

Tim G. Hoffmann, Konrad Miegel, Dietmar Mehl

Regionalisierung der Hochwasserkennwerte für das Land Mecklenburg-Vorpommern: Aktualisierung und methodische Neuerungen

Regionalization of Flood Parameters for Mecklenburg-West Pomerania: update and methodological innovations

Für die Einschätzung der Hochwassergefährdung und die Bemessung von wasserwirtschaftlichen Anlagen ist der Scheitelabfluss maßgeblicher statistischer Wiederkehrintervalle (HQ (T)) eine wesentliche Größe. In der Vergangenheit wurde dieser Wert in Mecklenburg-Vorpommern (M-V) nach dem Verfahren von MIEGEL & HAUPT (1998) bestimmt. Gegenstand des Beitrags ist die Aktualisierung dieses Verfahrens. Sie erfolgt auf der Basis eines nichtlinearen, multivariaten Regressionsansatzes, verlängerter Pegelzeitreihen und eines regionalspezifischen Datensatzes an Gebietskenngrößen. Die Anwendung von GIS-Werkzeugen erlaubt die effektive Überprüfung einer Vielzahl weiterer Geofaktoren, wobei sich zwei davon zusätzlich zu den bisher verwendeten als effektiv erwiesen haben. Besondere Überlegungen erforderte die Aufbereitung der Pegelraten. Die Kriterien zur Bewertung der Modellgüte lassen erkennen, dass mit Hilfe des überarbeiteten Regionalisierungsansatzes je nach betrachtetem Wiederkehrintervall eine Verringerung des mittleren relativen Modellfehlers von 31 % bis 42 % auf 20 % bis 27 % erreicht werden kann. Darüber hinaus wird ein Verfahren vorgeschlagen, mit dem in beobachteten Einzugsgebieten (EZG) die mittels Regionalisierungsansatz bestimmten HQ (T) mit den Ergebnissen der lokalen Pegelanalyse abgeglichen und alternativ verbessert werden können.

Schlagwörter: Hochwasser, Pegel, Regionalisierung, Scheitelabfluss, Wiederkehrintervall, Multiple nichtlineare Regression

The peak flow of decisive statistical periods is a significant parameter for the assessment of flood risk and calculation of water management systems. In the past, this value was determined by the method of MIEGEL & HAUPT (1998) in Mecklenburg-West Pomerania. This article introduces certain updates to this method. This is done on the basis of a non-linear, multivariate regression approach, extended time series for the water level gauges and a region-specific dataset of area characteristics. The usage of GIS-tools allows the effective analysis of a variety of other geofactors. Two of these, in addition to the ones used so far, have been proved to be effective. The analysis of the water level data required special consideration in this process. The evaluation criteria for the model's accuracy show that a reduction of the average relative model error from 31%-42% to 20%-27% can be achieved with the aid of the new regionalization approach, depending on the examined recurrence interval. In addition, a method is also presented with which the peak flows values determined via the regionalization approach can be compared with the results of the local water level analyses and possibly optimized.

Keywords: Flood, water gage, regionalization, flood peak, recurrence interval multiple nonlinear regression

1 Einleitung

Das „Hochwasserrisiko“ nach Artikel 2 EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL) ist die „Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Hochwasserereignisses und der hochwasserbedingten potenziellen nachteiligen Folgen auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und die wirtschaftlichen Tätigkeiten“ sowie erhebliche Sachwerte (vgl. § 73 Absatz 1 Wasserhaushaltsgesetz WHG).

Die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Hochwasserereignisses im Sinne einer Gefahr bzw. Gefährdung wird überwiegend mit dem hydrologischen Kennwert des Hochwasserscheitels als Abfluss/Durchfluss-Größe (Menge je Zeiteinheit) verbunden. Basierend auf gewässerkundlichen Daten und Analysen dienen Hochwasserscheitelabflüsse mit zugehörigem Wiederkehrintervall als Bemessungsgrundlage in der Wasserwirtschaft bzw. damit korrespondierenden Feldern (z. B. Infrastruktur).

Für die dafür notwendige „Wahrscheinlichkeitsanalyse“ (DWA, 2012) bildet jeweils das an einem Pegel generierte Datenkollektiv beobachteter Jahreshöchstwerte HQ (a) im hydrologischen Jahr für einen Zeitraum von mindestens 25 a bis 30 a (jährliche

Serie) die Grundlage. Eine Alternative stellt die Zusammenstellung aller HQ dar, die einen vorgegebenen Schwellenwert HQS überschreiten (partielle Serie). Da durch eine solche Schwellenwertstatistik die tatsächlich größten HQ mit dem Umfang n berücksichtigt werden und die Ereignisauswahl nicht von der willkürlichen Unterteilung des Beobachtungszeitraums in Jahre mit dem zufälligen Auftreten von Jahreshöchstwerten abhängt, ist dieses Vorgehen methodisch besser begründet. Der damit einhergehende Zuwachs an Genauigkeit beschränkt sich jedoch auf den Bereich kleinerer Wiederkehrintervalle bis ca. 15 Jahre (DVWK, 1999), weshalb meist vereinfachend doch mit jährlichen Serien gearbeitet wird.

Bei ausreichenden Datengrundlagen gilt die Wahrscheinlichkeitsanalyse als das genaueste Verfahren zur Ermittlung der HQ (T), im engeren Sinne gilt es jedoch nur für die Messpegelstandorte. Die damit notwendige Übertragung von Kenngrößen, die aus örtlich gewonnenen hydrologischen Messgrößen ermittelt worden sind, auf ein Gebiet, wird in der Hydrologie als „Regionalisierung“ bezeichnet (KLEEBERG, 1999).

Einfachere Methoden der regionalen Übertragung sind nur unter bestimmten Bedingungen, z. B. in hydrologisch homogenen

Regionen, einsetzbar. Zu den am häufigsten verwendeten, anspruchsvolleren Methoden gehört die Mehrfachregression zwischen den HQ (T) ausgewählter T und Gebiets- bzw. Geofaktoren, die für die Ausprägung von Hochwässern einer diesbezüglich homogenen Region bestimmend sind, sowie das Bezugs-HQ-Verfahren (englisch: Index-flood-method; HOSKING & WALLIS, 1997), bei dem eine regional gültige und von der Gebietsgröße AE unabhängige normierte Verteilungsfunktion (VF) und i. d. R. eine Funktion $MHQ = f(AE)$ zum Einsatz kommen (MHQ = Mittelwert der HQ (a)). Meist dient im Index-Flood-Verfahren der mittlere Hochwasserabfluss MHQ als Skalierungsfaktor. Alternativ zu den HQ (T) können durch Mehrfachregression auch statistische Momente wie Mittelwert und Schiefe, aus denen sich Parameter einer geeigneten und regional anwendbaren VF berechnen lassen, oder die Parameter der VF selbst ermittelt werden, wobei schlussendlich die HQ (T) anhand der VF zu bestimmen sind (DWA, 2012). Ausführlichere Betrachtungen zur Ermittlung von Scheitelabflüssen in unbeobachteten Gebieten sind bei BLÖSCHL et al. (2013) und SALINAS et al. (2013) zu finden.

Diesem Beitrag liegen die Ergebnisse eines durch das Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG M-V) erteilten Auftrages zugrunde (BIOTA, 2016). Das methodische Vorgehen ist in Abbildung 1 wiedergegeben. Auf Grund langjähriger, positiver Erfahrungen mit Mehrfachregressionsverfahren im Bundesland (RASMUS, 1989; MIEGEL & HAUPT, 1998; HAUPT, 2000; BIOTA, 2012) sowie anderen norddeutschen Bundesländern und Regionen (IAWG, 2008 in Schleswig-Holstein; DHI-WASY, 2009 in Brandenburg) wurde der gleiche methodische Weg durch den Auftraggeber vorgegeben. Ziel der Bearbeitung ist die flächendeckende Regionalisierung von Hochwasserscheitelabflüssen HQ der Wiederkehrintervalle $T = 2; 5; 10; 20; 25; 50; 100$ und 200 a für Mecklenburg-Vorpommern.

Folgende methodischen Fragestellungen sind damit verbunden, insbesondere im Vergleich mit dem bislang behördlich genutzten Ansatz von MIEGEL & HAUPT (1998) bzw. HAUPT (2000):

- Ist es im Vergleich zu den früheren analogen Datengrundlagen mit den heute verfügbaren Geodaten und den Analysemöglichkeiten Geographischer Informationssysteme möglich, geeignetere Geofaktoren abzuleiten und dadurch höhere Genauigkeiten zu erzielen?
- Wie kann die in den Staatlichen Ämtern für Landwirtschaft und Umwelt (StÄLU) vorhandene Expertise bestmöglich eingebracht und nutzbar gemacht werden?
- Führt die Vergrößerung der Grundgesamtheit (längere Pegelzeitreihen, mehr Pegel) zu einer Erhöhung der Modellgüte?



Abbildung 1

Vorgehensweise bei der Hochwasserregionalisierung für Mecklenburg-Vorpommern.
Approach for floodwater regionalization for Mecklenburg-West Pomerania.

- Können ggf. Verfahrensmodifikationen die Qualität der Regionalisierung steigern?
- Welche zeitliche Gültigkeitsdauer ist für die Regionalisierung anzusetzen, wann ist eine Neuberechnung erforderlich?
- Kann durch Bereitstellung einer geeigneten Anwendersoftware die praktische Handhabung des Verfahrens verbessert werden?

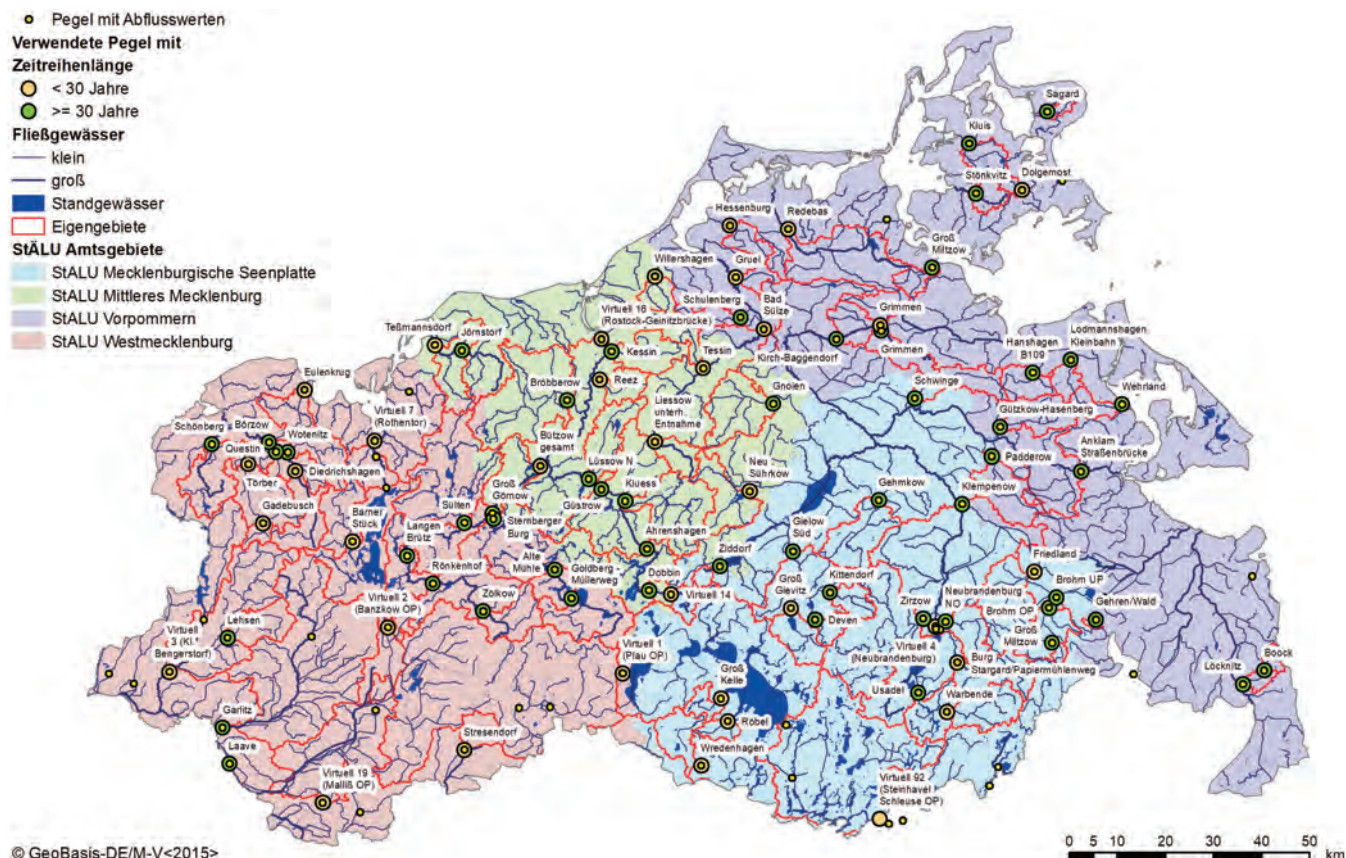
2 Datengrundlagen

2.1. Zusammenstellung der Daten

Der hydrologische Langzeitdatenspeicher Oberflächenwasser des Landes M-V (LOWO) verzeichnet 206 Pegel mit regelmäßiger, aktueller oder historischer Abflussermittlung. Alle Pegel wurden zunächst auf ihre prinzipielle gewässerkundliche Eignung für eine Hochwasserregionalisierung untersucht.

Einige Pegelbezugsgebiete liegen nicht vollständig in Mecklenburg-Vorpommern. Deshalb werden nur diejenigen Gebiete in den Datenpool für die Regionalisierung aufgenommen (Abb. 2), deren Flächenzugehörigkeit zu M-V mindestens 90 % beträgt und deren Hochwasserabflussmessungen (nach Auffassung der/des jeweils zuständigen Hydrologin/-en der StÄLU) als zuverlässig und im Sinne der räumlichen Homogenität das Hochwasserabflussgeschehen als repräsentativ für das Untersuchungsgebiet eingeschätzt werden können.

Das Merkblatt DWA-M 552 (DWA, 2012) empfiehlt für Hochwasserwahrscheinlichkeitsanalysen Zeitreihenlängen von mindestens 30 Jahren. Viele Pegel in M-V sind jedoch erst nach dem Jahr 1990 installiert worden. Um die Hochwasserregionalisierung auf eine möglichst breite Datenbasis zu stellen, werden etliche vergleichsweise kurze Zeitreihen im Datenpool belassen. Deshalb wird auch geprüft, welche Auswirkungen die Verwendung der verhältnismäßig kurzen Zeitreihen auf die Modellgüte hat (siehe Kap 4.2). Letztendlich bilden 88 Pegel, die eine Mindestzeitreihenlänge von 15 Jahren aufweisen, die Datengrundlage für die Regionalisierung (Abb. 2).


Abbildung 2

Für den Modelllaufbau der Hochwasserregionalisierung in Mecklenburg-Vorpommern verwendete Abflusspegel.
Runoff gauges used for modeling the flood flow regionalizing for Mecklenburg-West Pomerania.

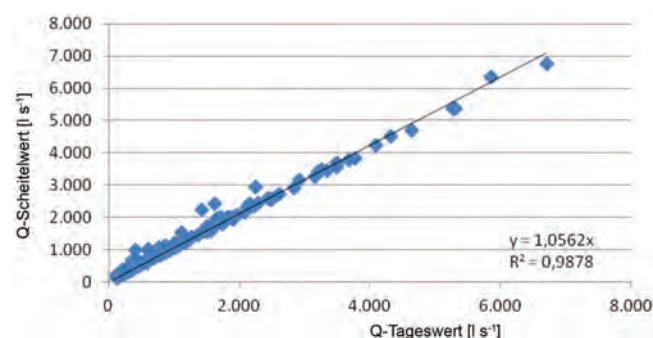
Zu den Fragen der Datenaufbereitung gehört, ob bei kürzeren Reihen eine Verlängerung erfolgt und wie mit Datenlücken innerhalb der gegebenen Reihen umgegangen werden sollte. Entsprechende Ergänzungen sind bei ausreichender hydrologischer Ähnlichkeit der betreffenden Einzugsgebiete prinzipiell durch Regression mit einem benachbarten Pegel möglich. Um jedoch die Datenreihe eines Zielpegels nicht mit Informationen des Nachbarpegels zu überfrachten, sollten die Ergänzungen ein bestimmtes Maß nicht überschreiten. Aus diesem Grund wird von einer Verlängerung von Zeitreihen abgesehen. Die Schließung von Lücken und das Ersetzen von Fehlwerten sind jedoch unverzichtbar, um mit durchgehenden Zeitreihen arbeiten zu können. Dies erfolgt auf der Grundlage der monatlichen Maximalabflusswerte (Monats-HQ).

Für viele Messjahre und Abflusspegel (Q-Pegel) sind im Grundlegendatensatz neben den Abflusstageswerten monatliche Scheitelabflüsse verzeichnet. Oft liegen aber für einige Zeiträume oder auch für den gesamten Messzeitraum ausschließlich Q-Tagesmittelwerte oder Q-Terminwerte Q_t vor. Um eine einheitliche Zeitreihe der HQ-Jahresscheitelwerte generieren zu können, wird bei Pegeln mit fehlenden Scheitelwerten durch Regressionsanalyse eine lineare Übertragungsfunktion ($Q_s = a \cdot Q_{tmax}$) zwischen dem immer angegebenen höchsten Q-Tageswert (Q_{tmax}) und dem Q-Scheitelwert (Q_s) ermittelt (Abb. 3). Die Grundlage bilden folglich neben den monatlichen Scheitel- die zugehörigen maximalen Tageswerte Q_{tmax} . Stehen dafür beim jeweiligen Pegel nicht mindestens 12 Datenpaare (Q_s ; Q_{tmax}) zur Verfügung, dann wird

auch hier auf der Grundlage der oben angesprochenen linearen Übertragungsfunktion auf einen Bezugspegel mit ähnlichen Gebieteigenschaften (siehe oben) zurückgegriffen.

2.2. Datenprüfung

Alle Datenkollektive der Jahresgrößtwerte HQ (a) sind auf Unabhängigkeit zu prüfen. Es ist also zu untersuchen, ob die HQ (a) benachbarter Jahre gemeinsame Entstehungsursachen haben. Dies ist v. a. dann zu erwarten, wenn zwei Scheitelwerte in zeitlich dichter Folge kurz vor und kurz nach dem Jahreswechsel auftreten.


Abbildung 3

Q-Scheitelwert-Tagesmittelwert-Beziehung des Pegels Gehmkow (Augraben, Einzugsgebietgröße 133 km²).
Runoff peak value - daily mean value correlation at the Gehmkow runoff gauge (Augraben, drainage area 133 km²).

Außergewöhnlich große Scheitelabflüsse sind möglicherweise als Ausreißer zu bewerten. Statistisch betrachtet handelt es sich dabei um extrem seltene Ereignisse, denen als Element der Stichprobe ein deutlich zu kleines Wiederkehrintervall zugewiesen wird. Gelingt es nicht, sie als historisches Hochwasser korrekt einzuordnen, dann sind sie aus dem Datenkollektiv zu entfernen, was aber immer einen Informationsverlust bedeutet (MIEGEL & BÜTTNER, 2003). Kausal betrachtet kann es sich um Ereignisse handeln, die aufgrund besonderer Hochwasserentstehungsbedingungen Teil einer anderen Grundgesamtheit sind, was zwingend zu ihrer Aussonderung führt. Beide Fälle sind jedoch oft nicht zu unterscheiden. Die statistische Prüfung solcher Extremwerte erfolgte entsprechend DVWK (1999) nach MÜLLER et al. (1985). Im Fall der Bestätigung als Ausreißer wird der jeweilige Extremwert durch den zweithöchsten, unabhängigen Hochwasserwert des betreffenden hydrologischen Jahres ersetzt.

Der Prüfung auf Ausreißer schließt sich die Prüfung auf Homogenität, d. h. auf zeitliche Veränderungen innerhalb der Zeitreihen der HQ (a) an, die durch lineare Trendanalyse erfolgt. So soll vermieden werden, dass signifikante Trends (z. B. durch Nutzungsänderungen im Einzugsgebiet, Retentionsveränderungen) oder sprunghafte Veränderungen (z. B. durch Veränderung des Abflussverlaufes oder den Bau von Speicherbecken) zur Verfälschung der Ergebnisse führen. Einzelne Pegelzeitreihen mussten im Ergebnis der Analyse gekürzt oder einer Trendbereinigung unterzogen werden.

Die Erfahrung bei der Durchführung ähnlicher Regionalisierungsverfahren zeigt, dass eine abschließende Expertenprüfung für die Modellgüte von enormer Wichtigkeit ist. Aus diesem Grund wurden alle Arbeitsschritte der Datenaufbereitung mit Hilfe der Staatlichen Ämter für Landwirtschaft und Umwelt (StÄLU) geprüft und Korrekturen bei ca. 40 % der Pegel im Hinblick auf folgende Aspekte vorgenommen:

- Plausibilität gemessener Hochwasserscheitelwerte
- Übereinstimmung gemessener W- und Q-Scheitelwerte einzelner Pegel
- Qualität der Scheitelwert-Tageswert-Beziehung
- Lückenschluss bei unterbrochenen Zeitreihen
- vorgenommene Trendbereinigung
- Auswahl der für die Modellkalibrierung geeigneten Pegel

3 Methodisches Vorgehen bei der Regionalisierung

3.1. Identifikation einer passenden Extremwertverteilung und Berechnung der Pegel-HQ(T)

Die Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten erfolgt mit der Software HQ-EX 3.0 (DHI-WASY, 2007) und auf Basis von Zeitreihen der Abflussmaxima HQ (a) hydrologischer Jahre. Mit dem Programm lassen sich sieben verschiedene analytische Verteilungsfunktionen VF, die bei DVWK (1999) aufgeführt sind, an die empirischen Eintragungswahrscheinlichkeiten der HQ (a) anpassen. Für die Parameterschätzung stehen drei Verfahren zur Verfügung. Dabei wird die Güte durch drei Anpassungsmaße (Kolmogorov, $n\omega^2$ -Anpassungsmaß, Quantil-Korrelation) quantifiziert. Unter den Kombinationen VF/Parameterschätzverfahren werden automatisch die drei mit den „besten“ Anpassungen ausgewiesen. Auswahlkriterium ist die Summe der drei Anpassungsmaße. Bei der finalen Entscheidung wird eine visuelle Bewertung

der Anpassung mit dem Fokus auf seltene Hochwasserereignisse vorgenommen.

Zu den Grundvoraussetzungen der Regionalisierung von Hochwasserkennwerten gehört, dass das Untersuchungsgebiet homogen ist, was die maßgeblichen Hochwasserentstehungsbedingungen anbetrifft. Hier werden frühere Aussagen von MIEGEL & HAUPT (1998) bestätigt, wonach diesbezüglich in M-V von Homogenität ausgegangen werden kann.

3.2. Ermittlung relevanter Gebietskenngrößen

Der grundsätzliche Aufbau eines nichtlinearen multiplen Regressionsmodells ist in Gleichung 1 wiedergegeben (nähere Erläuterungen zum Modellaufbau siehe auch HOFFMANN & RÖDEL, 2004):

Gleichung 1

$$\begin{aligned} f_z(HQ_2(EZG)) &= a_0 + a_1 * f_{1a}(G_{1a}(EZG)) + \dots + a_n * f_{na}(G_{na}(EZG)) \\ f_z(HQ_5(EZG)) &= b_0 + b_1 * f_{1b}(G_{1b}(EZG)) + \dots + b_n * f_{nb}(G_{nb}(EZG)) \\ &\dots \\ f_z(HQ_{200}(EZG)) &= h_0 + h_1 * f_{1h}(G_{1h}(EZG)) + \dots + h_n * f_{nh}(G_{nh}(EZG)) \end{aligned}$$

$HQ_t(EZG)$ = Hochwasserabfluss des Beobachtungszeitraumes im unbeobachteten Einzugsgebiet (Wiederkehrintervall t)

$a_x, b_x, \dots, h_x$ = Modellparameter für einen Bilanzzeitraum

$f_{xy}(z)$ = nichtlineare Variablentransformation

$G_{xy}(EZG)$ = Geofaktor eines Gesamteinzugsgebietes als erklärende Modellvariable

RASMUS (1989) und HAUPT (2000) haben bei ihren Regionalisierungsansätzen in Mecklenburg-Vorpommern hochwasserbeeinflussende Gebietsparameter (Geofaktoren) für das Untersuchungsgebiet mit weitestgehend analogen Methoden bestimmt. Durch moderne Verfahren der Datengewinnung wie die Fernerkundung und Plattformen der Geoinformatik stehen Geodaten inzwischen elektronisch in wesentlich größerem Umfang und meist mit höherer räumlicher Auflösung zur Verfügung. Die Möglichkeiten, Geofaktoren für die Regionalisierung zu generieren, haben damit deutlich zugenommen. Insofern ist es folgerichtig, die bisher verwendeten Faktoren noch einmal auf den Prüfstand zu stellen und weitere Faktoren, die sachlich begründet potenziell geeignet sind, einzubeziehen. Dafür werden für alle Pegel-einzugsgebiete 52 Gebietseigenschaften neu bestimmt und zu pegelbezogenen Sets zusammengefasst (Tab. 1, Abb. 4). Grundlage dafür sind die bereits genannten Voruntersuchungen in M-V (RASMUS, 1989; HAUPT, 2000; BIOTA, 2012), aber auch Erfahrungen von DHI-WASY (2009) und IAWG (2008).

Die Anzahl der Geofaktoren muss zur Anzahl der verwendeten Pegel in einem angemessenen Verhältnis stehen (DWA, 2012). Außerdem nimmt mit der Zahl der Parameter die Gefahr von Multikollinearitäten zwischen den Parametern zu. Aus diesem Grund werden die nichtlinearen multiplen Regressionsmodelle zur Übertragung der HQ (T)-Werte auf unbeobachtete Gebiete und innere Teilgebiete beobachteter Pegel-einzugsgebiete in diesem Vorhaben mittels schrittweiser Regression nach dem Prinzip

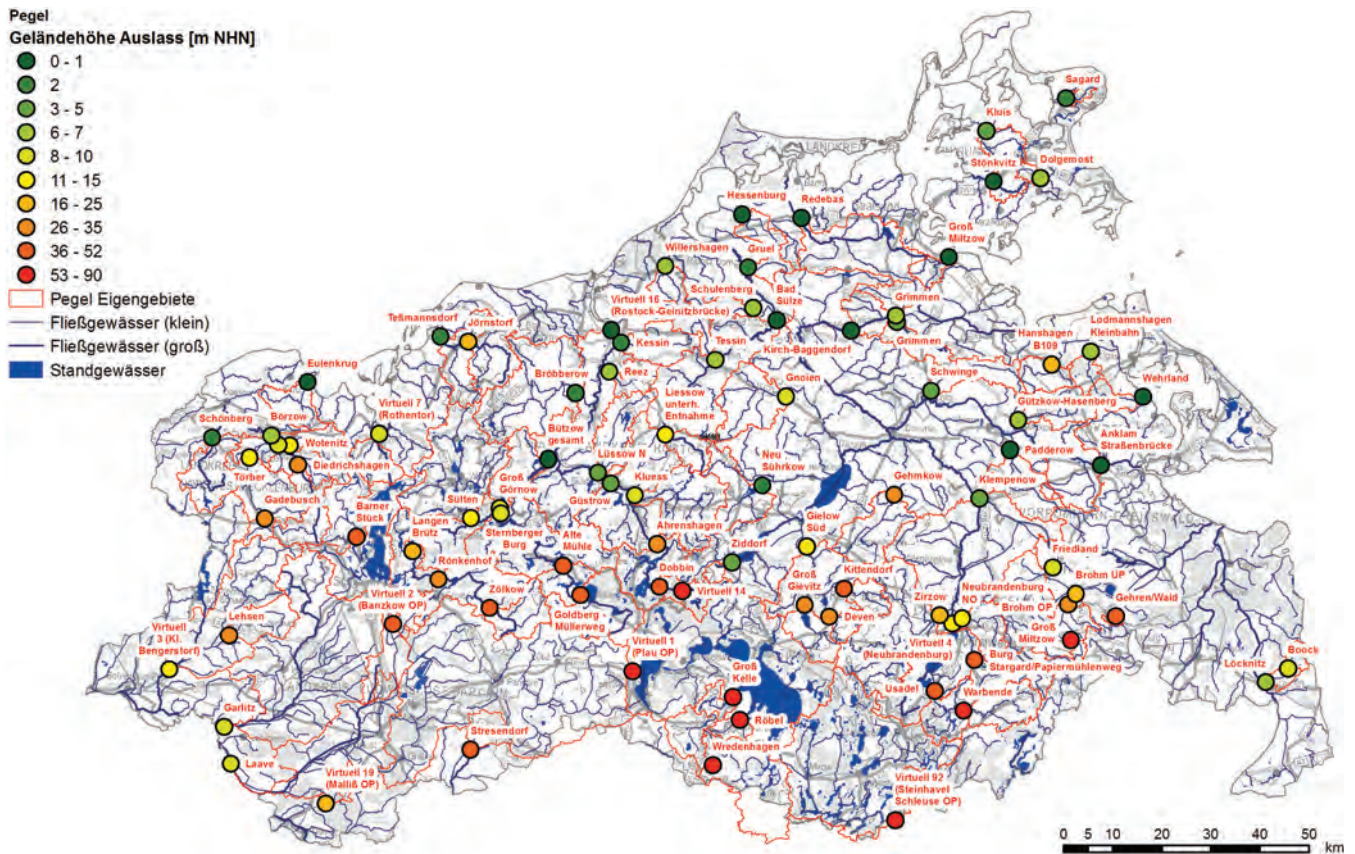
Tabelle 1

Nichtlineare Variablentransformationen der Gebietskennzahlen und Zielgrößen (Parameter G2 bis G47 neu mittels GIS berechnet).
Nonlinear variable transformations of the area characteristics and target values (the parameters G2 through G47 were newly calculated via GIS).

Nr.	Neu	Gebietskennzeichengröße/Zielgröße (Kurzbezeichnung)	Einheit	Schiefe der Verteilung	Transformation f(x)	ADAT ²
G1		Flächengröße (Flaeche_k)	km ²	5,67	Ln (x)	ja
G2	x	Umfang (Umfang_k)	km	3,51	Ln (x)	
G3	x	Formfaktor (Formfaktor_k)	-	3,30	Ln (x)	
G4	x	Rechtswert (Rechtsw_k)	m	-0,12		
G5	x	Hochwert (Hochw_k)	m	0,54		
G6	x	Küstenabstand (Küstenentf_k)	km	0,23		
G7	x	Mittlere Höhe (Elev_MW_k)	m (NHN)	0,51		
G8	x	Minimale Höhe (Elev_Min_k)	m (NHN)	1,10		
G9	x	Höhe Gebietsauslass (Elev_Auslass)	m (NHN)	0,97		nein
G10	x	Standardabweichung Höhe (Elev_Std_k)	m	0,96		
G11	x	Mittleres Gefälle (M_Gefaele_k)	%	1,08		
G12	x	Standardabweichung Gefälle (S_Gefaele_k)	-	0,69		
G13	x	Mittlerer topographischer Index (M_Top_Index_k)	-	-1,03	x ³	
G14	x	Gefälle des Hauptgewässers (GefaeleHG_k)	%	3,73	$\sqrt[3]{x}$	
G15	x	Ackeranteil (Acker_Ant_k)	%	-0,73		
G16	x	Grünlandanteil (Gruen_Ant_k)	%	0,42		
G17	x	Waldanteil (Wald_Ant_k)	%	0,83		
G18	x	Siedlungsanteil (Sied_Ant_k)	%	7,15	Ln (x)	
G19	x	Gewässeranteil (Gew_k)	%	2,17	$\sqrt[3]{x}$	
G20	x	Moorflächenanteil (Moor_k)	%	0,43		
G21	x	Flächenanteil Bodentyp A (Boden_A_Ant_k)	%	1,37		
G22	x	Flächenanteil Bodentyp B (Boden_B_Ant_k)	%	2,31	Ln (x)	
G23	x	Flächenanteil Bodentyp C (Boden_C_Ant_k)	%	-0,84		
G24	x	Flächenanteil Bodentyp D (Boden_D_Ant_k)	%	0,53		
G25	x	CN-Wert (CN_k)		-1,34	x ³	
G26	x	Flächenanteil Bodentyp A + Bodentyp B (Boden_AB_Ant_k)	%	1,03	Ln (x)	
G27	x	Anteil durchlässiger Böden (Durchl_Boden_Ant_k)	%	0,79		
G28	x	Wurzeltiefe (Wurzelt_k)	mm	0,71		
G29	x	Feldkapazität (FKapazitaet_k)	mm	-2,55	x ³	
G30	x	Nutzbare Feldkapazität (N_FKap_k)	mm	0,43		nein
G31	x	Anteil Gewässerfläche (See_Ant_k)	%	2,92	$\sqrt[3]{x}$	
G32	x	FARL ¹ -Index (Farl_Index_k)	-	-1,53	x ³	
G33	x	Gewässerdichte (Gewaesserdichte_k)	km km ⁻²	1,32		
G34	x	Rohrleitungsdichte (Rohrdichte_k)	km km ⁻²	6,34	Ln (x)	
G35	x	Durchlassdichte (Durchl_k)	DL km ⁻²	1,75	$\sqrt[3]{x}$	
G36	x	Grundwasserflurabstand (GWFLA_k)	m	1,48		
G37	x	Größe Grundwassereinzugsgebiet (GWEZG_k)	km ²	-0,03		
G38	x	Grundwasserkoeffizient (GW_Koeff_k)	-	-0,75		
G39	x	FARLMoor-Index (FarlMoor_k)	-	0,74		
G40	x	Mittlerer Abfluss (MQ_k)	m ³ s ⁻¹	3,75	Ln (x)	
G41	x	August-90-Abfluss (Aug_90_k)	m ³ s ⁻¹	5,16	Ln (x)	
G42	x	Kriging Niedrigwasserabflusspende (MNQ_Krig)	l s ⁻¹ km ⁻²	0,29		
G43	x	Dränflächen (Draen_k)	%	-0,04		
G44	x	Schöpfwerksflächen (Schoepf_k)	km ²	2,58	$\sqrt[3]{x}$	
G45	x	Mittlerer Jahresniederschlag 1981 bis 2010 (M_J_Nied_k)	mm	-0,43		nein
G46	x	Maximaljahresniederschlag T = 1; D 24 h (Max_Nied1_k)	mm	-0,06		
G47	x	Maximaljahresniederschlag T = 100; D 24 h (Max_Nied100_k)	mm	0,15		
G48		Gefällefaktor nach MIEGEL & HAUPT (MH_Gefälle)	‰	3,23	Ln (x)	
G49		Gebietsform nach MIEGEL & HAUPT (MH_GF)	-	-1,46	x ²	nein
G50		Anteil der durchlässigen Bodenarten im EZG nach MIEGEL & HAUPT (MH_Boden)	-	-0,83	e ^x	
G51		Seeretention nach MIEGEL & HAUPT (MH_Seen)	-	2,99	Ln (x)	nein
G52		mittlerer Gebietsniederschlag nach MIEGEL & HAUPT (MH_Nied)	mm	0,20	Ln (x)	
Z1		HQ(2)	m ³ s ⁻¹	5,47	Ln (x)	ja
Z2		HQ(5)	m ³ s ⁻¹	5,40	Ln (x)	
Z3		HQ(10)	m ³ s ⁻¹	5,38	Ln (x)	
Z4		HQ(20)	m ³ s ⁻¹	5,37	Ln (x)	
Z5		HQ(25)	m ³ s ⁻¹	5,37	Ln (x)	
Z6		HQ(50)	m ³ s ⁻¹	5,36	Ln (x)	
Z7		HQ(100)	m ³ s ⁻¹	5,35	Ln (x)	
Z8		HQ(200)	m ³ s ⁻¹	5,33	Ln (x)	ja

¹ FARL = Flood Attenuation by Reservoirs and Lakes (MIOTTO et al., 2007)

² normalverteilt nach Anderson-Darling-Test (1952)

**Abbildung 4**

Gebietskenngröße G9 (Höhe Gebietsauslass) bezogen auf das Gesamteinzugsgebiet der Pegel.

Area characteristic G9 (altitude catchment outlet) relative to the entire catchment area of the runoff gauges.

der „begleiteten“ Vorwärtsselektion entwickelt. Der Vorteil dieses Vorgehens besteht darin, dass nicht nur irrelevante Parameter eliminiert, sondern auch Multikollinearitäten bzw. Korrelationen zwischen den Geofaktoren automatisch berücksichtigt werden. Dieses Vorgehen führte dazu, dass sich gemessen an Tabelle 1 die Anzahl der berücksichtigten Parameter erheblich verringert (siehe Kap. 4.1).

Bei der Vorwärtsselektion wird zunächst von dem Geofaktor ausgegangen, der mit der Zielgröße am stärksten korreliert bzw. durch den die Zielgröße am besten erklärt werden kann. Anschließend wird schrittweise aus dem Set der Parameter ein weiterer Geofaktor hinzugenommen, und zwar jeweils der, durch den sich die erklärte Varianz am stärksten erhöht bzw. die unerklärte Restvarianz am stärksten abnimmt. In jedem Schritt „wächst“ also das Regressionsmodell um eine erklärende Variable. Auf der Grundlage statistischer Prüfkriterien werden solange weitere Geofaktoren in das Modell integriert, solange die unerklärte Restvarianz signifikant abnimmt. Als Prüfkriterien dienen hier das Bayesianische Informationskriterium (BIC) bzw. das Akaike Informationskriterium (AIC) (BURNHAM et al., 2004).

Das Wort „begleitet“ bedeutet hierbei, dass auf die fachliche Vorprüfung besonderer Wert gelegt wird, was die Auswahl von Parametern anbetrifft. So wird über die Auswahl aufgrund von Parameterkorrelationen nicht rein formal entschieden, sondern bereits im Vorfeld aufgrund von eindeutigen Kausalitäten. Dies kann auch dazu führen, dass ein Geofaktor im Set verbleibt, der zwar unter zwei Parametern der kausal ursächliche ist, sich aber

rein formal betrachtet nicht als erklärender Parameter durchgesetzt hätte. Ziel ist, für alle Jährlichkeiten ein einheitliches Set aus Gebietskenngrößen zu generieren, um am Ende eine vorgegebene, einfache Anwendung des Modells zu ermöglichen.

Ein für alle Gebietskenngrößen durchgeführter Anderson-Darling-Anpassungstest auf Normalverteilung zeigt, dass für fast alle Ausgangsparameter (außer für die Flächengröße) trotz Transformation keine gesicherte Normalverteilung, sondern nur eine Annäherung erreicht werden kann. Dies führt i. d. R. zur Erhöhung des Modellfehlers, muss aber mangels geeigneter Transformationsfähigkeit der Ausgangsparameter hingenommen werden.

3.3. Festlegung der Gültigkeitsgrenzen des Modells

Die Wertebereiche der erklärenden Eingangsgrößen sind nicht allein ausschlaggebend für die Festlegung des Modellgültigkeitsbereiches. Entscheidend ist vielmehr das Verhalten des Modells an den Grenzen und außerhalb der Wertebereiche, so wie sie sich aus den Geofaktoren der berücksichtigten Pegel-einzugsgebiete ergeben. Daher wird für das nichtlineare, multiple Regressionsmodell eine Sensitivitätsanalyse der erklärenden Parameter durchgeführt. Ermittelt wird das Verhalten (die Funktion) der Hochwasserscheitelabflussspende (H_q) bezüglich einer einzelnen veränderlichen Gebietskenngröße bei gleichzeitiger Konstanz der anderen Gebietskenngrößen mit:

- Median (Szenario $H_q(T)$ med),
- H_q -maximalen (Szenario $H_q(T)$ max) und
- H_q -minimalen (Szenario $H_q(T)$ min) Extremwerten

der beobachteten Einzugsgebiete (siehe Beispiel Hq (T = 200 a) bei variabler Einzugsgebietsgröße in Abb. 5). Verglichen werden diese Bereiche schließlich mit den realen Hochwasserscheitelabflussspenden der Pegel, um auf dieser Grundlage parameterbezogene Gültigkeitsbereiche zu definieren.

Bei der Überprüfung der Gültigkeitsbereiche der Parameter im Einzelnen kann festgestellt werden, dass die modellierten Hq-Werte bei Einzugsgebieten mit geringer Flächengröße vor allem bei seltenen Hochwasserereignissen und generell bei abnehmender nutzbarer Feldkapazität sehr schnell ansteigen. Eine Extrapolation weit außerhalb der durch Pegel beobachteten Modellbereiche ist aufgrund fehlender Messungen unsicher und deshalb nicht zu empfehlen. Als Gültigkeitsbereich des Modells werden daher alle Teileinzugsgebiete in Mecklenburg-Vorpommern mit:

- Größe des betrachteten Einzugsgebiets $> 5 \text{ km}^2$
 - mittlere nutzbare Feldkapazität im betrachteten Einzugsgebiet $> 100 \text{ mm}$
- festgelegt.

4 Ergebnisse

4.1. Identifikation maßgeblicher Geofaktoren

Als Ergebnis des Auswahlverfahrens gemäß Vorwärtsselektion werden die (teilweise transformierten) Gebietskenngrößen:

1. Fläche $[\text{km}^2]$ (Transformation: $\ln$)
2. Seeretention nach MIEGEL & HAUPT [-] (Transformation: $\ln$)
3. mittlerer Jahresniederschlag 1981 bis 2010 $[\text{mm}]$ (keine Transformation)
4. nutzbare Feldkapazität $[\text{mm m}^{-1}]$ (keine Transformation)
5. Gebietsform nach MIEGEL & HAUPT (Transformation: $()^2$)
6. Geländehöhe Auslass $[\text{m NHN}]$ (keine Transformation)

als die geeigneten Parameter zur Beschreibung der Hochwasserscheitelabflüsse (Hq(T)) erklärt. Die hier aufgeführte Reihenfolge entspricht dabei der Identifikationsreihenfolge während der Vorwärtsselektion und ist Ausdruck der abnehmenden Erklärungsstärke der einzelnen Geofaktoren.

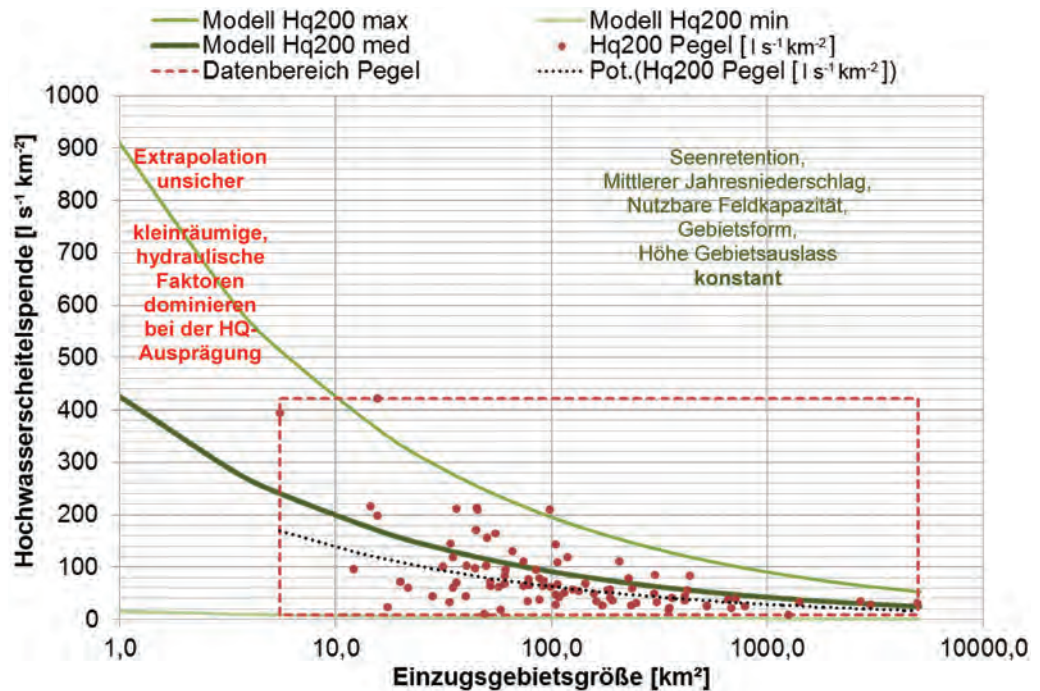


Abbildung 5

Abflussspenden im Modellwertebereich in Abhängigkeit der veränderlichen Gebietskenngröße „Einzugsgebietsgröße“ (grün) und HQ (T) der Pegelzeitreihen (rot) mit Trendlinie (gepunktet) für HQ (T = 200 a).

Run-off rate in the model value range as a function of the variable area characteristic "Basin area value" (green) and HQ (T) of the gauge time series (red) with trend line (dotted) for HQ (T = 200 a).

Mit der mittleren nutzbaren Feldkapazität und der Höhe des Gebietsauslasses werden zwei neue Parameter in das Set aufgenommen. Die vier restlichen Parameter entsprechen der Auswahl nach RASMUS (1989).

Die Reihenfolge zeigt, dass wie bei allen anderen Regionalisierungsansätzen, die den Autoren bekannt sind, die Gebietsgröße an erster Stelle steht. Dies gilt unabhängig davon, ob der Scheitelabfluss oder die zugehörige Spende die Zielgröße ist. An zweiter Stelle steht als regionale Besonderheit des Nordostdeutschen Tieflands der Parameter der Seeretention. Dies lässt sich mit dem hohen Flächenanteil an Seen in Mecklenburg-Vorpommern erklären. Kausal ist auch dieser Parameter unstrittig, weil die Seeretention zur Abflachung von Hochwasserwellen führt und damit der Anteil an Seeflächen differenzierend wirkt. Der von den Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) auf die Einzugsgebietsfläche übertragene mittlere Jahresniederschlag im Zeitraum 1981 bis 2010 folgt auf Platz drei. Dies ist nur auf den ersten Blick überraschend. Unsere Erfahrungen zeigen (MIEGEL et al., 2014; MEHL et al., 2014), dass sich extreme Niederschlagsereignisse, die zu außergewöhnlich großen Hochwasser führen, auch durch signifikant erhöhte Jahresniederschläge bemerkbar machen, d. h. quasi bis auf die jährliche Niederschlagshöhe durchschlagen. Nicht zuletzt hängt die Vorfeuchte vom Niederschlagsgeschehen ab und somit auch die Abflussbereitschaft der Einzugsgebiete.

Die nutzbare Feldkapazität bestimmt als Speicherparameter das Retentionsvermögen von Böden. Sie steht mit der hydraulischen Leitfähigkeit im Zusammenhang. Ihr geringer Rang kann damit erklärt werden, dass der Anteil des Gebietsrückhalts durch Infiltration mit der Niederschlagshöhe zurückgeht und bei besonders

Tabelle 2

Koeffizienten der multiplen Regressionsmodelle für die HQ(T).
Coefficients of the multiple regression models for the HQ (T).

Zielgröße	Koeffizienten						
	Schnittpunkt	Ln Fläche [km ²]	Ln Seeretention [-]	Mittlerer Jahresniederschlag [mm]	Nutzbare Feldkapazität [mm m ⁻¹]	Gebietsform ² [-]	Höhe Gebietsauslass [m NHN]
Ln HQ(2)	3,12107715	0,80753530	-0,31736199	0,00345426	-0,00774730	0,83118557	-0,00640226
Ln HQ(5)	4,59973466	0,75823147	-0,32986348	0,00246340	-0,00929864	0,76191475	-0,00757437
Ln HQ(10)	5,57791899	0,72420753	-0,33557775	0,00179044	-0,01033762	0,70247524	-0,00822051
Ln HQ(20)	6,59467400	0,68913590	-0,34197508	0,00106970	-0,01142208	0,63915108	-0,00885754
Ln HQ(25)	6,87367661	0,67975567	-0,34420575	0,00086403	-0,01170353	0,62510801	-0,00905409
Ln HQ(50)	7,66873734	0,65375438	-0,35177889	0,00026676	-0,01251756	0,59173409	-0,00963398
Ln HQ(100)	8,36995493	0,63130926	-0,35948164	-0,00027730	-0,01320527	0,56597734	-0,01018961
Ln HQ(200)	9,01145663	0,61172497	-0,36634977	-0,00079447	-0,01381037	0,54431945	-0,01073005

extremen Niederschlägen, bei den in kleineren Einzugsgebieten der Mittelgebirge Abflussbeiwerte von 70 % bis 90 % erreicht werden, spürbar an Bedeutung verliert. Dies dürfte auch die Ursache dafür sein, dass die Landnutzung nur marginal zu räumlichen Unterschieden der Abflussbildung beiträgt, abgesehen von ihrer geringen naturräumlichen Differenzierung.

Von der Gebietsform hängt die Abflusskonzentration und damit die Wellenform ab. Das der entsprechende Parameter auf Platz fünf liegt, deutet darauf hin, dass sich die untersuchten Gebiete in dieser Hinsicht signifikant unterscheiden. Schließlich ist noch auf die Geländehöhe am Gebietsauslass zu verweisen. Dies ist hypothetisch damit zu erklären, dass mit abnehmender Höhe der Anteil von Niederungsgebieten mit geringer Dynamik der Abflussbildung und hoher Retentionswirkung zunimmt, aber im Mittel auch das Gefälle des Fließgewässers kleiner wird. Dieser Parameter könnte auch in anderen Regionen von Interesse sein.

Interessant ist, dass Parameter der Landnutzung als erklärende Variablen für die untersuchten Jährlichkeiten keine ausschlaggebende Rolle spielen. Diese Tatsache wird bereits bei RASMUS (1989) festgestellt und erneut bestätigt. Sie zeigt auf, dass die Abflussbildungs- und -konzentrationsprozesse im Hochwasserfall durch Bewuchs und nutzungsbedingte Oberflächenbeschaffenheit nicht maßgeblich beeinflusst werden.

Abgesehen von diesen qualitativen Überlegungen zur hydrologischen Plausibilität der gefundenen Abhängigkeiten sind schärfere Aussagen nur auf der Grundlage aufwändiger Niederschlag-Abfluss-Simulationen möglich.

4.2. Kalibrierung der Regressionsmodelle und Modellfehler

Die Modellkalibrierung wurde zunächst mit den Datensätzen aller Pegel durchgeführt. Bei der Bewertung der Modellgüte zeigten drei Pegel hohe relative Abweichungen zwischen den HQ (T) nach Pegelstatistik und Modellanwendung (über alle T im Mittel 80 %). In Rücksprache mit den zuständigen Hydrologen der Landesumweltverwaltung kann dies mit unsicheren Messungen im Hochwasserbereich und anthropogenen Einflüssen erklärt werden. Diese Pegel werden aus der Modellgrundlage eliminiert und anschließend eine Neukalibrierung durchgeführt (Tab. 2).

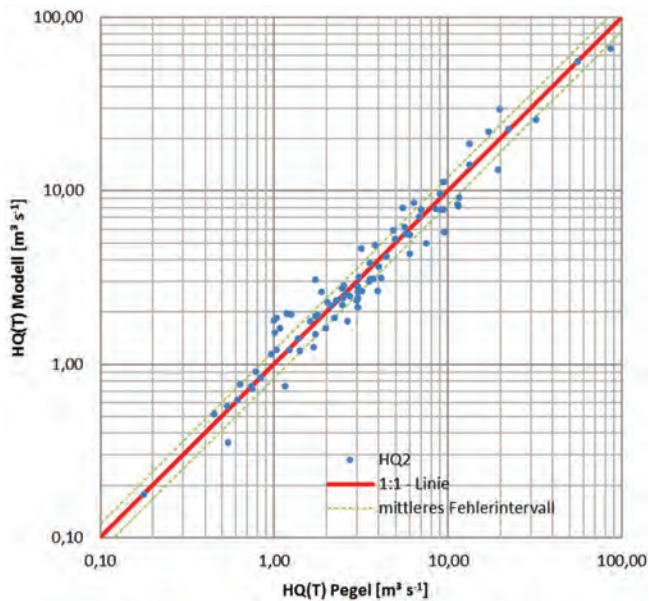
Hinsichtlich des Gesamtmodells ist die Modellanpassung der transformierten Zielgrößen in der Regel wesentlich besser als für die untransformierten Größen (Tab. 3), da sich durch die Rücktransformation die Modellabweichungen überproportional auswirken. Die mittlere relative Fehlerabweichung liegt zwischen 20 % und 27 %. Für die Wiederkehrintervalle $T = 2$ a und $T = 100$ a sind in Abbildung 6 und 7 die modellierten HQ (T) den HQ (T) gemäß Pegelstatistik im x-y-Plot gegenübergestellt.

Die Erfahrungen verschiedener Untersuchungen belegen, dass mittlere Abweichungen zwischen den HQ (T) von Pegelstatistik und Regionalisierungsansatz im Bereich von 20 % bis 30 % liegen (z. B. PARAJKA et al., 2005; DHI-WASY, 2009; WALTHER et al., 2012). Dies deutet einerseits darauf hin, dass die Varianz der HQ (T) natürlich nicht vollständig durch die berücksichtigten Einflussgrößen (Geofaktoren) erklärt werden kann. Die Abweichungen allein dem Regionalisierungsansatz anzulasten wäre jedoch zu einseitig, denn auch die Pegelstatistik ist mit Modellfehlern behaftet, wobei der Stichproben- und der Abflussmess-

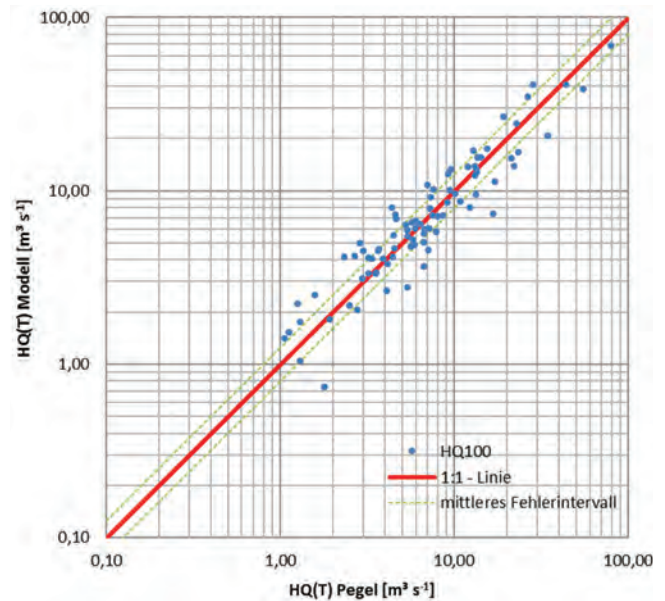
Tabelle 3

Parameter der Modellgüte.
Model accuracy parameters.

Zielgröße HQ(T)		HQ(2)	HQ(5)	HQ(10)	HQ(20)	HQ(25)	HQ(50)	HQ(100)	HQ(200)
Transformierte Zielgrößen Ln HQ(T)									
adjustiertes Bestimmtheitsmaß R^2		0,94	0,94	0,93	0,92	0,92	0,90	0,88	0,86
relativer absoluter Fehler F		2,46 %	2,41 %	2,47 %	2,57 %	2,60 %	2,68 %	2,85 %	3,03 %
Untransformierte Zielgrößen HQ(T)									
relativer absoluter Fehler F		20 %	20 %	21 %	22 %	22 %	23 %	25 %	27 %


Abbildung 6

Beziehung zwischen modellierten und an Pegeln bestimmten Scheitelabflüssen HQ (T = 2 a) (adjustiertes Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,94$).
Relationship between modeled and gauge based peak flows HQ (T = 2 a)
(adjusted coefficient of determination $R^2 = 0.94$).


Abbildung 7

Beziehung zwischen modellierten und gemessenen mittleren Gebietsabflüssen HQ (T = 100 a) (adjustiertes Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,88$).
Relationship between modeled and gauge based peak flows HQ (T = 100 a)
(adjusted coefficient of determination $R^2 = 0.88$).

fehler hervorzuheben sind. Daneben entspricht eine gewählte Verteilungsfunktion nie ideal dem statistischen Verhalten der Grundgesamtheit, insbesondere im Bereich seltener Hochwasser mit ihren oft besonderen Entstehungsbedingungen. Dies kommt letzten Endes in der Streuung der Plotting Positions um die gefundene Verteilungsfunktion zum Ausdruck. Insofern bedeutet die Regionalisierung der HQ (T) auch eine gewisse Glättung der mit der Pegelstatistik verbundenen Modellfehler.

4.3. Nachträgliches Anpassungsverfahren mittels originaler Pegel-HQ(T)-Werte

Ungeachtet der festgestellten Modellabweichungen ist es zielführend, in einem zweiten Arbeitsschritt die Differenzen zwischen den aus dem Regressionsmodell gewonnenen und den an den Pegeln berechneten Hochwasserscheitelabflüssen (Modellresiduen) auszugleichen.

Dazu dient ein zusätzliches in Tabelle 4 beschriebenes Anpassungsverfahren, das konsistente Abflüsse für systembenachbarte Einzugsgebiete und u. a. plausibles Längsschnittverhalten sicherstellt.

Das Anpassungsverfahren führt zum Ergebnis, dass

- die so korrigierten HQ(T)-Scheitelwerte mit den HQT(T) der Pegel übereinstimmen,
- die Modifikationen systematisch für die Teilgebiete innerhalb eines Pegelgebiets am größten sind, welche die größten Scheiteldurchflüsse aufweisen und
- keine unplausiblen Unstetigkeiten im Fließverlauf der Gewässer sowohl in beobachteten als auch in unbeobachteten Bereichen auftreten.

4.4. Bewertung der ermittelten Werte HQ (T)

Auf Grundlage des hier beschriebenen Regionalisierungsansatzes können für die meisten Fließgewässerabschnitte in M-V in

den festgelegten Modellgültigkeitsgrenzen (Einzugsgebietsgröße $\geq 5 \text{ km}^2$ und mittlerer nutzbarer Feldkapazität im EZG $> 100 \text{ mm m}^{-1}$) regionalisierte Hochwasserscheitelwerte der statistischen Wiederkehrdauern T = 2; 5; 10; 20; 25; 50; 100 und 200 a berechnet werden. In Gebieten, in denen aufgrund von Pegelbeobachtungen belastbare Datengrundlagen vorliegen, kann gewählt werden zwischen

- einem rein regressionsbasierten rHQ(T)-Wert und
- einem zusätzlich pegelangepassten pHQ(T)-Wert.

In einigen Gebieten ohne ausreichend übertragbaren Pegeldaten liegen demnach nur rHQ(T)-Werte vor. Im Anwendungsfall muss nach Experteneinschätzung festgelegt werden, welcher der zur Verfügung stehenden Werte für die Lösung der konkreten Fragestellung besser geeignet ist. Als wesentliches Entscheidungskriterium ist dabei zu klären, ob eine hohe Übereinstimmung mit durch regionale Besonderheiten geprägten HQ(T)-Werten ober- und unterhalb liegender Pegel notwendig ist (pHQ) oder ob diese explizit ausgeschlossen werden sollen (rHQ). In Abbildung 8 sind beispielhaft die pegelangepassten HQ-Abflüsse für ein T = 100 a wiedergegeben.

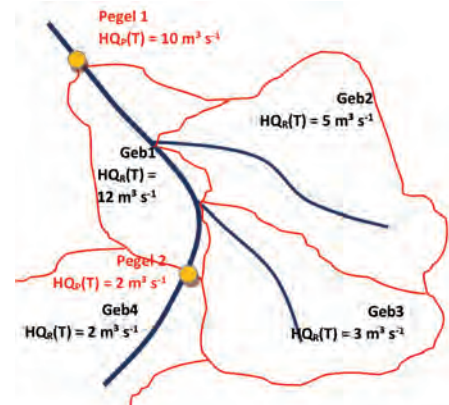
Mit dem hier vorgestellten Verfahren wird der Regionalisierungsansatz von MIEGEL & HAUPT (1998), der auf Datenreihen von 58 Pegeln mit einer mittleren Zeitreihenlänge von 28 Jahren basiert, aktualisiert und auf eine neue Datenbasis mit 88 Pegeln (mittlere Zeitreihenlänge von 36 Jahren) gestellt.

Um die Ansätze vergleichen zu können, werden HQ(T)-Abflussscheitel mittels altem und neuem Verfahren entsprechend der vorgegebenen Gebietskennwerte berechnet und mit aktuellen Pegel-HQ(T)-Werten ins Verhältnis gesetzt. Die nachträgliche Pegelkorrektur wird nicht berücksichtigt, da diese für das ursprüngliche Verfahren nicht existiert. Für das Verfahren von MIEGEL & HAUPT (1998) wird ein mittlerer relativer Modellfehler von 31 %

Tabelle 4

Schritte des nachträglichen Anpassungsverfahrens der modellierten HQ (T) an Scheitelabflüsse der Pegel.
 Steps of the retroactive adjustment of the modeled HQ (T) to peak runoffs of the gauges.

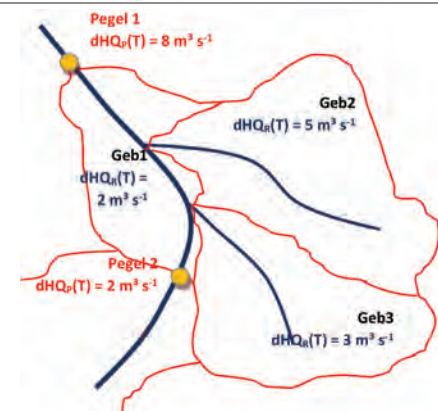
1. Die regressionsbasierten Hochwasserscheiteldurchflüsse $HQ_R(T)$ werden als **Ausgangswerte** flächendeckend aus dem zuvor beschriebenen Regressionsmodell für alle Teilgebiete (Gebx) ermittelt. Diese Werte weichen in der Regel aufgrund der Modellfehler von an den Pegeln bestimmten $HQ_P(T)$ ab.



2. Die HQ(T)-Differenzwerte (= $dHQ_R(T)$) werden für jedes Einzugsgebiet zwischen $HQ_R(T)$ aller Zuläufe und dem Ablauf bestimmt („Entkumulieren“):

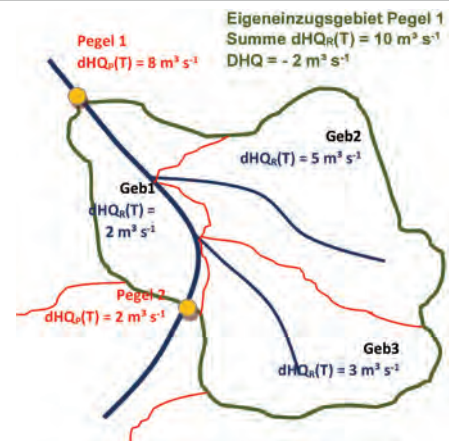
- $dHQ_R(T) = HQ_R(T)$,
wenn kein oberliegendes Einzugsgebiet existiert
- $dHQ_R(T) = HQ_R(T) - \sum_{i=1}^n HQ_R(T)_i$,
mit $i = 1 \dots n$ bei oberliegenden Einzugsgebieten

Mit den Eigeneinzugsgebieten der Pegel wird identisch verfahren ($dHQ_P(T)$ = Differenz der Ausläufe und Einläufe – im Beispiel $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} - 2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)



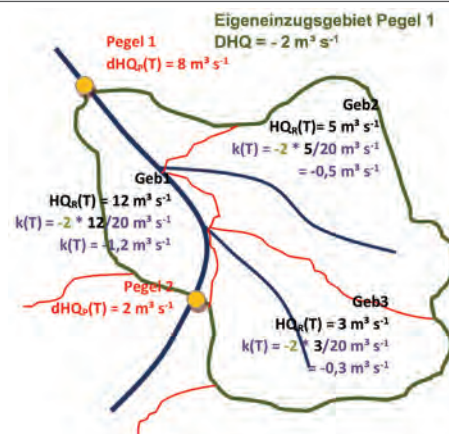
3. Die aus dem Regressionsmodell gewonnenen $dHQ_R(T)$ der Pegeleigeneinzugsgebiete werden mit den aus den direkten Pegelscheitelabflüssen berechneten $dHQ_P(T)$ -Werten verglichen und **Abweichungen** (DHQ = lokaler Modellfehler) der Pegel- $HQ_P(T)$ - und der Modell- $HQ_R(T)$ -Werte für jedes Eigengebiet bestimmt:

- $DHQ = dHQ_P(T) - \sum_{j=1}^m dHQ_R(T)_j$,
für alle $j = 1 \dots m$ Teileinzugsgebiete eines Pegeleigeneinzugsgebietes



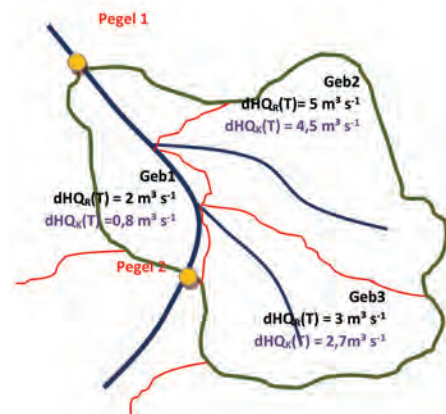
4. **Gewichtet** nach Scheitelabflusshöhe wird die Abweichung auf alle Teilgebiete des Pegeleigeneinzugsgebietes aufgeteilt und ein Anpassungswert $k(T)$ ermittelt.

- $k(T)_i = \frac{DHQ \cdot HQ_R(T)_i}{\sum_{j=1}^m HQ_R(T)_j}$,
für alle $i, j = 1 \dots m$ Teileinzugsgebiete eines Pegeleigeneinzugsgebietes



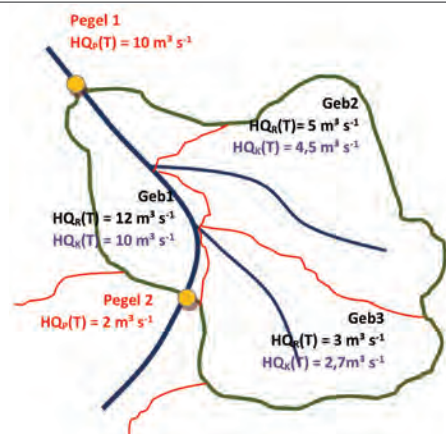
5. Anhand des Anpassungswerts $k(T)$ und des ursprünglichen $dHQ_R(T)$ -Wertes wird ein korrigiertes $dHQ_K(T)$ für jedes beobachtete Teileinzugsgebiet bestimmt.

- $dHQ_K(T) = k(T) + dHQ_R(T)$
für alle beobachteten Teileinzugsgebiete



6. Ein abschließendes „**Rekumulieren**“ ergibt den korrigierten $HQ_K(T)$ -Scheitelabfluss.

- $HQ_K(T) = \sum_{i=1}^p dHQ_K(T)_i$
für alle $i = 1 \dots p$ Teilgebiete im Gesamteinzugsgebiet, wenn kein oberliegendes Einzugsgebiet existiert
- $HQ_K(T) = \sum_{i=1}^p dHQ_K(T)_i + \sum_{j=1}^n HQ_P(T)_j$,
mit $i = 1 \dots p$ Teileinzugsgebiete im Pegelgeneinzugsgebiet und mit $j = 1 \dots n$ oberliegenden Pegelgeneinzugsgebieten



($T = 2$ a) bis 42 % ($T = 200$ a), bezogen auf die heutige Datenbasis (88 Pegel), festgestellt. Mit 20 % bis 27 % kann im aktualisierten Verfahren eine deutliche Reduktion der Abweichungen erreicht werden. Vergleicht man die mittleren relativen Modellfehler nur für die 41 Pegel, die in beiden Verfahren Grundlage waren, so erreicht das aktualisierte Verfahren auch hier mit 23 % bis 26 % gegenüber 32 % bis 41 % eine wesentliche Verringerung.

Um die Güte des Modells regional differenziert abschätzen zu können, wird außerdem eine Analyse der räumlichen Verteilung des Gesamtfehlers des Regressionsmodells durchgeführt. Dafür werden die Amtsbereiche der vier Staatlichen Ämter für Landwirtschaft und Umwelt (StÄLU) als Vergleichsräume gewählt (der Amtsbereich des StÄLU Vorpommern wird in einen nördlichen (Raum Ueckermünde, UEM) und südlichen (Raum Stralsund-Rügen, STR) Bereich unterteilt) und die mittleren absoluten

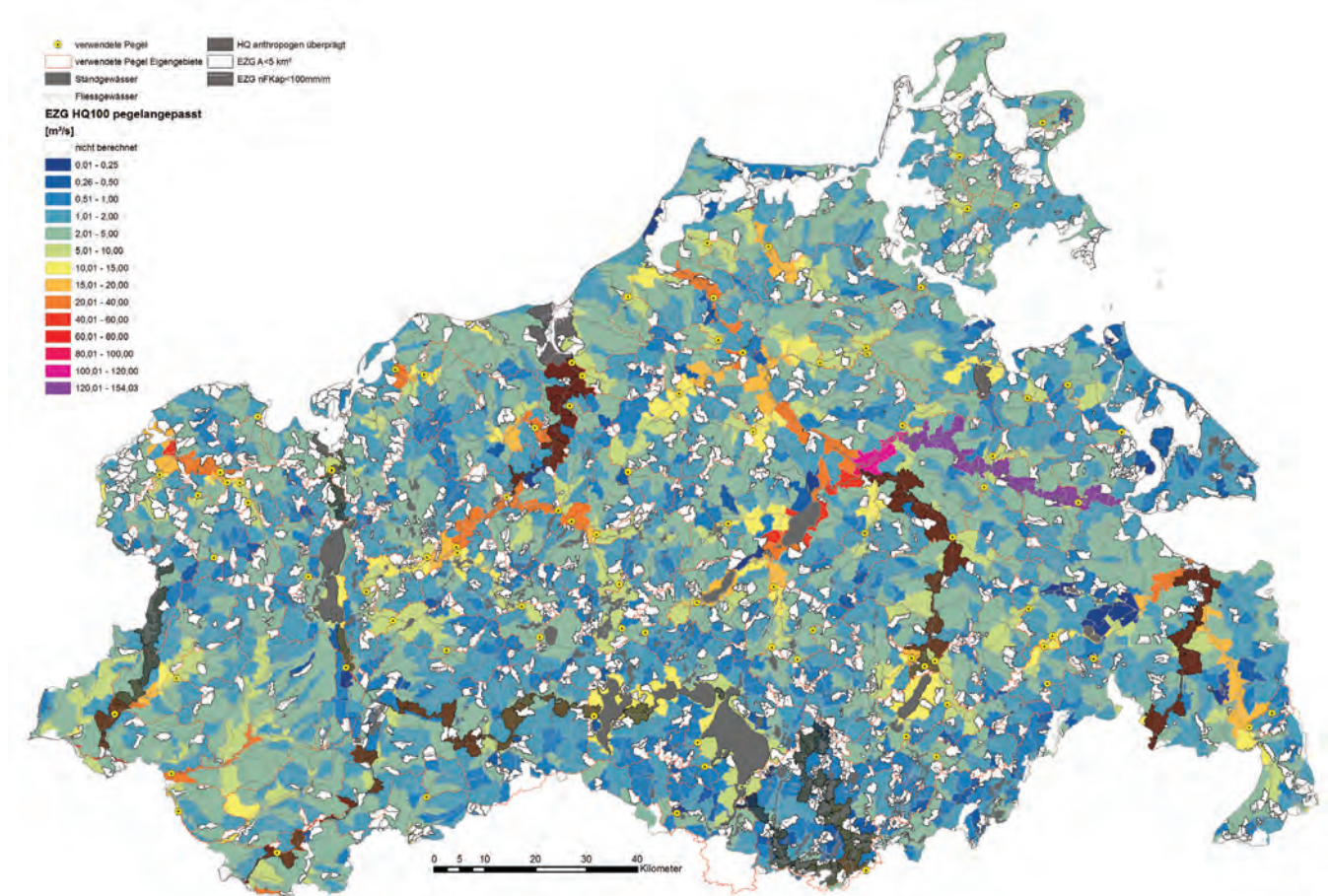
Fehler an den Pegeln in diesen Amtsbereichen betrachtet. Wie in Tabelle 5 erkennbar ist, bewegen sich die Abweichungen überwiegend im erwartbaren Rahmen.

Eine Ausnahme bildet der Bereich Ueckermünde (UEM). Hier sind die Modellfehler für häufige Hochwasserereignisse geringer als im Landesdurchschnitt. Dagegen weicht die Modellgüte für seltene Ereignisse stark negativ vom Landesdurchschnitt ab. Die größten Verschiebungen sind an den Pegeln Lodmannshagen Kleinbahn (Mühlgraben) und Padderow (Großer Abzugsgraben) festzustellen, die dadurch erheblich zur Abweichung vom Landesdurchschnitt beitragen. Als Ursache kommen regionale Besonderheiten im Hochwasserprozess in Betracht, die nicht durch den vorgestellten landesweiten Ansatz abgedeckt werden. Denkbar sind bei diesen und einigen anderen Pegeln auch Singularitäten bei der Abflussmessung oder Extremwertfunktionsanpassung in HQ-EX.

Tabelle 5

Mittlerer relativer Modellfehler [%] nach Amtsbereichen der Staatlichen Ämter für Landwirtschaft und Umwelt (StÄLU) (Abb. 2).
Mean relative model error [%] according to the operational area of the state agencies for agriculture and the environment (StÄLU – see fig. 2).

StÄLU	HQ(2)	HQ(5)	HQ(10)	HQ(20)	HQ(25)	HQ(50)	HQ(100)	HQ(200)
MM	19,1	18,6	18,6	19,1	19,2	20,0	20,8	21,7
MS	22,0	21,0	20,5	19,8	19,6	18,9	20,7	22,6
VP (STR)	24,0	24,9	25,3	25,6	25,8	26,0	26,9	29,9
VP (UEM)	15,4	15,8	20,4	26,1	27,6	32,0	37,3	42,8
WM	19,7	20,1	20,5	21,6	22,0	23,3	24,9	26,4
Land	20,2	20,2	20,8	21,8	22,0	23,0	24,8	26,9

**Abbildung 8**

Kulisse der pegelangepassten pHQ ($T = 100$ a) - Abflussscheitelwerte für Mecklenburg-Vorpommern.
 Map of the gauge adjusted pHQ ($T = 100$ a) - runoff peaks for Mecklenburg-Western Pomerania.

4.5. Überführung des Ansatzes in ein PC-Werkzeug

Im Rahmen des Projektes wurde zudem ein Werkzeug auf der Grundlage von Python 2.7.3 entwickelt, welches es ermöglicht, die meisten Arbeitsgänge der Berechnungen zu automatisieren. Es lässt sich als Skript in ArcGIS 10.2 einbinden. Auf diese Weise können bei Aktualisierungen der Grundlagendaten (Gebietsfaktoren, Pegelzeitreihen) schnell Neuberechnungen der Hochwasserscheitelabflüsse vorgenommen werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Jahr 2016 wurde eine Überarbeitung der Regionalisierung der Hochwasserscheitelabflüsse auf Basis des in Mecklenburg-Vorpommern bewährten multivariaten, nichtlinearen Regressionsmodelles vorgenommen. Mittels „begleiteter“ Vorwärtss Selektion werden aus 52 potenziell hochwasserbeeinflussenden Gebietskennzahlen systematisch sechs bestimmende Parameter ausgewählt. Die bestimmenden Größen sind nun: Flächengröße des Einzugsgebietes, gefolgt von der Seeretention, mittlerem Jahresniederschlag, nutzbarer Feldkapazität der Böden im Einzugsgebiet, Gebietsform und der Geländehöhe des Gebietsauslasses. Im Vergleich zum ursprünglichen Ansatz haben sich die zwei neu berechneten Gebietskennzahlen zur Feldkapazität und zur Gebietsauslasshöhe als besser geeignet erwiesen, vier der bisherigen Parameter wurden übernommen. Grundsätzlich wird damit die Auswahl von RASMUS (1989), aber auch ein gewisses Verbes-

serungspotenzial durch die Anwendung von GIS-Analysen bestätigt.

Mit Hilfe von 88 Pegelzeitreihen aus dem Zeitraum 1951 bis 2012 werden Regressionsmodelle kalibriert und die regionalisierten Hochwasserkennwerte der statistischen Wiederkehrdauern $T = 2$; 5; 10; 20; 25; 50; 100 und 200 Jahre berechnet.

Durch die Einbeziehung von Wasserwirtschaftsexperten der Staatlichen Ämter für Landwirtschaft und Umwelt mit genauer Kenntnis der Pegel und Messmethoden wird zudem sichergestellt, dass die Hochwasserdatengrundlage sehr zuverlässig und repräsentativ ist. Dieser Schritt hilft, den Methodenfehler insgesamt zu reduzieren.

Der mittlere relative Fehler der Scheitelwerte an den Pegeln liegt zwischen 20 % für $T = 2$ a und 27 % für $T = 200$ a. Die Reduzierung der Abweichung gegenüber dem ursprünglichen Verfahren (hier lag der mittlere relative Fehler bei 31 % bis 42 %) ist etwa gleichrangig auf eine bessere Pegel datengrundlage und eine bessere Gebietsfaktorenauswahl zurückzuführen.

Eine Optimierung der Regionalisierung kann mit Hilfe eines nachträglichen Korrekturverfahrens für beobachtete Einzugsgebiete erreicht werden, bei dem die an den Pegeln auftretenden Abweichungen abflussgewichtet auf die Teileinzugsgebiete

aufgeteilt werden. Damit wird erreicht, dass die so korrigierten $HQ_K(T)$ -Scheitelwerte mit den $HQ_P(T)$ der Pegel übereinstimmen, dass die Anpassungen systematisch für die Teilgebiete innerhalb eines Pegelbezugsgebietes am größten sind, welche die größten Fehlerabweichungen aufweisen und dass keine unplausiblen Unstetigkeiten im Fließverlauf der Gewässer auftreten.

Empfehlenswert ist, bei größeren Veränderungen im Einzugsgebiet bzw. nach festen Zeiträumen (etwa eine Dekade) eine Neukalibrierung der Regionalisierungskoeffizienten vorzunehmen, da Qualität und Quantität hydrologischer Daten zunehmen und wahrscheinliche Trends bei den Hochwasserscheitelabflüssen berücksichtigt werden können. Vereinfacht wird dies auch durch ein ArcGIS-Tool, das in Folge der Arbeiten entstanden ist. Neben der Ermittlung der Scheitelabflusswerte werden bei zukünftigen Analysen der Pegelwerte sicher auch verstärkt instationäre Kennwerte, wie z. B. Ganglinienform, Abflussvolumen und Zeitandauer, eine Rolle spielen müssen. So zeigte sich im Hinblick auf die Hochwasserschäden des sogenannten „Sommerhochwassers 2013“ in Mecklenburg-Vorpommern, dass Abflussfülle und Zeitandauer über bestimmten Schwellenwerten hydrologisch wichtige Kennwerte sind, die nach Möglichkeit bei der statistischen Auswertung von Pegeldaten stärker berücksichtigt werden sollten (MEHL et al., 2014).

Summary and Conclusion

In 2016, a new regionalization of the floodwater peak flows was carried out based on the multivariate, nonlinear regression model, which has been tried and tested in Mecklenburg-West Pomerania. By means of "continuous" forward selection, six determining parameters were chosen from 52 potentially flood-influencing regional characteristics. These are the area size of the catchment area, the lake retention, the average annual precipitation, the usable field capacity of the soils in the catchment area, the area shape and the terrain elevation of the area outlet. In comparison to the former method, the two newly calculated regional characteristics 'field capacity' and 'terrain elevation of the area outlet' have proven to be better; the four other characteristics have been adopted. This generally confirms both the selection by RAMUS (1989) as well as the potential for improvement by the application of GIS analyses.

Regression models were calibrated and the regionalized flood parameters of the statistical repetition periods $T = 2; 5; 10; 20; 25; 50; 100$ and 200 years were calculated by analyzing different time series of 88 runoff gauges between the period of 1951 to 2012.

By involving the experts in water management of the National Departments of Agriculture and Water Management with their extensive expertise in the area of water levels and measurement methods, a very reliable and representative data basis can be secured for floods. This step helped to minimize the possibility of methodological errors.

The average relative error of the peak values at the gauges is between 20% for $T = 2a$ and 27% for $T = 200a$. The reduction of errors in comparison with the original method (error rate between 31% and 42%) is equally due to a better gauge data basis and an improved selection of regional characteristics.

An optimization of the regionalization can be achieved with the help of a subsequent correction process for analyzed catchment areas, in which the deviations occurring at the gauges are distributed outflow-weighted to the sub-basins. This method allows the corrected $HQ_K(T)$ peak values to correspond to the $HQ_P(T)$ of the gauges, that the adjustments are systematically the largest for the subareas within a gauge's own drainage area that have the greatest error deviations and that there are no implausible inconsistencies in the course of the flow water bodies.

It is advisable to re-calibrate the regionalization coefficients for major changes in the catchment area and after fixed periods (for example, every decade) since the quality and quantity of hydrological data are constantly improving and likely trends in flood peak flows can be considered. This is also simplified by an ArcGIS tool, which has been created as a result of the study. In addition to the determination of the pure peak runoff values, increasingly unsteady characteristic values, such as flow lines, discharge volumes and duration will surely also play a role in the future analyses of the level values. The flood damages of the so-called "summer flood 2013" in Mecklenburg-Western Pomerania also proved that abundance of runoff and duration above certain thresholds are hydrologically important parameters that should be considered more seriously in the statistical interpretation of gauge data (MEHL et al. 2014).

Danksagung

Wir danken den Mitgliedern der projektbegleitenden Arbeitsgruppe aus Fachleuten der Landesverwaltung: Herrn Schumann (Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern), Frau Friedrich (Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern), Frau Besler und Herrn Lückstädt (Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt (StALU) Westmecklenburg), Frau Ölschner (StALU Mittleres Mecklenburg), den Herren Blodow, Fichte, Höft und Müller (StALU Vorpommern) sowie Frau Quade und den Herren Henke und Petzold (StALU MS).

Anschriften der Verfasser

Dr. T. G. Hoffmann

Dr. Dr. D. Mehl

biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH
Nebelring 15

18246 Bützow

tim.hoffmann@institut-biota.de

Prof. Dr. K. Miegel

Universität Rostock

Satower Straße 48

18059 Rostock

konrad.miegel@uni-rostock.de

Literaturverzeichnis

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.

- BIOTA (2016): HQ(T) M-V (2016). Überarbeitung und Aktualisierung der Regionalisierung der Hochwasserkennwerte für Mecklenburg-Vorpommern. – biota - Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 104 S.
- BLÖSCHL, G., SIVAPALAN, M., WAGENER, T., VIGLIONE, A., & SAVENIJE, H. (2013): Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales, Cambridge University Press, 490 S.
- BURNHAM, K. P. & ANDERSON, D. R. (2004): Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection. – *Sociological Methods and Research* 33/2, 261-304
- DALRYMPLE, T. (1960): Flood-frequency analysis - manual of hydrology, part 3. – U. S. Geological Survey, Water Supply Paper 1543-A, Washington
- DHI-WASY (2007): Software HQ-EX® 3.0, Programm zur Berechnung vom Hochwasserwahrscheinlichkeiten; DHI-WASY GmbH; Berlin
- DHI-WASY (2009): Landeseinheitliche Regionalisierung von Hochwasserabflüssen im Land Brandenburg. Schlussbericht. – DHI-WASY GmbH im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg
- DVWK (1999): Merkblatt 251: Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblatt 251. – Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), 43 S.
- DWA (2012): M 552: Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), 96 S.
- DYCK, S. & PESCHKE, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. – 3. Aufl., Berlin (Verlag für Bauwesen), 536 S.
- DYCK, S., GRÜNEWALD, U., HANSEL, N., KLUGE, C., LAUTERBACH, D. & SCHRAMM, M. (1980): Angewandte Hydrologie. Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse. – 2. Aufl., Berlin (Verlag für Bauwesen), 511 S.
- HAUPT, R. (2000): Regionalisierung von Hochwasserkennwerten in Mecklenburg-Vorpommern. – Dissertation, Universität Rostock, Umwelt- und Agrarwissenschaftliche Fakultät
- HAUPT, R., MIEGEL, K., SCHRAMM, M. & WALTHER, J. (1999): Saisonalität und Regionalisierung von Hochwasserscheiteldurchflüssen in Mecklenburg-Vorpommern. – *Wasserwirtschaft* 89, 7-8
- HOFFMANN, T. & RÖDEL, R. (2004): Leitfaden für die Statistische Auswertung geographischer Daten. – Greifswalder Geographische Mitteilungen 33, Greifswald, 110 S.
- HOSKING, J. R. M. & WALLIS, J. R. (1997): Regional frequency analysis: an approach based on L-moments. – Cambridge (Cambridge University Press)
- HWRM-RL (Europäische Hochwasserrichtlinie): Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken, Amtsblatt der EG Nr. L 288 vom 06.11.2007
- IAWG (2008): Regionalisierung von MQ, MNQ, 330Q, MHQ und HQT. Update 2008. – Dr. Willems und Prof. Dr. Kleeberg GbR - Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik im Auftrag des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
- KLEEBERG, H.-B. (1999): Zum Problem der Regionalisierung in der Hydrologie, in: KLEEBERG, H.-B., MAUSER, W., PESCHKE, G., STREIT, U., DIEKKRÜGER, B., SCHWARZE, R. & SCHUMANN, A. H. [Hrsg.] (1999): Hydrologie und Regionalisierung. Ergebnisse eines Schwerpunktprogramms (1992-1998). Forschungsberichte (DFG). – Wiley-VCH (Weinheim), 3-12
- MEHL, D., MIEGEL, K. & SCHUMANN, A. (2014): Ungewöhnliche Niederschlagsereignisse im Sommer 2011 in Mecklenburg-Vorpommern und ihre hydrologischen Folgen – Teil 2: Hydrologische Folgen. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 58 (1), 29-42
- MIEGEL, K. & BÜTTNER, U. (2003): Zum Einfluss der Datenverfügbarkeit und von extremen Ereignissen auf das Ergebnis hochwasserstatistischer Analysen. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 47 (3), 94-102
- MIEGEL, K. & HAUPT, R. (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, Abteilung Wasserwirtschaft
- MIEGEL, K., MEHL, D., MALITZ, G. & ERTEL, H. (2014): Ungewöhnliche Niederschlagsereignisse im Sommer 2011 in Mecklenburg-Vorpommern und ihre hydrologischen Folgen – Teil 1: Hydrometeorologische Bewertung des Geschehens. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 58 (1), 18-28
- MÜLLER, P.H., NEUMANN, P. & STORM, R. (1985): Tafeln der mathematischen Statistik, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 275 S.
- PARAJKA, J., MERZ, R. & BLÖSCHL, G. (2005): A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters. – *Hydrology and Earth Systems Sciences* 9, 157-171
- RASMUS, G. (1989): Berechnung von Hochwasserscheiteldurchflüssen mit Wiederkehrintervallen aus Gebietskennwerten für beliebige Einzugsgebiete im nördlichen Flachland der DDR., unveröff. Bericht der Wasserwirtschaftsdirektion Küste, Stralsund
- SALINAS, J. L., LAAHA, G., ROGGER, M., PARAJKA, J., VIGLIONE, A., SIVAPALAN, M. & BLÖSCHL, G. (2013): Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 2: Flood and low flow studies, *HESS*, 17, 2637-2652
- SKØIEN, J., MERZ, R. & BLÖSCHL, G. (2006): Top-Kriging - geostatistics on stream networks. – *Hydrology and Earth System Sciences (HESS)* 10, 277-287
- WALTHER, J., FISCHER, B., HORN, S., MERZ, R., ILLARENA, J. L. S. & LAAHA, G. (2012): Flächenhafte Bestimmung von Hochwasserspenden. Schriftenreihe des LfULG Sachsen, Heft 3/2012
- WASY (2007): HQ-EX 3.0 – Programm zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Benutzerhandbuch. – WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH
- WHG: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) m 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist