	
Deviation		Ableitung, Umleitung *hier: …von Wasserläufen oder Flächenüberflutungen*	
Durchfluss (Q)	[l/s, m³/s]	Wasservolumen, das einen bestimmten Querschnitt in der Zeiteinheit durchfließt. *Anmerkung: unabhängig von der Zuordnung zu einem Einzugsgebiet; vgl. → Abfluss*	DIN 4044 DIN 4049-3
ELWIS		Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice (www.elwis.de)	
Erosion *(auch Sohlerosion, -eintiefung)*	[-]	Abtragung von Gestein durch Wasser *Man unterscheidet flächenhafte Erosion (Flächenabtrag) und lineare Erosion (Rinnenerosion).*	DIN 4049-3
Flussregelung		Wasserstraßenausbau zur Verbesserung der Wasserstands- und Strömungsverhältnisse durch flussbauliche Maßnahmen, ausgenommen durch Stauanlagen *Maßnahmen sind z.B. Buhnen, Parallelwerke, Geschiebebewirtschaftung.*	DIN 4054
FLYS		Flusshydrologischer Webdienst (www.bafg.de/FLYS) Online-Fachdienst der BfG als umfassender Datenservice für die Bearbeitung hydraulischer, hydrologischer und morphologischer Aufgabenstellungen	
Ganglinie		grafische Darstellung von Werten (z.B. Wasserstand oder Abfluss) in ihrer zeitlichen Reihenfolge	DIN 4049-1
GlW - Gleichwertige Wasserstände	[cm], [m+NHN]	einander entsprechende Wasserstände in verschiedenen Abflussquerschnitten eines Fließgewässers bei gleicher Unter- (Über-) schreitungsdauer. *Der GlW 1989*(20d), der gültige niedrige Bezugswasserstand der Elbe, ist der Wasserstand, der im Mittel von sieben trockenen und mittleren Jahre zwischen 1973 und 1986 an durchschnittlich 20 eisfreien Tagen unterschritten wird. Er liegt in der Größe des langjährigen mittleren Niedrigwassers (MNW).*	DIN 4049-1 BAW (1991)
Hauptwerte - Abfluss - Wasserstand		Sammelbegriff für die in der Hydrologie gebräuchlichsten statistischen Werte, z.B. Extremwerte, Mittelwerte, Mediane, unter- oder überschrittene Werte. Die Bezugszeitspanne ist jeweils anzugeben, z.B. MQ 1971/2000	DIN 4049-1
HHQ, HHW	[m³/s] bzw. [cm]	höchster bekannter Durchfluss (HHQ) bzw Wasserstand (HHW) an einem Pegel	DIN 4049-3

Benennung	Einheit	Erklärung / Definition	Quelle
Hochwasser-meldestufen		Wasserstandsschwellenwerte (in der Regel in drei oder vier Stufen differenziert), deren Erreichen bei Hochwasser ein bestimmtes Überflutungsausmaß charakterisiert und bestimmte Informations- und Schutzmaßnahmen durch die zuständigen Behörden auslöst	
Höhentief		Tiefdruckgebiet in relativ großer Höhe, meist ~ 5 km	
HSW	[cm], [m+NHN]	höchster schiffbarer Wasserstand	DIN 4054
HThw		höchster Wert des Tidehochwassers eines bestimmten Zeitraums	
hydrologisches Jahr		In Deutschland der Zeitraum vom 01.November bis 31.Oktober. Namensgebend ist das zweite involvierte Kalendarjahr.	DIN 4049-1
Jährlichkeit	a	mittlere Zeitspanne, in der ein Ereignis einen Wert entweder einmal erreicht oder überschreitet bzw. einmal erreicht oder überschreitet *vgl. → Wiederholungszeitspanne, Wiederkehrintervall*	
Klimamittel		Mittelwert eines Klimaelements über einen Zeitraum von 30 Jahren (einer so genannten Klimanormalperiode)	WMO (2011)
Klimastandardnormalperiode		Festgelegte Folge von 30 Jahreszeiträumen (einer so genannten Klimanormalperiode) zur Beschreibung des Klimas (z.B. anhand von → Klimamitteln). Die derzeit jüngste vollständige Klimastandardnormalperiode ist die von 1961-1990.	WMO (2011)
Kronenhöhe	[m+NHN]	Höhe der Bauwerksoberkante	
LARSIM		Rasterbasiertes Wasserhaushaltsmodell (**L**arge **Ar**ea **Si**mulation **M**odel)	
Mai* 2013		der hochwasserrelevante Zeitraum im Frühjahr 2013 (26.04. bis 03.06.2013)	
Median, (ZQ, ZW…)	[m³/s] [cm]	Wert, der gleich häufig über- und unterschritten wird	DIN 4049-3
mittlerer Niedrigwasserstand (MNW jj/kk, $MNW_{jj/kk}$)	[cm]	arithmetischer Mittelwert der unteren Grenzwerte der Wasserstände (bezogen auf Pegelnullpunkt) der angegebenen Zeitspanne	DIN 4049-1
Mittelwasserstand MW *(Jahresreihe)*	[cm]	arithmetisches Mittel aller Wasserstände gleichartiger Zeitabschnitte im betrachteten Zeitraum (von jj bis kk; jj, kk = verkürzte Jahreszahlen)	DIN 4049-3
Mittlerer Abfluss MQ *(Jahresreihe)*	[m³/s]	arithmetischer Mittelwert der Abflüsse in einer Zeitspanne.	DIN 4049-3
mMQ	[m³/s]	Monatsmittel des Abflusses	

Benennung	Einheit	Erklärung / Definition	Quelle
Modell (Strömungsmodell, Feststofftransport-modell)		Schematische Nachbildung eines Systems bezüglich ausgewählter Eigenschaften und Vorgänge. Im Flussbau ursprünglich maßstäblich verkleinertes gegenständliches Modell (DIN 4049-1). Heute umfassender verwendet z.B. auch für mathematische (statistische, hydrodynamisch-numerische) Modelle oder für „Modellvorstellungen“.	vgl. DIN 4049-1
Morphodynamik		das Wechselspiel der aufbauenden und abtragenden Kräfte (Sedimentation, Erosion) im Rahmen der Flussmorphologie	
Morphologie		Teil der physischen Geographie. Lehre von Gestalten, Formen und Strukturen *Im Flussbau häufig im Sinne von Morphodynamik genutzt.*	
NHN		Normalhöhennull: Bezugsfläche für Höhen über dem Meeresspiegel im Deutschen Haupthöhennetz 1992	
NM7Q	[m³/s]	niedrigstes arithmetische Mittel des Abflusses von 7 aufeinanderfolgenden Tagen innerhalb eines Zeitabschnittes (z.B. Jahres)	DVWK (1983)
NN		„Normal Null“: Bezugsfläche für die Tiefenangabe eines Gewässers	DIN 4054
PEGELONLINE		Internetportal, das mit verschiedenen Diensten tagesaktuelle Rohwerte unterschiedlicher gewässerkundlicher Parameter (z.B. Wasserstand) von Binnen- und Küstenpegeln der Wasserstraßen des Bundes bis maximal 30 Tage rückwirkend publiziert (www.pegelonline.wsv.de)	
pluvial		durch Regen verursacht *Hier bezogen auf das → Abflussregime eines Flusses, das in diesem Fall überwiegend durch das Wechselspiel und die zeitliche Abfolge von Regenfällen und Verdunstung bestimmt wird*	
Polder		eingedeichtes tief gelegenes Gelände *hier: künstlich geschaffener Zwischenspeicherraum für Hochwasservolumina*	
RADOLAN		Routineverfahren des DWD zur Online–Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen/Ombrometer	
Regelungsbauwerk *nicht Strombauwerk, aber umgangssprachlich genutzt*		Bauwerk zur Flussregelung; synonym mit Regulierungsbauwerk *Alt: Regulierungsbauwerk*	DIN 4054
Retention		Durchflussverzögerung infolge der Speicherwirkung natürlicher Gegebenheiten oder künstlicher Maßnahmen („Rückhalt“)	DIN 4049-3

Benennung	Einheit	Erklärung / Definition	Quelle
Signifikanz		Die statistische Signifikanz (α-Wert, p-Wert) sagt aus, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass der gemessene Unterschied dem Zufall entspringt. (*Bsp.: p< 0,05 bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit kleiner als 5 % ist*)	
SOBEK		Software zur Simulation hydraulischer und hydrologischer Prozesse	
Sohleintiefung, Sohlerhöhung		Änderung der absoluten Höhenlage der Gewässersohle durch Abtrag/Anlandung von Sedimenten	
Sohlerosion		großflächige und zeitlich längerfristige Eintiefung der Gewässersohle durch Abtrag von Sohlenmaterial	
Tendenz		Tendenz bezeichnet ohne das Prädikat einer Signifikanz das Steigen oder Fallen einer Trendgeraden. *vgl. → Trend*	
Trend		Das Steigen oder Fallen einer Trendgeraden (Regressionsgeraden), das bestimmte Signifikanzkriterien erfüllt und deshalb als Beleg für eine zeitliche Entwicklung dient. *vgl. → Tendenz*	
Troglage		Wetterlage, in der sich ein Trog, d.h. ein Gebiet relativ niedrigen Luftdrucks ausgebildet hat	
Tropopause		atmosphärische Grenzschicht zwischen der Troposphäre und der Stratosphäre, charakterisiert durch eine deutliche Abnahme des vertikalen Temperaturgradienten	nach WMO (1992)
Troposphäre		unterer Teil der Erdatmosphäre von der Eroberfläche bis in eine Höhe von 9 km an den Polen und 17 km am Äquator, charakterisiert durch eine relativ gleichförmige vertikale Temperaturabnahme	nach WMO (1992)
Überschwemmungsgrenze		Wasserrand auf der linken und rechten Flussseite, der sich bei ausufernden Hochwasserabflüssen in den Vorländern einstellt. Im Ereignisfall erfasste Überschwemmungsgrenzen werden in Überschwemmungskarten dargestellt bzw. lassen sich durch Verschneidung von berechneten Wasserflächen mit digitalen Geländemodellen ermitteln.	
Wasserspiegelfixierung	[m+NHN]	Eine einem bestimmten Abfluss zugeordnete Messung der Höhenlage des Wasserspiegels im Längsschnitt.	
Wasserspiegellage		gemessene Wasserstände im Längsprofil eines Gewässers bzw. mit hydraulischen Modellen (1D/2D) für stationäre Abflusszustände berechnete Wasserstände im Längsprofil für einen vorgegeben Abfluss	
Wasserstand		lotrechter Abstand eines Punktes des Wasserspiegels vom Gewässerbett oder im Überschwemmungsgebiet von der Geländeoberfläche	DIN 4049-3
WAVOS		Wasserstandsvorhersagesystem	

Benennung	Einheit	Erklärung / Definition	Quelle
Wiederholungs-zeitspanne		*vgl. → Jährlichkeit, Wiederkehrintervall*	
Wiederkehrintervall		*vgl. → Jährlichkeit, Wiederholungszeitspanne*	
W-Q-Beziehung		in einem → Abflussquerschnitt das Verhältnis der Messgrößen → Wasserstand (W) und → Abfluss (Q) eines Gewässers zueinander, funktional beschrieben in der → Abflusskurve	
Zentralwert (ZQ, ZW…)		*vgl. → Median*	