

Dietmar Mehl, Konrad Miegel und André Schumann

Ungewöhnliche Niederschlagsereignisse im Sommer 2011 in Mecklenburg-Vorpommern und ihre hydrologischen Folgen – Teil 2: Hydrologische Folgen

Unusual rainfall events in Mecklenburg-Vorpommern during the summer of 2011 and their hydrological consequences – Part 2: Hydrological consequences

In Mecklenburg-Vorpommern (M-V) haben sich in den Sommermonaten Juli und August 2011 in weiten Landesteilen Niederschläge ereignet, die weit außerhalb des bisherigen Erfahrungsbereichs der Menschen lagen (s. MIEGEL et al. 2014). Dies betrifft das mehrfache Auftreten extremer Einzelereignisse, ihre Kumulation zu noch nie beobachteten Monatssummen und ihre statistische Einordnung, insbesondere bezüglich von Regenmengen mit Dauern > 12 h (MIEGEL et al. 2014). Auch die hydrologischen Folgen in den besonders betroffenen Einzugsgebieten waren außergewöhnlich. Ziel des Beitrags ist ein kurzer Abriss über das hydrologische Geschehen, der anhand von Ganglinienverläufen ausgewählter Pegel untersetzt wird, die statistische Einordnung der beobachteten Spitzenabflüsse sowie die Analyse der Auswirkungen auf das Grundwasser und die Grundwasserneubildung, wobei Daten der Lysimeterstation der Universität Rostock in Groß Lüsewitz die Grundlage bilden. Der Artikel knüpft an die Ausarbeitung von SCHUMANN et al. (2013) an.

Schlagwörter: Grundwasser, Grundwasserneubildung, Hochwasser, Hochwasserabflussspende, Lysimeter, Starkniederschlag

In July and August 2011, unprecedented rainfall events occurred in large parts of Mecklenburg-Vorpommern (MIEGEL et al. 2014). This relates to the repeated appearance of extreme single events as well as their storm depth, especially with regard to the quantity of rain in periods of > 12 h (MIEGEL et al. 2014). Moreover, the hydrological impacts on the especially hard hit catchments were extraordinary. The article aims at giving a short summary of the hydrological events based on hydrographs of selected gauges. Besides, the article deals with the statistical classification of the observed peak discharges and takes a look at the effects on groundwater and its regeneration. The analysis is based on data collected by the lysimeter station of the University of Rostock at Groß Lüsewitz. This paper supplements the paper by SCHUMANN et al. (2013).

Keywords: Flood, groundwater, groundwater recharge, heavy rain, lysimeter, peak flow rate

1 Einleitung

In den letzten 20 Jahren sind in Deutschland immer wieder schwere Hochwasser (HW) an den großen Strömen aufgetreten, wie zuletzt erneut an der Elbe im Jahr 2013. Aufgrund ihrer Dimension (Größe der Gewässereinzugs- und Überschwemmungsgebiete, Umfang der Schadenspotenziale) waren die Folgen jeweils katastrophal und allein mit regionalen Ressourcen nicht zu bewältigen. Der Wiederhall in den Medien war entsprechend groß. Von der deutschlandweiten öffentlichen Berichterstattung weniger oder sogar weitgehend unbeachtet bleiben dagegen regelmäßig HW-Ereignisse von eher regionaler Bedeutung, obwohl auch hier die Betroffenen nicht weniger unter den Folgen zu leiden haben. Dies betrifft beispielsweise das Geschehen im Sommer 2011, das sich nordöstlich des Elbe-Einzugsgebietes in den Flussgebieten des Ostsee-Einzugsgebietes, vor allem in der Flussgebietseinheit Warnow-Peene, abgespielt hat. Ursache war eine Folge ungewöhnlicher Extremniederschläge, die bis dahin in diesem Ausmaß noch nicht beobachtet worden sind (MIEGEL et al. 2014).

M-V wird von einer Hauptwasserscheide zweigeteilt. Diese zieht sich im Bereich des Mecklenburgischen Landrückens von Südosten kommend mit pendelartigen Richtungswechseln nach Nordwesten quer durchs Land und teilt die Einzugsgebiete (EZG) in Zustromgebiete zur Nordsee und Ostsee. Die größeren Flussgebiete Sude, Elde und Havel im Nordseegebiet sind dem Strom Elbe tributär. Im zum Ostseegebiet gehörenden Landesteil hat M-V im Südosten einen Anteil am Stromgebiet der Oder, der ge-

messen am Gesamteinzugsgebiet der Oder jedoch sehr klein ist. Ansonsten dominieren im Ostseegebiet M-V's relativ betrachtet die größeren Flussgebiete von Stepenitz, Warnow, Peene und Uecker. Alle anderen Ostseezuflüsse sind aufgrund der geringen Größe ihrer Einzugsgebiete weniger bedeutsam. Aufgrund dessen sind sie zu den Küstengebieten West und Ost zusammengefasst. Die Einzugsgebietsstruktur und insbesondere die Zuordnung zu den Flussgebietseinheiten nach WRRL verdeutlichen Abbildung 1 und Tabelle 1.

Aufgrund der relativ geringen Größe der Fließgewässer und ihrer EZG sowie der geringen Besiedlungsdichte bzw. überwiegend landwirtschaftlichen Nutzung von EZG und Flussauen sind auch die HW-Schadenspotenziale im Vergleich zu Flüssen wie Rhein, Oder und Elbe klein. In der Landwirtschaft z.B. waren 2011 Betroffenen aber nicht allein Folge der Ausuferung von Fließgewässern, sondern auch von großflächigen Vernässungen auf Landoberflächen mit geringem Geländegefälle, in Senkenlagen und infolge von Grundhochwasser. Zu den Besonderheiten, die im nächsten Abschnitt näher besprochen werden, gehört die Entwässerung küstennaher Niederungen und Flussabschnitte über Schöpfwerke in die Vorflut oder direkt in die Ostsee. Eine Überlastung der Schöpfwerke durch die binnenseitig anfallenden Wassermassen und teilweise technische Havarien stellten im Sommer 2011 besondere Probleme dar. Nicht nur aufgrund der Ungewöhnlichkeit der meteorologischen Genese, sondern auch aufgrund hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Besonderheiten des Nordostdeutschen Tieflandes lohnt sich eine Analyse des HW-Geschehens im Sommer 2011.

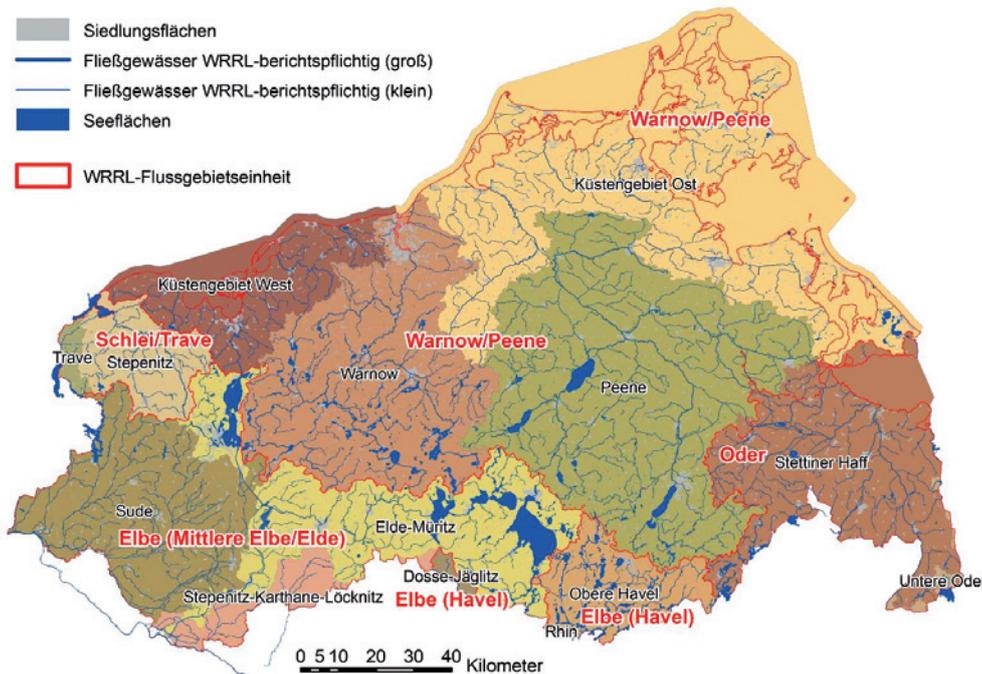


Abbildung 1
 Struktur der oberirdischen Einzugsgebiete bzw. WRRL-Flussgebiets- und WRRL-Planungseinheiten des Landes Mecklenburg-Vorpommern, verändert nach BIOTA (2011)
 Structure of WRRL-relevant catchments in Mecklenburg-Vorpommern, modified according to BIOTA (2011)

Tabelle 1 Einzugsgebietsflächen der WRRL-Flussgebiets- und WRRL-Planungseinheiten in Mecklenburg-Vorpommern Areas of WRRL-relevant catchments in Mecklenburg-Vorpommern			
WRRL-Flussgebietseinheit	WRRL-Planungseinheit	Einzugsgebietsfläche [km ²]	
Warnow/Peene	Gesamtanteil M-V	13.518	
	Warnow	3.302	
	Peene	5.087	
	Küstengebiet Ost	3.994	
	Küstengebiet West	1.136	
Schlei/Trave	Gesamtanteil M-V	866	
	Stepenitz	760	
	Trave	106	
Oder	Gesamtanteil M-V	2.467	
	Stettiner Haff	2.405	
	Untere Oder	61,4	
	Elbe	Gesamtanteil M-V	6.175
		Dosse-Jäglitz	59,1
Elde-Müritz		2.574	
Obere Havel		834	
Rhin		5,8	
	Stepenitz-Karthane-Löcknitz	441	
	Sude	2.261	
Gesamt-MV		23.025	

2 Zum Niederschlag-Abfluss-Geschehen

Das Abflussgeschehen des Sommers 2011 war in M-V naturgemäß ein Spiegelbild des in MIEGEL et al. (2014) dargestellten Zeitverlaufs der Starkniederschläge und ihrer räumlichen Ver-

teilung. So sind für die am stärksten betroffenen EZG drei Wellenscheitel typisch, verursacht durch die herausragenden Niederschlagsereignisse um den 22. Juli und 29. Juli sowie am 6. August. Die Aufwechtlung durch diese Ereignisse bedingte auch im Nachgang eine hohe Abflussbereitschaft, so dass weitere Niederschläge vom 10. bis 12. August, die weitaus weniger gravierend ausfielen, darauf aufsattelten und in einigen Gebieten zur Ausbildung einer vierten HW-Welle führten (s. auch Abschnitt 3).

In den Abbildungen 2 und 5 von MIEGEL et al. (2014) ist die räumliche Niederschlagsverteilung im Juli 2011 sowie ereignisbezogen am 21./22. Juli und 28./29. Juli 2011 dargestellt. Die größten HW-Abflusspenden produzierten weitgehend die EZG, die dementsprechend von den größ-

ten Niederschlagsmengen betroffen waren. Dazu gehörten insbesondere auch viele kleinere Fließgewässer im Küstenbereich, die direkt in die Ostsee entwässern. Dass auch in anderen Regionen v.a. in kleinen Fließgewässern die größten Abflussspitzen im Bereich von Wiederkehrintervallen $T=100$ a beobachtet worden sind (Abschnitt 4), ist vorrangig darauf zurückzuführen, dass die von Spitzenintensitäten betroffenen Gebiete aufgrund konvektiver Verstärkungen innerhalb großräumiger Niederschlagsstrukturen i.d.R. nur eine geringe räumliche Ausdehnung aufwiesen. Flächendeckend betrafen sie deshalb nur kleinere EZG.

Die räumlich differenzierte Ausprägung der HW folgte nicht nur der räumlichen Niederschlagsverteilung (Abb. 2), sie resultierte daneben aus der starken Differenzierung von Gebietsmerkmalen, die die Bildung schneller Abflusskomponenten begünstigen. Hervorzuheben sind für M-V in diesem Zusammenhang vor allem gering durchlässige Böden (Abb. 3), geringe Grundwasserflurabstände, höheres Geländegefälle, aber auch die künstliche Entwässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen (MIEGEL & HAUPT 1998, MEHL 2004 und BIOTA 2010). Weiterführend wird auf Abbildung 2 und 3 im Abschnitt 4 Bezug genommen.

Aufgrund von Regenereignissen langer Dauer mit enormen Niederschlagshöhen und stündlichen Intensitätsspitzen bedurfte es aber örtlich nicht einmal Standortbedingungen, die für die Direktabflussbildung besonders prädestiniert sind. So wurde selbst an solchen Standorten gleich mehrfach Oberflächenabfluss gebildet, bei denen dies extrem selten oder bisher überhaupt noch nicht beobachtet worden ist. Ursache war die Überlastung des Retentionsvermögens der anstehenden Böden. Dramatisch war die lokale Betroffenheit besonders in Bereichen mit behinderter oder sogar fehlender Vorflut, so wie dies in Geländesenken bzw. Binnenentwässerungsgebieten der Fall ist. An Standorten mit

oberflächennahem Grundwasser (GW) wirkte darüber hinaus noch der Anstieg der Grundwasser Oberfläche bis an die Geländeoberfläche verschärfend (s. auch Abschnitt 5).

Besonders prekär war die Situation in einigen urbanen Gebieten mit hohem Anteil versiegelter Flächen, wofür der Stadtteil Rostock-Evershagen beispielhaft genannt werden kann (Abb. 4). Dort waren die Kanalisationen allein schon durch die Niederschläge über ihrem siedlungswasserwirtschaftlichen Planungsgebiet deutlich überlastet, welche den jeweiligen Bemessungsniederschlag bei Weitem übertrafen. Hinzu kam aber noch Oberflächenabfluss von umgebenden Nutzflächen, der aufgrund entsprechender Neigung des Geländes in die Siedlung einströmte (quasi „unvorhergesehene“ Ausdehnung des EZG) und dort zusätzlich für die Überlastung des Entwässerungssystems sorgte. Flächenhafte Überflutungen waren die Folge. Wie oft bei solchen Ereignissen wurden teilweise auch Planungsmängel deutlich, die regelmäßig mit ungünstiger baulicher Einbettung des Wohngebietes in Senkenlagen und Unterschätzung der Abflusswirkungen bei extremen Ereignissen im „erweiterten“ hydrologischen Einzugsgebiet erklärt werden können. Nur eine zusammenhängende und komplexe Betrachtung im Sinne einer urbanen Hydrologie kann hier helfen, was der in der DIN EN 752:2008-04 postulierten „integralen Entwässerungsplanung“ entspricht, welche den Planungsraum Siedlungsentwässerung als gesamtes Abwasserentsorgungssystem im Komplex mit den Vorflutern im Blickfeld hat (DWA 2006).

Wie sich letzten Endes die Beiträge der abflussbildenden Teilflächen zum Gesamtabfluss eines EZG überlagern, hängt von einer Reihe weiterer Einflussgrößen wie Gebietsform, Dichte und Struktur des Gewässernetzes oder Gefälle des Flusslaufes ab, die über die Abflusskonzentration und den Durchflussverlauf bestimmen. Diesbezüglich bestehen im Nordostdeut-

schen Tiefland nicht nur große Unterschiede zwischen den Fließgewässern, hier liegen darüber hinaus häufig besondere hydraulische Bedingungen der „Fließgewässersystemtypen“ (MEHL 2004) vor, wie z.B. Fließgewässer-Seen-Systeme, fluss-seenbildende Fließgewässer oder ostseerückgestaute Niederungsfließgewässer.

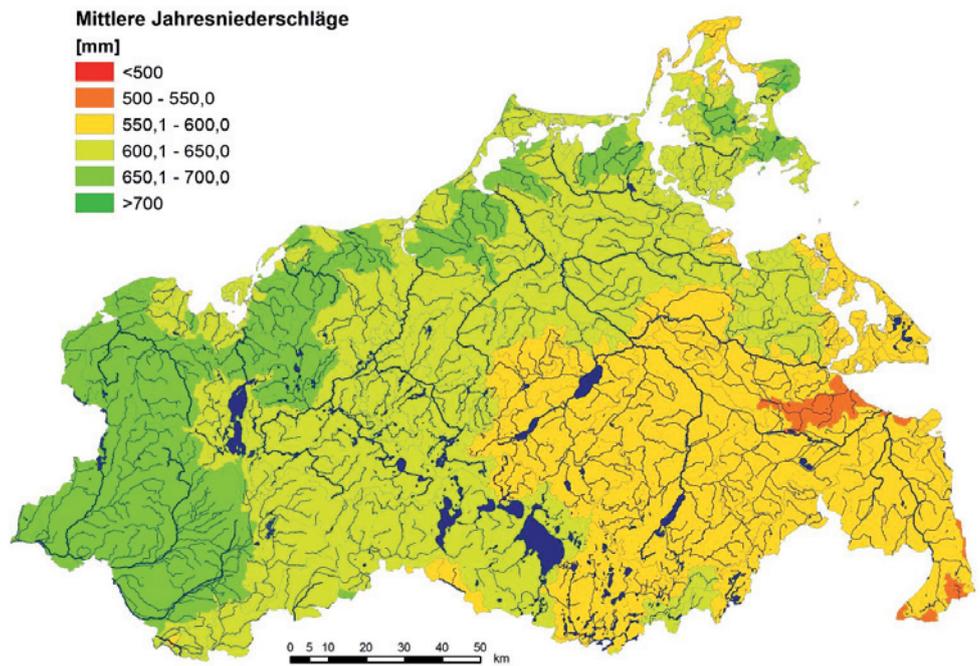


Abbildung 2
Mittlerer Jahresniederschlag (1981–2010) in Mecklenburg-Vorpommern, verändert nach BIOTA (2012)
Mean annual precipitation (1981–2010) in Mecklenburg-Vorpommern, modified according to BIOTA (2012)

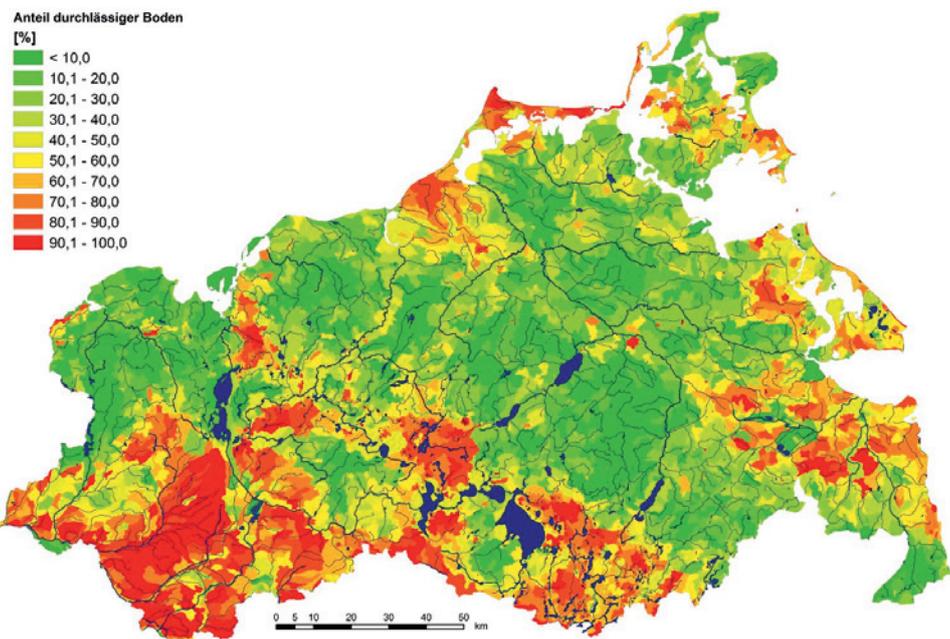


Abbildung 3
Anteil der durchlässigen Böden (Sand-, Sand-Lehm-Areale), ausgewertet für das jeweils relevante Zuflussgebiet von insgesamt ca. 5.700 „Basis-Einzugsgebieten“ in Mecklenburg-Vorpommern, verändert nach BIOTA (2012)
Percentage of permeable soils (sand, sand-loam areas) in Mecklenburg-Vorpommern, modified according to BIOTA (2012), investigation of relevant catchments with 5,700 subcatchments

In den stärker betroffenen kleineren EZG trugen v.a. auch Verrohrungen, Durchlässe, Wehre und Brücken zur Ausbildung lokaler Problemschwerpunkte bei. Als hydraulische Engstellen bewirkten sie Rückstau und Ausuferung mit Schäden in den betroffenen Flächen. Von dieser Retentionswirkung profitierten insbesondere die unmittelbar unterhalb gelegenen Flussabschnitte.

Positive Effekte konnten daneben an Gewässerabschnitten festgestellt werden, die in den vorangegangenen Jahren renaturiert worden sind und sich demzufolge als problemarm oder sogar problemlos erwiesen. Zu den Maßnahmen gehörten u.a. eine sachgerechte Bemessung der Querprofile, die Erreichung der ökologischen Durchlässigkeit bei Beseitigung von Engstellen und/oder die Modernisierung und Neu-Dimensionierung von Bauwerken, aber auch eine Wiederanbindung von Auen-/Niederungsbereichen als Retentionsflächen (SCHUMANN et al. 2013).

Bei den größeren Hauptgewässern kam es zur Ausuferung in die Vorländer hinein (Abb. 5). Im Bereich ausgedehnter Flussniederungen war die Überschwemmung großflächig und damit die Retentionswirkung erheblich, was die hohe Bedeutung der Auenretention im Hochwasserschutz unterstreicht (MEHL et al. 2012). Dies führte in den Unterläufen und küstennahen Flussabschnitten einerseits zu stark abgeflachten, andererseits aber auch zu lang gestreckten und fülligen HW-Wellen. Ähnliche Wirkungen auf die unterhalb gelegenen Flussabschnitte gingen von den größeren durchströmten Seen aus, die sich als wirksame Speicher erwiesen und ihrerseits mit deutlich erhöhten Wasserständen reagierten.

In Niederungsgebieten entlang von Fließgewässern und im Küstenbereich kommt noch als Besonderheit die häufig praktizierte Entwässerung durch Schöpfwerke hinzu. Die exzessiven Abflüsse führten in vielen solcher Gebiete zur Überlastung ihrer Schöpfwerke und zum Einstau der Niederungen (Abb. 6) mit teilweise erheblichen Schäden, vor allem bei Nutzung durch Kleingärten, Campingplätze usw.

3 Entwicklung der Wasserstände und Durchflüsse an ausgewählten Pegeln

Abbildung 11 zeigt am Beispiel von vier Pegeln M-V's (Abb. 7 bis 10) deutlich die Veränderung wichtiger Kenngrößen der HW-Wellen mit der Gebietsgröße und daneben die unterschiedliche Anzahl der Wellenscheitel je nach Betroffenheit durch Starkregen.

Beim westlich von Rostock gelegenen küstennahen Pegel Bad Doberan an der Stege sind gleich sechs HW-Scheitel zu erkennen, die den jeweiligen mittleren monatlichen HW-Abfluss MHQ (m) übertroffen haben. Herausragend sind die drei Abflussspitzen, die durch die Niederschläge in der 3. Julidekade und am 6. August hervorgerufen worden sind. Deren HW-Scheitelwerte sind z.T. sogar deutlich größer als die bisher beobachteten Monatsgrößtwerte HQ (m). Hier sind bereits durch kräftige Niederschläge am 2. und 13. Juli 2011 kleinere HW-Wellen entstanden. Der Tagesniederschlag des 12. August mit ähnlicher Größenordnung erzeugte im Vergleich dazu einen mehr als doppelt so hohen Abflussscheitel, der beinahe noch einmal das HQ (m) erreichte. Ursache dafür war die hohe Abflussbereitschaft nach den Hauptereignissen Ende Juli und Anfang August. Typisch für ein EZG dieser Größe sind auch die relativ steilen Anstiege der HW-Wellen.



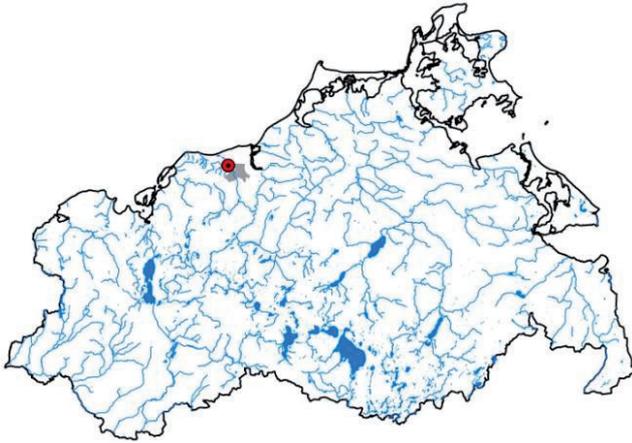
Abbildung 4
Überfluteter Brigitte-Reimann-Ring in Rostock, Evershagen Dorf, Juli 2011, verursacht durch Überlastung der Kanalisation.
Foto: Büttner/INITIATIVE EVERSCHAGEN DORF (2011)
Flash flood in district Rostock-Evershagen on July 2011, caused by overload of the sewage water system (image source: Büttner/INITIATIVE EVERSCHAGEN DORF (2011))



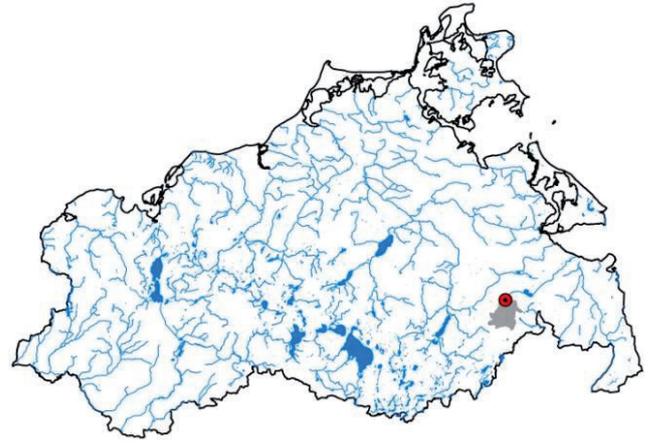
Abbildung 5
Tal der Tollense unterhalb von Klempenow am 2. August 2011 (Bildquelle: StALU (Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt) Mecklenburgische Seenplatte)
Floodplain of the Tollense river near Klempenow on 2 August 2011 (image source: StALU (Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt) Mecklenburgische Seenplatte)



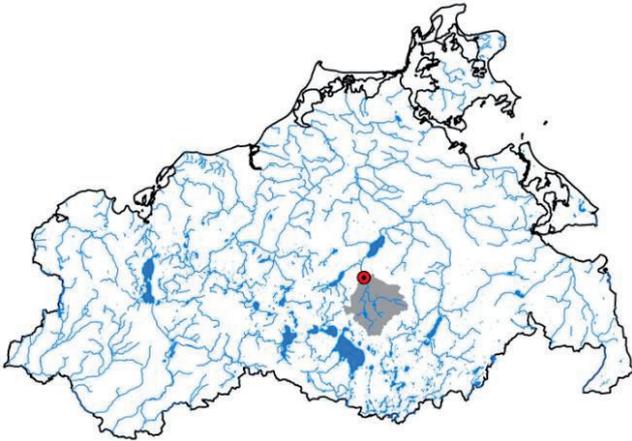
Abbildung 6
Die Conventer Niederung zwischen Heiligendamm und Börgerende (im Bild rechts oben) am 17. August 2011 (Bildquelle: Konrad Miegel)
Conventer Niederung between Heiligendamm and Börgerende on 17 August 2011 (image source: Konrad Miegel)

**Abbildung 7**

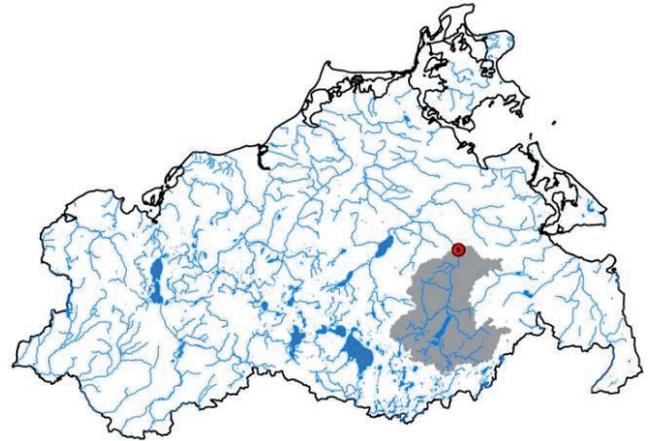
Pegel Bad Doberan/Stege mit zugehörigem Einzugsgebiet (45,7 km²)
Flow gauging station Bad Doberan/Stege, catchment size 45.7 km²

**Abbildung 8**

Pegel Brohm OP/Golmer Mühlbach mit zugehörigem Einzugsgebiet (98,0 km²)
Flow gauging station Brohm OP/Golmer Mühlbach, catchment size 98.0 km²

**Abbildung 9**

Pegel Gielow/Ostpeene mit zugehörigem Einzugsgebiet (362 km²)
Flow gauging station Gielow/Ostpeene, catchment size 362 km²

**Abbildung 10**

Pegel Klempenow/Tollense mit zugehörigem Einzugsgebiet (1.409 km²)
Flow gauging station Klempenow/Tollense, catchment size 1,409 km²

Am Oberpegel Brohm am Golmer Mühlbach (Lage östlich von Neubrandenburg) konnten dagegen als Folge der Niederschläge in der 3. Julidekade nur 2 größere Wellenscheitel beobachtet werden. Die Niederschläge am 21./22. Juli 2011 waren hier räumlich relativ eng begrenzt. Sie fielen mit 75 mm bis 100 mm ca. 20 % bis 30 % geringer aus als im Rostocker Raum und östlich davon. Die Niederschläge am 28./29. Juli, die mit ihrem regionalen Schwerpunkt räumlich ausgedehnter waren und weite Teile Vorpommerns betrafen, erreichten im EZG eine ähnliche Größenordnung wie am 21./22. Juli. Trotzdem war der zweite HW-Scheitel ca. 4-fach höher als der erste, was darauf hindeutet, dass das Retentionsvermögen des Gebietes vor dem zweiten Scheitel deutlich geringer war als vor dem ersten, verursacht durch die Auffeuchtung des Gebietes während des ersten Ereignisses. Der Anstieg des zweiten Scheitels verläuft ähnlich steil wie beim Pegel Bad Doberan/Stege. Da am 6. August 2011 vergleichsweise wenig Niederschlag gefallen ist, konnte hier kein weiterer HW-Scheitel beobachtet werden, im Gegensatz zu einem dritten, aber kleinen Scheitel nach dem 12. August 2011.

Das EZG des Pegels Gielow an der Ostpeene (nordöstlich der Mürzitz) ordnet sich von seiner Größe her zwischen den beiden zuvor besprochenen Gebieten und dem EZG der Tollense (Pegel Klempenow) ein. Die an den Pegeln Gielow und Klempenow gemessenen HW-Wellen sind lang gestreckt und fülliger, gemessen an den Gebietsgrößen aber auch gedämpfter, was stärker noch für den Pegel Klempenow zutrifft. Die Scheitelwerte treten hier mit deutlicher Zeitverzögerung von ca. 5 bzw. 7 Tagen auf. Beim Pegel Gielow ist nur ein echter Scheitel, aufgetreten Anfang August, zu erkennen. Die Niederschläge des 21./22. Juli 2011 machen sich im Ganglinienverlauf nur als Plateau bemerkbar, von dem aus sich der Anstieg des Durchflusses nach dem 29. Juli weiter fortsetzt. Ähnliches gilt für den Pegel Klempenow, dessen Hauptscheitel aber eher als 14-tägiges Plateau in Erscheinung tritt.

Interessant, wenn auch ohne Kenntnis der hydrologischen und hydrometrischen Situation nicht interpretierbar, ist der Durchflussverlauf der Peene am Pegel Anklam-Straßenbrücke (Abb. 12 und 13). Die Peene hat hier ein EZG von immerhin 4.967 km²,

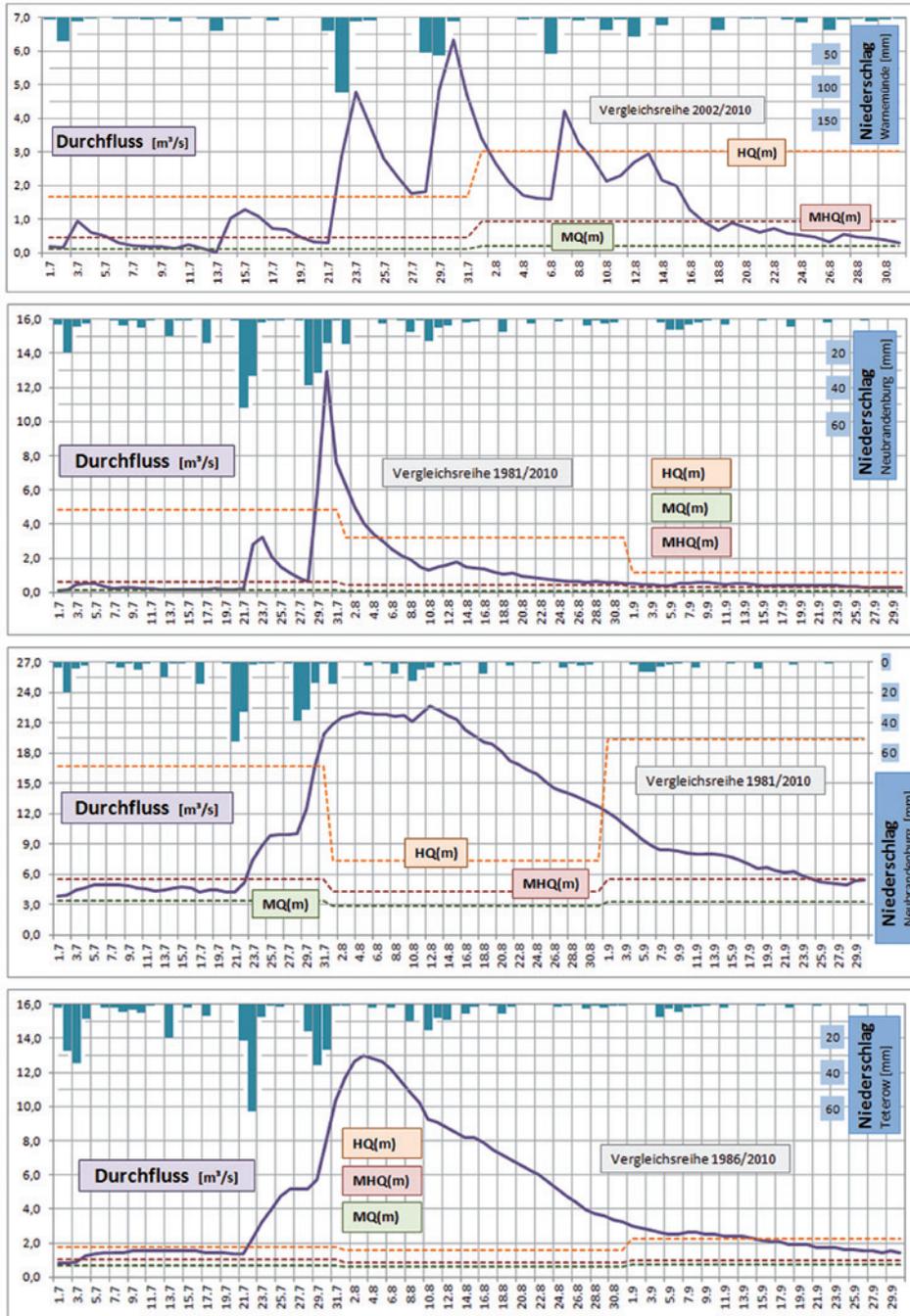


Abbildung 11
 Tagesmittel des Durchflusses vom 1. Juli bis 30. September 2011 an den Pegeln Bad Doberan/Stege, Brohm OP/Golmer Mühlbach, Klempenow/Tollense und Gielow/Ostpeene (verändert nach SCHUMANN et al. 2013)
 Discharge (daily means) from 1 July to 30 September 2011 at the gauges Bad Doberan/Stege, Brohm OP/Golmer Mühlbach, Klempenow/Tollense und Gielow/Ostpeene (acc. SCHUMANN et al. 2013, modified)

zu dem auch die EZG von Trebel und Tollense gehören. Ein klarer zeitlicher Zusammenhang zwischen Extremniederschlägen und HW-Verlauf ist nicht ohne Weiteres zu erkennen. Es wird hauptsächlich eine lange Phase mit ungewöhnlich hohen Durchflüssen deutlich, die im Vergleich zu den zuvor besprochenen Gebieten der Gebietsgröße und dem besonders geringen Gefälle des Flusslaufs geschuldet ist. Das Niveau der MHQ (m) wird hier fast acht Wochen lang überschritten. Auffällig ist der sägezahnartige Verlauf der Durchflussganglinie, zurückzuführen auf Fluktuatio-

nen des Ostseewasserstandes und damit wechselnden Rückstau durch die Ostsee, der bei Sturmfluten weit in das Binnenland zurück reicht und zu „negativen“ Durchflüssen führen kann (HAUPT & MIEGEL 2006). Die resultierende Überprägung der Schwankungen des Durchflusses macht eine klare Zuordnung von Abflussspitzen zu einzelnen Extremniederschlagsereignissen ohne weiterführende Analysen im Grunde genommen unmöglich.

In Abbildung 14 sind die Wasserstände der Müritz am Pegel Waren und Durchflüsse an ausgewählten Pegeln der Müritz-Elde-Wasserstraße (MEW) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Müritz ihre höchsten Wasserstände um den 15. August 2011 erreichte. Vom Ganglinienverlauf her verhält sie sich bis dahin qualitativ sehr ähnlich wie der Durchfluss der Ostpeene (Abb. 11), deren EZG nordöstlich der Müritz gelegen ist, was auf einen ähnlichen Niederschlagsverlauf in beiden EZG hindeutet. Es dauerte jedoch bis Mitte September, bis der Wasserstand der Müritz wieder das Niveau erreichte, das Mitte Juli vorgeherrscht hat.

Da die Entwässerung der Müritz in die MEW über Kölpinsee, Fleesensee, Malchower See und Plauer See erfolgt, wurden in diesen Seen die höchsten Wasserstände später bis in den September hinein registriert. Auch die Abläufe von Malchower See und Plauer See spiegeln das Geschehen insgesamt sehr gedämpft wider, wobei man mit der Regelung des Ablaufs am Plauer See entlastend auf den Seewasserstand reagierte. An allen Mecklenburgischen Seen wurden neue Höchstwasserstände in Sommermonaten registriert. Die bisherigen Höchstwerte waren durchweg Folge von Winterereignissen, die sich bis in den Sommer hinein auswirkten.

4 Einordnung von Scheitelabflussspenden an ausgewählten Pegeln

In Abbildung 15 ist die Abhängigkeit der größten Scheitelabflussspenden H_q des Sommers 2011 von der Größe des EZG für ausgewählte Pegel dargestellt. Die Größe ihrer EZG schwankt zwischen 30 km² und 1.000 km². Zwei kleinere EZG wurden aufgrund lokaler Besonderheiten nicht einbezogen, ebenso wie die

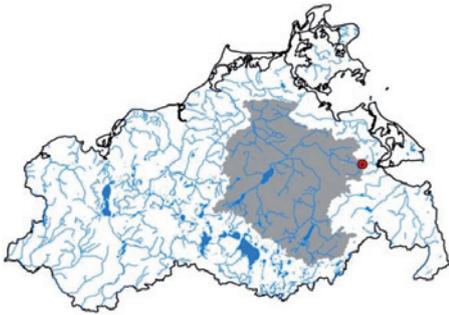


Abbildung 12

Pegel Anklam Straßenbrücke/Peene mit zugehörigem Einzugsgebiet (4.967 km²)
 Flow gauging station Anklam Straßenbrücke/Peene, catchment size 4,967 km²

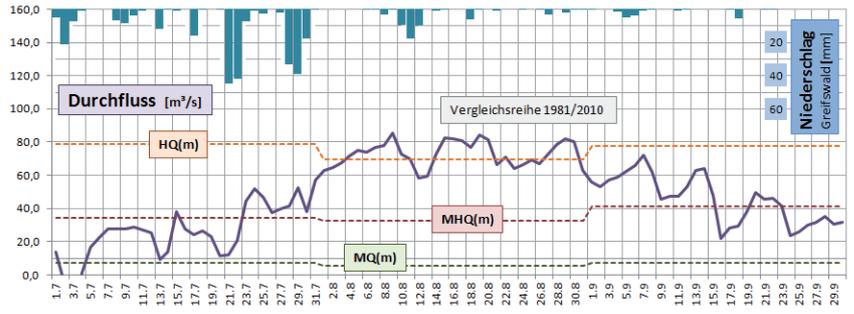
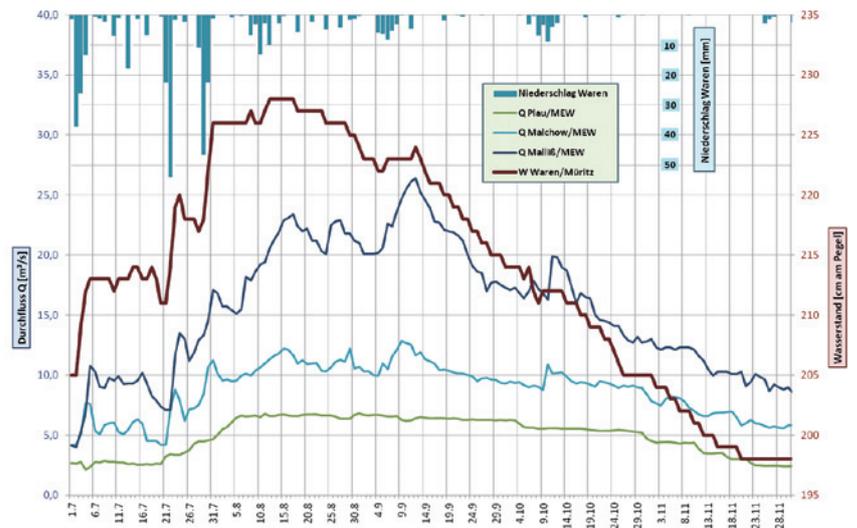


Abbildung 13

Tagesmittel des Durchflusses vom 1. Juli bis 30. September 2011 am Pegel Anklam/Peene (verändert nach SCHUMANN et al. 2013)
 Discharge (daily means) from 1 July to 30 September 2011 at the gauge Anklam/Peene (acc. SCHUMANN et al. 2013, modified)

Abbildung 14

Wasserstand am Pegel Waren/Müritz, Durchfluss am Pegel Malchow (Auslass der Müritz über Kölpinsee, Fleensee und Malchower See), Abgaben an die Müritz-Elde-Wasserstraße (MEW) aus dem Plauer See (Pegel Plau) sowie Durchflüsse in der MEW am Pegel Malliß unweit der Elbe (blau: Tagesniederschläge an der DWD-Station Waren; aus: SCHUMANN et al. 2013)
 Water-level at the gauge Waren (lake Müritz), discharge at the gauge Malchow (outlet of the lakes Müritz, Kölpinsee, Fleensee and Malchower See), outlet of the lake Plauer See into the waterway Müritz-Elde-Wasserstraße (MEW) and discharge at the gauge Malliß of the MEW near the river Elbe (blue: daily amount of precipitation at the DWD-station Waren; acc. SCHUMANN et al. 2013)



größeren EZG der Pegel Anklam (Peene), Pasewalk und Ueckermünde (jeweils Uecker) sowie Klempenow (Tollense), wobei die EZG der beiden Uecker-Pegel teilweise zum Land Brandenburg gehören und weniger von Extremniederschlägen betroffen waren. Letzteres gilt auch für den Pegel Ludwigshof (Teufelsgraben) im Südostzipfel Vorpommerns, der gleichfalls nicht berücksichtigt ist.

In der Darstellung ist eine gewisse inverse Abhängigkeit der Hq₅ von der Gebietsgröße zu erkennen, so wie dies in Mitteleuropa für statistisch ermittelte HW-Abflusspenden i.d.R. typisch ist. Die Streuung ist auf die unterschiedliche Betroffenheit durch die Extremniederschläge des Sommers 2011 zurückzuführen. Diese ist insbesondere bei den kleineren EZG sehr groß, was wiederum mit konvektiven Verstärkungen innerhalb großräumiger Niederschlagsstrukturen zu erklären ist, welche einzelne kleinere Gebiete besonders trafen. Dies gilt z.B. für den Pegel Ziddorf an der Westpeene mit einer Gebietsgröße von 16,0 km², in Abbildung 15 ebenfalls nicht berücksichtigt. Sein Hq₅, beobachtet am 31. Juli 2011, beträgt 335,6 l s⁻¹ km⁻² (Tab. 1).

Die farblichen Markierungen der Eintragungspunkte weisen darauf hin, dass sich die dargestellten Pegel in vier Gruppen einteilen lassen. Die grünen Punkte umfassen EZG, die im westlichen Teil Mecklenburgs gelegen sind und im Juli 2011 deutlich geringere

Niederschläge erhalten haben als andere Landesteile. Da hier die August-Niederschläge bedeutsamer waren, sind die Hq₅ 2011 in der Monatsmitte des August beobachtet worden. Auf die meisten der ansonsten in Abbildung 15 dargestellten Pegel fallen die Hq₅ 2011 auf die Tage nach dem Extremereignis des 28./29. Juli.

Die roten und dunkelgelben Eintragungspunkte betreffen küstennahe EZG im zentralen Landesteil bzw. EZG im zentralen südlichen Landesteil einschließlich zweier Gebiete östlich von Neubrandenburg. Diese EZG haben mit den größten Hq₅ auf die Extremniederschläge reagiert, wobei die Hq₅ in den EZG der roten Gruppe noch größer ausfallen. Die blauen Eintragungspunkte repräsentieren Landesteile südlich und östlich von Greifswald sowie bei Neubrandenburg mit zwar ergiebigen, aber dennoch spürbar geringeren Niederschlägen als in den mittleren und einigen östlichen Landesteilen von M-V (rote und dunkelgelbe Gruppe).

Diesen Grundmustern der räumlichen Unterschiede der Hq₅ 2011 entspricht weitgehend auch ihre extremwertstatistische Einordnung. Demnach ergeben sich in Bezug auf die Scheitelabflüsse Hq₅ bei den Pegeln der roten und dunkelgelben Gruppe durchschnittlich die größten Wiederkehrintervalle T. Dagegen sind bei den Pegeln der grünen Gruppe die zugehörigen T-Werte bis auf eine Ausnahme kleiner als 2 Jahre. In der blauen Gruppe bewegt

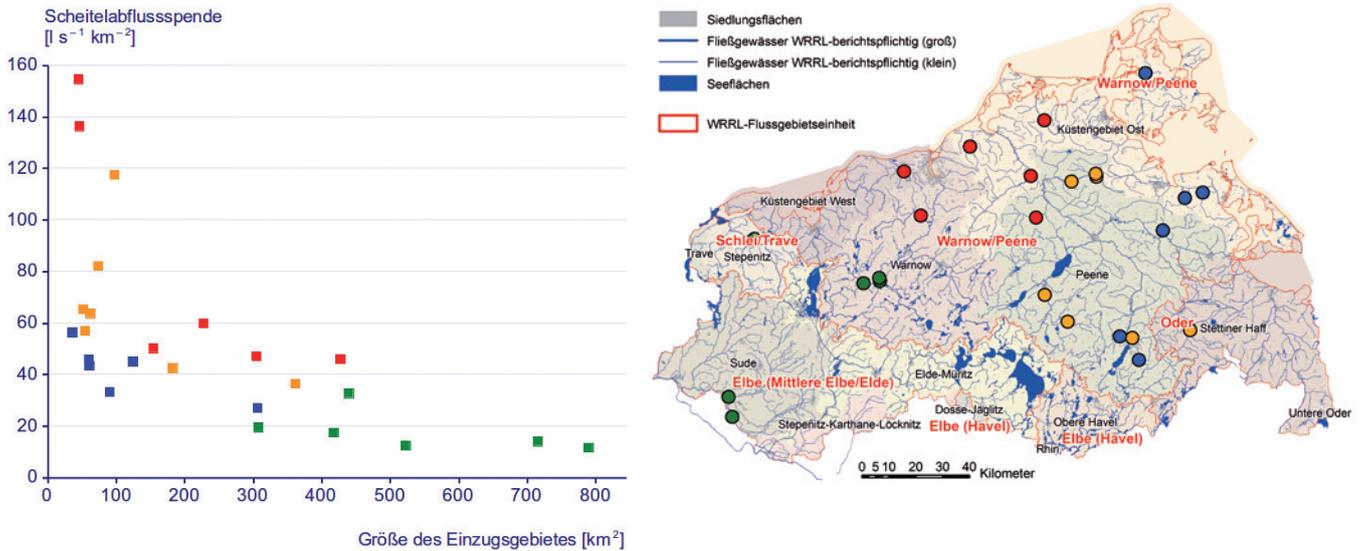


Abbildung 15
 Abhängigkeit der größten Scheitelabflussspenden (links) im Sommer 2011 von der Größe des Einzugsgebietes (30 bis 1.000 km^2) an ausgewählten Pegeln Mecklenburg-Vorpommerns (rechts)
 Dependence of major specific peak discharges (left) in summer 2011 on basin size (from 30 to 1,000 km^2) for selected gauges in Mecklenburg-Vorpommern (right)

sich T überwiegend im Bereich 5 a bis 20 a. Hier sticht allein das mit 36,5 km^2 kleine EZG des Mühlgrabens in Lodmannshagen östlich von Greifswald mit T = 50 a heraus.

In Tabelle 2 sind die Pegel zusammengestellt, deren Hq_5 einem Wiederkehrintervall T > 50 a entspricht. Der Vergleichbarkeit halber sind auch hier nicht die Hq_5 , sondern die zugehörigen Abflussspenden Hq_5 angegeben. Es fehlt der Pegel Bad Doberan/Stege, $Hq_5 = 154,5 l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$, da er sich bisher nicht exakt statistisch einordnen lässt.

Obwohl die Pegel der roten Gruppe durchschnittlich höhere Hq_5 aufweisen (Abb. 15), fällt auf, dass in Tabelle 2 Pegel der dunkelgelben Gruppe dominieren und hier nur drei Pegel der roten Gruppe Eingang gefunden haben. 6 der 10 aufgeführten Pegel befinden sich im EZG der Peene. Dies bedeutet, dass statistisch betrachtet besonders im Peene-EZG, d.h. in der südlichen Landesmitte von M-V, die Abflüsse besonders extrem gewesen sind. Bei 4 dieser 6 Pegel beträgt T > 100 a, wobei der Pegel Ziddorf

an der Westpeene (westlich des Malchiner Sees) mit T > 200 a noch herausragt. Dieser Wert wird nur noch durch den Wallbach in Willershagen (rote Gruppe), zwischen Rostock und Ribnitz-Damgarten gelegen, mit ca. T ≈ 500 a überboten. Die beiden zugehörigen EZG sind jedoch mit 16,0 km^2 (Ziddorf) bzw. 46,9 km^2 vergleichsweise klein, was auch hier auf eine besondere lokale Betroffenheit (s.o.) hindeutet. Setzt man die Hq_5 2011 ins Verhältnis zu ihren mittleren HW-Abflussspenden für Sommermonate, dann ergeben sich bei den Pegeln der dunkelgelben Gruppe Verhältniswerte, die durchschnittlich ca. 30 % größer sind als bei der roten Gruppe. Dies korrespondiert mit den Aussagen zu den Wiederkehrintervallen.

Analog zu Abbildung 15 lassen die Angaben in Tabelle 2 erkennen, dass die Scheitelabflussspenden mit der Gebietsgröße abnehmen. Am dort nicht aufgeführten Pegel Anklam (Peene, Größe des EZG = 4.967 km^2) beträgt das Hq_5 2011 vom 9. August 2011 zum Vergleich 19,7 $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$. Das zugehörige T ist kleiner als 20 a.

Tabelle 2
 Einzugsgebiete Mecklenburg-Vorpommerns mit außergewöhnlichen Spitzenabflüssen (T > 50 a, T = Wiederkehrintervall) im Sommer 2011 (EZG = Einzugsgebiet, TG = Teilgebiet, Hq_5 = Scheitelabflussspende)
 Extraordinary peak flow rates Hq_5 (T > 50 a, T = return period) in basins of Mecklenburg-Vorpommern in summer 2011 (EZG = basin area, TG = subbasin)

Pegel/EZG	Lage	Fläche des EZG [km^2]	Hq_5 [$l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$]	Datum	T [a]
Willershagen/ Wallbach	Küstengebiet Ost, westlicher Teil	46,9	136,2	12. Aug.	ca. 500
Bad Sülze/Recknitz	Küstengebiet Ost, westlicher Teil	428	45,8	1. Aug.	50
Lodmannshagen/Mühlgraben	Küstengebiet Ost, östlich Greifswald	36,5	56,2	31. Juli	50
Gnoien/Warbel	nordwestlicher Teil des Peene-EZG, TG der Trebel	155	50,0	31. Juli	50
Ziddorf/Westpeene	südwestlicher Teil des Peene-EZG	16,0	335,6	31. Juli	> 200
Gielow/Ostpeene	südwestlicher Teil des Peene-EZG	362	36,2	3. Aug.	> 100
Kittendorf/Kittendorfer Peene	südwestlicher Teil des Peene-EZG, TG der Ostpeene	52,2	65,1	31. Juli	> 100
Klempenow/Tollense	südöstlicher Teil des Peene-EZG	1.409	16,3	12. Aug.	50
Neubrandenburg/Datze	südöstlicher Teil des Peene-EZG, TG der Tollense	74,1	81,9	30. Juli	> 100
Brohm/Golmer Mühlbach	EZG der Zarow, östl. Neubrandenburg	98,0	117,4	30. Juli	100

Bei den meisten der in Tabelle 2 aufgelisteten Pegel war der Sommerhöchstwert 2011 des Durchflusses Q die unmittelbare Folge der Niederschläge vom 28./29. Juli, bei den größeren EZG jedoch mit entsprechender zeitlicher Verzögerung. Eine Ausnahme bildet auch hier der Pegel Willershagen, bei dem erst die Niederschläge des 12. August 2011 für den Höchstwert sorgten.

Abschließend stellt sich die Frage, warum die Spitzenabflüsse an den Pegeln der roten Gruppe statistisch betrachtet weniger extrem ausgefallen sind als die der dunkelgelben Gruppe, trotz höherer Niederschläge im Juli 2011 und obwohl die Hq_5 spürbar größer sind (Abb. 15). Auch sind die EZG der dunkelgelben Gruppe durchschnittlich kleiner, was aufgrund der höheren Abflussdynamik kleinerer Gebiete größere Hq_5 erwarten lässt. Dies kann als Beleg dafür gewertet werden, dass in den EZG der roten Gruppe generell mehr HW-Abfluss gebildet wird, was sich auch an den mittleren HW-Abflusspenden MHq ablesen lässt. Diese sind in den EZG der roten Gruppe um mehr als das 1,5-Fache größer. Die langfristig betrachtet geringeren Spitzenabflüsse in den südlichen und südöstlichen EZG von M-V (dunkelgelbe Gruppe) sind Spiegelbild des Gradienten des mittleren Niederschlagsdargebots von Nordwest nach Südost (Abb. 2) und möglicherweise eines höheren Anteils durchlässiger Böden in ihren EZG (Abb. 3). Bei der Regionalisierung von HW-Scheiteldurchflüssen in M-V durch Mehrfachregression (MIEGEL & HAUPT 1998) hat sich gezeigt, dass der mittlere Jahresniederschlag zu den maßgeblichen Prediktoren gehört. Demnach sind dort größere Scheitelabflusspenden zu erwarten, wo auch die Jahresniederschläge größer ausfallen. Vermutlich haben aber 2011 in den EZG der dunkelgelben Gruppe die Abfolge mehrerer Extremniederschläge und die Erschöpfung des Retentionsvermögens zu Abflussbildungsbedingungen geführt, die in höherem Maße außergewöhnlich waren.

Diese hypothetischen Aussagen bedürfen jedoch der Bestätigung durch weiterführende Ereignis- und Gebietsanalysen. Interessant wäre auch die statistische Analyse der Hochwasserfülle (des Abflussvolumens) und der Zeitdauer der HW, die hier mangels verfügbarer Vergleichsdaten nicht möglich ist. Es ist zu vermuten, dass in dieser Hinsicht das Abflussgeschehen in einigen größeren Einzugsgebieten, die weniger durch besonders extreme Scheitelabflüsse aufgefallen sind, statistisch betrachtet gleichfalls außergewöhnlich gewesen ist.

5 Auswirkungen auf das Grundwasser (GW)

Viele Auswertungen zu den hydrologischen Folgen von Extremniederschlägen beschränken sich auf das Abflussgeschehen in Fließgewässern. Ein tieferes Verständnis erfordert den Blick auf die dynamischen, flächendifferenzierten Prozesse der Abflussbildung in den EZG, wobei insbesondere in den Gebirgsregionen der Direktabfluss im Mittelpunkt steht. Der Beitrag des GW-Abflusses findet meist sehr vereinfacht oder pragmatisch durch systemhydrologische Ansätze Berücksichtigung, obwohl älteres unterirdisches Wasser nicht unerheblich an den Mechanismen der Abflussbildung beteiligt ist (BRONSTERT 2005). Im Norddeutschen Tiefland bereitet ein solcher Pragmatismus größere Schwierigkeiten, weil hier auch bei HW der Beitrag des GW- zum Gesamtabfluss bedeutsam und die Interaktionen zwischen Oberflächenwasser und GW (DWA 2013) vielfältiger sind.

Darüber hinaus wird man hier bezüglich der Folgeschäden nicht nur mit den Auswirkungen der HW in den Fließgewässern kon-

frontiert, sondern auch mit denen erhöhter Grundwasserstände bzw. geringer Grundwasserflurabstände (GWF). Flurnahes GW ist nicht nur für Niederungsgebiete, sondern auch für oberflächennahe Grundwasserleiter typisch. So haben die Niederschläge des Sommers 2011 neben den Überschwemmungen durch die Fließgewässer aufgrund hoher Infiltrations- und Versickerungsraten zu einem rapiden Anstieg oberflächennahen GW geführt. Bei standortbezogen ohnehin geringen GWF stieg das GW örtlich über längere Zeit bis an die Geländeoberfläche an, was für Sommermonate untypisch ist, verbunden mit Vernässungserscheinungen und hoher Abflussbereitschaft gegenüber weiteren Starkniederschlägen. Anderenorts erreichte die Grundwasseroberfläche (GWO) ein bisher nicht oder nur sehr selten beobachtetes Höhenniveau. Viele ältere Eigentümer von Häusern beklagten im Rostocker Raum erstmals Eindringen von GW in ihre Kellerräume.

In Niederungen entlang von Fließgewässern führten hohe Wasserstände der Vorfluter quasi zu einem unterirdischen Rückstau von GW oder sogar zur Exfiltration von Flusswasser, wodurch sich hier die Situation noch verschärfte. Dort, wo sich erhöhte Grundwasserstände mit oberirdischen Zuflüssen überlagerten und die Kapazitäten der Schöpfwerke (insbesondere an der Küste) nicht ausreichten, kam es länger anhaltend zu Überschwemmung und Vernässungserscheinungen. Zu den besonderen Folgen erhöhter Grundwasserstände gehörten in Binneneinzugsgebieten der Austritt und die Ansammlung von GW in ihren Tiefpunkten, so dass sich temporär Standgewässer bildeten.

An Standorten, an denen oberflächennahe Grundwasserleiter nicht direkt mit einem Oberflächengewässer kommunizieren, sind schnelle Anstiege der GWO vorrangig auf die Versickerung aus der durchwurzelten Bodenzone zurückzuführen. Eine genauere Bewertung ist auf der Grundlage von Beobachtungen an der Lysimeterstation Groß Lüsewitz, die ca. 10 km östlich von Rostock gelegen ist und deren Betrieb durch das Landwirtschafts- und Umweltministerium M-V gefördert wird, möglich und aufschlussreich. Die Station besteht aus 6 Lysimetern mit einer Oberfläche von einem Quadratmeter und einer Gesamttiefe von 2,5 m. Die Bodenmonolithen, die mit einer landwirtschaftlichen Fruchtfolge bewirtschaftet werden, entstammen dem gleichen Standort in der Stationsumgebung mit der Bodenart lehmiger Sand. Im Juli 2011 blieben die Niederschlagsmengen in Groß Lüsewitz nur geringfügig hinter denen von Rostock-Warnemünde zurück, im August fielen sie dagegen deutlich geringer aus.

Die Darstellung des Gangs der Grundwasserneubildung (GWN) von zwei ausgewählten Lysimetern (Lysimeter 4 und 6) im Zeitraum 1. bis 25. Juli 2011 im Vergleich zum Niederschlag (Abb. 16) macht deutlich, dass die Sickerwasserbildung erst mit den Extremniederschlägen des 22. Juli eingesetzt hat. Dieses sehr späte Anspringen überrascht ein wenig, da bis dahin, d.h. vom 22. Mai bis 21. Juli, in Bodenniveau insgesamt 245,5 mm Niederschlag gemessen worden sind.

Zu erklären ist diese späte Reaktion nur mit der extremen Trockenheit im Frühjahr 2011, auf die in MIEGEL et al. (2014) ausführlicher eingegangen worden ist, und die dadurch hervorgerufene hohe Aufnahmefähigkeit der ausgetrockneten Böden. Die Niederschläge ab Mitte Mai wurden infolgedessen vollständig in der durchwurzelten Bodenzone zurückgehalten, zusätzlich begünstigt durch die Zehrung des Bodenwasservorrats aufgrund

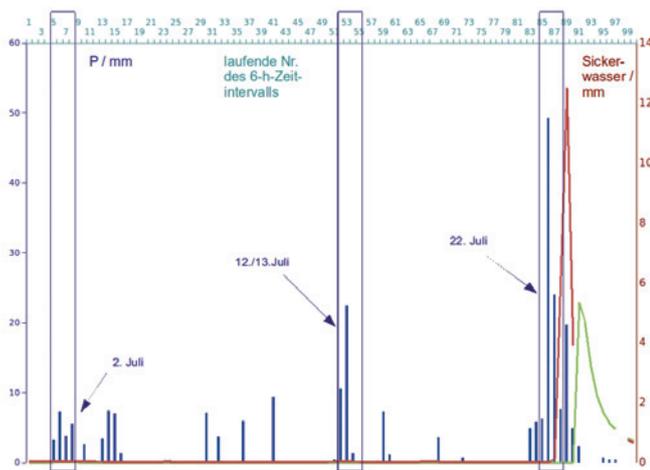


Abbildung 16
 Grundwasserneubildung der Lysimeter 4 und 6 der Station Groß Lüsewitz vom 1. bis 25. Juli 2011 (braune und grüne Linie) im Vergleich zum Niederschlag (blaue Balken; Darstellung für 6-h-Zeitintervalle)
Groundwater recharge of two selected lysimeters at the station Groß Lüsewitz (brown and green curves) compared to precipitation (blue bars; illustrated for 6-hour-time-intervals)

jahreszeitlich hoher Raten der Transpiration. An dieser Situation änderten auch die Tagesniederschläge des 22. Juni (29,2 mm), 2. Juli (17,7 mm) und 13. Juli (34,0 mm) zunächst nichts. Vom 21. Mai bis 20. Juli betrug die größte tägliche Sickerwasserrate 0,21 mm (Lysimeter 1 und Lysimeter 2 am 27. Mai). In diesen sechs Dekaden wurde je Dekade und Lysimeter durchschnittlich 0,84 mm Sickerwasser gebildet, mit einem spürbaren Rückgang der ohnehin schon sehr kleinen Tagesraten. So betrug die mittlere Tagesrate in der zweiten Juli-Dekade nur noch 0,04 mm. Die nach dem 20. Mai vorherrschenden sehr geringen und gleichmäßigen Versickerungsraten waren vermutlich überwiegend noch „Reste“ der Sickerwasserbildung des Vorwinters.

Eine Zunahme der Sickerwasserraten konnte erst mit den exzessiven Niederschlägen zu Beginn der 3. Juli-Dekade, d.h. mit ungewöhnlich geringer Verzögerung am 23. Juli (Lysimeter 2, 3, 5 und 6) bzw. 24. Juli (Lysimeter 1 und 4), beobachtet werden. Die Monolithen waren offensichtlich so weit aufgesättigt, dass es mit diesen Niederschlägen zu einem spontanen Durchbruch und ungewöhnlich starken Anstieg der Sickerwasserbildung kam. Lysimeter 1 ausgenommen betrug die durchschnittliche Sickerung vom 23. bis 27. Juli 9,6 mm, 13,6 mm, 13,0 mm, 4,0 mm und 2,4 mm pro Tag. Nur das Lysimeter 1 reagierte mit einem langsamen Anstieg und länger anhaltenden, dafür aber geringeren Raten, was nur mit der Wirkung einer stauenden Schicht bei diesem Lysimeter erklärt werden kann. Weitere extreme Niederschläge am Ende des Monats (MIEGEL et al. 2014) führten schließlich zu einem weiteren Peak der Sickerwasserbildung.

Die durchschnittliche 30-tägige Sickerwasserrate aller sechs Lysimeter betrug im Zeitraum 23. Juli bis 21. August 2011 136,3 mm. Eine Sickerwassermenge dieser Größenordnung über einen Zeitraum von 30 Tagen ist seit Beginn zuverlässiger Aufzeichnungen in Groß Lüsewitz, d.h. seit 1972, selbst in Wintermonaten noch nicht annähernd beobachtet worden. Die mittlere jährliche Sickerwasserrate (Monate November bis Oktober; 38 Jahre von 1972/73 bis 2009/10), beträgt zum Vergleich 199 mm.

In Abbildung 17 ist die jeweils größte 30-Tage-Menge der GWN innerhalb von 12 Monaten in Groß Lüsewitz, hier aber nicht für Kalenderjahre, sondern für 12-monatige Zeitabschnitte September bis August, dargestellt. Diese Jahreszäsur hat sich als günstig erwiesen, weil über den Monatswechsel August-September hinweg in keinem Jahr eine bedeutsame GWN stattgefunden hat. Vielmehr ist in diesem Zeitraum nicht selten überhaupt keine GWN zu verzeichnen. Insofern kann in der Region um Groß Lüsewitz der Zeitraum September bis August auch als „gehydrologisches Jahr“ oder „GW-Neubildungsjahr“ bezeichnet werden.

Abbildung 17 bestätigt, dass die GWN im Allgemeinen und besonders hohe Raten der GWN im Speziellen ein Phänomen des Winterhalbjahrs (November bis April) sind. Dies belegen auch die Monatsmittelwerte, die nur von November bis April bzw. Januar bis März größer als 10 mm bzw. 30 mm sind. Damit korrespondieren auch die bisher 15 größten 30-Tage-Mengen, die ausschließlich im Zeitraum November bis März beobachtet worden sind. Die einzige Ausnahme bildet der Mai 1983, verursacht durch ergiebige Niederschläge im April davor. Abbildung 17 ist darüber hinaus zu entnehmen, dass die größte 30-Tage-Menge der GWN nur in drei der 40 Zeiträume September bis August in den Monaten Mai bis Juli (grüne Balken) registriert worden ist. Ursache dafür ist in diesen drei Fällen nicht nur das Anhalten der Periode der GWN über die Wintermonate und das zeitige Frühjahr hinaus, sondern daneben ihre Intensivierung aufgrund umfangreicher Niederschläge in den Folgemonaten.

Aufgrund dieser Fakten wäre allein schon das Auftreten der größten Sickerwassermenge über 30 Tage in einem Hochsommer ein Novum gewesen. Dass darüber hinaus gerade zu dieser Jahreszeit der bisherige 30-Tage-Größtwert der GWN deutlich übertroffen worden ist, unterstreicht die Ungewöhnlichkeit der Ereignisse. Beleg dafür ist auch Abbildung 18, in der die GWN der beiden Monate Juli und August im Vergleich zu den bisherigen Beobachtungen an der Lysimeterstation in diesen Monaten veranschaulicht sind.

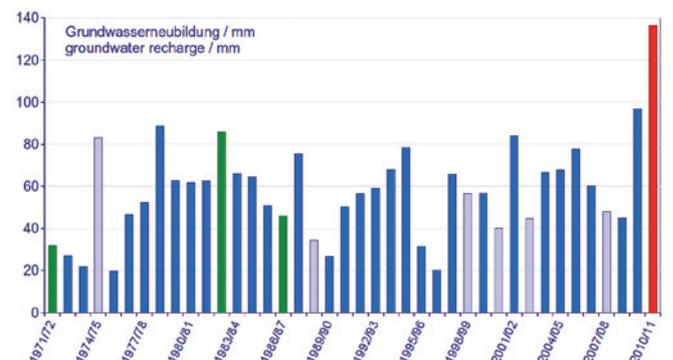


Abbildung 17
 Die größten Sickerwassermengen der Dauer 30 Tage innerhalb von Zeiträumen September bis August an der Lysimeterstation Groß Lüsewitz (blaue Balken: überwiegend im Januar bis März; hellblaue Balken: überwiegend im November, Dezember oder April; grüne Balken: überwiegend im Mai bis Juli; rote Balken: überwiegend im August bis Oktober; acc. SCHUMANN et al. 2013)
The largest amounts of groundwater recharge of the 30 days-term and periods from September to August at the lysimeter station Groß Lüsewitz (blue bars: formation mainly from January to March; light blue bars: formation mainly in November, December or April; green bars: formation mainly from May to July; red bars: formation mainly from August to October; acc. SCHUMANN et al. 2013)

Die statistische Überprüfung der 30-tägigen Sickerwasserrate 136,3 mm des Zeitraums 23. Juli bis 21. August 2011 zeigt zunächst, dass das Datenkollektiv der 30-Tage-Größtwerte in Zeiträumen September bis August ohne den Wert des Jahres 2011 annähernd normalverteilt ist und dieser um das mehr als 4-Fache der Standardabweichung von ihrem Mittelwert abweicht. Die Anwendung von zwei Ausreißertests nach SACHS (2003) bzw. MÜLLER et al. (1979) führt mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % bzw. 1 % zu seiner Ausweisung als Ausreißer. Dennoch weicht dieser Größtwert nicht so drastisch von allen anderen Werten des Datenkollektivs ab, wie dies bei dem 30-Tage-Größtwert des Niederschlags des Sommers 2011 der Fall ist (MIEGEL et al. 2014).

Die Sickerwasserbildung gehört zu den hydrologischen Prozessen, die von der Überschreitung von Schwellenwerten, hier des Bodenwassergehaltes bei Feldkapazität, abhängen. In einzelnen Sommermonaten ist es deshalb nicht untypisch, dass der Niederschlag aufgrund der Zehrung des Bodenwasservorrates durch Verdunstung nicht ausreicht, um Sickerung auszulösen. Daraus resultieren häufig kleine Summenwerte der GWN in den Monaten Juli und August (Abb. 18). Besonders extrem und vergleichbar mit der geringen GWN vom 22. Mai bis 21. Juli 2011 (trotz 245,5 mm Niederschlag in diesem Zeitraum; s.o.) ist in dieser Hinsicht der August 2006, in dem trotz 165 mm Niederschlag nur 0,2 mm Sickerwasser gebildet worden sind.

Wenn jedoch ausreichende Niederschläge zur Überschreitung der Feldkapazität führen und das Retentionsvermögen des Bodens erschöpft ist, dann werden weitere Niederschläge kaum noch zurückgehalten, so dass auch im Sommer größere, vereinzelt sogar extreme Sickerwassermengen möglich sind. In Abbildung 18 ragen diesbezüglich drei weitere Jahre heraus, auch wenn diese nicht an das Geschehen im Juli/August 2011 heranreichen.

In Abbildung 19 ist die Entwicklung des GWF von September 2010 bis März 2012 mit dem mittleren GWF dieser Monate verglichen und den beobachteten Monatsniederschlägen gegenübergestellt. Dabei ist der GWF anders als üblich zur besseren Veranschaulichung mit einem negativen Wert nach unten abgetragen. Dadurch sind indirekt die Schwankungen der GWO wiedergegeben. Es ist zu erkennen, dass vor dem trockenen Frühjahr die Niederschläge durchaus ergiebig waren. So sind von November 2010 bis Januar 2011 229,0 mm Niederschlag gefallen, die bei geringer Verdunstung zu 176,5 mm GWN und einem kräftigen Anstieg der GWO führten. Damit war der GWF deutlich kleiner als normal. Das trockene Frühjahr bedingte zwar wiederum einen starken Rückgang der GWO, diese erreichte dadurch aber nur ihr jahreszeitlich normales Niveau. Davon ausgehend bewirkten die Niederschläge im Juli und August einen ähnlichen Anstieg der GWO wie im Winter zuvor, d.h. um ca. 1,5 m, was bei einer GWN im Juli und August von 144,7 mm hypothetisch mit einer entwässerbaren Porosität von ca. 10 % korrespondiert. Wären die Winterniederschläge weniger ergiebig gewesen, wären auch die Auswirkungen auf das oberflächennahe GW weniger drastisch ausgefallen. Damit hatten die Winterniederschläge durchaus ihren Anteil am Grundwasseranstieg im Sommer 2011. Die erhöhten Grundwasserstände setzten sich im darauf folgenden Winter 2011/12 fort. Erst im März 2012 erreichten sie wieder ihr normales Niveau.

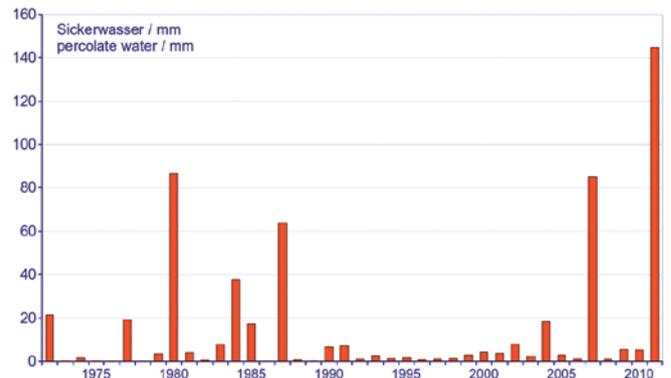


Abbildung 18
Sickerwassermengen an der Lysimeterstation Groß Lüsewitz, Summenwerte der Monate Juli und August (1972 bis 2011); aus: MIEGEL (2011)
Percolate water at the lysimeter station Groß Lüsewitz, cumulative values of the months July and August (1972 to 2011); acc. MIEGEL (2011)

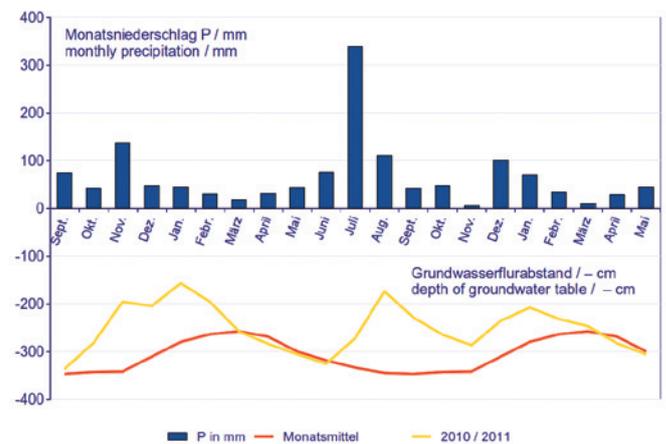


Abbildung 19
Monatswerte des Niederschlags von September 2010 bis Mai 2012 im Vergleich zum GW-Flurabstand dieser Monate (gelbe Linie) und ihrem langjährigen mittleren GW-Flurabstand (rote Linie); erweitert nach MIEGEL (2011)
Monthly precipitation from September 2010 to May 2012 compared with depth of the groundwater table of this month (yellow line) and long-term mean values of the groundwater table (red line); extended according to MIEGEL (2011)

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Als Folge mehrerer Extremniederschlagsereignisse in Nordostdeutschland im Sommer 2011 waren im Küstengebiet der Ostsee in zahlreichen Einzugsgebieten Hochwasser zu beobachten. Sie fielen in den Landesteilen von M-V am schwersten aus, die auch von den Niederschlägen am stärksten betroffen waren, d.h. im Ostsee-einzugsgebiet zwischen Wismar und Stralsund mit einem breiten Keil bis zur südlichen Landesgrenze, der insbesondere das EZG der Peene überdeckt.

Auch der Zeitverlauf der HW-Ereignisse hing in erster Linie von der räumlichen Verteilung der einzelnen Extremniederschlagsereignisse ab. Gebiete, über die alle maßgeblichen Niederschlagsfelder hinweggegangen sind, reagierten mit einer Folge von bis zu sechs HW-Wellen, während andere Gebiete nur 1 bis 2 markante HW-Wellen ausbildeten. Der größte Scheitelwert ist

in den meisten EZG nach dem Extremniederschlag am 28./29. Juli 2011 beobachtet worden. Ausschlaggebend war dabei ihre Auffeuchtung durch die ausgiebigen Niederschläge am 22./23. Juli 2011, so dass in der Folge eine hohe Abflussbereitschaft vorgeherrscht hat. Diese führte statistisch betrachtet zu den extremsten Scheitelabflüssen in den südwestlichen und südlichen Teileinzugsgebieten der Peene mit $T > 100$ a, die im Mittel und Vergleich zu den nordwestlichen Landesteilen kleinere HW-Abflussspenden produzieren, was ungeachtet der statistischen Einordnung auch im Sommer 2011 der Fall war.

Zu den hydrologischen Besonderheiten des Nordostdeutschen Tieflands (MIEGEL & HENNIG 2006) gehört der besonders hohe Anteil des GW-Abflusses am Gesamtabfluss, auch bei HW. Auswertungen zur GWN an der Lysimeterstation Groß Lüsewitz und punktuelle Auswertungen der beobachteten Grundwasserstände machen deutlich, dass die Folgen der Starkniederschläge auch für den GW-Haushalt ungewöhnlich waren. Einerseits wurden Rekordwerte der GWN beobachtet – und dies ausgerechnet im Hochsommer – andererseits begünstigten bei oberflächennahen Grundwasserleitern extreme Grundwasserstände die ober- und unterirdische Abflussbildung. Aufgrund dessen hatte das Grundwasser in mehrfacher Hinsicht Anteil am Abflussgeschehen, d.h. sowohl durch seinen erheblichen Eigenbeitrag als auch aufgrund eingeschränkter unterirdischer Retention und großflächiger Vernässungen mit der Folge einer hohen Abflussbereitschaft solcher Flächen gegenüber Niederschlägen.

Weiterführende Analysen sind erforderlich, um die Prozesse des Niederschlag-Abfluss-Geschehens während dieser außergewöhnlichen Ereignisse in den betroffenen EZG unter Berücksichtigung der regionalen Besonderheiten besser verstehen zu können. Die verfügbaren Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) leiden überwiegend darunter, solche Besonderheiten nur unzureichend abbilden zu können. Schwierig gestalten sich dabei v.a. die Berücksichtigung der erheblichen Speisung aus dem GW und die Quantifizierung der Dränabflüsse. Insofern wäre von weiterführenden Untersuchungen auch ein Beitrag zur weiteren Qualifizierung solcher Modelle zu erwarten.

Im Hinblick auf HW-Schäden und entsprechende Potenziale zeigt das „Sommer-HW 2011“ auch auf, dass Abflussfülle und Zeitandauer über bestimmten Schwellenwerten hydrologisch wichtige Kennwerte sind, die nach Möglichkeit bei der statistischen Auswertung von Pegeldaten stärker berücksichtigt werden sollten.

Abgesehen von diesen regionalen Besonderheiten des Niederschlag-Abfluss-Geschehens in M-V sind solche Beobachtungen zu extremen Hochwassern generell von besonderem Wert für die Überprüfung von N-A-Modellen, die oft nur anhand mittlerer oder sogar kleinerer HW möglich ist. Erweisen sich die Modelle und ihre Parameter auch bei solchen Ereignissen als geeignet, dann kann von einem weiten Bereich ihrer Gültigkeit ausgegangen werden. Andernfalls spräche dies für die Notwendigkeit ihrer gesonderten Parametrisierung oder möglicherweise sogar für besondere HW-Entstehungsbedingungen und den Bedarf an Modellerweiterungen oder spezifischen Lösungsansätzen.

Nach solchen außergewöhnlichen HW-Ereignissen stellt sich meist die Frage, wie sich die Wasserwirtschaft am besten auf katastrophale Extremniederschläge und Hochwasser einstellen sollte. Hier hat sich in den letzten Jahren teilweise ein Paradig-

menwechsel vom HW-Management zum Schadensmanagement vollzogen. Die Möglichkeiten, katastrophale HW zu beeinflussen, sind begrenzt. Maßnahmen des Hochwasserschutzes sind dort unverzichtbar, wo hohe Schadenspotenziale zu verzeichnen oder sogar Menschenleben bedroht sind. Daran und an Aspekten der Wirtschaftlichkeit solcher Maßnahmen hat sich das Bemessungsniveau wasserwirtschaftlicher Anlagen zu orientieren. Insbesondere aufgrund möglicher Veränderungen durch den Klimawandel, sowohl die Intensität und Häufigkeit solcher Ereignisse betreffend, tritt die Frage nach dem verbleibenden Restrisiko immer mehr in den Vordergrund. Hier setzen die Maßnahmen der HW-Vorsorge an, die im engeren Sinne auf eine Verringerung der HW-Schadenspotenziale ausgerichtet sowie überwiegend schneller und mit einem weitaus geringeren Aufwand an Mitteln als z.B. größere HW-Schutzbauwerke, zu realisieren sind.

Summary and conclusions

As a result of several extreme rainfall events in North-East Germany in the summer of 2011, floods could be observed in numerous catchments of the Baltic Sea's coastal area. The floods were most severe in the parts of Mecklenburg-Vorpommern that were also hit hardest by the rainstorm events, i.e. in the Baltic Sea catchment between Wismar and Stralsund, including a broad wedge towards the Southern border of Mecklenburg-Vorpommern, notably covering the catchment of the Peene river.

The timing of the flood events was primarily dependent on the spatial distribution of the single extreme rainfall events. Areas that were affected by all major precipitation fields reacted with a succession of up to six flood waves, while other areas showed just 1 or 2 striking flood waves. In most catchments, the highest peak value was observed after the extreme rainfalls on July 28/29 2011. Their additional moisture penetration due to the abundant rainfalls on 22/23 July 2011 resulted in a high runoff tendency. From a statistical point of view, this caused the most extreme peak runoff in the subcatchments to the south-west and south of the Peene at $T > 100$ a, that produce smaller flood runoff depths on average and compared to the north-west parts of the land. Regardless of the statistical classification, this was also the case in the summer of 2011.

The hydrological particularities of the north-east German lowlands (MIEGEL & HENNIG 2006) include the high share of groundwater runoff in the total runoff, also in the event of flooding. Evaluations of the groundwater recharge at the lysimeter station Groß Lüsewitz and selective evaluations of the observed groundwater levels reveal that the impacts of the heavy rainfalls were also exceptional in terms of the groundwater balance. On the one hand, record values were observed in groundwater recharge – of all things at the height of summer, on the other hand extreme groundwater levels of near-surface aquifers favoured overground and underground runoff generation. Therefore, groundwater played a role in the runoff proceedings in several respects, i.e. both due to its considerable own contribution but also to limited underground retention and large-scale waterlogging causing a high runoff tendency of such areas with respect to precipitation.

Further analyses are required to increase the understanding of the processes involved in the rainfall-runoff occurrences during these extraordinary events in the catchments concerned while considering regional particularities. The available rainfall-runoff models (R-R-models) are mostly unable to adequately reprodu-

ce such particularities. Considering the substantial groundwater feed and the quantification of runoff from drainages proves difficult. In this respect, further investigations should also make a contribution towards further qualifying such models.

With a view to flood damages and relevant potentialities, the "2011 summer floods" also show that flow volume and duration above certain threshold values are hydrologically important characteristics, that should be taken greater account of in the statistical evaluation of gauge data.

Apart from these regional particularities of the rainfall-runoff occurrences in Mecklenburg-Vorpommern, such observations on extreme floods are generally of great value for verifying R-R models, often only feasible by means of average or even smaller floods. If the models and their parameters prove suitable in such events, a wide range of validity can be assumed. Otherwise, their separate parameterisation would be required or even for special flood origin conditions and the need for model extensions or specific solution approaches.

Such extraordinary flood events usually entail the question how water management should best adapt to catastrophic extreme rainfalls and floods. In the last few years, a partial paradigm shift from flood management to risk management has taken place. The options of impacting on catastrophic floods are limited. Flood control measures are indispensable where high damage potentials are imminent or even human life is at risk. The dimensioning of water management facilities is to be guided by the latter and by the aspect of the economic efficiency of such measures. Notably owing to possible changes in the wake of climate change, both concerning intensity and frequency of such events, the residual risk issue increasingly comes to the fore. This is where the flood prevention measures start going which aim at reducing flood damage potentials and that can be implemented faster and with far fewer means and funds as e.g. large-size flood protection structures.

Danksagung

Dem Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (LUNG) Mecklenburg-Vorpommern sei an dieser Stelle ausdrücklich für die Bereitstellung der Pegeldata gedankt.

Anschriften der Verfasser:

Dr. Dr. D. Mehl
biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH
Nebelring 15, 18246 Bützow
dietmar.mehl@institut-biota.de

Prof. Dr. K. Miegel
Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Professur Hydrologie
Universitätsplatz 1, 18051 Rostock
konrad.miegel@uni-rostock.de

A. Schumann
Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern
Abteilung Wasser
Dezernat 310: Hydrologie, Hochwasserrisikomanagement
Goldberger Straße 12, 18273 Güstrow
andre.schumann@lung.mv-regierung.de

Literaturverzeichnis

- BIOTA (2010): Ermittlung von Art und Intensität künstlicher Entwässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen in Mecklenburg-Vorpommern. – biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 102 S.
- BIOTA (2011): Vorläufige Bewertung des Hochwasserrisikos im Rahmen der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie für das Land Mecklenburg-Vorpommern. – biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 144 S.
- BIOTA (2012): Überarbeitung und Aktualisierung der Karte der mittleren Abflüsse und mittleren Niedrigwasserabflüsse für Mecklenburg-Vorpommern. – biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 97 S.
- BRONSTERT, A. (2005): Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele. – Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 13.05. – Hrsg. Hydrologische Wissenschaften – Fachgemeinschaft in der DWA, Hennef
- DIN EN 752:2008-04: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden. Deutsche Fassung EN 752:2008
- DWA (2006): Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. – Arbeitsblatt DWA-A 118. – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 34 S.
- DWA (2013): Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser. – DWA-Themen T2. – Hrsg. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, 157 S.
- HAUPT, R. & K. MIEGEL (2006): Analyse rückstaubeinflusster Wasserstände der Peene und Ableitung von Bemessungswasserständen. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 50 (6), 297–302
- INITIATIVE EVERSHAGEN DORF (2011): Dokumente, Skizzen, Fotos, mündliche Mitteilungen der Bewohner von Rostock, Evershagen Dorf
- LUNG (2009): Rahmenpapier für die landesspezifische Umsetzung der EZG-Wasserrahmenrichtlinie in Mecklenburg-Vorpommern. – Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern – Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie, Güstrow
- MEHL, D. (2004): Grundlagen hydrologischer Regionalisierung: Beitrag zur Kennzeichnung der hydrologischen Verhältnisse in den Flussgebieten Mecklenburgs und Vorpommerns. – Dissertation, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, 156 S.
- MEHL, D., A. STEINHÄUSER, H.D. KASPERIDUS & M. SCHOLZ (2012): Hochwasserretention. – In: Scholz, M., Mehl, D., Schulz-Zunkel, C., Kasperidus, H. D., Born, W. & K. Henle: Ökosystemfunktionen in Flussauen. Analyse und Bewertung von Hochwasserretention, Nährstoffrückhalt, Treibhausgas-Senken-/Quellenfunktion und Habitatfunktion. – Schriften. Naturschutz und biologische Vielfalt 124, 34–47

- MIEGEL, K. (2011): Niederschlagsereignisse in Mecklenburg-Vorpommern im Sommer 2011. – In: Erhöhung der Effektivität von Abwasserentsorgungsanlagen (Tagungsband). – Schriftenreihe Umweltingenieurwesen 31, 147–166; Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Universität Rostock, Eigenverlag
- MIEGEL, K. & R. HAUPT (1998): Abschlussbericht zum Projekt „Regionalisierung von Hochwasserscheiteldurchflüssen HQ(T) in Mecklenburg-Vorpommern“. – Universität Rostock, Institut für Kulturtechnik und Siedlungswasserwirtschaft, im Auftrag des Landesamtes für Umwelt und Natur Mecklenburg-Vorpommern
- MIEGEL, K. & H. HENNIG (2006): Probleme der Niederschlag-Abfluss-Modellierung im nordostdeutschen Tiefland. – In: Schmitz, G.H. Lennartz, F. & R. Schwarze: Analyse und Modellierung der Niederschlag-Abfluss-Prozesse – Bewährte Techniken und neue Ansätze. – Tagungsband. – TU Dresden, 271–280
- MIEGEL, K., D. MEHL, G. MALITZ & H. ERTEL (2014): Ungewöhnliche Niederschlagsereignisse im Sommer 2011 in Mecklenburg-Vorpommern und ihre hydrologischen Folgen. Teil 1: Hydrometeorologische Bewertung des Geschehens. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 58 (1), 289–302
- MÜLLER, P.H., P. NEUMANN & R. STORM (1979): Tafeln der mathematischen Statistik. – VEB Fachbuchverlag Leipzig, 3. Aufl.
- SACHS, L. (2003): Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden. – Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 11. Aufl.
- SCHUMANN, A., D. MEHL, K. MIEGEL, A. BACHOR & J. EBERTS (2013): Das Sommerhochwasser 2011 in Mecklenburg-Vorpommern. Dokumentation und Auswertung. – Materialien zur Umwelt 2; Hrsg. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, Güstrow