

Durchflussskennwerte und Querbauwerke

Schriftenreihe, Heft 5/2019



Leitfaden zur Web-Anwendung „Ausgewählte Durchflusskennwerte und Querbauwerke sächsischer Fließgewässer, Stand 2015“

Antje Becker, Romy Ehrcke, Björn Fischer, Susanna Horn, Katharina Köpp-Klausch, Stefanie Kübler,
Evelin Bohn, Uwe Büttner, Holm Frieze, Erhard Wolf, Maik Ulrich, Ulf Winkler

1	Einleitung	9
2	Web-basierter Abruf von Durchflusskennwerten und Verwendungshinweise.....	11
2.1	Aufbau und Nutzung der Web-Anwendung.....	11
2.2	Allgemeine Hinweise zur Verwendung der abgerufenen Durchflusskennwerte	22
2.3	Verwendung abgerufener Niedrig- und Mittelwasserdurchflusskennwerte.....	23
2.4	Verwendung abgerufener Hochwasserdurchflusskennwerte MHQ und HQ _T	24
3	Recherche – Verknüpfungen mit der Querbauwerksdatenbank	27
Anhang A 1	Regionalisierung von Niedrigwasserdurchflusskennwerten	29
A 1.1	Durchflussdaten zur Bestimmung von Niedrigwasserdurchflusskennwerten	29
A 1.1.1	Verlängerung der Pegel-Beobachtungsreihen	29
A 1.1.2	Verwendung weiterer Pegel	29
A 1.1.3	Datenkorrekturen und Lückenfüllung in den Beobachtungsreihen der Pegel.....	29
A 1.1.4	Überprüfung auf Beeinflussungen der Pegel	30
A 1.1.5	Zusammenfassung	30
A 1.2	Geodaten für die Regionalisierung	31
A 1.3	Methodik zur Regionalisierung	31
A 1.3.1	Multiple lineare Regression	31
A 1.3.2	Top-Kriging	32
A 1.3.3	Durchflusslängsschnitte	33
A 1.4	Ergebnisse der Regionalisierung	34
A 1.4.1	Multiple lineare Regression	34
A 1.4.2	Top-Kriging	37
A 1.4.3	Durchflusslängsschnitte	37
A 1.5	Berechnung und Plausibilitätsprüfung.....	39
Anhang A 2	Regionalisierung von vieljährigen mittleren Durchflüssen	43
A 2.1	Durchflussdaten zur Bestimmung von mittleren Durchflüssen	43
A 2.1.1	Nichtberücksichtigung von Pegeln	43
A 2.1.2	Verlängerung der Pegel-Beobachtungsreihen	44
A 2.1.3	Verwendung weiterer Pegel	44
A 2.1.4	Datenkorrekturen und Lückenfüllung in den Beobachtungsreihen	44
A 2.1.5	Überprüfung auf Beeinflussungen der Pegel auf Basis des Pegelverzeichnisses 2014	45
A 2.2	Methodik	45
A 2.3	Berechnung und Plausibilitätsprüfung.....	46
A 2.4	Durchflusslängsschnitte	47
A 2.5	Ergebnisse der Regionalisierung	49
Anhang A 3	Regionalisierung von Hochwasserscheiteldurchflüssen mit Jährlichkeit HQ_T	50
A 3.1	Aufbereitung der Durchflussdaten für die Regionalisierung.....	50
A 3.1.1	Kriterien für die Verwendung von HQ _T -Werten	50
A 3.1.2	Extremwertstatistische Auswertung	51
A 3.1.3	Ergebnisse.....	52
A 3.2	Geodaten und Gebietskenngrößen für die Regionalisierung	53
A 3.3	Anwendung Regionalisierungsverfahren	53
A 3.3.1	Multiple lineare Regression	54
A 3.3.2	Top-Kriging der Residuen	57
A 3.3.3	Index-Flood-Verfahren zur Bestimmung der HQ _T	58

A 3.3.4	Erstellung von HQ_T -Längsschnitten mit einem Regressionsansatz.....	61
A 3.3.5	Erstellung von HQ_T -Längsschnitten für beeinflusste Gewässerabschnitte.....	64
A 3.3.6	Spezielles Vorgehen im ostsächsischen Tieflandbereich zur Erstellung der $HQ_{(T)}$ -Längsschnitte.....	64
A 3.4	Berechnung und Plausibilitätsprüfung von regionalisierten HQ_T	66
A 3.4.1	Wertebereiche der eingehenden Gebietskenngrößen	67
A 3.4.2	Untersuchung anthropogener und weiterer Beeinflussungen.....	68
A 3.4.3	Korrektur von nicht plausiblen MHQ und HQ_T im Längsschnitt	72
A 3.5	Ergebnisse von Vorzugsverfahren und HQ_T -Längsschnitten.....	74
Literaturverzeichnis.....		76

Abbildung 1:	Konzeptioneller Aufbau der Web-Anwendung	11
Abbildung 2:	Benutzeroberfläche der Geoportalanwendung	12
Abbildung 3:	„Werkzengleiste“ mit Erläuterungen.....	12
Abbildung 4:	Hauptdialog des Geoportals	14
Abbildung 5:	Druckansicht	15
Abbildung 6:	Meldung „Fehlclick“	15
Abbildung 7:	Meldung „Quellgebiet“	16
Abbildung 8:	Meldung „Gebietskenngrößen liegen außerhalb des Wertebereiches“	16
Abbildung 9:	Meldung „Stauanlageneinfluss“	17
Abbildung 10:	Meldung „Umfluteinfluss“	17
Abbildung 11:	Meldung „Rückstaeinfluss“	18
Abbildung 12:	Hauptdialog mit Hinweis auf Beeinflussung.....	18
Abbildung 13:	Hauptdialog mit fehlenden MHQ- und HQ ₂₅ -Werten für die Elbe	19
Abbildung 14:	Hauptdialog mit fehlenden Werten im Mündungsbereich des Wolfsgrabens	20
Abbildung 15:	Hauptdialog mit Werten für den Wolfsgraben	20
Abbildung 16:	Fensterbereich Navigation	21
Abbildung 17:	Workflow zur Verwendung abgerufener Hochwasserdurchflusskennwerte	25
Abbildung 18:	Abfrage von Querbauwerksinformationen	27
Abbildung 19:	Teilung des Untersuchungsgebiets (Freistaat Sachsen) in zwei Regionen für die MNQ-Berechnung	34
Abbildung 20:	Mittels Top-Kriging übertragene Residuen der MNQ _{Jahr} der Pegeleinzugsgebiete auf alle Teilgebiete des Untersuchungsgebietes.....	37
Abbildung 21:	Durchflusslängsschnitte der Lausitzer Neiße für MNQ, MNQ _{Som} und MNQ _{Win}	38
Abbildung 22:	Durchflussspendenlängsschnitte der Lausitzer Neiße für MNq, MNq _{Som} und MNq _{Win}	38
Abbildung 23:	Flächendeckende Durchflussspenden der Ausflussquerschnitte für das Gesamtjahr	39
Abbildung 24:	Vollständig plausibilisierte Durchflussspenden MNq der Teileinzugsgebiete der Zuflussknoten für das Gesamtjahr, das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr	41
Abbildung 25:	Vollständig plausibilisierte Durchflussspenden MNq der Teileinzugsgebiete der Ausflussknoten für das Gesamtjahr, das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr	42
Abbildung 26:	Abflüsse R als Grundlage für die Bestimmung des Mittelwasserdurchflusses	46
Abbildung 27:	MQ-Längsschnitt der Lausitzer Neiße	48
Abbildung 28:	Durchflussspendenlängsschnitt der Lausitzer Neiße.....	48
Abbildung 29:	Vollständig plausibilisierte Mittelwasserdurchflussspenden Mq der Teileinzugsgebiete der Ausflussknoten für die Zuflussquerschnitte und die Ausflussquerschnitte	49
Abbildung 30:	Approximation einer Allgemeinen Extremwertverteilung an die zusammengesetzte Verteilung am Beispiel des Pegels Golzern 1/Mulde	52
Abbildung 31:	Hochwasserhomogene Regionen in Sachsen als Basis für das Vorzugsverfahren.....	54
Abbildung 32:	Residuen der Pegel und der Teileinzugsgebiete des Untersuchungsgebietes	58
Abbildung 33:	MHQ- und HQ ₂ - bis HQ ₂₀₀ -Längsschnitte der Zschopau, Freiburger und Vereinigte Mulde vom Pegel Hopfgarten bis zum Pegel Golzern 1	63
Abbildung 34:	MHQ- sowie HQ ₂ - bis HQ ₂₀₀ -Längsschnitte der Weißen Elster von der tschechischen Staatsgrenze bis zur Mündung der Göltzsch	63
Abbildung 35:	MHQ- sowie HQ ₂ - bis HQ ₂₀₀ -Längsschnitte der Lausitzer Neiße vom Pegel Hartau bis zum Pegel Klein Bademeusel (Brandenburg)	64
Abbildung 36:	Prinzipskizze zur Plausibilitätsprüfung	72

Abbildung 37: Beispiel einer HQ_T -Korrektur im Längsschnitt durch Anhebung auf kleinstmöglichen plausiblen HQ_T	73
Abbildung 38: 100-jährliche Hochwasserscheiteldurchflussspenden Hq_{100} an den Zufluss- und Ausflussknoten der Teileinzugsgebiete	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der Pegel mit signifikanten Abweichungen von den mittels Regression berechneten MNq	36
Tabelle 2:	Pegel aus der DIFGA-Analyse, die nicht zur Regionalisierung des mittleren Durchflusses verwendet wurden	43
Tabelle 3:	Übersicht der Pegel mit signifikanten Abweichungen von den MHq in der jeweiligen Region	56
Tabelle 4:	Übersicht der Pegel mit signifikanten Abweichungen vom mittleren Verhalten der Pegel der jeweiligen Region (Index-Flood-Verfahren)	60
Tabelle 5:	Parameter der Growth Curve der saisonalen HQ-Statistik	60
Tabelle 6:	Normierte Quantile der Hochwasserwahrscheinlichkeitsfunktion x_T für jede Region	61
Tabelle 7:	Gewässerabschnitte der erstellten HQ _T -Längsschnitte	61
Tabelle 8:	Wertebereich der Gebietskenngrößen der Basispegel und minimale bzw. maximale Gebietskenngrößen aller Zu- und Ausflussquerschnitte der jeweiligen Region	67
Tabelle 9:	Anzahl der Gewässerquerschnitte mit Gebietskenngrößen innerhalb der beaufschlagten Wertebereiche der Basispegel	68
Tabelle 10:	Berechnungsbeispiel zum Stauanlageneinfluss auf den Unterlauf bei Nutzung von Regionalisierungsergebnissen	71

Abkürzungsverzeichnis

A_E	Einzugsgebietsfläche [km ²]
AIC	AKAIKE-Kriterium [-]
AKZ	Anlagenkennzahl
CG2	Rückgangskonstante der langsamsten unterirdischen Abflusskomponente [d]
DIFGA	Differenz-Ganglinien
H_{qT} oder $H_q(T)$	Hochwasserscheiteldurchflussspenden mit Jährlichkeit T [$l/(s \cdot km^2)$]
HQ_T o. $HQ(T)$	Hochwasserscheiteldurchfluss mit Jährlichkeit T [m ³ /s]
LN	natürlicher Logarithmus
LTV	Landestalsperrenverwaltung
MHq	vieljährige mittlere Hochwasserscheiteldurchflussspende [$l/(s \cdot km^2)$]
MHQ	vieljähriger mittlerer Hochwasserscheiteldurchfluss [m ³ /s]
MNq	vieljährige mittlere Niedrigwasserdurchflussspende [$l/(s \cdot km^2)$]
MNQ	vieljähriger mittlerer Niedrigwasserdurchfluss [m ³ /s]
MNQ_{Jahr}	vieljährige mittlere Niedrigwasserdurchflussspende für das Gesamtjahr [$l/(s \cdot km^2)$]
MNQ_{Jahr}	vieljähriger mittlerer Niedrigwasserdurchfluss für das Gesamtjahr [m ³ /s]
MNQ_{Regio}	modellierter, quasinatürlicher mittlerer Niedrigwasserdurchfluss
MNQ_{Pegel}	realer, gemessener vieljähriger mittlerer Niedrigwasserdurchfluss
MNq_{Som}	vieljährige mittlere Niedrigwasserdurchflussspende für das Sommerhalbjahr [$l/(s \cdot km^2)$]
MNQ_{Som}	vieljähriger mittlerer Niedrigwasserdurchfluss für das Sommerhalbjahr [m ³ /s]
MNq_{Win}	vieljährige mittlere Niedrigwasserdurchflussspende für das Winterhalbjahr [$l/(s \cdot km^2)$]
MNQ_{Win}	vieljähriger mittlerer Niedrigwasserdurchfluss für das Winterhalbjahr [m ³ /s]
Mq	vieljährige mittlere Durchflussspende [$l/(s \cdot km^2)$]
MQ	vieljähriger mittlerer Durchfluss [m ³ /s]
NQ	Niedrigwasserdurchfluss
mrF	mittlerer relativer Fehler [%]
nFK	nutzbare Feldkapazität [mm]
P_{Jahr}	vieljährige mittlere Jahressumme des Niederschlags [mm]
QBW	Querbauwerk
R^2	Bestimmtheitsmaß [-]
RG2	Zufluss zur langsamsten unterirdischen Abflusskomponente [mm]
SQRT	Wurzel
SQR	Quadrat
UTM	Universal Transverse Mercator
WMS	Web Map Service

1 Einleitung

Durchflusskennwerte¹ zur Beschreibung des Abflussverhaltens eines Gebietes bilden neben anderen Größen eine entscheidende Grundlage für die Bemessung anthropogener Eingriffe in das Fließgewässerökosystem und die Einhaltung sicherheitstechnischer Aspekte. Benötigt werden diese sowohl in Planungs- als auch in wasserrechtlichen Vollzugsverfahren. Dies betrifft u. a. Erlaubnisse/Bewilligungen/Festsetzungen gemäß

- §§ 8 und 9 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) für das Entnehmen und Ableiten von Wasser, das Anheben und Absenken des Wasserspiegels, das Einbringen und die Einleitung von Stoffen,
- § 26 Sächsisches Wassergesetz (SächsWG) i. V. m. § 36 WHG für die Errichtung und den Betrieb von wasser- und verkehrsbaulicher sowie sonstiger baulicher Anlagen an Fließgewässern,
- §§ 72 bis 74 SächsWG i. V. m. §§ 76 bis 78 WHG für Ausweisung von Überschwemmungsgebieten und
- § 71 Abs. 3 SächsWG i. V. m. § 74 WHG für die Erstellung von Hochwassergefahrenkarten.

Das Durchflussregime eines Fließgewässers ist – auch bei geringfügiger wasserbaulicher Einflussnahme – bestimmend für die Lebensbedingungen der gewässertypspezifischen Tier- und Pflanzengemeinschaften. Veränderungen dürfen u. a. nicht dazu führen, dass die Durchgängigkeit für Fische und die Funktionsfähigkeit des Ökosystems in Fließgewässern oder Abschnitten davon gefährdet wird. So verlangt der Gesetzgeber, dass Gewässer im Sinne des § 6 WHG nachhaltig zu bewirtschaften sind. Das Ziel besteht im Erhalt und in der Verbesserung ihrer Funktions- und Leistungsfähigkeit sowie ihrem Schutz vor nachteiligen Veränderungen. Damit unmittelbar verbunden ist der Erhalt der ökologisch erforderlichen Mindestwasserführung (§ 33 WHG) und die Durchgängigkeit der Gewässer nach § 34 Abs. 1 WHG.

Natürliche Niedrigwassersituationen in Oberflächengewässern stellen besondere Zeiträume dar, in denen die Lebensgemeinschaften der Gewässer einem erhöhten physiologischen Stress ausgesetzt sein können und in denen die Gewässer in ihrer ökologischen Funktionalität sehr anfällig für Störungen und Einflüsse von außen sind. Niedrigwasserperioden gehen insbesondere in den Sommermonaten einher mit erhöhten Lufttemperaturen, die auch zur deutlichen Erwärmung der Gewässer führen. Dabei verringert sich die Löslichkeit von Sauerstoff. Gleichzeitig reduzieren sich die vom Wasser bedeckte Fläche des Gewässers und die mittlere Tiefe. Bereits natürliche Niedrigwassersituationen wirken sich oftmals direkt auf die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften in den Gewässern aus.

Wirken zusätzlich noch anthropogene Einflüsse in den Niedrigwasserperioden auf die Gewässer ein, so kann dies zu übermäßigen Beeinträchtigungen der ökologischen Funktionen der Gewässer führen. Einleitungen aus Abwasserbehandlungsanlagen können in Niedrigwassersituationen zeitweise nicht mehr ausreichend durch das noch vorhandene Oberflächenwasser im Bach verdünnt werden und haben negative Folgen auf die gewässergebundene Lebensgemeinschaft. Einleitungen von erwärmtem Kühlwasser können zusätzlich fatale ökologische Auswirkungen entfalten.

Eine weitere wichtige Grundlage für unterschiedliche umweltbehördliche Fach- und Vollzugsaufgaben bilden regionale Mittelwasserkennwerte. So besitzt insbesondere der langjährige mittlere Durchfluss (MQ) in den jeweiligen

¹ Anstelle des Begriffs „Kennwerte“ wird in der hydrologischen Fachterminologie der Begriff „Hauptwerte“ verwendet.

Fließgewässern im Zusammenhang mit der Beurteilung chemisch-stofflicher Befrachtungen, der Abschätzung des Wasserkraftpotenzials, der Ermittlung zulässiger Einleitungsmengen von Kläranlagen oder auch zur Bilanzierung des regionalen Wasserhaushaltes eine erhebliche Bedeutung.

Im Zusammenhang mit den 2010 und 2013 aufgetretenen, z. T. extremen Hochwassern haben sich zum einen die Parameter der Hochwasserwahrscheinlichkeitsfunktionen der an den Pegeln beobachteten Scheiteldurchflüsse erheblich verändert und zum anderen die Datenbasis mit bedeutenden Informationen zum Hochwasserregime erweitert. Diese Ereignisse waren für das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) Anlass für eine Neuberechnung von Hochwasserscheiteldurchflüssen mit Jährlichkeit (HQ_T). Die Methodik zur Bestimmung von HQ_T für beobachtete und unbeobachtete Gewässerquerschnitte ist in DHI WASY (2010b, 2015a) dokumentiert, wobei das in WALTHER ET. AL. (2012) empfohlene Vorzugsverfahren, eine Kombination verschiedener geostatistischer Techniken, für große Teile des Landes Anwendung fand. Zusätzlich erfolgte für insgesamt 15 Abschnitte größerer Fließgewässer die Berechnung von HQ_T mittels einer HQ_T -Längsschnittanalyse, mit der das Hochwasserverhalten von Tieflandsflüssen, die in den Gebirgslagen entspringen, besser beschrieben werden kann.

In ähnlicher Weise wurden die vieljährigen mittleren Niedrigwasserdurchflüsse (MNQ) und die vieljährigen mittleren Durchflüsse (MQ) durch DHI WASY (2014) regionalisiert. Alle im Rahmen dieser Projektarbeiten modellgestützt ermittelten Kennwerte des Niedrig- und Mittelwasserbereichs beschreiben im Wesentlichen einen quasinatürlichen unbeeinflussten Zustand. Deshalb müssen lokal oder über längere Flussabschnitte wirksame größere anthropogene Beeinflussungen, wie Einleitungen zentraler Kläranlagen, Umfluten durch Mühlgräben, Steuerungen der Wasserabgabe in Fließgewässerabschnitte unterhalb von großen Stauanlagen (z. B. Talsperren) u. ä. ohne entsprechenden Hinweis in der Karte oder im Hauptdialog (Datenabruf) separat berücksichtigt werden. Die bei solchen Gewässerabschnitten angezeigten MNQ und MQ erfordern auf jeden Fall eine Korrektur hinsichtlich der tatsächlichen Beeinflussungen des dortigen Durchflussgeschehens.

Im Gegensatz dazu geben die angegebenen HQ_T für Abschnitte mit wesentlichen anthropogenen Beeinflussungen durch Bewirtschaftung von existenten und geplanten Stauanlagen mit großen Hochwasserrückhalteräumen, Umfluter, Hochflutbetten und Rückstaueffekte die Ergebnisse gesonderter Hochwassergutachten der Landestalsperrenverwaltung (LTV) wieder. Diese gehen mehrheitlich nicht von Regionalisierungsergebnissen aus, sondern berücksichtigen im Regelfall die Ergebnisse von Niederschlags-Abfluss-Modellierungen. Mit entsprechenden Sicherheitszuschlägen wird die herausgehobene, wasserwirtschaftliche Bedeutung bzw. das besondere Gefahrenpotential der Talsperren, Rückhaltebecken und Speicher berücksichtigt. Dieses Vorgehen kann hinsichtlich der vorliegenden Regionalisierungsergebnisse zu unterschiedlichen HQ_T gleicher Jährlichkeit T führen.

Um die Verfügbarkeit der verschiedenen Durchflusskennwerte des Niedrig-, Mittel- und Hochwasser-Bereiches für Vorhabensträger, Planer, Genehmigungsbehörden und sonstige Nutzer zu erleichtern, wurde durch die DHI WASY GmbH über mehrere Teilprojekte in den zurückliegenden Jahren eine internetbasierte Anwendung entwickelt und Mitte 2018 inhaltlich und funktional fertiggestellt.

Der vorliegende Leitfaden erläutert, wie Durchflusskennwerte für einen interessierenden Fließgewässerquerschnitt (Auswahlquerschnitt bzw. Aussagequerschnitt) über die Benutzeroberfläche der Web-Anwendung abgerufen werden können und welche Einschränkungen hinsichtlich ihrer Angabe und Genauigkeit bestehen. Weiterhin wird über die sachgerechte Nutzung der abgerufenen Daten und die hierbei erforderliche Prüfung und Berücksichtigung ggf. vorliegender lokal wirksamer Beeinflussungen des Durchflussgeschehens informiert.

Die Anhänge 1 bis 3 beinhalten die Beschreibungen der jeweiligen Methoden zur Ermittlung der Durchflusskennwerte getrennt für den Niedrigwasser-, den Mittelwasser- sowie den Hochwasserbereich.

Zusammengefasst waren folgende Arbeitsschritte erforderlich:

1. Aufbereitung vorliegender Durchflussdaten für die Regionalisierung
2. Bestimmung von Geodaten und Gebietskenngrößen für die Regionalisierung
3. Auswahl und Anwendung der Regionalisierungsverfahren
4. Berechnung und Plausibilitätsprüfung der regionalisierten Durchflusskennwerte
5. Dokumentation der Ergebnisse aus der Anwendung der jeweiligen Regionalisierungsverfahren

2 Web-basierter Abruf von Durchflusskennwerten und Verwendungshinweise

2.1 Aufbau und Nutzung der Web-Anwendung

Im Hintergrund der Web-Anwendung arbeitet eine Geodatenbank, in der für die im sächsischen Wasserlaufverzeichnis (Stand: 2015) enthaltenen, hellblau oder gestrichelt hervorgehobenen Fließgewässer die Durchflusskennwerte MNQ , MNQ_{Winter} , MNQ_{Sommer} , MQ , MHQ und HQ_T mit den Jährlichkeiten $T = 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100$ und 200 a bereitstehen. Andere Durchflusskennwerte bzw. -hauptwerte wie der niedrigste (bekannte) Niedrigwasserdurchfluss NNQ , der höchste Hochwasserscheiteldurchfluss HHQ , der an x Tagen pro Jahr unterschrittene Durchfluss xQ oder das niedrigste arithmetische Mittel von x aufeinanderfolgenden Tageswerten in einem Niedrigwasserzeitabschnitt $NMxQ$ werden in dieser Web-Anwendung nicht angezeigt.

Die Browser-Applikation ist als Anwendung mit fünf Fensterbereichen erstellt worden (Abbildung 1). Der Fensterbereich „Titel“ ist ein statischer Bereich, in dem der Titel der Applikation mit gestalteten Logos angezeigt wird. Der Fensterbereich „Statusleiste“ stellt die Informationen der Anwendung wie z. B. Messergebnisse oder eine Koordinatenanzeige zur Verfügung. In dem Fensterbereich „Werkzeugleiste“ sind die Werkzeuge positioniert. Mit dem Mauszeiger angefahrte Werkzeuge zeigen Informationen in einem Popupfenster. Detailinformationen der Werkzeuge werden in dem Fensterbereich „Statusleiste“ angezeigt. Im Fensterbereich „Navigationsbereich“ werden die komplexen Anwendungen wie z. B. Navigieren zum gesuchten Gewässerquerschnitt, Hintergrundkarten und Legende bereitgestellt. Der Fensterbereich „Kartenfenster“ zeigt die individuell erstellte Karte an.

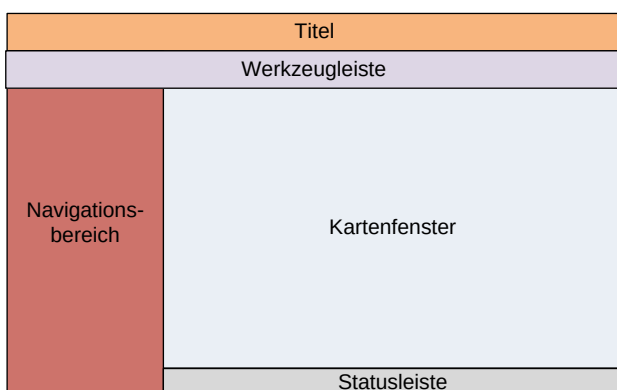


Abbildung 1: Konzeptioneller Aufbau der Web-Anwendung

Im Eingangsbildschirm der Anwendung wird der Freistaat Sachsen in einer topografischen Übersichtskarte dargestellt (Abbildung 2).

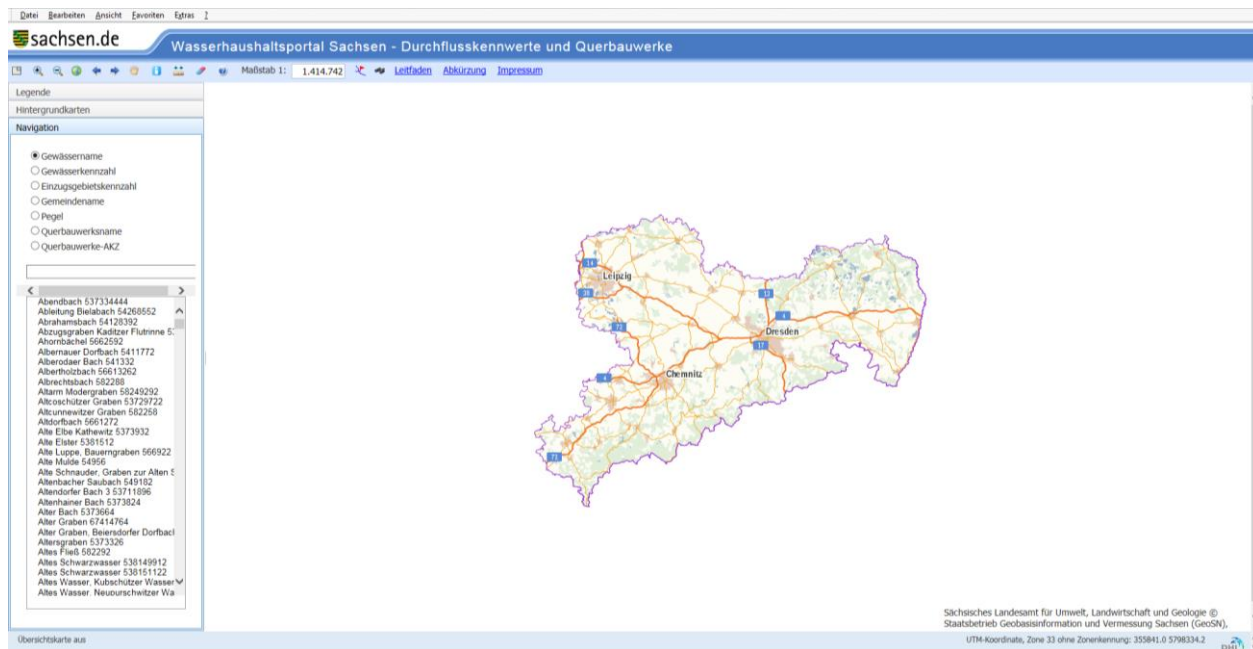
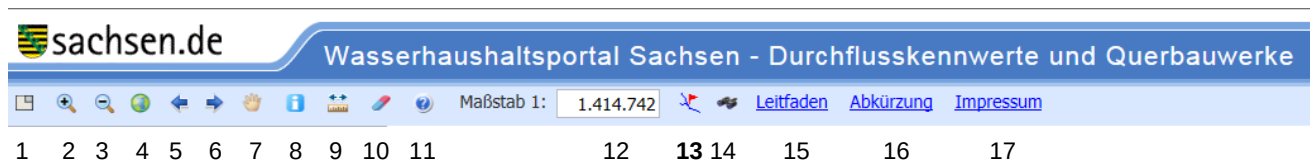


Abbildung 2: Benutzeroberfläche der Geoportalanwendung

In der „Werkzeugleiste“ sind folgende Werkzeuge enthalten, die für ihre Benutzung anzuklicken sind (Abbildung 3):



mit

- 1 = Übersichtskarte
- 2 bis 7 = Navigationswerkzeuge
- 8 = Information
- 9 = Messen
- 10 = Aufhebung der Selektion
- 11 = Hilfe
- 12 = Maßstabsdefinition
- 13 = Auswahlquerschnitt oder Aussagequerschnitt
- 14 = UTM-Koordinateneingabe zur Standortwahl
- 15 = Link auf den Leitfaden
- 16 = Abkürzungsverzeichnis
- 17 = Link auf das Impressum

Abbildung 3: „Werkzeugleiste“ mit Erläuterungen

■ **Werkzeug 1 – Übersichtskarte:**

Öffnet eine Übersichtskarte von Sachsen mit einem Kartenrahmen des aktuell verwendeten Kartenausschnittes aus dem Kartenfenster.

■ **Werkzeug 2 bis 7 – Werkzeuge zum Navigieren im Kartenfenster:**

- 2 Vergrößern des Maßstabes mit einem durch den Anwender aufziehbaren Ausschnitt auf der Karte
- 3 Verkleinern des Maßstabes mit einem durch den Anwender aufziehbaren Ausschnitt auf der Karte
- 4 Gesamtansicht Sachsen
- 5 den vorhergehenden Zoomausschnitt wiederherstellen
- 6 den nachfolgenden Zoomausschnitt wiederherstellen
- 7 Verschieben des Kartenausschnittes

■ **Werkzeug 8 – Informationsdialog (i-Button):**

Über das Werkzeug können Informationen zu dargestellten Features (Eigenschaften, Merkmale) eines in der Navigationsspalte markierten Layers (Schicht, Thema) angezeigt werden.

■ **Werkzeug 9 – Messen von Strecken und Flächen:**

Das Werkzeug ruft ein Menü auf, in dem ausgewählt werden kann, ob entweder Strecken (in km oder m) oder Flächen (in km² oder m²) bestimmt werden sollen. Durch anschließendes einfaches Anklicken des Anfangspunktes und Abfahren der zu messenden Strecke oder Umfahren der Fläche sowie abschließendes doppeltes Anklicken des jeweiligen Endpunktes wird das Ergebnis entweder als Längenangabe oder als Flächenangabe im Pop-up-Fenster angezeigt.

■ **Werkzeug 10 – Aufheben der Selektion:**

Aufhebung der Selektion in der Anwendung, d. h., Schließen der mit einem Werkzeug ausgewählten Anzeige in der Karte.

■ **Werkzeug 11 – Hilfe:**

Aufruf der Online-Hilfe.

■ **Werkzeug 12 – Maßstab:**

Dieses Werkzeug zeigt den gerade verwendeten Maßstab an. Darüber hinaus kann ein Maßstab eingegeben werden. Mit der Enter-Taste wird die Eingabe bestätigt und die Karte im eingestellten Maßstab dargestellt.

■ **Werkzeug 13 – Aussagequerschnitt festlegen:**

Durch einfaches Anklicken des Werkzeugs („Fähnchen-Symbol“) und einen anschließenden Klick auf einen interessierenden Gewässerquerschnitt (Auswahl- bzw. Aussagequerschnitt) eines im sächsischen Wasserlaufverzeichnis 2015 „betrachteten Gewässers“ werden für diesen in einem Pop-up-Fenster, dem Hauptdialog (Abbildung 4), die Durchflusskennwerte automatisch angezeigt. In der Karte sind die „betrachteten Gewässer“ durch dickere hellblaue oder verschiedenfarbig gestrichelte Linien gemäß der Legende des Themenkomplexes „MNQ, MQ, MHQ, HQ(T) (Stand: 2015)“ gekennzeichnet. Die für den Aussagequerschnitt angegebenen Durchflusskennwerte werden durch Interpolation über die Gewässerstrecke zwischen den Werten am Teilgebietszufluss und denen am -ausfluss ermittelt.

Stammdaten

Rechtswert: UTM Koordinate Streifen 33	464107
Hochwert: UTM Koordinate	5661015
Gewässername	Cunewalder Wasser
Gewässerkennzahl	58218
Gebietskennzahl	582189
Flussgebiet	Spree

Durchfluss m³/s	Durchflussspende l/(s·km²)	Geofaktoren	
	Auswahlquerschnitt	Zufluss	Ausfluss
MNQ	0,087	0,084	0,104
MNQ _{so}	0,094	0,092	0,112
MNQ _{wi}	0,113	0,11	0,136
MQ	0,25	0,242	0,31
MHQ	6,83	6,69	7,79
HQ ₂	6,23	6,1	7,1
HQ ₅	9,07	8,89	10,3
HQ ₁₀	11,7	11,5	13,3
HQ ₂₀	15,2	15	17,5

Drucken

Abbildung 4: Hauptdialog des Geoportals

Der Dialog der Webanwendung beinhaltet

- Stammdaten zum gewählten Aussagequerschnitt,
- die für den Zeitraum von 1952 bzw. Beobachtungsbeginn bis 2015 bestimmten vieljährigen mittleren Niedrigwasserdurchflüsse des Gesamtjahres, des Winter- und Sommerhalbjahres sowie die vieljährigen mittleren Durchflüsse in m³/s und die dazugehörigen vieljährigen mittleren Durchflussspenden in l/(s·km²) für den gewählten Aussagequerschnitt und die benachbarten Zu- und Ausflussquerschnitte des Teilgebietes, in dem sich der Auswahlquerschnitt befindet,
- die Hochwasserscheiteldurchflüsse mit Jährlichkeit in m³/s und die entsprechenden Durchflussspenden in l/(s·km²) jeweils für Jährlichkeiten von 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200 a am gewählten Aussagequerschnitt und an den benachbarten Zu- und Ausflussquerschnitten des Teilgebietes, in dem sich der Auswahlquerschnitt befindet,
- die auf aktueller Geodatengrundlage basierende Einzugsgebietsfläche in km² und mittlere Geländehöhe in m ü. HN für die Einzugsgebiete des Zu- und Ausflussquerschnittes des Teilgebiets, in dem der ausgewählte Gewässerquerschnitt liegt. Die Einzugsgebietsfläche des Aussagequerschnitts ist vereinfacht aus den Einzugsgebietsflächen des Zu- und Ausflussquerschnittes durch lineare Interpolation über die dazwischenliegende Gewässerstrecke bestimmt worden und darf deshalb nicht für andere Zwecke weiterverwendet werden.

Außerdem ist ein Ausdruck (Abbildung 5) möglich. Dieser kann mithilfe der Druckfunktion des Browsers ausgeführt werden.

MNQ, MQ, MHQ und HQ(T) 09/07/2018 15:9:1

>> <<

Stammdaten			
Rechtswert: UTM Koordinate Streifen 33		464107	
Hochwert: UTM Koordinate		5661015	
Gewässername		Cunewalder Wasser	
Gewässerkennzahl		58218	
Gebietskennzahl		582189	
Flussgebiet		Spree	
Durchfluss in m³/s			
	Auswahlquerschnitt	Zufluss	Ausfluss
MNQ	0,087	0,084	0,104
MNQ ₅₀	0,094	0,092	0,112
MNQ _{Wi}	0,113	0,11	0,136
MQ	0,25	0,242	0,31
MHQ	6,83	6,69	7,79
HQ ₂	6,23	6,1	7,1
HQ ₅	9,07	8,89	10,3
HQ ₁₀	11,7	11,5	13,3
HQ ₂₀	15,3	15	17,5
HQ ₂₅	16,7	16,4	19,1
HQ ₅₀	21,6	21,2	24,6
HQ ₁₀₀	27,7	27,2	31,6
HQ ₂₀₀	35,4	34,7	40,4

Abbildung 5: Druckansicht

In Einzelfällen öffnet sich vor dem Hauptdialog ein kleineres Fenster mit bestimmten Meldungen, die im Folgenden erklärt werden.

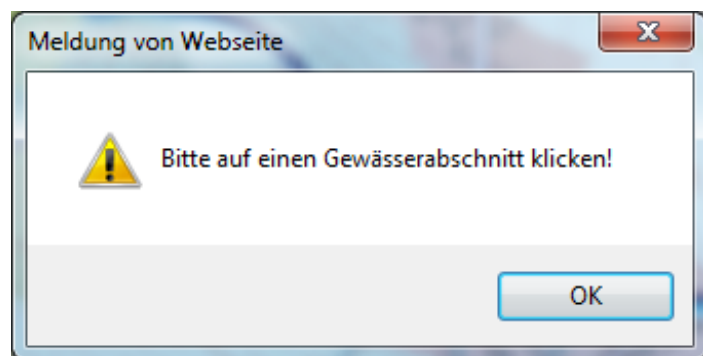


Abbildung 6: Meldung „Fehlclick“

Erscheint die Meldung gemäß Abbildung 6, wurde bei einem Abruf mit dem Werkzeug 13 („Fähnchen-Symbol“) die Spitze des Mauspfeiles nicht genau genug auf das hellblau oder gestrichelt dargestellte Gewässer (betrachtete Gewässer) gesetzt, sondern ein „Auswahlpunkt“ neben dem Gewässer angeklickt.

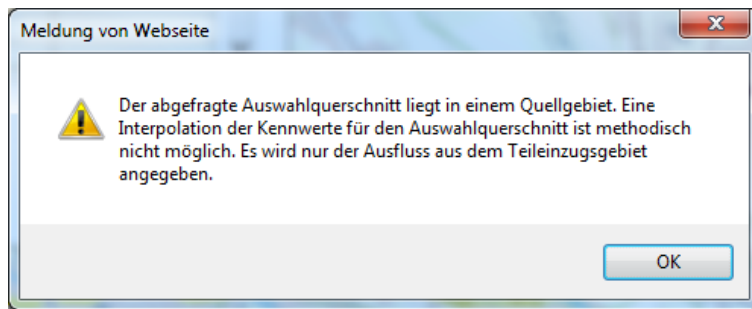


Abbildung 7: Meldung „Quellgebiet“

Eine Meldung gemäß Abbildung 7 besagt, dass der gewählte Aussagequerschnitt im Kopfgebiet bzw. obersten Teileinzugsgebiet eines Gewässers liegt und damit keinen Fließgewässerzufluss aus einem oberhalb gelegenen Teileinzugsgebiet hat. Diese Meldung erscheint auch bei denjenigen Gewässern, die als Zufluss zu einem Hauptgewässer nicht weiter unterteilt sind. Diese Teileinzugsgebiete werden in dieser Web-Anwendung als „Quellgebiete“ bezeichnet, obwohl sie mehrere km² groß sein können und nicht nur das eigentliche Quellgebiet (Grundwasseraustritt auf Geländeoberfläche) umfassen. Von den insgesamt 6358 Teileinzugsgebieten des Wasserlaufverzeichnisses (Stand 2015) sind davon 2891 betroffen. Für einen Gewässerquerschnitt innerhalb eines „Quellgebietes“ fehlen die für die Berechnung von Durchflusskennwerten erforderlichen Gebietskenngrößen. Aus diesem Grund kann nicht interpoliert werden. Für den gewünschten Aussagequerschnitt können demzufolge keine Durchflusskennwerte angegeben werden. Stattdessen werden die Kennwerte für den Ausflussquerschnitt des Kopfgebietes oder des Einzugsgebietes des nicht unterteilten Zuflusses angezeigt, der unterhalb des gewünschten Aussagequerschnittes liegt. Falls in der Nachbarschaft ähnlich beschaffene kleinere Einzugsgebiete mit Flächen in der Größe des Aussagequerschnittes ausgewiesen sind, können hilfsweise die dort abrufbaren Durchflusskennwerte für weitere Plausibilitätsuntersuchungen genutzt werden.

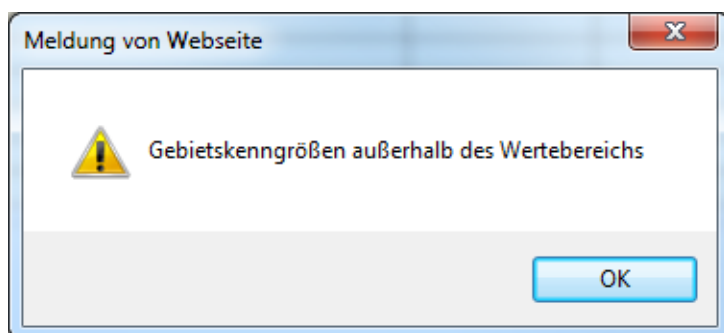


Abbildung 8: Meldung „Gebietskenngrößen liegen außerhalb des Wertebereiches“

Die in Abbildung 8 dargestellte Meldung bezieht sich ausschließlich auf die Hochwasserdurchflusskennwerte und nicht auf die zur MNQ- und MQ-Bestimmung. Die Meldung erscheint bei 1569 der 9825 Zu- und Ausflussquerschnitte der Teileinzugsgebiete, wenn einzelne Gebietskenngrößen, die in die Regressionsanalyse der MHQ (siehe Anhang A 3) eingingen, außerhalb des Wertebereiches der für die zugrunde liegenden Pegel bestimmten Gebietskenngrößen liegen (siehe auch Abschnitt 2.4). Der Hintergrund dieser Warnung besteht darin, dass sich bei der Anwendung der Regressionsmodelle die Wahrscheinlichkeit für nicht plausible Ergebnisse erhöht. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn eine Gebietskenngröße des unbeobachteten Gebietes um mehr als 10 % von den für die Pegelbezugsgebiete der jeweiligen Region bestimmten Minima und Maxima abweicht. Sind in der unmittelbaren Umgebung ähnlich beschaffene Einzugsgebiete mit Flächengrößen des Aussagequerschnitts ausgewiesen, können mit deren Hochwasserdurchflusskennwerten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Falls für den Aussagequerschnitt anthropogene Beeinflussungen durch Anlagen der LTV vorliegen oder Rückstau-einfluss besteht, wird durch eine besondere Markierung (gestrichelte Linie) des beeinflussten Gewässerabschnitts in der Karte und entsprechenden Meldungen nach Abbildung 9 bis Abbildung 12 darauf hingewiesen. In diesen Fällen müssen derzeit die HQ_T , aber auch die im Hauptdialog mit Werten ausgewiesenen MNQ und MQ, bei der LTV, Referat 21 (Wassermenge, TS-Meldezentrale), erfragt werden. Schrittweise werden auch diese Werte in der Web-Anwendung veröffentlicht.

Folgende Beeinflussungen werden ausgewiesen:

- Stauanlageneinfluss (Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken)/Datenabfrage bei Landestalsperrenverwaltung – Abbildung 9
- Umfluteinfluss (Hochflutbetten und Umfluter)/Datenabfrage bei LTV – Abbildung 10
- Rückstau-einfluss (Mündungsabschnitt der Nebengewässer) – Abbildung 11

Falls die Stau- und/oder Umflutanlagen nicht in der Unterhaltungslast der LTV liegen, wie z. B. Mühlgräben, Kunstgräben, Fischteiche mit regelbaren Zu- und Abläufen, sind die betroffenen Gewässerabschnitte in der interaktiven Karte nicht mit einem Hinweis zu Stauanlagen- oder Umfluteinfluss gekennzeichnet. Ebenso erscheint bei ihnen keine derartige „Meldung von Webseite“ wie in Abbildung 9 und Abbildung 10. Im Hauptdialog werden für das Hauptgewässer die berechneten Durchflussskennwerte für den Talquerschnitt ausgewiesen. Welcher Anteil hiervon durch einen bestehenden Umfluter fließt und welcher im Hauptgewässer verbleibt, muss bei der unteren Wasserbehörde erfragt werden. Hinweise auf mögliche Umfluten geben die in der interaktiven Karte angezeigten Querbauwerke, zu denen über die Untertitel in der Legende und der Informationstabelle (Werkzeug 8) nähere Informationen abrufbar sind.

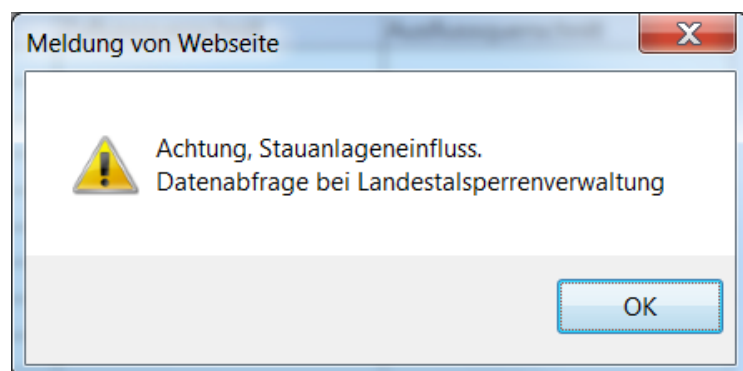


Abbildung 9: Meldung „Stauanlageneinfluss“

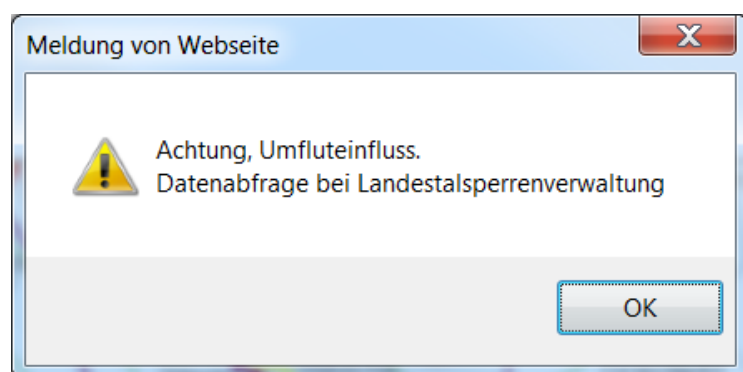


Abbildung 10: Meldung „Umfluteinfluss“

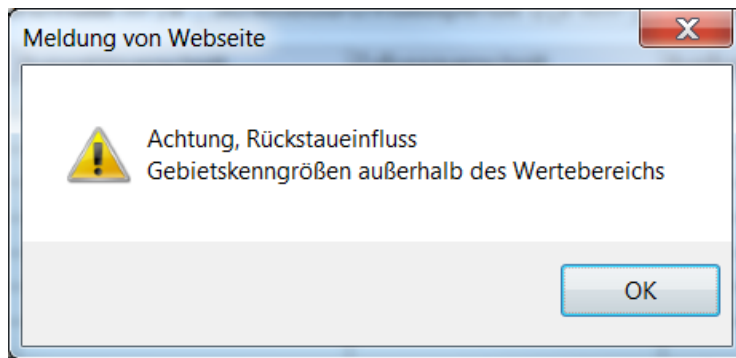


Abbildung 11: Meldung „Rückstau einfluss“

Zusätzlich wird auch im Hauptdialog auf die Art der Beeinflussung hingewiesen, wie in Abbildung 12 im unten stehenden Hinweisfeld neben dem Button „Drucken“ dargestellt.

MNQ, MQ, MHQ und HQ(T)

Stammdaten

Rechtswert: UTM Koordinate Streifen 33	382228
Hochwert: UTM Koordinate	5620941
Gewässername	Haselbach
Gewässerkennzahl	54268726
Gebietskennzahl	5426872619
Flussgebiet	Freiberger Mulde

Durchfluss m³/s

Durchflussspende l/(s·km²)

Geofaktoren

	Auswahlquerschnitt	Zufluss	Ausfluss
MNQ	0,022	0,021	0,022
MNQ _{so}	0,024	0,023	0,025
MNQ _{wt}	0,028	0,027	0,029
MQ	0,074	0,070	0,077
MHQ	1,68	1,6	1,73
HQ ₂	1,43	1,36	1,48
HQ ₅	2,12	2,02	2,19
HQ ₁₀	2,82	2,68	2,9
HQ ₂₅	2,96	2,67	2,97

Drucken

Achtung, Stauanlage(n)

Abbildung 12: Hauptdialog mit Hinweis auf Beeinflussung

Für eine Reihe größerer Flüsse mit mindestens zwei Pegeln wurden statt der Anwendung des Vorzugsverfahrens Längsschnitte der Durchflusskennwerte erstellt. Beim länderübergreifend abgestimmten Längsschnitt der Elbe gibt es für MHQ und HQ₂₅ keine Werte, weshalb dort im Hauptdialog als Wert „NaN“ („Not a Number“ = „keine Zahl“) angezeigt wird (Abbildung 13).

MNQ, MQ, MHQ und HQ(T) ✕

Stammdaten

Rechtswert: UTM Koordinate Streifen 33	397673
Hochwert: UTM Koordinate	5664616
Gewässername	Elbe, Labe
Gewässerkennzahl	5
Gebietskennzahl	5373175
Flussgebiet	Elbezuflüsse

Durchfluss m³/s

Durchflussspende l/(s·km²)

Geofaktoren

MQ	338	338	338
MHQ	NaN	NaN	NaN
HQ ₂	1580	1580	1580
HQ ₅	2110	2110	2110
HQ ₁₀	2520	2520	2520
HQ ₂₀	3000	3000	3000
HQ ₂₅	NaN	NaN	NaN
HQ ₅₀	3690	3690	3690
HQ ₁₀₀	4260	4260	4260
HQ ₂₀₀	4860	4860	4860

Drucken

Abbildung 13: Hauptdialog mit fehlenden MHQ- und HQ₂₅-Werten für die Elbe

Bei einigen Einzugsgebieten gibt es in den Mündungsbereichen Digitalisierungsungenauigkeiten zwischen Gewässer- und Verlauf des Nebengewässers und dessen (Teil-)Einzugsgebietsgrenze. Die Abbildung 14 und die Abbildung 15 verdeutlichen einen solchen Sachverhalt am Beispiel des Wolfsggrabens, einem Zufluss zur Elbe. Wählt der Anwender einen Querschnitt aus, der auf der virtuell verlängerten Gewässerachse des Wolfsggrabens unterhalb dessen Mündungsquerschnitt (= Elbufer) im Gewässerbett der Elbe liegt (Abbildung 14), werden keine Werte angezeigt, jedoch der für diesen Aussagequerschnitt gültige Gewässername „Elbe“ mit den zugehörigen Stammdaten. Abbildung 15 stellt die korrekten Durchflusskennwerte für den Ausfluss des Wolfsggrabens dar.

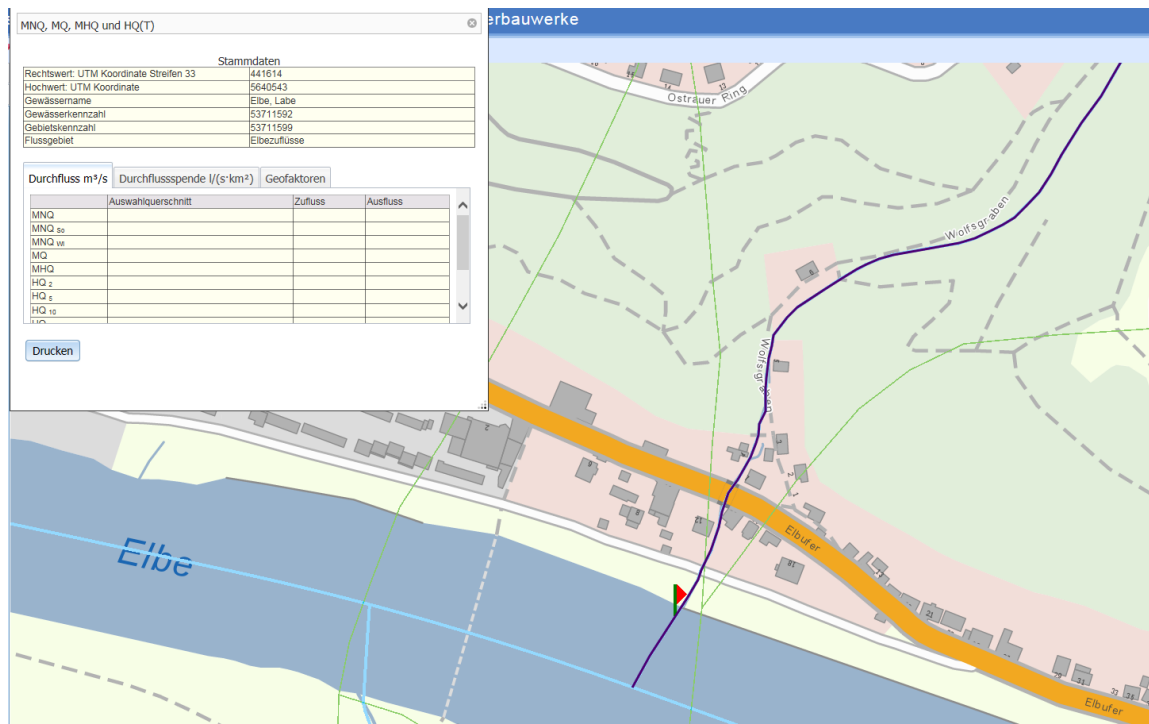


Abbildung 14: Hauptdialog mit fehlenden Werten im Mündungsbereich des Wolfsgrabens

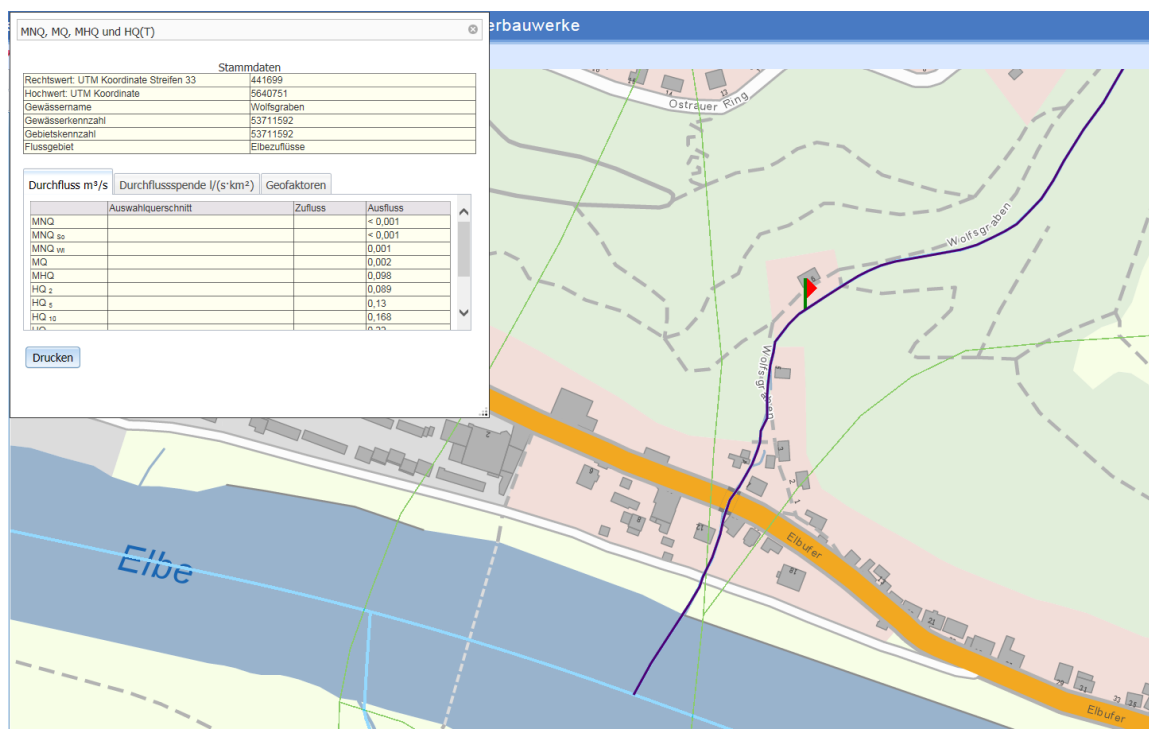


Abbildung 15: Hauptdialog mit Werten für den Wolfsgraben

■ Werkzeug 14 – UTM-Koordinateneingabe zur Standortwahl:

Eingabe bekannter UTM-Koordinaten eines Punktojektes oder Aussagequerschnitts zur automatischen Suche des betreffenden Standortes in der interaktiven Karte.

■ Werkzeug 15 – Leitfaden:

Link auf den „Leitfaden Durchflusskennwerte und Querbauwerke“.

■ Werkzeug 16 – Abkürzung:

Aufruf des Verzeichnisses der verwendeten Abkürzungen, Symbole und Formelzeichen.

■ Werkzeug 17 – Impressum:

Link auf das Impressum (<http://www.smul.sachsen.de/impressum/>).

Die übrigen Fenster beinhalten:

■ Navigationsbereich:

Das Fenster „Navigationsbereich“ kann individuell eingeklappt werden. Es beinhaltet die Funktionsbereiche Legende, Hintergrundkarten und Navigation mit zugeordneten Funktionen. Wird ein Funktionsbereich aktiviert, so wird der aktuell geöffnete Funktionsbereich eingeklappt und der aktivierte aufgeklappt, sodass die Funktionen darunter sichtbar werden (Abbildung 16).

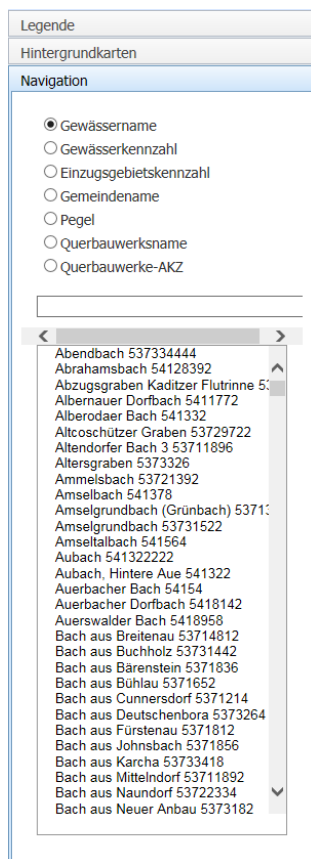


Abbildung 16: Fensterbereich Navigation

■ Navigation, Funktionsbereich „Legende“:

Anzeige, der in die Applikation als ArcGIS-Server-Dienst integrierten Themen: Die Anzeige beinhaltet die Funktionen Ein- und Ausblenden der Legende, An- und Ausschalten der Themen in der Karte, Markieren eines Themas.

Die Themen werden maßstabsabhängig im Koordinatenreferenzsystem UTM ETRS89 dargestellt. Themen, die in dem gerade verwendeten Maßstabsbereich nicht angezeigt werden, erscheinen in der Legende ausgegraut. Alle Themen sind in die zwei Gruppen-Layer „MNQ, MQ, MHQ, HQ(T) – Datenstand 2015“ und „Querbauwerke (QBW)“ eingeordnet. Die Basis der dargestellten Themen bildet ein entsprechend vorgefertigtes Kartendokument (MXD-Datei). Die Themen aus der MXD-Datei werden in der Applikation einerseits angezeigt und andererseits durch die Applikation ausgewertet. Mit diesen Themen werden die Suche und die Abfragen realisiert. Die Themen werden durch das LfULG kartographisch aufgearbeitet und bereitgestellt.

■ **Navigation, Funktionsbereich „Hintergrundkarten“:**

Die Anzeige der in die Applikation als WMS-Dienst integrierten Themen basiert auf dem Kartendienst des Staatsbetriebes Geobasisinformation und Vermessung Sachsen WebAtlasSN und wird aus zwei Grundlagendiensten,

- den Digitalen Landschaftsmodellen und
- den Hauskoordinaten aus dem Liegenschaftskataster,

zur Darstellung der Topographie des Freistaates Sachsen bereitgestellt. Die Aktualisierung des Kartendienstes erfolgt ständig. Die dort enthaltenen Gewässer sind für den Fall deren zeitweisen Trockenfallens gestrichelt dargestellt; verrohrte Abschnitte bleiben unsichtbar.

■ **Navigation, Funktionsbereich „Navigation“:**

In der Applikation wird zur schnelleren Navigation zum gesuchten Gewässerquerschnitt die Suche nach Gewässernamen, Gewässerkennzahlen, Einzugsgebietskennzahlen, Gemeindenamen, Pegeln, Querbauwerksnamen und Anlagekennzahlen der Querbauwerke unterstützt. Nach Eingabe von Buchstaben wird die Liste der Gewässernamen bzw. nach Eingabe von Zahlen die Liste der Gebiets- oder Gewässerkennzahlen eingeschränkt. Die Treffer werden in der Liste angezeigt, aus welcher der Anwender auswählen kann.

■ **Kartenfenster:**

Der Inhalt des Fensterbereiches „Kartenfenster“ wird durch eine MXD-Datei bereitgestellt. Die Darstellungseigenschaften der Themen und Attribute werden darin definiert und bei Abfragen zur Webapplikation transferiert. Eine Harmonisierung der Daten für das Geoportal ist damit gegeben.

■ **Administrierungskomponenten:**

Das Geoportal für die Anwendung verfügt über zwei Administrationsbereiche. Der GIS-Administrationsbereich umfasst die MXD-Datei für die kartographische Gestaltung der Basisanwendung. Der JavaScript-Administrationsbereich enthält alle weiteren notwendigen Angaben für das Portal, die in einer JavaScript Steuerdatei gespeichert werden.

2.2 Allgemeine Hinweise zur Verwendung der abgerufenen Durchflussskennwerte

Grundlage der Regionalisierungen bildeten generell nutzungsunbereinigte und zum Teil quasinatürliche Durchflüsse der gewässerkundlichen Pegel. Vor Weiterverwendung der im Hauptdialog angegebenen Durchflussskennwerte in der Praxis ist es erforderlich, einerseits regionale oder lokale Einflussgrößen auf das Durchflussgeschehen in den Gewässern noch konkreter zu erfassen bzw. deren Auswirkungen näher zu prüfen und andererseits auch methodische Aspekte der angewandten Regionalisierungsverfahren angemessen zu berücksichtigen. Nachfolgend werden Kriterien und entsprechende Erläuterungen aufgezeigt, in welchen Fällen die aus der Web-Anwendung

abgerufenen Durchflusskennwerte nicht direkt oder nur eingeschränkt weiterverwendet werden dürfen und was bei ihrer Nutzung zu beachten ist.

Zur Berücksichtigung spezifischer regionaler oder lokaler Gegebenheiten auf das Durchflussgeschehen ist zu prüfen, inwieweit für den betrachtungsrelevanten Gewässerabschnitt Beeinflussungen bestehen. Beispielsweise wird durch die Bewirtschaftung von Stauanlagen mit relativ großen Hochwasserrückhalteräumen das Durchflussverhalten im Unterlauf in allen Durchflussbereichen wesentlich verändert. Wie weit die jeweiligen Beeinflussungen durch Talsperren reichen, ist sehr unterschiedlich und hängt vor allem vom zur Verfügung stehenden Hochwasserrückhalteraum, ihren Bewirtschaftungsregeln, der Einzugsgebietsgliederung und der Niederschlagscharakteristik ab.

Die Berechnung der Durchflusskennwerte mittels Gebietskenngrößen erfolgte nur für die Zufluss- und Ausflussquerschnitte der Teilgebiete. Die zwischen diesen beiden Querschnitten vorgenommene Interpolation von deren Einzugsgebietsflächen A_E über die zugehörige Wasserlauflänge stellt nur eine grobe Näherung zur Bestimmung der A_E des Aussagequerschnitts dar, weshalb diese für andere Zwecke nicht zu verwenden ist. Auch gelten die Durchflusskennwerte nur für das hellblau hervorgehobene Hauptgewässer des entsprechenden Teilgebietes. Dünn und dunkelblau gezeichnete Nebengewässerabschnitte innerhalb dieses Teilgebietes werden nicht betrachtet.

2.3 Verwendung abgerufener Niedrig- und Mittelwasserdurchflusskennwerte

Bestehende Gewässerbenutzungen können die Durchflusskennwerte derart verändern, dass die tatsächlichen Durchflussbedingungen im jeweiligen Gewässerabschnitt deutliche Abweichungen vom quasinatürlichen Zustand aufweisen. Aber auch hydrogeologisch begründete Versickerungen aus den Fließgewässern über Strecken bis etwa 50 km Länge in Sachsen können zeitweise die Durchflüsse im Gewässerverlauf verringern. Im Zuge der Regionalisierung sind solche Erscheinungen nicht spezifisch erfassbar. Wegen fehlender Pegel mit vieljährigen Beobachtungsreihen an den kleineren Tieflandgewässern kann die hier mit einer mittleren Niedrigwasserdurchflussspende $MNq = 0,3 \text{ l/s} \cdot \text{km}^2$ festgelegte Untergrenze in der Wirklichkeit unterschritten werden.

Dies alles kann dazu führen, dass die abgerufenen regionalisierten Niedrig- und Mittelwasserdurchflusskennwerte oftmals nicht die realen Durchflüsse am Standort abbilden können. Demzufolge können diese Durchflusskennwerte nicht direkt im Rahmen von wasser- und fischereirechtlichen Vollzugsverfahren verwendet werden, sondern erst nach zusätzlich erfolgter Überprüfung auf potenzielle Einflüsse und deren Auswirkungen auf den Durchfluss.

Die im Hauptdialog aufgeführten Niedrig- und Mittelwasserdurchflusskennwerte sind mit den spezifischen lokalen Rahmenbedingungen des benutzungsrelevanten Gewässerabschnittes zu vergleichen. Konkret zu beachten sind z. B. bereits bestehende Gewässerbenutzungen, wie erhebliche Wasserentnahmen bzw. Wassereinleitungen durch Industrie, Gewerbe und Bergbau sowie öffentliche Wasserversorgung bzw. Abwasserentsorgung, Durchflussregulierungen durch Stauanlagen, sonstige Querbauwerke oder anderweitige mögliche erhebliche Beeinträchtigungen des natürlichen Durchflusses (z. B. infolge Fischteichbewirtschaftung im Einzugsgebiet).

Mittlere Niedrigwasser- und Mittelwasserdurchflüsse an den gewässerkundlichen Pegeln des staatlichen Messnetzes sind im Teil 3 des hydrologischen Handbuches zu finden unter:

<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13700>.

Standortinformationen können u. a. zentralen Datenregistern wie dem „Digitalem Wasserbuch“ entnommen werden. Auch die Fotodokumentation zur ökologischen Strukturkartierung der Fließgewässer des sächsischen WRRL-Berichtsgewässernetzes kann diesbezüglich wichtige gewässerabschnittskonkrete Anhaltspunkte liefern, siehe unter <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/8584.htm#article8881>. Aber auch spezielle Ortskenntnisse, Erfahrungen zum Gebiet oder sonstige gewässer- bzw. gebietsbezogene Dokumentationen sollten im Rahmen der Überprüfungen möglicher Einflussfaktoren auf die Durchflusskennwerte mit zugrunde gelegt werden.

Je nach Fischregion sind die MNQ_{Som} oder MNQ_{Win} nicht alleinige Größen zur Bestimmung der Mindestwasserführung nach § 33 WHG mittels des ökohydrologischen Ansatzes (LAWA 2001). Zweites Kriterium bei deren Festlegung ist die von der Fischregion abhängige Mindestwassertiefe in der Ausleitungsstrecke bzw. unterhalb der Entnahme- oder Ableitungsstelle, die eventuell höhere Durchflüsse als die jeweiligen Halbjahres-MNQ erfordert.

2.4 Verwendung abgerufener Hochwasserdurchflusskennwerte MHQ und HQ_T

Von der LTV wurden in Zusammenarbeit mit dem LfULG Gewässerabschnitte unterhalb von Stauanlagen identifiziert, die maßgeblich von landeseigenen Talsperren insbesondere bezüglich der HQT beeinflusst sind. Für derartig beeinflusste Abschnitte werden gesonderte Gutachten durch die LTV erstellt, wobei für die Zuläufe der geplanten und bestehenden Stauanlagen in der Regel nicht mit den Regionalisierungsergebnissen gerechnet wurde, sondern u. a. die Ergebnisse von Niederschlags-Abfluss-Modellierungen mit entsprechenden Sicherheitszuschlägen berücksichtigt und ausgewiesen wurden. Begründet ist dies mit der herausgehobenen wasserwirtschaftlichen Bedeutung der Talsperren, Hochwasserrückhaltebecken und Speicher. Diese Vorgehensweise führt in der Regel zu unterschiedlichen HQ_T -Werten gleicher Jährlichkeit. Die Gutachtenwerte der LTV werden derzeit in der Web-Anwendung nur teilweise ausgewiesen und müssen gegebenenfalls direkt im dortigen Referat 21, abgefragt werden.

Nicht explizit betrachtet wurde der Einfluss sonstiger Stauanlagen von Dritten außerhalb des Zuständigkeitsbereiches der LTV. Da deren Hochwasserrückhalteräume in der Regel unbedeutend sind, können diese im Allgemeinen unberücksichtigt bleiben. Trotzdem wird eine vorherige Prüfung empfohlen.

Darüber hinaus wurden Gewässerabschnitte ausgewiesen, die durch landeseigene Umfluter und Hochflutbetten sowie Rückstau derartig beeinflusst sind, dass die Verwendung der regionalisierten quasinatürlichen MHQ und HQ_T , aber auch der MNQ und MQ , allein für das namensgebende Hauptgewässer in diesen Abschnitten nicht zulässig ist. Durch entsprechende Meldungen in der Web-Anwendung wird auf den jeweiligen Umflut- bzw. Rückstau einfluss hingewiesen.

Das Vorzugsverfahren ist nicht geeignet, die wegen vorhandener Retentionseffekte entlang von Flüssen und Bächen teilweise zurückgehenden Hochwasserscheiteldurchflüsse zu berücksichtigen, sondern hält sie in diesem Fall bis zur Mündung auf dem Niveau der im Längsschnitt höchsten berechneten HQ_T . Ausnahmen hiervon werden bei den für die größeren Flüsse erstellten HQ_T -Längsschnitten gemacht.

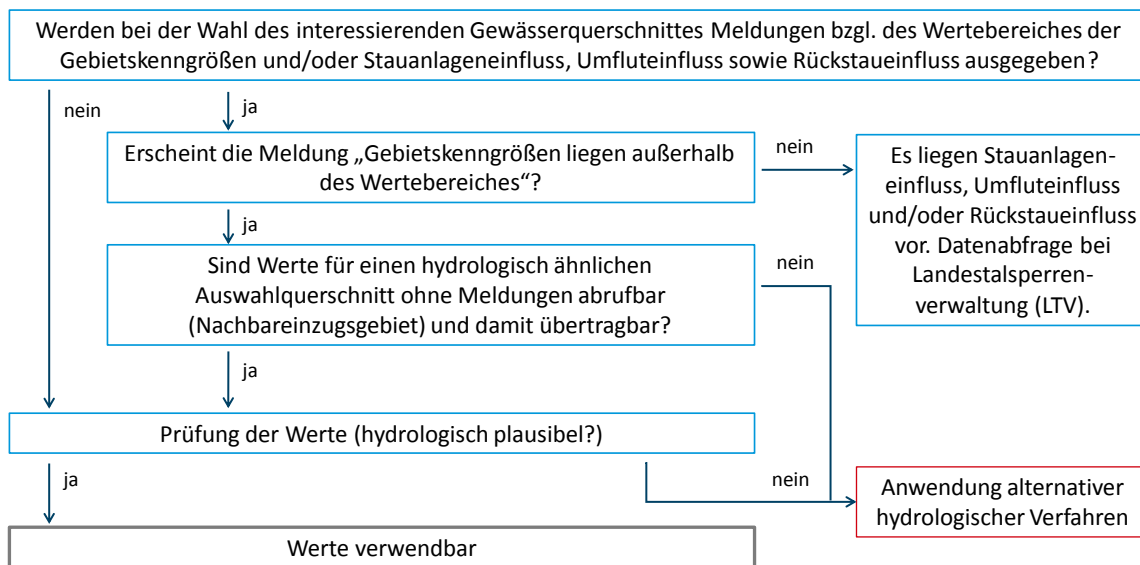
Auch ist bei den Gebieten mit hohem Seen- und Teichanteil (z. B. Lausitzer Seenkette im ehemaligen Braunkohlentagebaug Gebiet, Oberlausitzer Heide- und Teichlandschaft und Leipziger Neuseenland) eine Anwendung des Vorzugsverfahrens nur eingeschränkt bzw. gar nicht möglich. Hier wurden und werden durch die LTV mittels Niederschlag-Abfluss-Modellen und hydraulischen Berechnungen Gutachten erstellt, deren Ergebnisse schrittweise in

die Datenbank integriert werden. Eine weitere Ausnahme stellt das Gebiet der sich in Betrieb befindenden Tagebaue Nochten und Reichwalde im Lausitzer Braunkohlenrevier dar, das sich herkömmlichen Regionalisierungs- und Berechnungsansätzen insgesamt verschließt.

Im Folgenden wird erläutert,

- unter welchen Randbedingungen abgerufene MHQ und HQ_T -Werte verwendet werden können und wie deren Plausibilisierung durchzuführen ist,
- wann abgerufene MHQ und HQ_T -Werte nicht verwendet werden dürfen und alternative hydrologische Verfahren zur Ermittlung von Hochwasserscheiteldurchflüssen angewendet werden müssen.

Dazu veranschaulicht Abbildung 17 einen Workflow, wie nach der Wahl des interessierenden Gewässerquerschnittes vorgegangen werden sollte:



© DHI-WASY

Abbildung 17: Workflow zur Verwendung abgerufener Hochwasserdurchflusskennwerte

So können die im Hauptdialog angezeigten MHQ und HQ_T -Werte (Abbildung 4) verwendet werden, wenn durch die Web-Anwendung keine gegenteiligen Meldungen erfolgen und keine lokalen Einflüsse, z. B. Umfluten oder Flutungspolder, wirksam sind.

Eine mögliche Meldung besagt, dass die „Gebietskenngrößen bei der HQ_T -Berechnung außerhalb des Wertebereiches“ liegen (vgl. Abschnitt 2.1, Abbildung 8). Hintergrund hierfür ist die Festlegung, dass die Gebietskenngrößen nicht mehr als $\pm 10\%$ von der größten und kleinsten Gebietskenngröße abweichen dürfen, die für die verwendeten Pegel der jeweiligen Region bestimmt worden sind. Zum Beispiel ist das kleinste Pegel Einzugsgebiet der nördlichen Region nur $2,95 \text{ km}^2$ groß, so dass sich bei 10% Abzug eine Einzugsgebietsfläche A_E von $2,66 \text{ km}^2$ ergibt. Die ausgegebene Meldung bedeutet, dass nicht garantiert werden kann, dass die angewendete Methodik der Regionalisierung für einen Querschnitt mit A_E unter $2,66 \text{ km}^2$ plausible MHQ und HQ_T liefert, sondern diese lediglich als Orientierungswerte genutzt werden können. Ist eine andere Gebietskenngröße dafür verantwortlich, dass die „Wertebereichs-Meldung“ erscheint und damit die angezeigten Werte für den ausgewählten Querschnitt nicht un-

bedingt plausibel sind, sollte die Übertragung von einem hydrologisch ähnlichen Auswahlquerschnitt in Betracht gezogen werden. Voraussetzung für eine solche Übertragung ist zum einen die hydrologische Vergleichbarkeit der Gebietseigenschaften, vor allem der Größe des Einzugsgebietes am Auswahlquerschnitt. Andererseits muss die Selektion des Querschnittes im Nachbareinzugsgebiet ohne Meldungen durch die Web-Anwendung möglich sein, d. h., dass die Gebietskenngrößen für diesen Nachbarquerschnitt innerhalb des Wertebereiches liegen und auch keine anthropogenen Beeinflussungen existieren. Liefert die Web-Anwendung für den benachbarten Querschnitt und für den zu untersuchenden Querschnitt ähnliche Werte, sind letztere für den Auswahlquerschnitt verwendbar. Ergeben sich signifikante Abweichungen zwischen den Werten für den benachbarten Querschnitt und für den zu untersuchenden Querschnitt oder kann kein ähnlicher Querschnitt gefunden werden, müssen alternative hydrologische Berechnungsverfahren nach DWA-M 552, z. B. ein hydrologisches Gutachten auf Basis eines Niederschlags-Abfluss-Modells, angewendet werden, um Hochwasserscheiteldurchflüsse mit Jährlichkeit HQ_T für den zu untersuchenden Querschnitt zu ermitteln.

Eine weitere Meldung durch die Web-Anwendung weist darauf hin, dass für den zu untersuchenden Querschnitt anthropogene und/oder weitere Beeinflussungen vorliegen (vgl. Abschnitt 2.1). Das bedeutet, dass das Durchflussregime des Querschnittes entweder durch Stauanlagen (Talsperren, Speicher, Hochwasserrückhaltebecken) und/oder Umfluten verändert wird und damit vom quasinatürlichen Zustand abweicht. Bei Rückstau einfluss im Mündungsbereich eines Nebengewässers sind die für dieses Nebengewässer ermittelten HQ_T -Werte nicht für die hydraulische Berechnung der zugehörigen Hochwasserstände bzw. die Bemessung von Anlagen geeignet, da die Hochwasserscheiteldurchflüsse des Hauptgewässers und die damit am Mündungsquerschnitt berechneten Hochwasserstände maßgeblich für die hydraulisch berechneten Hochwasserstände (Staulinienberechnung) im Mündungsbereich sind. Bei entsprechendem Hinweis ist in diesen Fällen bei der LTV nachzufragen, um die Beeinflussungen der Hochwasserstände im Nebengewässer fachgerecht zu berücksichtigen.

Soweit neu ausgewiesene HQ_T aufgrund der insbesondere durch die großen bis extremen Hochwasser 2002, 2010 und 2013 vergrößerten HQ_T an den Pegeln und durch veränderte Regionalisierungsverfahren um mehr als 40 % von den bisher für den Gewässerquerschnitt angegebenen HQ_T abweichen, kann eine Plausibilitätsprüfung durch einen hydrologisch geschulten Anwender mit spezifischen Ortskenntnissen erforderlich sein. Hierzu sollten die HQ_T mit denen benachbarter Einzugsgebiete ähnlicher Größe und Gebietseigenschaften verglichen werden. Falls die HQ_T ähnlich groß sind, kann davon ausgegangen werden, dass sie sich auch regional und nicht nur lokal verändert haben, und insofern plausibel sind. Des Weiteren sollte die Häufigkeit der seit ca. 1980 beobachteten Ausuferungen (ohne die durch lokale Versetzungen bedingten) mit der Jährlichkeit T der zum bordvollen Durchfluss (Ausuferungsbeginn) gehörigen HQ_T verglichen werden. Auch sollten die Häufigkeit der beobachteten Hochwasserstände und Einstaue an Brücken und Durchlässen zum Vergleich herangezogen werden, wobei hierzu die den hydraulischen Wasserstandsberechnungen zu Grunde liegenden HQ zu nutzen sind. Stimmen die örtlichen Beobachtungen besser mit den neu ausgewiesenen HQ_T überein, sind diese als plausibel anzusehen und weiter zu verwenden.

3 Recherche – Verknüpfungen mit der Querbauwerksdatenbank

Der Anwender kann im Rahmen der Web-Anwendung auch Informationen zur Durchgängigkeit der Gewässer aus der sächsischen Querbauwerksdatenbank abfragen.

Im hierfür im Funktionsbereich „Legende“ eingerichteten Gruppen-Thema „Querbauwerke (QBW)“ sind folgende ausgewählte Daten der Querbauwerksdatenbank zur Informationsabfrage integriert:

- Durchgängigkeit der QBW
- Funktionsstatus der Fischaufstiege
- Funktionsstatus der Fischabstiege
- Betriebszustand WKA
- Querbauwerk nicht mehr vorhanden
- Gewässernetz LfULG (Arbeitsstand)

Fallbeispiel: Abfrage von Querbauwerksinformationen für Sohlschwelle Sportplatz Großschweidnitz

Im Fensterbereich „Navigation“ (Abbildung 18) wurde das Querbauwerk „Sohlschwelle Sportplatz Großschweidnitz“ fiktiv ausgewählt. Das Querbauwerk wird durch einen Kreis im Kartenfenster markiert. Informationen zum Querbauwerk können abgefragt werden, indem unter „Legende“ des Navigationsbereiches das gewünschte Thema (z. B. Durchgängigkeit der QBW) durch Anklicken markiert und der Infobutton (Werkzeug 8) angeklickt wird. Danach ist das Querbauwerk zu selektieren, für das Angaben, z. B. über Passierbarkeit und Art der Querverbauung, abgefragt werden sollen. Es erscheint das Fenster mit den entsprechenden Objektinformationen (Abbildung 18).

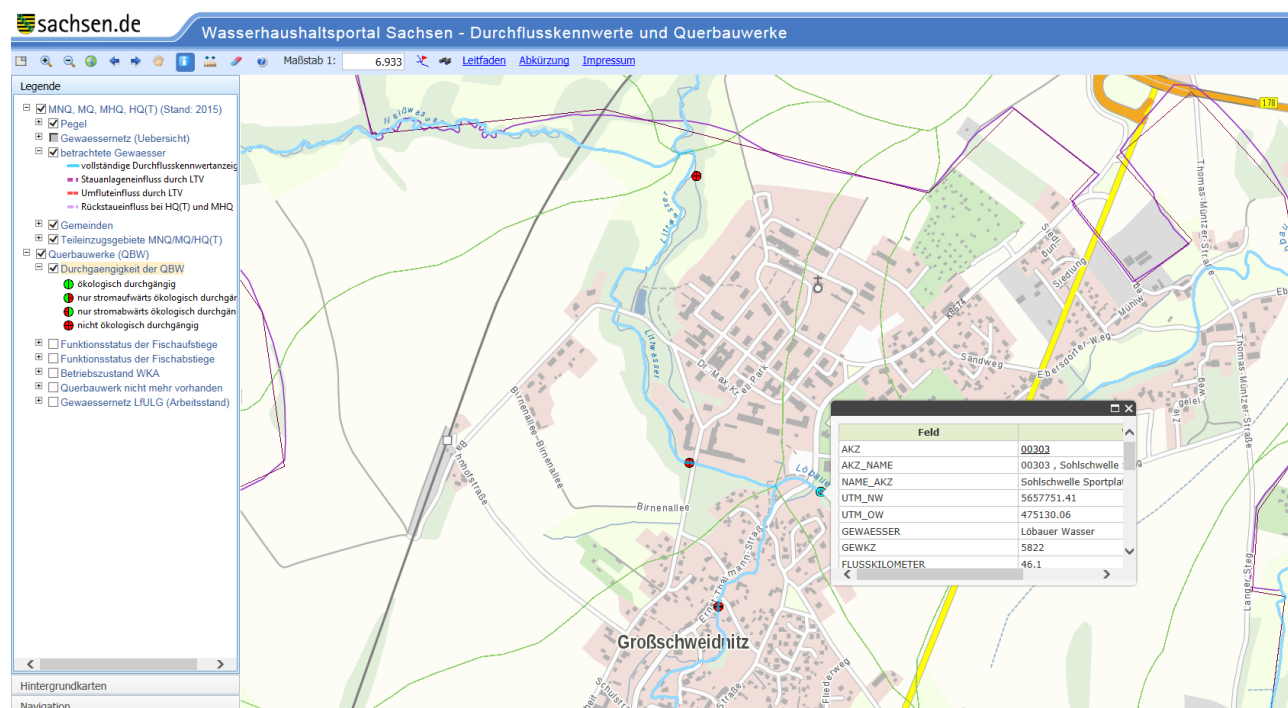


Abbildung 18: Abfrage von Querbauwerksinformationen

Hierbei werden die laufend durch den Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen aktualisierten Karten direkt in den unter der Bezeichnung „Gewässernetz LfULG (Arbeitsstand)“ stehenden Layer übernommen. Das differenzierte, abfragbare Gewässernetz umfasst außer den im Wasserlaufverzeichnis 2015 enthaltenen Gewässern, die unter dem Gruppenlayer „MNQ, MQ, MHQ, HQ(T) (Stand 2015)“ als „betrachtete Gewässer“ geführt werden, viele weitere, meist kleine, teilweise verrohrte, in ihrem Verlauf nicht richtig wiedergegebene oder verfüllte Fließgewässer, die beim Anklicken des „Gewässernetz LfULG (Arbeitsstand)“ durch dünne blaue Linien sichtbar werden. Dabei ist zu beachten, dass es sich hierbei nicht immer um Gewässer gemäß § 1 SächsWG handelt. Dieses Gewässernetz dient vorrangig der Ermittlung der Gebietskennzahl (GEBKZ) bei Neuaufnahme eines Querbauwerkes in der Querbauwerksdatenbank. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass nicht alle angegebenen Gewässernamen endgültig sind und sich auch einige Gebietskennzahlen wegen verlegter oder nicht mehr vorhandener Gewässer ändern können. Aus der Querbauwerksdatenbank werden die UTM-Koordinaten an die Web-Anwendung „Durchflussskennwerte und Querbauwerke“ übergeben. Über den angezeigten Koordinatenpunkt kann der Nutzer die richtige Lage der Koordinaten des Querbauwerks prüfen und über das Werkzeug „Identifizieren“ (Informationsdialog bzw. i-Button) im Thema „Gewässernetz“ die zugehörige Gebietskennzahl kopieren und in der Querbauwerksdatenbank ergänzen.

Anhang A 1 Regionalisierung von Niedrigwasserdurchflusskennwerten

A 1.1 Durchflussdaten zur Bestimmung von Niedrigwasserdurchflusskennwerten

Eine Grundlage für die Regionalisierung von Niedrigwasserdurchflüssen durch die DHI WASY GmbH bilden beobachtete Durchflussdaten hydrologischer Pegel von Fließgewässern in Sachsen. Vom LfULG wurden dafür 114 Pegel zur Verfügung gestellt, die bereits für eine DIFGA-Analyse im Rahmen des KliWES-Teilprojektes „Säule A“ verwendet wurden (SCHWARZE ET AL. 2012). Diese Pegelreihen wurden bereits auf Fehler überprüft und Lücken darin geschlossen.

A 1.1.1 Verlängerung der Pegel-Beobachtungsreihen

Die vorhandenen Durchflussdatenreihen lieferten Beobachtungswerte längstens bis zum Jahr 2005. Zur Erweiterung der Datenbasis wurde geprüft, inwiefern die Beobachtungsreihen der 114 Pegel aus der DIFGA-Analyse bis 2012 verlängert werden konnten. Hierfür wurden vom LfULG entsprechende Monats-NQ-Werte der Pegel übergeben. Im Ergebnis konnten von den 114 Pegeln 93 Pegel bis 2012 verlängert werden. Für weitere 13 Pegel liegt nun eine Beobachtungsreihe bis 2011, für fünf Pegel bis 2010 und für einen Pegel bis 2007 vor. Bei zwei Pegeln konnte keine Verlängerung der Beobachtungsreihen vorgenommen werden, sie besitzen weiterhin Beobachtungsreihen bis 2005.

A 1.1.2 Verwendung weiterer Pegel

Nach der Verlängerung der Beobachtungsreihen der 114 Pegel aus der DIFGA-Analyse wurde überprüft, welche Pegel zusätzlich für die Regionalisierung der Niedrigwasserdurchflüsse herangezogen werden können. Hierfür kamen Pegel mit Einzugsgebieten größer 400 km² in Frage, weil diese Pegel in der DIFGA-Analyse nicht verwendet wurden. Darüber hinaus blieben in den o. g. DIFGA-Analysen im Rahmen des KliWES-Teilprojektes „Säule A“ bislang sechs Pegel der Lausitzer Neiße noch unberücksichtigt. Diese Pegel wurden in die Untersuchung zusätzlich mit einbezogen, um speziell für die Lausitzer Neiße Abflusslängsschnitte zu erstellen. Weiterhin wurden Pegel herangezogen, die aufgrund der vorgenommenen Zeitreihenverlängerung bis 2012 nun die Mindestreihenlänge von 20 Beobachtungsjahren erfüllen. Darüber hinaus wurden weitere fünf Pegel ergänzt, deren Nichtberücksichtigung in der DIFGA-Analyse nicht durch die oben beschriebenen Fälle erklärbar war. In der Summe gingen 142 Pegel in die weitere Untersuchung ein.

A 1.1.3 Datenkorrekturen und Lückenfüllung in den Beobachtungsreihen der Pegel

Die Beobachtungsreihen der DIFGA-Pegel ab 2005 und die der 28 zusätzlichen Pegel wurden überprüft. Im Bedarfsfall erfolgten Datenergänzungen und kleinere Korrekturen. Im Folgenden sind die Pegel aufgeführt, bei denen Datenkorrekturen bzw. Datenergänzungen vorgenommen wurden.

Beim Pegel Adorf/Weiße Elster wurde das fehlende Jahr 2012 mit Hilfe der Beobachtungsreihe des Pegels Adorf 1/Weiße Elster ergänzt. Beim Pegel Großsteinberg/Gladegraben wurden im Zuge der DIFGA-Analyse die Nullwerte in der Beobachtungsreihe auf 0,001 m³/s gesetzt, weil Nullwerte im dort verwendeten Modell nicht verarbeitet werden konnten. Diese Werte wurden wieder durch die beobachteten Nullwerten ersetzt. Die Beobachtungsreihe des Pegels Podrosche 2/Lausitzer Neiße wurde von 1993 bis 1994 mit Hilfe der Pegelbeobachtungen des Pegels Görlitz ergänzt. Unplausible Werte für das Jahr 1996 wurden ebenfalls mit Hilfe von Werten des Pegels Görlitz/Lausitzer Neiße korrigiert. Das Fehljahr 1996 des Pegels Ramoldsreuth/Feilebach wurde mit Hilfe der Beobachtungswerte des Pegels Bobenneukirchen/Schafbach aus dem ähnlich großen Nachbareinzugsgebiet ergänzt.

A 1.1.4 Überprüfung auf Beeinflussungen der Pegel

Für die Regionalisierung der Niedrigwasserdurchflüsse war es notwendig, (weitgehend) unbeeinflusste Pegelwerte zu verwenden. Um die Pegel auf Beeinflussungen hin zu überprüfen, wurden zwei verschiedene Quellen herangezogen. Das waren zum einen die Informationen aus dem „Hydrologischen Handbuch, Teil 1: Pegelverzeichnis“ (LFULG 2010) und zum anderen Informationen über Wassernutzer im Elbeeinzugsgebiet, die vom Projekt GLOWA-Elbe (CONRADT ET AL. 2007) vorlagen. Zuerst wurden die Informationen des Pegelverzeichnisses (LFULG 2010) bezüglich der Beeinflussung von Pegeln untersucht, wobei besonders auf signifikante Nutzungsbeeinflussungen des Durchflussregimes an den betreffenden pegelbeobachteten Gewässerabschnitten geachtet wurde. Diese resultieren z. B. aus Tagebauen (Überleitungen, Entnahmen, Absenkungstrichter), Wasserüberleitungen in oder aus anderen Flussgebiete(n), Einflüssen von Talsperren oder Teichbewirtschaftungen. Im Ergebnis stellte sich heraus, dass von den 142 zugrunde gelegten Pegeln 14 besondere Auswirkungen auf den Niedrigwasserdurchfluss besitzen können. Nach Recherche bzw. Untersuchung dieser möglichen Beeinflussungen wurden von den 14 Pegeln vier aus der Datenbasis entfernt und vier weitere Pegel mit verkürzter Zeitreihe in der Datenbasis belassen. Die Unterlagen zu Wassernutzern aus dem Projekt GLOWA-Elbe (CONRADT ET AL. 2007) beinhalteten vor allem Informationen zu Art und Lage der Nutzer, wie Einleitungen von Klärwerken oder Wasserentnahmen der Industrie.

Es wurde weiterhin überprüft, welche Pegel möglicherweise durch Nutzungen beeinflusst sein könnten. Hierfür wurden vor allem Pegel ausgewertet, die eine vergleichsweise niedrige ($< 0,6 \text{ l/[s} \cdot \text{km}^2]$) bzw. hohe Durchflussspende ($> 4 \text{ l/[s} \cdot \text{km}^2]$) besitzen. Darüber hinaus wurden Pegel genauer betrachtet, die regionale Auffälligkeiten in folgender Hinsicht besitzen: Auf Basis der Hypothese, dass vergleichsweise hohe mittlere Gebietsniederschläge sich auch in vergleichsweise hohen Durchflussspenden am Pegel zeigen sollten, wurden die Durchflussspenden MNq der Pegel und die mittlere Jahressumme des Niederschlags gegenübergestellt und bei Abweichungen von der o. g. Hypothese als „regional auffällige“ Pegel identifiziert. Im Ergebnis dieser Untersuchung zeigte sich, dass für die Pegel mit besonders niedrigen bzw. hohen Durchflussspenden und auch für die Pegel mit regionalen Auffälligkeiten in der Regel keine Beeinflussung durch Nutzungen nachgewiesen werden konnte. Pegel im mittleren Durchflussbereich können hingegen Beeinflussungen durch Nutzungen aufweisen. Letztendlich wurde angenommen, dass die Nutzungseinflüsse nur einen geringen Einfluss auf das Durchflussverhalten bei Niedrigwasser besitzen. Im Ergebnis wurden keine weiteren Pegel entfernt.

A 1.1.5 Zusammenfassung

Nach der Überprüfung auf bekannte Beeinflussungen und entsprechender Selektion stellten insgesamt 138 Pegel die Basis für Durchflussdaten dar, die anschließend für die Regionalisierung von Niedrigwasserkennwerten verwendet wurden.

A 1.2 Geodaten für die Regionalisierung

Für die anzuwendenden Regionalisierungsverfahren „Multiple lineare Regression“ und „Top-Kriging“ (Abschnitte A 1.3.1 und A 1.3.2) waren Geodaten und daraus für räumliche Einheiten abgeleitete Gebietskenngrößen notwendig. Im Zuge der Modellerstellung waren diese Gebietskenngrößen zunächst für die Einzugsgebiete der verwendeten Fließgewässerpegel und später für alle Einzugsgebiete gemäß Digitalem Wasserlaufverzeichnis WLTV (Stand August 2015) bereitzustellen. Gebietskenngrößen für die Pegeleinzugsgebiete wurden auch für die „Residuenmuster-Methode“ benötigt, die angewendet wurde, um die Bildung von quasihomogenen Regionen zu ermöglichen (Abschnitt A 1.4.1).

Die Auswahl der Gebietskenngrößen, die in die Regionalisierung einzubeziehen waren, gestaltete sich insofern schwierig, dass die Gebietskenngrößen, die einen signifikanten Einfluss auf den Niedrigwasserdurchfluss bzw. die Niedrigwasserdurchflussspende haben, a priori nicht bekannt sind.

Aufbauend auf den Erfahrungen bei der Hochwasserregionalisierung in Brandenburg (DHI WASY 2009), Sachsen (DHI WASY 2010a), Rheinland-Pfalz (DHI WASY 2010b) und Thüringen (DHI WASY 2012), GLOS & LAUTERBACH (1972) sowie WILLEMS & HIRSCHHÄUSER (2004) kamen folgende Gebietskenngrößen für die Regionalisierung prinzipiell in Frage:

- Hydrographische und morphologische Kenngrößen, z. B. Einzugsgebietsfläche, Einzugsgebietsform, Fließgewässerdichte, Geländegefälle, Geländehöhe
- Meteorologische und hydrologische Kenngrößen, z. B. mittlerer Jahresniederschlag, mittlerer jährlicher Zufluss zum Speicher der langsamsten unterirdischen Abflusskomponente, Rückgangskonstante der langsamsten unterirdischen Abflusskomponente
- Landnutzungs- und Boden-Kenngrößen, z. B. Waldanteil, Anteil bebaute Fläche, nutzbare Feldkapazität

Grundsätzlich müssen die ausgewählten Gebietskenngrößen flächendeckend, d. h. auch für die außerhalb des Territoriums Sachsens zu berücksichtigenden Einzugsgebietsanteile ableitbar sein. Die Grundlage für die Ermittlung der Gebietskenngrößen ist daher eine konsistente digitale Geodatenbasis für das gesamte über Sachsen hinausgehende Untersuchungsgebiet.

A 1.3 Methodik zur Regionalisierung

A 1.3.1 Multiple lineare Regression

Bei der multiplen linearen Regression werden Niedrigwasserdurchflüsse bzw. -durchflussspenden von Pegeln und Gebietskenngrößen der Pegeleinzugsgebiete durch Regressionsmodelle miteinander verknüpft. Dabei wird davon ausgegangen, dass mit den aufgestellten Modellen auch für unbeobachtete Gewässerquerschnitte, deren Gebietskenngrößen bekannt sind, Niedrigwasserdurchflüsse oder -durchflussspenden bestimmt werden können.

Die multiple lineare Regression wurde in den letzten zwei Jahrzehnten mehrfach erfolgreich bei Hochwasserregionalisierungen angewendet, z. B. in FÜGNER ET AL. (1990); HAUPT (2000); DHI WASY (2009), DHI WASY (2010b) und DHI WASY (2012). Aber auch bei der Regionalisierung von Niedrigwasserkenngrößen stellt die multiple lineare Regression die am häufigsten eingesetzte Methode dar (DWA 2009).

Für den Aufbau der linearen Regressionsmodelle sind für jede Region folgende Arbeitsschritte erforderlich:

- Test auf Normalverteilung der Eingangsdaten
- Untersuchung der Gebietskenngößen auf Interkorrelation
- Schrittweise multiple lineare Regression für $MNq_{\text{jährlich}}$, MNq_{Som} und MNq_{Win}
- Auswahl geeigneter Regressionsmodelle für $MNq_{\text{jährlich}}$, MNq_{Som} und MNq_{Win}

Zur Durchführung der Regression wurde das lineare Mehrfachregressionsmodell in folgender Form verwendet:

$$Y = a_0 + a_1 * X_1 + a_2 * X_2 + \dots + a_n * X_n \quad (1)$$

In dieser Gleichung ist a_0 die Regressionskonstante, a_1 bis a_n sind die (partiellen) Regressionskoeffizienten und X_1 bis X_n die Regressoren (Gebietskenngößen). Die Durchflüsse oder Durchflussspenden als Zielgrößen der Regression sind die Regressanden Y .

Schrittweise Regression bedeutet, dass zunächst ein Regressionsmodell aufgestellt wird, das alle ermittelten n Gebietskenngößen als Regressoren enthält. Anschließend wird diejenige Gebietskenngöße vernachlässigt, die den geringsten Einfluss auf die Zielgröße hat und ein Regressionsmodell mit $(n - 1)$ Regressoren aufgestellt. Diese Prozedur wird so oft wiederholt, bis ein Regressionsmodell mit nur einem Regressor bestehen bleibt.

Zur Beurteilung, welches der n -Regressionsmodelle das Beste ist, wurden verschiedene Gütekriterien berücksichtigt. Hierzu wurden das Bestimmtheitsmaß R^2 , das von AKAIKE (1974) vorgeschlagene Informationskriterium AIC und der mittlere relative Fehler, mrF , genutzt.

Die Entscheidung für eine Modellgruppe mit einer bestimmten Anzahl von Gebietskenngößen läuft letztlich auf einen Kompromiss zwischen der Genauigkeit der Ergebnisse, die sich mit zunehmender Anzahl Regressoren sukzessive erhöht, und der Stabilität der Modelle, die umso eher gewährleistet ist, je weniger Regressoren in den Gleichungen berücksichtigt werden, hinaus.

A 1.3.2 Top-Kriging

Top-Kriging ist ein Verfahren der räumlichen Interpolation (Kriging) und gehört zur Gruppe der geostatistischen Verfahren, die auf der Annahme beruhen, dass benachbarte Gebiete ein ähnliches Abflussverhalten zeigen (BLÖSCHL 2006), weil sich Klima und Gebietseigenschaften nur allmählich im Raum ändern. Gegenüber dem traditionellen „Ordinary-Kriging-Verfahren“ berücksichtigt es die Topologie der Einzugsgebiete, d. h., dass Ober- und Unterliegergebiete eines Gewässers hydrologisch ähnlicher sind als Gebiete am benachbarten Gewässer.

Geostatistische Verfahren werden zur räumlichen Interpolation vieler hydrologischer Größen wie Grundwasserstände, Niederschlag oder Bodenfeuchte verwendet und wurden auch in anderen Regionen schon erfolgreich zur Bestimmung von regionalen Hochwässern (z. B. MERZ & BLÖSCHL 2005) und Niedrigwässern angewandt (LAAHA 2008).

Im traditionellen „Ordinary-Kriging-Verfahren“ wird die zu schätzende Größe (hier Durchflussskennwerte an Knoten (Zu- und Ausflussquerschnitte der Teilgebiete) ohne Pegel) als gewichtetes Mittel der gemessenen Größe (hier Durchflussskennwerte an Pegeln) in der Nachbarschaft berechnet.

$$\hat{z}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(\mathbf{x}_i) \quad (2)$$

λ_i ist das Gewicht der Messung (Durchflussskennwert) an der Position $\mathbf{x}_i$ (Pegel i) und n die Anzahl der benachbarten Pegel, die zur Interpolation benutzt werden. Die Gewichte sind abhängig von der Distanz der Pegel zur Position $\mathbf{x}_0$ (Knoten), wobei die Durchflussskennwerte näher gelegener Pegel ein höheres Gewicht erhalten als die entfernteren. Zur Anwendung des Verfahrens ist eine Variogrammanalyse erforderlich, bei der die Entfernungen zwischen allen Messpunkten (Pegeln) und die Wertedifferenzen berechnet werden. Das Ergebnis ist ein empirisches Semivariogramm, mit dem die Gewichte der einzelnen Messpunkte zur Schätzung des unbekannten Wertes ermittelt werden können.

Verfahren der räumlichen Interpolation erzielen gute Ergebnisse, wenn eine hohe Messpunktzahl für das Untersuchungsgebiet vorliegt. Auch werden sehr gute Ergebnisse bei Interpolation zwischen Pegeln an einem Gewässer erhalten. Defizite sind dagegen bei der Extrapolation zunehmend kleiner werdender Einzugsgebiete zu beobachten, deren Einzugsgebietsfläche die der benachbarten Pegel unterschreitet. Auch bei Flüssen und Flussgebieten ohne Messwerte sind Defizite mit diesem Verfahren zu erwarten.

A 1.3.3 Durchflusslängsschnitte

Aufgrund fehlender Gebietskenngrößen für die Pegel an der Elbe und Lausitzer Neiße, deren Einzugsgebiete größtenteils außerhalb von Sachsen liegen, konnten speziell für diese Gewässer keine Durchflussskenngrößen mittels des Vorzugsverfahrens (Kombination von multipler linearer Regression und Top-Kriging) ermittelt werden. Ersatzweise wurden deshalb für alle hier betrachteten Durchflussskenngrößen der Elbe und Lausitzer Neiße Durchflusslängsschnitte aufgestellt.

Die Methodik wurde schon bei der Hochwasserregionalisierung in Brandenburg (DHI WASY 2009) und Sachsen (DHI WASY 2010a) für die Lausitzer Neiße angewendet. Als Stützstellen für die Berechnung der Durchflusslängsschnitte dienten die vorliegenden Niedrigwasserdurchflussskennwerte an den Pegeln der Gewässer. Zwischen den Stützstellen wurden die Durchflussskennwerte gewässerabschnittsweise durch Interpolation berechnet. Bei der Interpolation wurde die sukzessive Zunahme der Einzugsgebietsfläche zwischen den Pegeln berücksichtigt. Bei zunehmenden Durchflüssen zwischen den Stützstellen wurde eine exponentielle Interpolation verwendet (DWA 2012). Die entsprechende Gleichung hat folgende Form:

$$\left(\frac{MNQP_o}{MNQP_u} \right) = \left(\frac{A_E P_o}{A_E P_u} \right)^{y(MNQ)} \quad (3)$$

- mit
- $MNQP_o$ - MNQ am oberhalb liegenden Pegel,
 - $MNQP_u$ - MNQ am unterhalb liegenden Pegel,
 - $A_E P_o$ - Einzugsgebietsfläche am oberhalb liegenden Pegel,
 - $A_E P_u$ - Einzugsgebietsfläche am unterhalb liegenden Pegel und
 - $y(MNQ)$ - Exponent in Abhängigkeit des mittleren Niedrigwasserdurchflusses und der Einzugsgebietsgröße des oberhalb und unterhalb liegenden Pegels.

A 1.4 Ergebnisse der Regionalisierung

A 1.4.1 Multiple lineare Regression

Zur Anwendung des im Abschnitt A 1.3.1 vorgeschlagenen Regionalisierungsverfahrens „Multiple lineare Regression“ ist es notwendig, quasihomogene Regionen zu bilden, in denen jeweils ein ähnliches Niedrigwasserverhalten auftritt. Für die Regionenbildung wurde die so genannte Residuenmuster-Methode (DWA 2009) vorgeschlagen. Hierfür wird eine sich auf das gesamte Untersuchungsgebiet beziehende „globale“ Regressionsanalyse durchgeführt. Anschließend werden die Abweichungen (Residuen) der mit dem „globalen“ Regressionsmodell berechneten MNQ von den Ergebnissen der Pegelstatistik ermittelt. Die räumliche Verteilung der Residuen wird kartografisch dargestellt. Ziel ist es, ggf. vorhandene räumliche Muster zu erkennen, die die Bildung von räumlich zusammenhängenden quasihomogenen Regionen rechtfertigen würden. Bezüglich der methodischen Grundlagen der Residuenmuster-Methode sei auf Abschnitt A 1.3.1 (Multiple lineare Regression) verwiesen.

Im Ergebnis dieser Untersuchung war eine räumliche Clusterung zu erkennen. Im Einzugsgebiet der Weißen Elster sind vornehmlich Überschätzungen der beobachteten MNQ anzutreffen. Im Gegensatz dazu zeigen die Einzugsgebiete der Freiburger und der Zwickauer Mulde etwa gleichviel Unter- und Überschätzungen. Im Oberlauf der Spree, der Schwarzen Elster und in angrenzenden Einzugsgebieten der Elbezuflüsse sind Unterschätzungen der Ergebnisse des Regressionsmodells zur Pegelstatistik vorhanden. In den restlichen Gebieten sind dagegen konzentriert im Berg- und Hügelland wieder Überschätzungen anzutreffen. Basierend auf diesen Aussagen wurde eine Unterteilung in zwei Regionen vorgenommen. Soweit möglich wurden hier Flussgebiete zusammengefasst. Im Ergebnis der Aufteilung (Abbildung 19) wurde das Untersuchungsgebiet in zwei Regionen mit jeweils 66 Pegeln unterteilt.

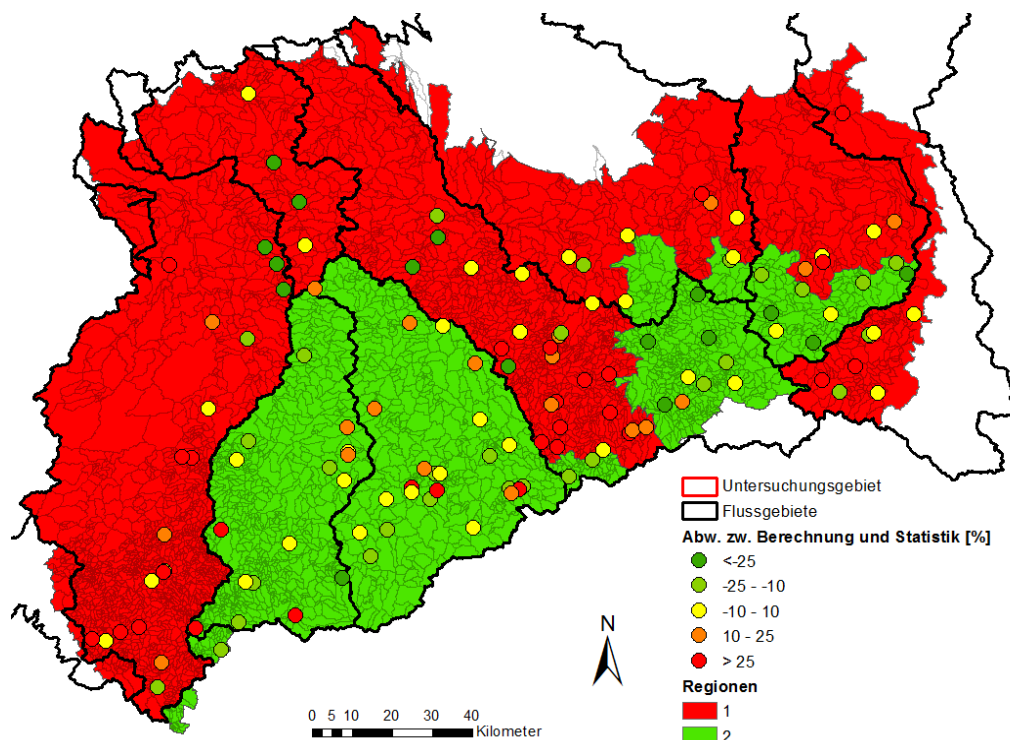


Abbildung 19: Teilung des Untersuchungsgebiets (Freistaat Sachsen) in zwei Regionen für die MNQ-Berechnung

Eine zweite Voraussetzung zur Anwendung der Multiplen linearen Regression ist die Ermittlung flächendeckender Gebietskenngrößen auf Basis der flächendeckenden Geodaten (Abschnitt A 1.3.1). Zunächst wurden die Gebietskenngrößen für alle Teileinzugsgebiete bestimmt. Mit Hilfe von Programmroutinen wurden über die Gebietskennzahl alle Teileinzugsgebiete erfasst, die zum Einzugsgebiet eines bestimmten Gewässerquerschnittes gehören. Anschließend wurden für diese Einzugsgebiete die Einzugsgebietsfläche, der Einzugsgebietsumfang und die interessierenden Gebietskenngrößen ermittelt. In der Regel wurden die Gebietskenngrößen für die zu den Teilgebieten gehörenden Einzugsgebiete durch eine flächengewichtete Mittelung der Gebietskenngrößen des betreffenden Teilgebietes und aller Oberliegerteilgebiete ermittelt. Die flächengewichtete Mittelung war für folgende Gebietskenngrößen anzuwenden: nutzbare Feldkapazität, Geländegefälle, Geländehöhe, mittlerer Jahresniederschlag, Speicherzufluss RG2 und Rückgangskonstante CG2.

Zur Ermittlung des Waldanteils und des bebauten Anteils der zu den Teilgebieten gehörenden Einzugsgebiete wurden die Waldflächen und bebauten Flächen des betreffenden Teilgebietes und aller Oberliegerteilgebiete aufsummiert und auf die Einzugsgebietsfläche bezogen. Als Formfaktor wurde das so genannte Kreisförmigkeitsverhältnis genutzt. Es ist definiert als das Verhältnis der Einzugsgebietsfläche und der Fläche eines Kreises mit dem gleichen Umfang wie das Einzugsgebiet (DYCK & PESCHKE 1995):

$$R_K = 4\pi \cdot \frac{A_E}{U^2} \quad (4)$$

Die Gewässerdichte D [km^{-1}] beschreibt das Verhältnis der Gesamtlänge L [km] aller zum Einzugsgebiet gehörenden Fließgewässer zur Einzugsgebietsfläche A_E [km^2]:

$$D = \frac{L}{A_E} \quad (5)$$

Auf Grundlage der Ergebnisse der Regionenbildung und der Gebietskenngrößen wurden für zwei Regionen die Regressionsgleichungen bestimmt. Infolgedessen werden die Tests auf Normalverteilung und Interkorrelation für jede Region getrennt durchgeführt und ausgewertet. Um einen strafferen Zusammenhang zwischen den Gebietskenngrößen und den Durchflüssen in den Regressionsmodellen zu erzielen, ist es unter Umständen notwendig, vereinzelte Pegel zu entfernen, die nicht dem allgemeinen Verhalten der Pegel der jeweiligen Region entsprechen. Hierfür wurden die Residuen der einzelnen Pegel angeschaut und Pegel identifiziert, die ein auffälliges Verhalten aufweisen. Dies traf zu, wenn die mittels der Regression berechneten MNq der Pegel die Werte der Pegelstatistik deutlich über- bzw. unterschritten. Eine Zusammenfassung der Pegel mit signifikanten Abweichungen ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Aufgrund der erheblichen Abweichungen der Pegel im Vergleich zum allgemeinen Verhalten der Pegel der jeweiligen Region wurden diese Pegel als „Ausreißerpegel“ identifiziert und aus der Datenbasis für die Regressionsanalyse entfernt.

Bezüglich der detaillierten Beschreibung zur Bestimmung der Regressionsgleichungen wird auf den Bericht von DHI WASY (2014) verwiesen.

Tabelle 1: Übersicht der Pegel mit signifikanten Abweichungen von den mittels Regression berechneten MNq

Region	Gesamtjahr	Sommerhalbjahr	Winterhalbjahr
1	Glasten/Parthe	Glasten/Parthe	Glasten/Parthe
1	Großsteinberg/Gladegraben	Großsteinberg/Gladegraben	Großsteinberg/Gladegraben
1	Langenreinsdorf/Koberbach		
1	Niederoderwitz/Landwasser	Niederoderwitz/Landwasser	
1	Ramoldsreuth/Feilebach	Ramoldsreuth/Feilebach	
1	Thallwitz/Lossa	Thallwitz/Lossa	
1	Untertriebelbach/Triebel	Untertriebelbach/Triebel	
1	Wernsbach HP/Wernsbach		
2	Johanngeorgenstadt 2/Breitenbach	Johanngeorgenstadt 2/Breitenbach	
2	Muldenberg 3/Rote Mulde	Muldenberg 3/Rote Mulde	
2	Neuwernsdorf/Wernsbach	Neuwernsdorf/Wernsbach	
2			Holtendorf/Weißer Schöps

Die im Ergebnis erstellten Regressionsmodelle der Regionen 1 und 2 für das Gesamtjahr, das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr sind im Folgenden dargestellt:

Region 1:

$$MNq_{\text{jährlich}} = 3,8741 \cdot \frac{\sqrt{RG2}}{10} + 1,4941 \cdot \frac{\sqrt{nFK}}{10} + 0,5146 \cdot \frac{\sqrt{CG2}}{10} - 4,7192$$

$$MNq_{\text{Som}} = 4,0870 \cdot \frac{\sqrt{RG2}}{10} + 1,1600 \cdot \frac{\sqrt{nFK}}{10} + 0,0240 \cdot \sqrt{\text{Waldanteil}} - 3,4663$$

$$MNq_{\text{Win}} = 3,3139 \cdot \frac{\sqrt{RG2}}{10} + 1,2613 \cdot \frac{\sqrt{\text{Niederschlag}}}{10} - 0,5440 \cdot \sqrt{\text{Flussdichte}} - 3,1373$$

Region 2:

$$MNq_{\text{jährlich}} = 2,2776 \cdot \frac{RG2}{100} + 1,7128 \cdot \ln(NFK) - 0,0659 \cdot \ln(\text{Fläche}) - 8,2436$$

$$MNq_{\text{Som}} = 2,3074 \cdot \frac{RG2}{100} - 0,0761 \cdot \ln(\text{Fläche}) - 0,6987$$

$$MNq_{\text{Win}} = 2,1582 \cdot \frac{RG2}{100} - 0,1200 \cdot \sqrt{\text{Waldanteil}} + 0,5259 \cdot \sqrt{\text{Flussdichte}} + 1,7054$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen wurden flächendeckend die mittleren Niedrigwasserdurchflussspenden für die Zu- und Ausflussquerschnitte des Untersuchungsgebietes berechnet.

A 1.4.2 Top-Kriging

Datenbasis für die Anwendung des Top-Krigings bilden die Residuen der Pegeleinzugsgebiete. Die Residuen werden aus der Differenz zwischen den beobachteten und den berechneten MNq der Pegel für das Gesamtjahr, das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr gebildet.

Diese Differenzen (Residuen) wurden anschließend mittels des Top-Krigings auf das Untersuchungsgebiet übertragen. In Abbildung 20 sind beispielhaft für das Gesamtjahr die Residuen der Teilgebiete dargestellt.

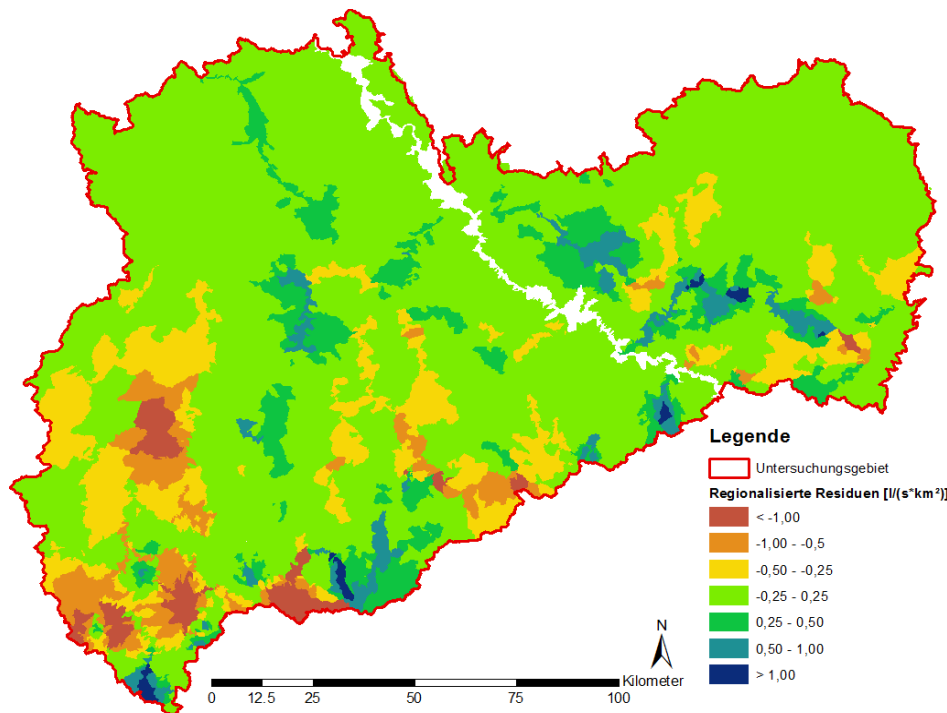


Abbildung 20: Mittels Top-Kriging übertragene Residuen der MNq_{Jahr} der Pegeleinzugsgebiete auf alle Teilgebiete des Untersuchungsgebietes

Mit den auf diese Art regionalisierten Residuen wurden nun die mittels der multiplen linearen Regression bestimmten MNq beaufschlagt. Im Ergebnis werden die Abweichungen zwischen beobachteten und berechneten MNq der Pegeleinzugsgebiete auf die Teilgebiete in der jeweiligen Nachbarschaft übertragen, sodass mögliche Über- bzw. Unterschätzungen von MNq durch die Regressionsmodelle in den unbeobachteten Gebieten in gewissem Maße ausgeglichen werden können. Andererseits ist bei dieser Vorgehensweise von Nachteil, dass kleinräumige hydrogeologische Besonderheiten, die besonders für die MNq-Bestimmung bedeutsam sind, nicht mehr genügend beachtet werden.

A 1.4.3 Durchflusslängsschnitte

Für die Berechnung der Durchflusslängsschnitte der Lausitzer Neiße wurden als Stützstellen die Daten der Pegel Hartau, Zittau 1, Görlitz und Klein Bademeusel verwendet. Diese Pegel besitzen Beobachtungsreihen von mindestens 55 Jahren, die bedeutende Niedrigwasserperioden z. B. von 1963, 1970 und 1976 mit einschließen. Die Verwendung des Pegels Podrosche 2, zwischen Görlitz und Klein Bademeusel gelegen, wurde verworfen, weil dieser nur eine Beobachtungsreihe von 28 Jahren besitzt und damit die genannten bedeutenden Niedrigwasserereignisse

von 1963, 1970 und 1976 nicht enthält. Die berechneten Durchflusslängsschnitte sind für MNQ , MNQ_{Som} und MNQ_{Win} in der Abbildung 21 und die entsprechenden Durchflussspendenlängsschnitte in Abbildung 22 dargestellt.

Auch für die Elbe in Sachsen wurden mit Hilfe der Pegel Schöna, Dresden und Torgau Niedrigwasserdurchflusslängsschnitte erstellt. Dabei wurde ein anderer Regressionsansatz, der dem bei den HQ_T -Längsschnitten verwendeten entspricht (siehe Anhang A 3.3.4), benutzt.

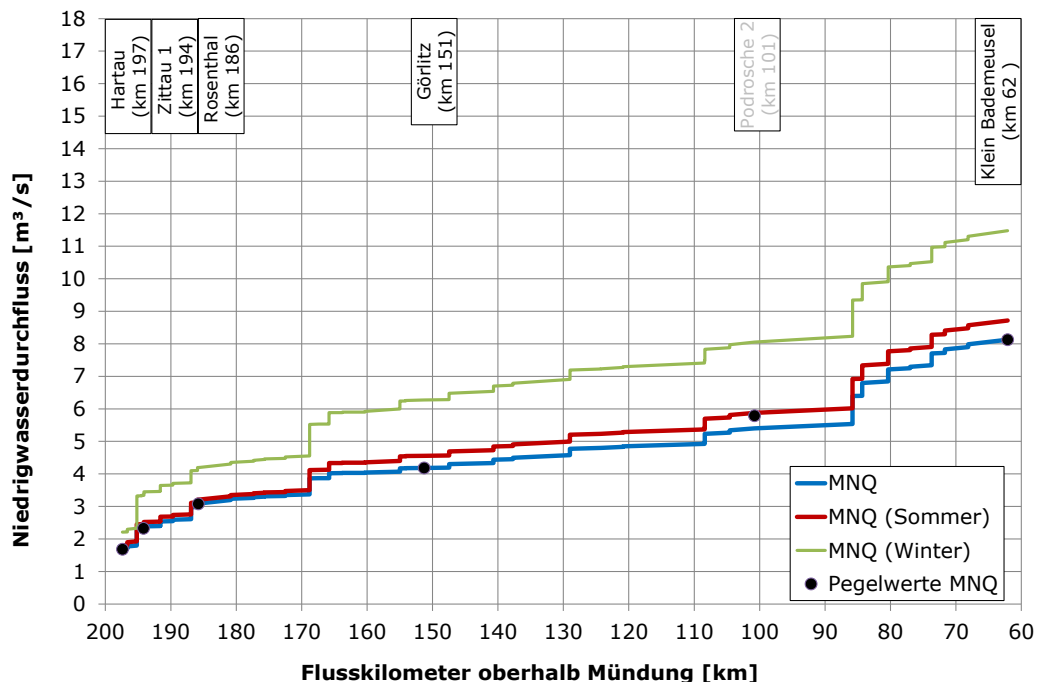


Abbildung 21: Durchflusslängsschnitte der Lausitzer Neiße für MNQ , MNQ_{Som} und MNQ_{Win}

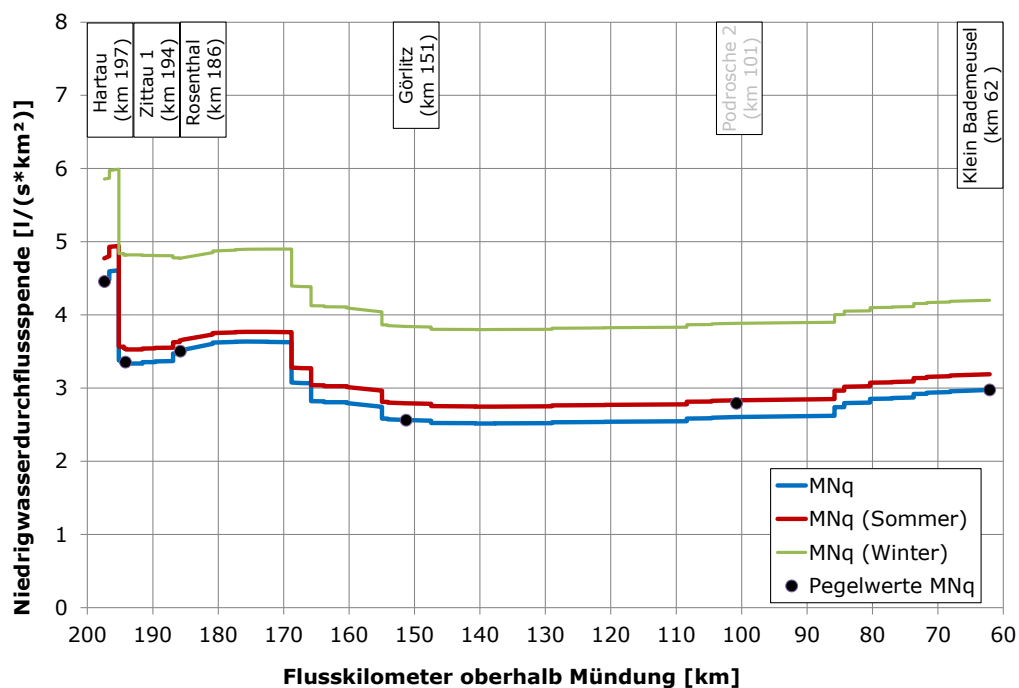


Abbildung 22: Durchflussspendenlängsschnitte der Lausitzer Neiße für MNq , MNq_{Som} und MNq_{Win}

A 1.5 Berechnung und Plausibilitätsprüfung

Die Berechnung der Niedrigwasserdurchflusskennwerte und ihrer Spenden für die Zu- und Ausflussquerschnitte der Teileinzugsgebiete auf Basis der multiplen linearen Regression (Abschnitt A 1.3.1) erfolgte in MS Excel. Anschließend wurden die Berechnungsergebnisse in ArcGIS mit den Geometrien der Teileinzugsgebiete verbunden. Ergebnis war ein Teileinzugsgebiets-Shape mit den Niedrigwasserdurchflusskennwerten für die Zufluss- und die Ausflussquerschnitte. Den „Quellgebieten“, die keinen Zuflussquerschnitt haben, wurde in den entsprechenden Attributfeldern der Wert „-9999“ zugeordnet. Insgesamt wurden für 3349 Zu- und 6240 Ausflussquerschnitte die MNQ , MNQ_{Som} , MNQ_{Win} und ihre Spenden berechnet.

In Abbildung 23 sind beispielhaft die Ergebnisse für die Ausflussquerschnitte der Teileinzugsgebiete für das Gesamtjahr dargestellt. Sowohl im Gesamtjahr als auch im Sommer- und Winterhalbjahr ist grundsätzlich ein plausibles Verhalten mit höheren Durchflussspenden im Süden und kleineren Spenden im Norden sowie einzelnen, in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Mustern, entlang größerer Flüsse zu beobachten.

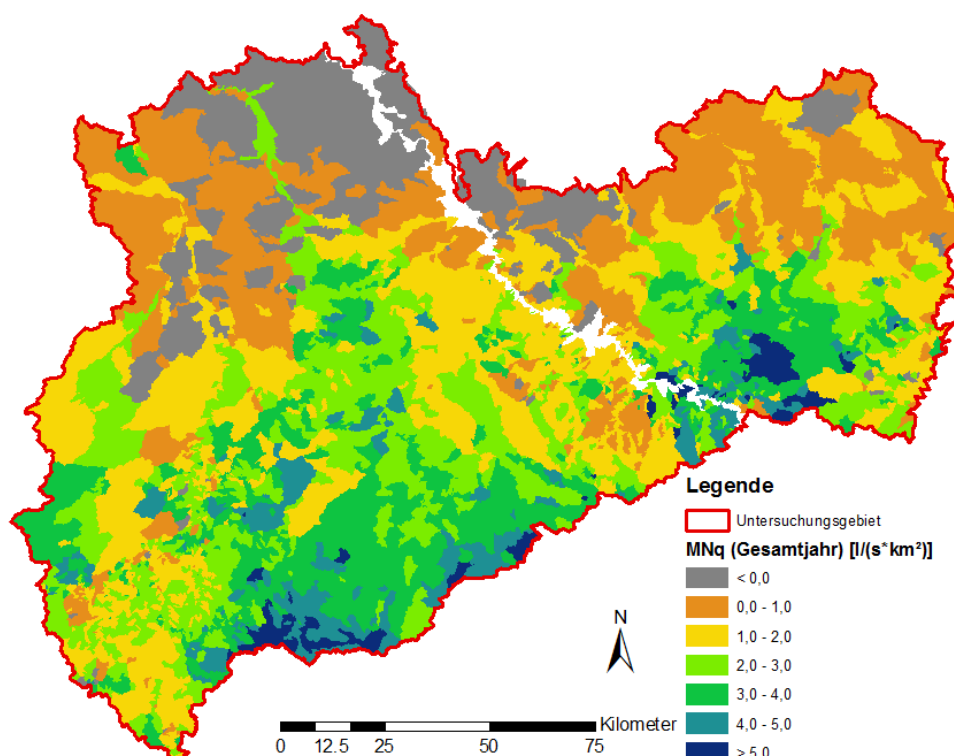


Abbildung 23: Flächendeckende Durchflussspenden der Ausflussquerschnitte für das Gesamtjahr

Die berechneten Niedrigwasserdurchflüsse und -durchflussspenden wurden anschließend auf ihre Plausibilität hin überprüft, wobei drei verschiedene Kriterien berücksichtigt wurden:

- Korrektur unplausibel geringer Durchflussspenden
- Korrektur der berechneten MNQ durch Addition der Residuen
- Korrektur lokaler Inkonsistenzen
- Korrektur der Durchflüsse im Flusslängsschnitt

Die Korrektur unplausibel geringer Durchflussspenden wurde für notwendig erachtet, weil in einigen Gebieten der Region 1 auch negative mittlere Niedrigwasserdurchflussspenden MNq_{Jahr} berechnet wurden. Als geringste plausible MNq_{Jahr} wurde in dieser Arbeit $0,3 \text{ l/(s} \cdot \text{km}^2)$ festgelegt, weil dies etwa den Werten entspricht, die die Pegel mit den geringsten MNq_{Jahr} aufwiesen. Da hier auch Gräben mit Einzugsgebieten über 3 km^2 bei den MNq -Berechnungen mit betrachtet werden, die durchaus jedes Jahr mindestens einmal trockenfallen, sollte das geringste plausible MNq_{Jahr} zukünftig gleich $0 \text{ l/(s} \cdot \text{km}^2)$ gesetzt werden. Dementsprechend sind die tatsächlich zwischen $0,01$ und $0,3 \text{ l/(s} \cdot \text{km}^2)$ berechneten MNq in den entsprechenden Teilgebieten statt der jetzigen $0,3 \text{ l/(s} \cdot \text{km}^2)$ zu verwenden.

Nach der Korrektur wurden die mittels Top-Kriging flächenhaft ermittelten Residuen berücksichtigt, indem diese auf die für die Zu- und Ausflussquerschnitte der Teilgebiete berechneten MNq aufaddiert wurden. Bei positiven Residuen wurde damit die Durchflussspende erhöht und bei negativen Residuen entsprechend verringert. Weil es nun in vereinzelt Fällen erneut zu unplausibel geringen Durchflüssen kommen kann, wurden diese Fälle erneut korrigiert. Im Ergebnis entsprechen nun die Durchflussspenden der Pegeleinzugsgebiete annähernd denen der beobachteten MNq .

Im dritten Schritt wurden die lokalen Inkonsistenzen beseitigt. Lokale Inkonsistenz bedeutet, dass der Durchflusswert für das Sommerhalbjahr kleiner ist als für das Gesamtjahr bzw. der Durchfluss für das Winterhalbjahr unter dem des Sommerhalbjahres liegt. Dieses Verhalten ist nicht plausibel und wurde korrigiert. Dabei wurden der Durchfluss des Sommerhalbjahres auf den Wert des Gesamtjahres und der Durchfluss des Winterhalbjahres auf den Wert des Sommerhalbjahres angehoben.

Zum Abschluss wurde die Plausibilität im Flusslängsschnitt untersucht. Als plausibel wurde angenommen, dass der Durchfluss im Flusslängsschnitt zunimmt oder mindestens gleichbleibt. Unplausibilitäten wurden beseitigt, indem die Durchflüsse auf den geringsten plausiblen Wert angehoben wurden.

Die berechneten und plausibilisierten mittleren Niedrigwasserdurchflüsse MNQ und ihre Spenden MNq für das Gesamtjahr, das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr wurden anschließend mit denen der Lausitzer Neiße und Elbe zusammengeführt. Die mittleren Niedrigwasserdurchflussspenden für das Gesamtjahr, das Sommerhalbjahr und das Winterhalbjahr der Zuflussquerschnitte (Zuflussknoten) sind in Abbildung 24 und die Durchflussspenden der Ausflussquerschnitte in Abbildung 25 (Ausflussknoten) dargestellt.

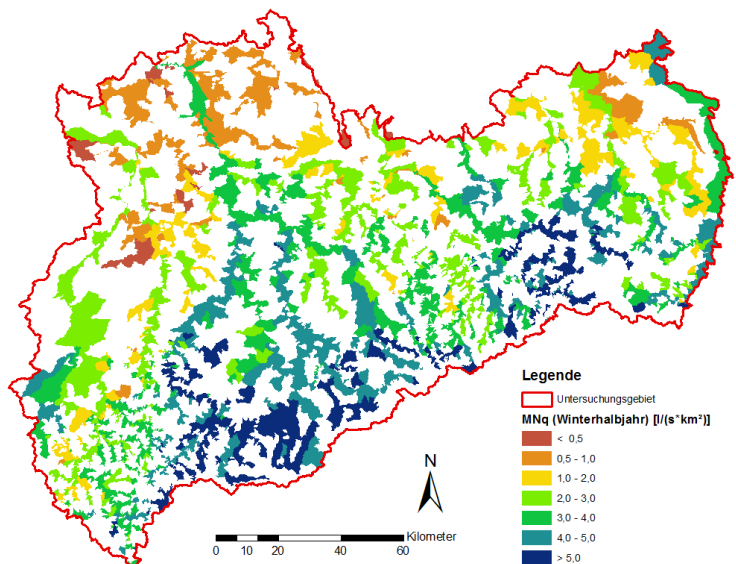
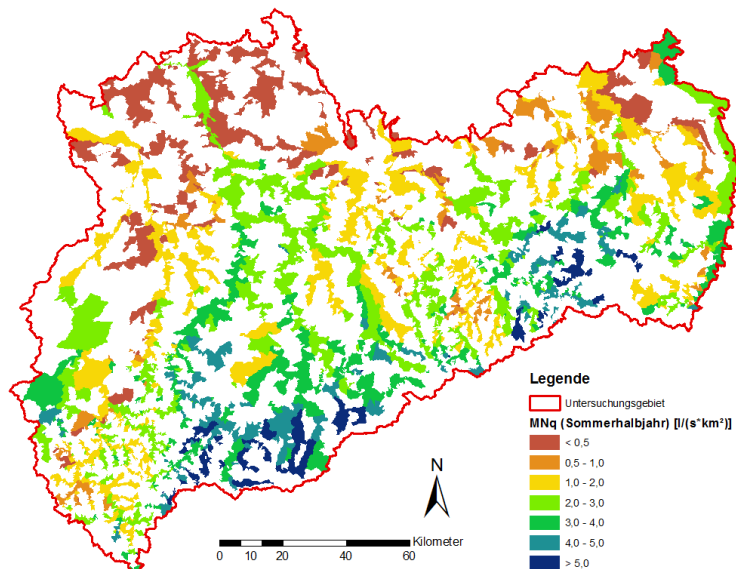
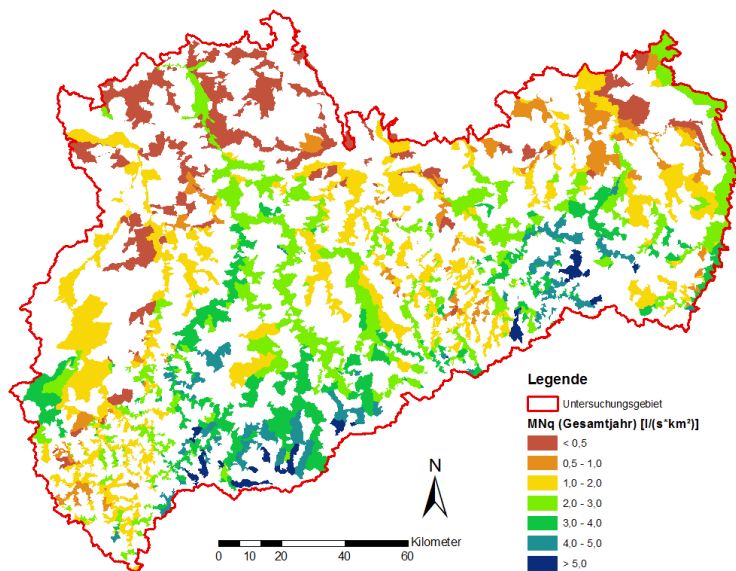


Abbildung 24: Vollständig plausibilisierte Durchflussspenden MNq der Teileinzugsgebiete der Zuflussknoten für das Gesamtjahr (oben), das Sommerhalbjahr (Mitte) und das Winterhalbjahr (unten)

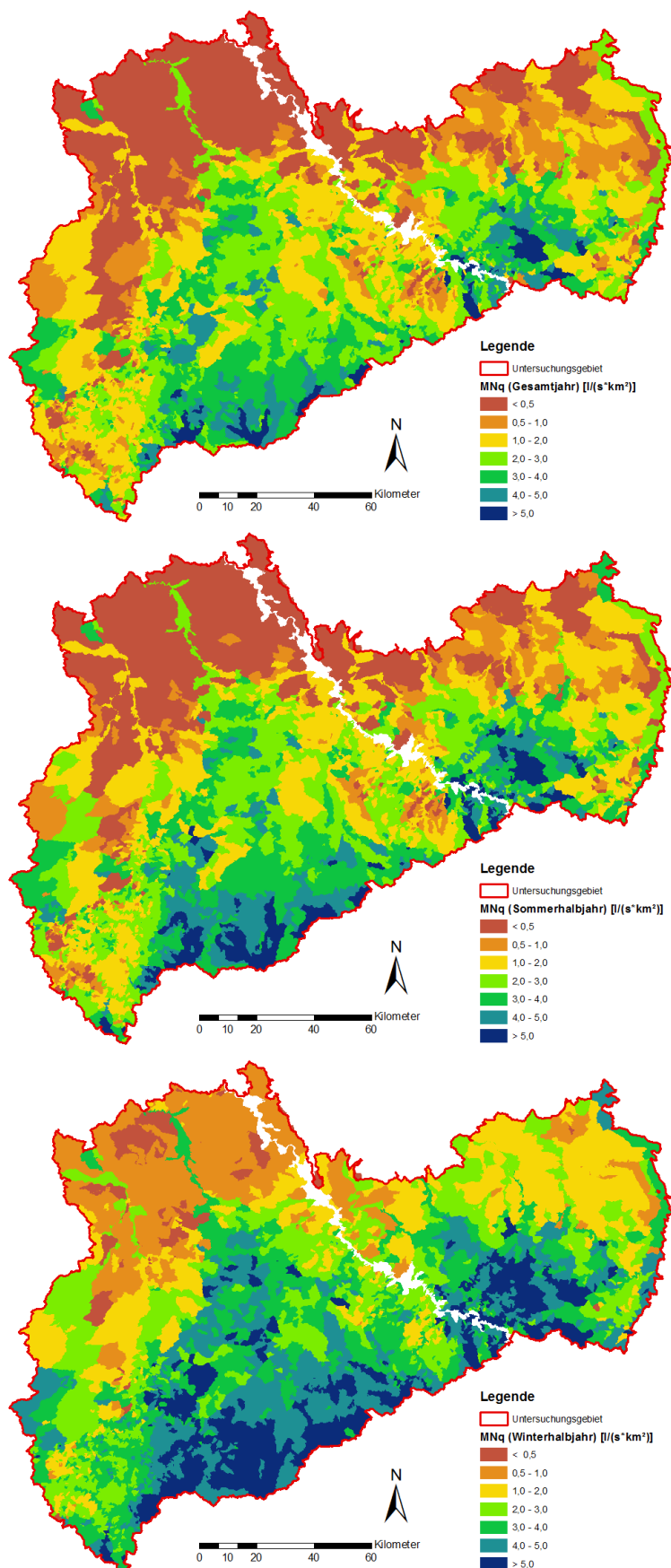


Abbildung 25: Vollständig plausibilisierte Durchflussspenden MNq der Teileinzugsgebiete der Ausflussknoten für das Gesamtjahr (oben), das Sommerhalbjahr (Mitte) und das Winterhalbjahr (unten)

Anhang A 2 Regionalisierung von vieljährigen mittleren Durchflüssen

A 2.1 Durchflussdaten zur Bestimmung von mittleren Durchflüssen

Für die flächendeckende Berechnung von vieljährigen mittleren Durchflüssen in Sachsen standen beobachtete Durchflussdaten von 114 Pegeln zur Verfügung, die bereits für eine DIFGA-Analyse verwendet wurden (SCHWARZE ET AL. 2012). Diese Beobachtungsdaten wurden auf Verwendbarkeit überprüft. Gegebenenfalls wurden die Datenreihen ergänzt und Daten weiterer Pegel herangezogen, die geeignet erschienen.

A 2.1.1 Nichtberücksichtigung von Pegeln

Tabelle 2 enthält alle Pegel, die von den 114 am Anfang zur Verfügung stehenden Pegeln nicht verwendet werden konnten, mit der jeweiligen Begründung.

Tabelle 2: Pegel aus der DIFGA-Analyse, die nicht zur Regionalisierung des mittleren Durchflusses verwendet wurden

Pegel/Gewässer	Begründung für die Nichtberücksichtigung
Burkersdorf 2/Gimmlitz	instabile W-Q-Beziehung und Umflut
Ebersbach/Spree	nur Lattenpegel mit Terminbeobachtungen und schießendem Abfluss im HW-Bereich
Freital 1/Poisenbach	nur Lattenpegel mit Terminbeobachtungen und instabiler W-Q-Beziehung
Großbardau/Schnellbach	liegt nur ungeprüft vor
Johanngeorgenstadt 2/Breitenbach	beeinflusst durch Überleitung aus dem Schwarzwasser über den Plattner Kunstgraben
Klotzsche/Prießnitz	nur Lattenpegel mit Terminbeobachtungen
Königshain/Königshainer Wasser	nur Lattenpegel mit Terminbeobachtungen
Krauschwitz/Legnitzka	nur Lattenpegel mit Terminbeobachtungen
Lauenstein 1/Weiße Müglitz	aufgrund der TS-Beeinflussung nicht mit Lauenstein UP verlängerbar
Nemt 1/Mühlbach	beeinflusst durch Fischteichbewirtschaftung und Rückstau durch Mulde-Hochwasser
Rennersdorf 1/Petersbach	nur Lattenpegel mit Terminbeobachtungen
Rennersdorf 3/Pließnitz	über die Mehrzahl der Beobachtungsjahre nur Lattenpegel mit Terminbeobachtungen
Thallwitz/Lossa	Standort liegt in Muldeschottern und bei Muldehochwasser im Rückstau

A 2.1.2 Verlängerung der Pegel-Beobachtungsreihen

Die vorhandenen Pegelreihen der für die weitere Bearbeitung betrachteten 101 Pegel aus der DIFGA-Analyse besaßen Beobachtungswerte längstens bis zum Jahr 2005. Zur Erweiterung der Datenbasis wurden anhand von zusätzlich übergebenen Monats-MQ-Werten die Beobachtungsreihen von 86 Pegeln bis 2014, von einem Pegel bis 2011 von 3 Pegeln bis 2010 verlängert. Bei den anderen Pegeln wurde keine Verlängerung der Beobachtungsreihen vorgenommen.

A 2.1.3 Verwendung weiterer Pegel

Nach der Verlängerung der Beobachtungsreihen wurde überprüft, welche Pegel zusätzlich herangezogen werden konnten. Hierfür kamen Pegel mit Einzugsgebieten größer 400 km² in Frage, weil diese Pegel in der DIFGA-Analyse nicht verwendet wurden. Darüber hinaus wurden in den DIFGA-Analysen Pegel der Lausitzer Neiße und der Elbe nicht berücksichtigt. Diese Pegel wurden in die Untersuchung zusätzlich mit einbezogen, um für beide Fließgewässer Flusslängsschnitte erstellen zu können. Weiterhin wurden Pegel herangezogen, die aufgrund der vorgenommenen Zeitreihenverlängerung bis 2014 nun die Mindestreihenlänge von zehn Beobachtungsjahren erfüllen. Darüber hinaus wurden weitere Pegel ergänzt, deren Nichtberücksichtigung in der DIFGA-Analyse nicht durch die oben beschriebenen Fälle abgedeckt war. Weiterhin wurden im Einzugsgebiet der Weißen Elster Daten einbezogen, die aus dem Projekt MORO (REGIONALER PLANUNGSVERBAND LEIPZIG-WESTSACHSEN 2012) stammen. Hierbei handelt es sich um Gewässerquerschnitte, für die Mittelwasserdurchflüsse bestimmt wurden. Insgesamt gingen 151 Pegel in die weitere Untersuchung ein.

A 2.1.4 Datenkorrekturen und Lückenfüllung in den Beobachtungsreihen

Die Beobachtungsreihen der Pegel wurden überprüft. Im Bedarfsfall erfolgten Datenergänzungen und kleinere Korrekturen. Im Folgenden sind die Pegel aufgeführt, bei denen Datenkorrekturen bzw. Datenergänzungen vorgenommen wurden.

- In der Beobachtungsreihe des Pegels Podrosche 2/Lausitzer Neiße wurden unplausible Werte von 1993 bis 1994 mit Hilfe der Pegelbeobachtungen des Pegels Görlitz/Lausitzer Neiße korrigiert. Fehlende Werte für das Jahr 1996 wurden ebenfalls mit Hilfe von Werten des Pegels Görlitz ergänzt.
- Das Fehljahr 1996 des Pegels Ramoldsreuth/Feilebach wurde mit Hilfe der Beobachtungswerte des Pegels Bobenneukirchen/Schafbach (Pegel des ähnlich großen Nachbareinzugsgebietes) ergänzt.
- Die Fehljahre 1995 und 1997 des Pegels Schönlinde 2/Haarbach wurde mit Hilfe der Beobachtungswerte des Pegels Adorf/Weiße Elster ergänzt.
- Die Fehljahre 1998 bis 2002 des Pegels Wolkenburg/Zwickauer Mulde wurde mit Hilfe der Beobachtungswerte des Pegels Wechselburg 1/Zwickauer Mulde ergänzt.

A 2.1.5 Überprüfung auf Beeinflussungen der Pegel auf Basis des Pegelverzeichnisses 2014

Für die flächendeckende Bestimmung des jeweiligen Mittelwasserdurchflusses war es notwendig, (weitgehend) unbeeinflusste Pegelwerte zu verwenden. Um die Pegel auf Beeinflussungen hin zu überprüfen, wurden Informationen aus dem Hydrologischen Handbuch, Teil 1: Pegelverzeichnis (LfULG 2014) herangezogen. Im Ergebnis konnten bei 14 Pegeln Beeinflussungen nicht vollständig ausgeschlossen werden. Von diesen 14 Pegeln wurden folgende vier Pegel aus dem Datenkollektiv entfernt:

- Pegel Lomske (Mikkel)/Lomschanke
- Pegel Cranzahl/Lampertsbach
- Pegel Garsebach/Triebisch
- Pegel Munzig 1/Triebisch

Bei drei weiteren Pegeln wurden die beeinflussten Zeitabschnitte aus den Beobachtungsreihen entfernt und die Pegel mit verkürzten Beobachtungsreihen im Datenkollektiv behalten. Für die Ermittlung der vieljährigen mittleren Durchflüsse MQ standen damit 147 Basispegel zur Verfügung.

A 2.2 Methodik

Für die Ermittlung der gewässerabschnittsbezogenen mittleren langjährigen Durchflüsse MQ wird der mittlere jährliche Gesamtabfluss R aus dem KliWES-Forschungsprojekt auf die zugehörigen Gewässereinzugsgebietsflächen bezogen. Dies setzt voraus, dass der mittlere jährliche Gesamtabfluss R flächendeckend für das Gebiet Sachsen und über die sächsische Landesgrenze hinausragenden Gewässereinzugsgebietsflächen vorliegt bzw. aus bereits vorliegenden Daten abgeleitet werden kann. Die so näherungsweise berechneten mittleren Durchflüsse MQ (unterirdische Abflussteile im Pegelquerschnitt werden nicht berücksichtigt) wurden validiert, indem sie mit statistisch hinterlegten MQ aus Beobachtungsreihen gewässerkundlicher Pegel verglichen wurden. Als Pegelbasis wurden dafür 147 Pegel genutzt.

Aufgrund der Abweichungen zwischen den flächendeckend berechneten Mittelwasserdurchflussspenden und den an den Pegeln beobachteten Mq wird die Anwendung des Top-Krigings empfohlen (näheres hierzu im Anhang 1). Die Abweichungen (Residuen) der für die Pegel berechneten von den beobachteten Mq werden mittels Top-Kriging auf die Teileinzugsgebiete des Pegels übertragen, so dass deren berechnete Mittelwasserdurchflussspenden mit den so gewichteten Residuen beaufschlagt werden. Im Ergebnis bedeutet das, dass die Teileinzugsgebiete des Pegels annähernd die beobachteten Mittelwasserdurchflussspenden wiedergeben.

Des Weiteren werden die Abweichungen zwischen beobachteten und berechneten Mittelwasserdurchflussspenden auf ähnliche Gebiete in der jeweiligen Nachbarschaft (Gebiete mit ähnlicher Größe und Entfernung vom beobachteten Pegelbezugsgebiet) übertragen, sodass mögliche Über- bzw. Unterschätzungen der Mittelwasserdurchflussspenden in den unbeobachteten Gebieten in gewissem Maße ausgeglichen werden können. Abschließend werden die Mittelwasserdurchflüsse auf Plausibilität im Längsschnitt und auf lokale Konsistenz zu den Niedrigwasserdurchflüssen überprüft.

A 2.3 Berechnung und Plausibilitätsprüfung

Die Ermittlung der mittleren jährlichen Gesamtabflüsse R erfolgte mit verfügbaren Daten aus unterschiedlichen Bearbeitungsphasen im Zuge der Realisierung des KliWES-Forschungsprojektes. In erster Linie und vorrangig wurden die Ergebnisse der KliWES-Säule B verwendet, denen ArcEGMO-Wasserhaushalts-Modellierungen zu Grunde liegen. Weil diese Daten aber nicht für das gesamte Untersuchungsgebiet vorlagen, wurden ergänzend auch Daten aus KliWES-Säule A, Modellierungsergebnisse aus DIFGA, verwendet. Die Ergebnisdaten aus KliWES-Säule B und KliWES-Säule A können über das Wasserhaushaltsportal Sachsen abgerufen werden. Im Ergebnis verblieben noch immer Bereiche in Sachsen, in denen keine Abflusswerte vorlagen. Auf diese Gebiete wurden die Abflüsse der Nachbareinzugsgebiete mittels Interpolation und Extrapolation übertragen. Abbildung 26 stellt die Abflüsse R [mm/a] im Untersuchungsgebiet als das Ergebnis der Zusammenführung dar.

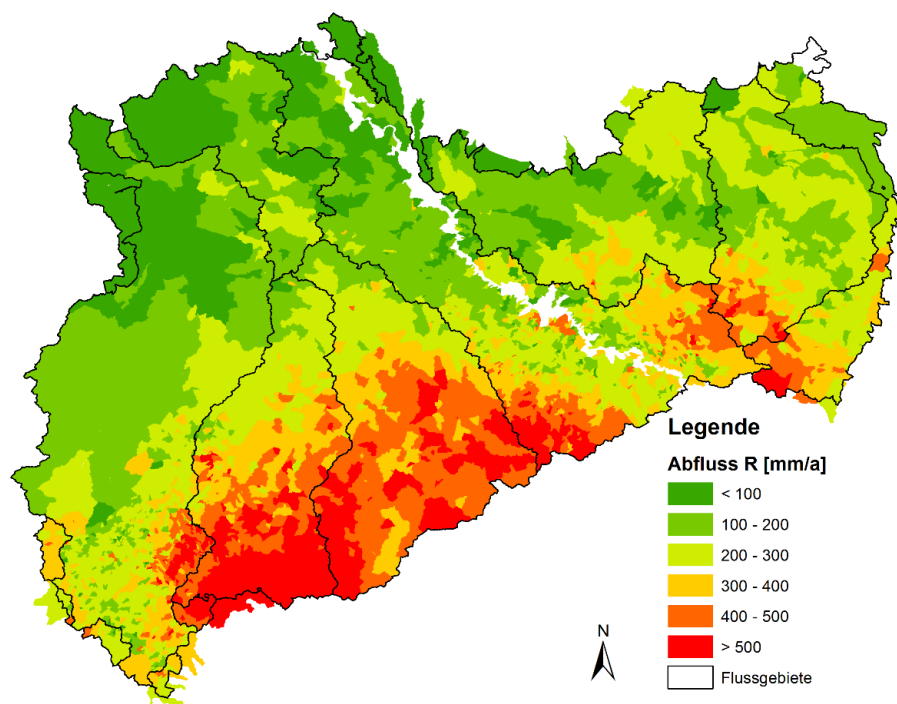


Abbildung 26: Abflüsse R als Grundlage für die Bestimmung des Mittelwasserdurchflusses

Mit Hilfe der aktuellen Einzugsgebietsgliederung von Sachsen wurden die Abflüsse R teileinzugsgebietsweise verschnitten und auf die Einzugsgebiete der Zu- und Ausflussquerschnitte zusammengefasst. Durch Multiplikation der Abflüsse [mm/a] mit der Einzugsgebietsgröße [km²] konnten anschließend die Abflüsse [m³/s] und Abflussspenden [l/(s·km²)] der Zu- und Ausflussquerschnitte berechnet werden.

In einem Vergleich der Durchflüsse an den Pegeln wurden die Residuen zwischen den beobachteten Durchflussspenden aus der Pegelstatistik und den für den Pegelstandort berechneten Abflussspenden ermittelt und mittels Top-Kriging auf das gesamte Untersuchungsgebiet übertragen. Im Ergebnis bedeutet dies, dass die berechneten M_q -Werte an den Pegeln annähernd die beobachteten M_q -Werte wiedergeben.

Die berechneten Mittelwasserdurchflüsse und -durchflussspenden wurden anschließend auf ihre Plausibilität hin überprüft, wobei folgende Kriterien berücksichtigt wurden:

- Korrektur unplausibel geringer Durchflussspenden
- Korrektur der Durchflüsse im Flusslängsschnitt

An ca. 3 % der Zu- und Ausflussquerschnitte wurden unplausibel niedrige Durchflussspenden kleiner $2,0 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ berechnet. Dieser Wert wurde als unplausibel definiert, weil er ca. 25 % unter der Abflussspende liegt, den der Pegel mit der geringsten Durchflussspende besitzt. Diese Durchflussspenden wurden dementsprechend auf den plausiblen Wert von $2,0 \text{ l/(s}\cdot\text{km}^2)$ angehoben.

Im nächsten Schritt wurde der Mittelwasserdurchfluss für alle Zu- und Ausflussprofile auf Plausibilität im Flusslängsschnitt überprüft. Als plausibel gilt, dass der Durchfluss im Flusslängsschnitt zunimmt oder mindestens gleich bleibt. Unplausibilitäten wurden beseitigt, indem die Durchflüsse auf den geringsten plausiblen Wert angehoben wurden.

Ein weiteres Kriterium für plausible Durchflüsse stellt die lokale Konsistenz der Mittelwasserdurchflüsse zum mittleren Niedrigwasserdurchfluss für das Winterhalbjahr dar. Im Anhang A 1.5 wurde bereits die lokale Konsistenz der Niedrigwasserdurchflüsse mit $\text{MNQ} \leq \text{MNQ}_{\text{Som}} \leq \text{MNQ}_{\text{Win}}$ geprüft. Somit muss für den Mittelwasserdurchfluss gewährleistet sein, dass dieser höher als der mittlere Niedrigwasserdurchfluss für das Winterhalbjahr ist.

Um zu verhindern, dass der Mittelwasserdurchfluss MQ gleich dem mittleren Niedrigwasserdurchfluss für das Winterhalbjahr MNQ_{Win} ist, wurde festgelegt, dass MQ mindestens 20 % über dem MNQ_{Win} liegen muss. Inkonsistente Durchflüsse wurden entsprechend auf den Wert des Niedrigwasserdurchflusses für das Winterhalbjahr plus eines Aufschlages von 20 % angehoben.

Weil es nun in vereinzelten Fällen erneut zu unplausiblen Durchflüssen im Längsschnitt kommen kann, wurde die Plausibilisierung im Flusslängsschnitt ein weiteres Mal durchgeführt.

A 2.4 Durchflusslängsschnitte

Die Berechnung der Durchflusslängsschnitte der Lausitzer Neiße für MQ erfolgte analog der Berechnung der Durchflusslängsschnitte für MNQ , MNQ_{Som} und MNQ_{Win} in Anhang A 1.4.3 indem die Pegel Hartau, Zittau 1, Rosenthal, Görlitz und Klein Bademeusel als Stützstellen dienten. Der berechnete Durchflusslängsschnitt für den Mittelwasserdurchfluss MQ der Lausitzer Neiße ist in Abbildung 27 und der entsprechende Durchflussspendenlängsschnitt in Abbildung 28 dargestellt. In gleicher Weise erfolgte die Berechnung des MQ-Längsschnittes für die Elbe.

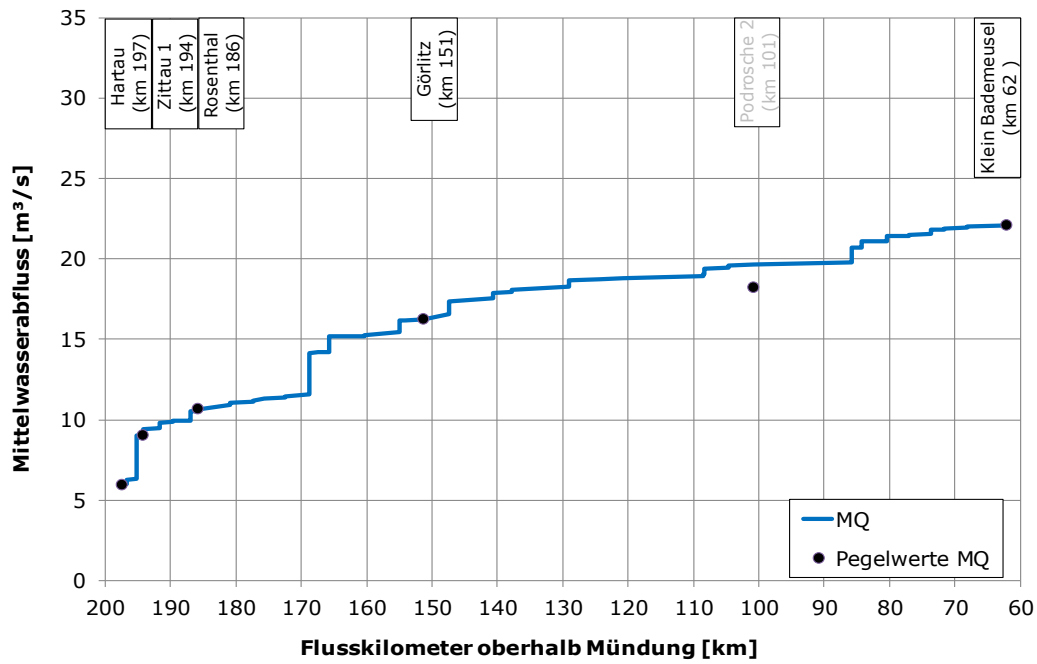


Abbildung 27: MQ-Längsschnitt der Lausitzer Neiße

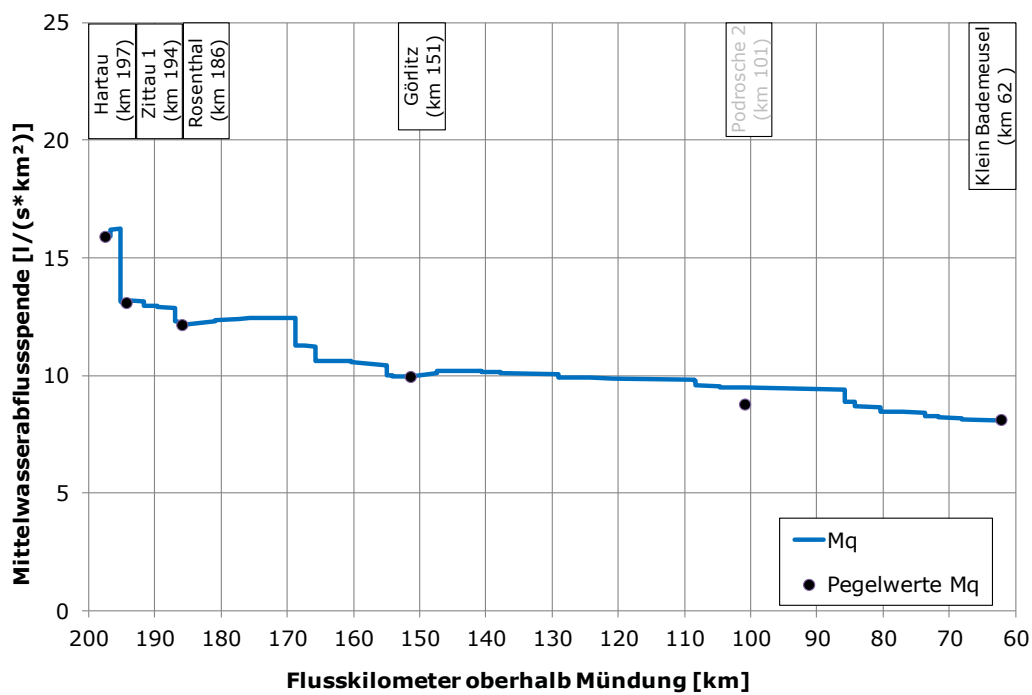


Abbildung 28: Durchflussspendenlängsschnitt der Lausitzer Neiße

A 2.5 Ergebnisse der Regionalisierung

Die berechneten, plausibilisierten und korrigierten Mittelwasserdurchflussspenden M_q einschließlich der aus den Längsschnitten ermittelten Durchflussspenden der Lausitzer Neiße sind in Abbildung 29 für die Zufluss- und Ausflussquerschnitte dargestellt.

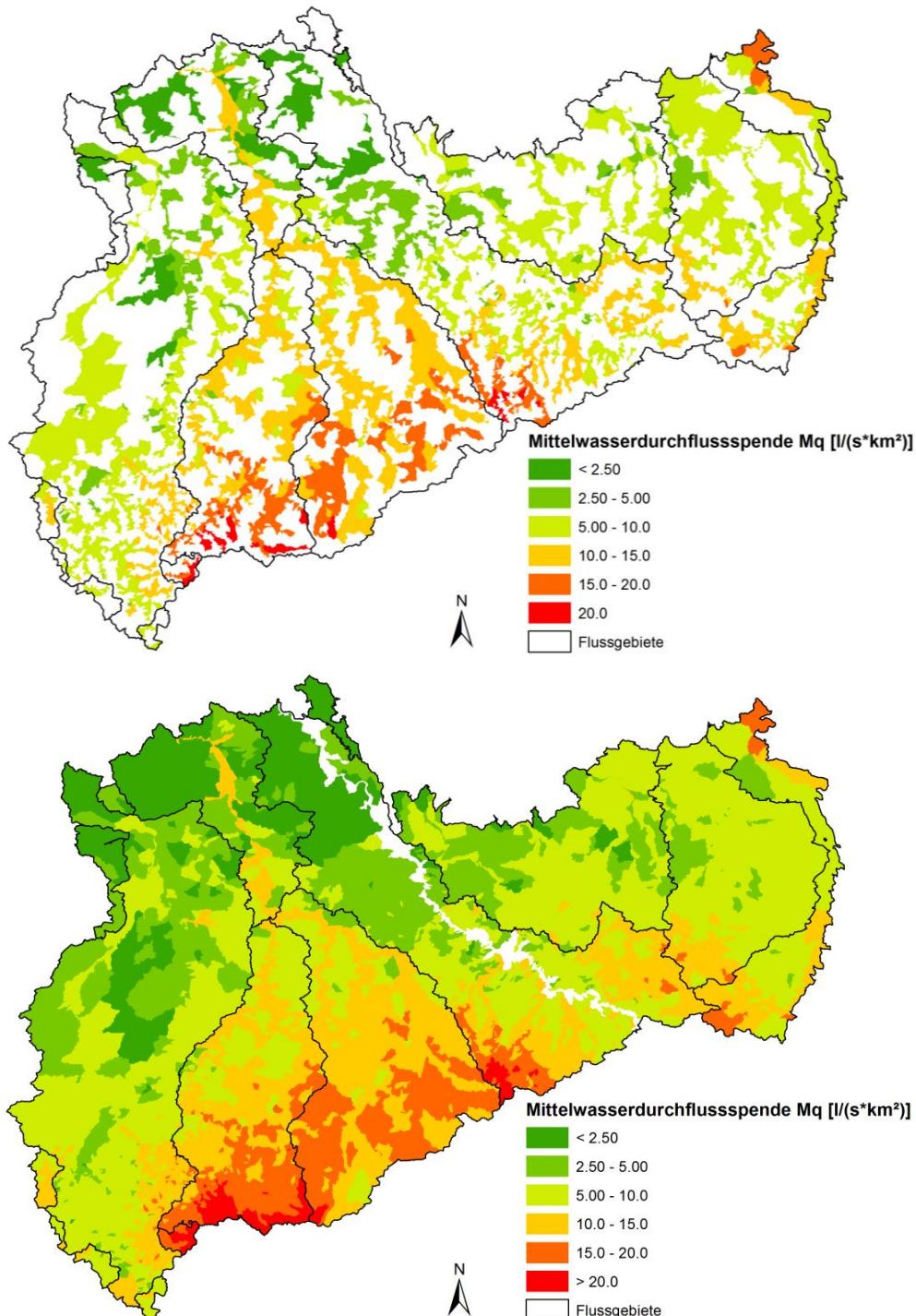


Abbildung 29: Vollständig plausibilisierte Mittelwasserdurchflussspenden M_q der Teileinzugsgebiete der Ausflussknoten für die Zuflussquerschnitte (oben) und die Ausflussquerschnitte (unten)

Anhang A 3 Regionalisierung von Hochwasserscheiteldurchflüssen mit Jährlichkeit HQ_T

A 3.1 Aufbereitung der Durchflussdaten für die Regionalisierung

A 3.1.1 Kriterien für die Verwendung von HQ_T -Werten

Für die Bestimmung der HQ_T mit $T = 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100$ und 200 Jahren sowie des MHQ mit $HQ-EX 4.0$ (DHI WASY 2015b) war es in einem ersten Schritt notwendig, homogene Jahres- HQ -Reihen sowie saisonale HQ -Reihen für das Sommer- und Winterhalbjahr bereitzustellen. Dafür wurden verschiedene Vorarbeiten durchgeführt, u. a. die

- Verlängerung der Reihen mehrerer Pegel mit den Reihen nicht mehr beobachteter benachbarter Pegel,
- Berücksichtigung von historischen Hochwasserereignissen,
- Datenkorrekturen,
- Prüfung der Plausibilität von extremen Hochwasserereignissen,
- Homogenitätsanalyse und
- die abschließende Festlegung der extremwertstatistisch auszuwertenden Pegel.

Die Mindestreihenlänge für die extremwertstatistische Auswertung mit $HQ-EX$ wurde auf 26 Jahre festgelegt. Für Pegel, die dieses Kriterium nicht erfüllen, wurde nur der mittlere Hochwasserscheiteldurchfluss MHQ berechnet, vorausgesetzt, es lagen mindestens zehn Beobachtungsjahre vor. Pegel mit Reihenlängen < 10 Jahre wurden bei der Regionalisierung nicht berücksichtigt.

Im Ergebnis dieser durchgeführten Untersuchungen wurden insgesamt 127 Pegel mit einer Reihenlänge > 25 Jahre ausgewählt, für die eine extremwertstatistische Auswertung der Jahres- HQ sowie der Winter- und Sommer- HQ empfohlen wurde. Diese Pegel werden im Folgenden als Basispegel der Regionalisierung bezeichnet.

Für 58 weitere Pegel mit einer Reihenlänge ≥ 10 Jahre wurde der MHQ ermittelt (im weiteren Text auch als MHQ -Pegel bezeichnet). Dazu gehörten auch einige mittlerweile nicht mehr beobachtete Pegel mit einer Reihenlänge > 25 Jahre, für die aber nur die Jahres- HQ zur Verfügung standen. Somit lag MHQ für insgesamt 185 Pegel vor und konnte im Zuge der Regionalisierung als Information genutzt werden.

A 3.1.2 Extremwertstatistische Auswertung

Methodische Grundlagen

■ Extremwertstatistische Auswertung mit HQ-EX

Die extremwertstatistische Auswertung der für die 127 Basispegel gebildeten Jahres-HQ-Reihen sowie saisonalen HQ-Reihen für das Sommer- und Winterhalbjahr erfolgte mit Hilfe der Software HQ-EX 4.0. Mit HQ-EX wurden die Parameter der Allgemeinen Extremwertverteilung nach der wahrscheinlichkeitsgewichteten Momentenmethode gemäß der im DVWK-Merkblatt 251 (DVWK 1999) beschriebenen Methodik geschätzt.

Für die Pegel mit historischen Hochwassern wurde die damit verbundene Zusatzinformation bei der extremwertstatistischen Auswertung der entsprechenden Reihen berücksichtigt. Dabei wurde in Kauf genommen, dass für die betreffenden Pegel die Reihen der Jahres-, Winter- und Sommer-HQ einen unterschiedlichen Informationsgehalt (Stichprobenumfang) besitzen können.

Des Weiteren wurde die in HQ-EX integrierte optionale Korrektur der HQ_T für kleine Wiederkehrintervalle, die auf den Empfehlungen in DVWK (1999) basiert, angewendet. Mit dieser Korrektur wird die aus der Verwendung von jährlichen Reihen resultierende Unterschätzung der HQ_T für kleine Jährlichkeiten, d. h. für $T = 2$ a und 5 a, kompensiert.

■ Anwendung der saisonalen Hochwasserstatistik

Bei statistisch gesehen kurzen Reihen, und als solche dürfen selbst 50-jährige Reihen betrachtet werden, sind die Ergebnisse der extremwertstatistischen Auswertung oft nicht befriedigend. Es ist daher ratsam, Möglichkeiten zur Informationserweiterung zu nutzen (DYCK u. A. 1980; DWA 2012). Eine Möglichkeit der (zeitlichen) Informationserweiterung ist die Einbeziehung historischer Hochwasser. Leider lagen gesicherte Aussagen über historische Hochwasserabflüsse nur für wenige Pegel vor. Eine andere Möglichkeit der (kausalen) Informationserweiterung ist die Aufgliederung der Hochwasser auf genetisch homogene Kollektive, die näherungsweise dadurch erreicht werden kann, dass für das Winterhalbjahr (November-April) und das Sommerhalbjahr (Mai-Oktober) je eine Reihe von Halbjahreshöchstabflüssen gebildet und separat extremwertstatistisch ausgewertet wird. SCHUMANN (2005) wandte diese als saisonale Hochwasserstatistik bezeichnete Methodik an, um im Einzugsgebiet der Mulde das Augusthochwasser 2002 hochwasserstatistisch einzuordnen.

Nach der extremwertstatistischen Auswertung der saisonalen HQ-Reihen für das Sommer- und Winterhalbjahr kann die auf das Gesamtjahr bezogene Unterschreitungswahrscheinlichkeit P_U eines bestimmten Hochwasserabflusses HQ mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$P_U(\text{Jahr}) = P_U(\text{Winter}) \cdot P_U(\text{Sommer}) \quad (1)$$

Gemäß Gleichung (1) kann die auf das Gesamtjahr bezogene Unterschreitungswahrscheinlichkeit nicht größer sein, als die Unterschreitungswahrscheinlichkeit im Winterhalbjahr oder im Sommerhalbjahr desselben Abflussjahres (November bis Oktober). Anders gesagt: Falls in einem Abflussjahr das HQ unterschritten wird, muss es sowohl im Winter als auch im Sommer unterschritten werden (SCHUMANN 2005).

Die mit Hilfe von Gleichung (1) berechneten Wertepaare (HQ , P_U) werden im Folgenden als Mischverteilung (zusammengesetzte Verteilung aus Winter- und Sommerhalbjahr) bezeichnet. Bei dieser Mischverteilung werden die

selteneren großen Sommerhochwasser der sächsischen Fließgewässer besser gegenüber den häufigeren kleineren Winterhochwassern als bei der aus den Jahreshöchst durchflüssen bestimmten Verteilungsfunktion berücksichtigt (DWA 2012). Mathematisch problematisch dabei ist, dass es mit Gleichung (1) zwar möglich ist, für ein bestimmtes HQ die auf das Gesamtjahr bezogene Unterschreitungswahrscheinlichkeit zu berechnen, eine analoge Gleichung, mit der für eine vorgegebene Unterschreitungswahrscheinlichkeit – wie in der Hydrologie üblich – der Hochwasserabfluss berechnet werden kann, aber nicht existiert. Letztlich fehlt eine geschlossene mathematische Beschreibung der zusammengesetzten Verteilung, die strenggenommen keine Allgemeine Extremwertverteilung mehr ist.

Praktisch wurde dieses Problem gelöst, indem an die zusammengesetzte Verteilung eine Allgemeine Extremwertverteilung approximiert wurde. Dies geschah über eine Optimierung der drei Parameter der Allgemeinen Extremwertverteilung, bei der die Summe der gewichteten quadratischen Abweichung zwischen der zusammengesetzten Verteilung und der approximierten Allgemeinen Extremwertverteilung minimiert wurde. Als Gewicht wurde der Hochwasserscheiteldurchfluss HQ verwendet. Damit wurde im Vergleich zur Anwendung der Minimierung der Summe der einfachen quadratischen Abweichung eine bessere Anpassung der Allgemeinen Extremwertverteilung an die zusammengesetzte Verteilung im Extrapolationsbereich ($T \geq 100$ a) erzielt. Abbildung 30 veranschaulicht die Vorgehensweise und das Ergebnis der Optimierung beispielhaft für den Pegel Golzern 1/Mulde.

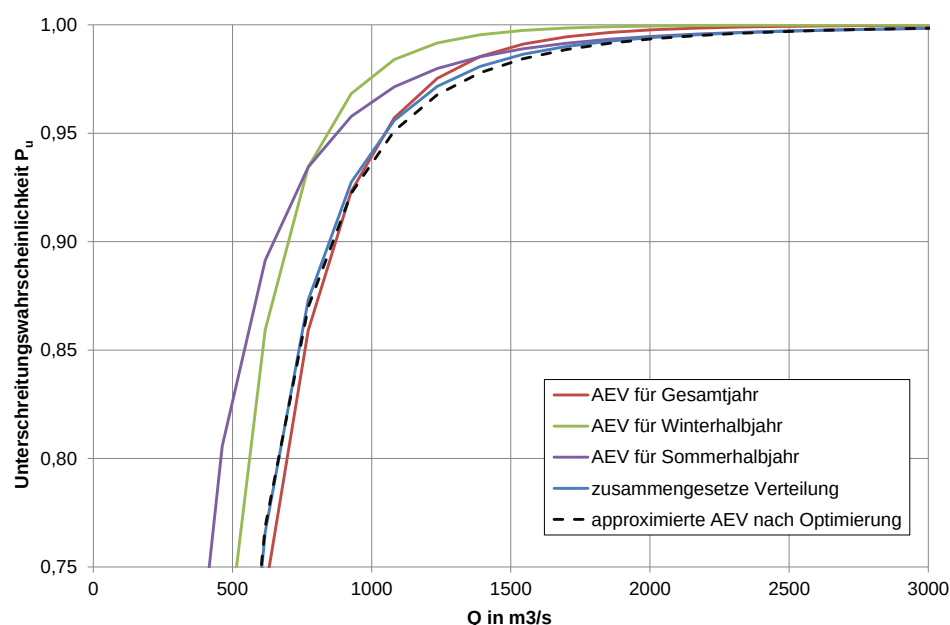


Abbildung 30: Approximation einer Allgemeinen Extremwertverteilung an die zusammengesetzte Verteilung am Beispiel des Pegels Golzern 1/Mulde

Die für alle Basispegel ermittelten approximierten Allgemeinen Extremwertverteilungen wurden für die Anwendung des Index-Flood-Verfahrens (Abschnitt A 3.3.3) genutzt.

A 3.1.3 Ergebnisse

Im Ergebnis standen für die 127 Basispegel die HQ_T mit $T = 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100$ und 200 a und für 185 Pegel das MHQ zur Verfügung.

A 3.2 Geodaten und Gebietskenngrößen für die Regionalisierung

Für die angewendeten Regionalisierungsverfahren „Multiple lineare Regression“ (Abschnitt A 3.3.1) und „Top-Kriging“ (Abschnitt A 3.3.1) waren Geodaten und daraus für räumliche Einheiten abgeleitete Gebietskenngrößen notwendig. Im Zuge der Modellerstellung wurden diese Gebietskenngrößen zunächst für die Einzugsgebiete der verwendeten Fließgewässerpegel und später für alle Teileinzugsgebiete des Wasserlaufverzeichnisses (Stand August 2015) bereitgestellt. Gebietskenngrößen für die Pegel-einzugsgebiete wurden auch für die Bildung von hochwasserhomogenen Regionen verwendet (Abschnitt A 3.3).

Die Auswahl der Gebietskenngrößen, die in die Regionalisierung einzubeziehen waren, gestaltete sich insofern schwierig, als dass die Gebietskenngrößen, die einen signifikanten Einfluss auf den mittleren Hochwasserscheiteldurchfluss MHQ bzw. die mittlere Hochwasserscheiteldurchflussspende MHq haben, a priori nicht bekannt sind. Aufbauend auf den Erfahrungen bei der Hochwasserregionalisierung in Brandenburg (DHI WASY 2009), Sachsen (DHI WASY 2010a), Rheinland-Pfalz (DHI WASY 2010b) und Thüringen (DHI WASY 2012) sowie GLOS UND LAUTERBACH (1972) und WILLEMS UND HIRSCHHÄUSER (2004) kamen folgende Gebietskenngrößen für die Regionalisierung prinzipiell in Frage:

- Hydrographische und morphologische Kenngrößen, z. B. Einzugsgebietsfläche, Einzugsgebietsform, Fließgewässerdichte, Geländegefälle, mittlere Geländehöhe des Einzugsgebietes,
- Meteorologische und hydrologische Kenngrößen, z. B. mittlerer Jahresniederschlag, mittlerer jährlicher Zufluss zum Speicher der langsamsten unterirdischen Abflusskomponente, Rückgangskonstante der langsamsten unterirdischen Abflusskomponente,
- Landnutzungs-kenngrößen, z. B. Waldanteil, Anteil der bebauten Fläche,
- Bodenkenngrößen, z. B. nutzbare Feldkapazität, hydraulische Leitfähigkeit.

A 3.3 Anwendung Regionalisierungsverfahren

In WALTHER U. A. 2012 wurde folgende Verfahrenskombination als Vorzugsverfahren zur Ermittlung von regionalisierten HQ_T in Sachsen empfohlen:

- Multiple lineare Regression zwischen MHQ und Einzugsgebietskenngrößen,
- Regionale Analyse und Ausgleich der Residuen der multiplen linearen Regression mit Top-Kriging,
- Bestimmung der höheren Momente (Varianz und Schiefe) der regionalen Verteilungsfunktion mit dem Index-Flood-Verfahren.

Dieses Vorzugsverfahren wurde auf Grundlage der aktualisierten HQ_T von 122 Basispegeln (ohne die Pegel im Längsschnitt der Lausitzer Neiße) und der aktualisierten MHQ von 180 Pegeln sowie auf Grundlage der unveränderten Geodatenbasis und daraus abgeleiteter Gebietskenngrößen aus DHI WASY (2015a) angewendet.

Mit dem Vorzugsverfahren wurden die Hochwasserscheiteldurchflüsse HQ_T mit den Jährlichkeiten $T = 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100$ und 200 a für Pegelgebiete (Gewässerquerschnitte mit Gebietsgrenzen und lokal beobachteten Hochwasserkollektiven) und für unbeobachtete Gebiete (Gewässerquerschnitte mit Gebietsgrenzen ohne lokale Beobachtungen) für das Gebiet des Freistaates Sachsen (ohne den Elbestrom und den Längsschnitt der Lausitzer Neiße) bestimmt.

Die Anwendung des Vorzugsverfahrens ergab letztendlich die Unterteilung Sachsens (in Abbildung 31 rot umrandet) in zwei hochwasserhomogene Regionen, eine Nordregion (Region 1) und eine Südregion (Region 2).

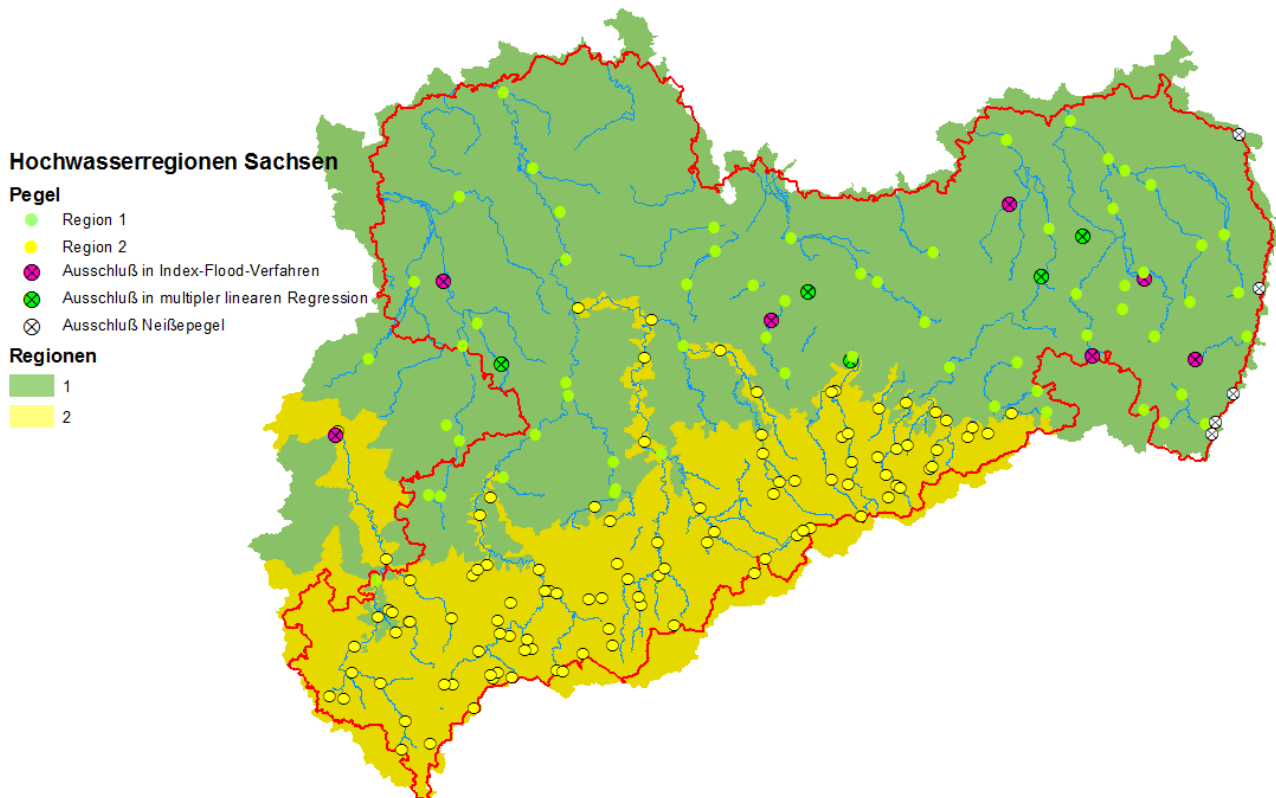


Abbildung 31: Hochwasserhomogene Regionen in Sachsen als Basis für das Vorzugsverfahren

Für insgesamt 15 Abschnitte größerer Fließgewässer wurden HQ_T -Längsschnitte mit einem Regressionsansatz erstellt.

Die Hochwassergutachten zu den Einzugsgebieten der bestehenden und geplanten Stauanlagen der LTV einschließlich der beeinflussten Unterliegegebiete gehen mehrheitlich nicht von den Regionalisierungsergebnissen aus, sondern berücksichtigen im Regelfall die Ergebnisse von Niederschlag-Abfluss-Modellierungen. Mit entsprechenden Sicherheitszuschlägen wird die herausgehobene, wasserwirtschaftliche Bedeutung bzw. das Gefahrenpotential der Talsperren, Rückhaltebecken und Speicher berücksichtigt. Dieses Vorgehen kann hinsichtlich der Regionalisierungsergebnisse zu differenzierten Bemessungswerten führen. Darüber hinaus wurden Untersuchungen ergänzend zur Regionalisierung im ostsächsischen Tieflandbereich vorgenommen, um die spezielle Gebietscharakteristik bei der Bestimmung der HQ_T -Längsschnitte zu berücksichtigen.

A 3.3.1 Multiple lineare Regression

Methodische Grundlagen

Bei der multiplen linearen Regression werden Hochwasserscheiteldurchflüsse bzw. -durchflussspenden von Pegeln und Gebietskenngrößen der Pegeleinzugsgebiete durch Regressionsmodelle miteinander verknüpft. Dabei wird davon ausgegangen, dass mit den aufgestellten Modellen auch für unbeobachtete Gewässerquerschnitte,

deren Gebietskenngrößen bekannt sind, Hochwasserscheiteldurchflüsse mit Jährlichkeit HQ_T in m^3/s oder deren Spenden Hq_T in $l/(s \cdot km^2)$ bestimmt werden können.

Die multiple lineare Regression wurde in den letzten zwei Jahrzehnten mehrfach erfolgreich angewendet, z. B. in FÜGNER ET AL. (1990), HAUPT (2000), DHI WASY (2009), WALTHER U. A. (2012), DHI WASY (2012) und DHI WASY (2015a).

Für den Aufbau der linearen Regressionsmodelle waren für jede Region die folgenden Arbeitsschritte erforderlich:

- Test auf Normalverteilung der Eingangsdaten,
- Untersuchung der Gebietskenngrößen auf Interkorrelation,
- Schrittweise multiple lineare Regression für MHq,
- Auswahl geeigneter Regressionsmodelle für MHq.

Zur Durchführung der Regression wurde das lineare Mehrfachregressionsmodell in folgender Form verwendet:

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_n \cdot X_n \quad (2)$$

In dieser Gleichung ist a_0 die Regressionskonstante, a_1 bis a_n sind die (partiellen) Regressionskoeffizienten und X_1 bis X_n die Regressoren (Gebietskenngrößen). Die Abflüsse oder Abflussspenden als Zielgrößen der Regression sind die Regressanden Y .

Schrittweise Regression bedeutet, dass zunächst ein Regressionsmodell aufgestellt wird, dass alle ermittelten n Gebietskenngrößen als Regressoren enthält. Anschließend wird diejenige Gebietskenngröße vernachlässigt, die den geringsten Einfluss auf die Zielgröße hat, und ein Regressionsmodell mit $n-1$ Regressoren aufgestellt. Diese Prozedur wird so oft wiederholt, bis ein Regressionsmodell mit nur einem Regressor erhalten wird.

Zur Beurteilung, welches der n Regressionsmodelle das Beste ist, wurden verschiedene Gütekriterien berücksichtigt. Das waren das Bestimmtheitsmaß R^2 , das von AKAIKE (1974) vorgeschlagene Informationskriterium AIC und der mittlere Fehlerquotient (DHI WASY 2015a). Die Entscheidung für eine Modellgruppe mit der notwendigen Anzahl von Gebietskenngrößen ist ein Kompromiss zwischen der Genauigkeit der Ergebnisse, die sich mit zunehmender Anzahl an Regressoren sukzessive erhöht, und der Stabilität der Modelle, die umso eher gewährleistet ist, je weniger Regressoren in den Gleichungen berücksichtigt werden.

Ergebnisse

Die Bestimmung der Regressionsgleichung zur Ermittlung der mittleren Hochwasserscheiteldurchflussspende MHq wurde für die beiden hochwasserhomogenen Regionen getrennt durchgeführt. Infolgedessen erfolgten auch die Tests auf Normalverteilung und Interkorrelation für beide Regionen getrennt. Dafür wurden 67 Pegel in der Region 1 und 96 Pegel in der Region 2 verwendet. Nicht verwendet wurden Pegel an den Mulden, der Zschopau und der Weißen Elster mit Einzugsgebietsgrößen größer $960 km^2$, da vermutet wurde, dass diese einen zu großen Einfluss auf die Regressionsbeziehung der Region 2 besitzen.

Um einen strafferen Zusammenhang zwischen den Gebietskenngrößen und den MHq in den Regressionsmodellen zu erzielen, ist es unter Umständen notwendig, vereinzelt Pegel zu entfernen, die nicht dem allgemeinen Verhalten der Pegel der jeweiligen Region entsprechen. Hierfür wurden die mittleren Fehlerquotienten der einzelnen Pegel

betrachtet und die Pegel identifiziert, die ein auffälliges Verhalten aufweisen. Ein solches ist in erster Linie dadurch gekennzeichnet, dass die mittels Regression berechneten MHq die aus den Jahres-HQ der Pegel berechneten MHq deutlich über- bzw. unterschätzen. Eine Zusammenfassung der Pegel mit signifikanten Abweichungen ist in Tabelle 3 dargestellt.

Aufgrund der erheblichen Abweichungen der MHq der in Tabelle 3 angegebenen Pegel allgemein üblichen MHq der Pegel der jeweiligen Region wurden diese Pegel als „Ausreißerpegel“ identifiziert und aus der Datenbasis für die Regressionsanalyse entfernt. Damit reduzierte sich die Pegelanzahl in der Region 1 auf 62 und in der Region 2 auf 91 Pegel und insgesamt auf 153 von ursprünglich 180 MHQ-Pegeln.

Tabelle 3: Übersicht der Pegel mit signifikanten Abweichungen von den MHq in der jeweiligen Region

Region 1	Region 2
Gorbitz 1/Gorbitzbach	Bad Elster 1/Weiße Elster
Lomske/Lomschanke	Neundorf/Gottleuba
Niederau/Niederauer Dorfbach	Am Katzenstein/Große Mittweida
Pietzschwitz/Langes Wasser	Ehrenfriedersdorf/Greifenbach
Streitwald 1/Wyhra	Elterlein/Schwarzbach

Die ermittelten Regressionsbeziehungen für die Regionen 1 (Nordregion) und 2 (Südregion) sind im Folgenden dargestellt:

$$\begin{aligned}
 \text{Region 1: } \quad \text{LN(MHq)} &= - 0,29518 \cdot \text{LN}(A_E) \\
 &+ 1,74300 \cdot \text{SQRT}(\text{mittlere Gebietshöhe})/10 \\
 &+ 0,15816 \cdot \text{SQRT}(\text{bebaute Anteil}) \\
 &+ 0,16500 \cdot \text{SQR}(n_{FK})/10000 \\
 &+ 2,23417
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Region 2: } \quad \text{LN(MHq)} &= - 0,15289 \cdot \text{LN}(A_E) \\
 &+ 1,11548 \cdot \text{SQRT}(P_{\text{Jahr}}) \\
 &+ 0,41664 \cdot \text{SQRT}(\text{Flussdichte}) \\
 &- 0,43067 \cdot \text{LN}(KF10) \\
 &- 1,09818
 \end{aligned}$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen wurden die mittleren Hochwasserscheiteldurchflussspenden MHq für die Zu- und Ausflussquerschnitte (Knoten) der im Wasserlaufverzeichnis (Stand 2015) angegebenen Fließgewässer in Sachsen berechnet.

A 3.3.2 Top-Kriging der Residuen

Methodische Grundlagen

Top-Kriging gehört zur Gruppe der geostatistischen Verfahren, die auf der Annahme beruhen, dass benachbarte Gebiete ein ähnliches Abflussverhalten zeigen (BLÖSCHL 2006), da sich Klima und Gebietseigenschaften nur allmählich im Raum ändern. Geostatistische Verfahren werden zur räumlichen Interpolation vieler hydrologischer Größen wie Grundwasserstand, Niederschlag oder Bodenfeuchte verwendet und wurden auch in anderen Regionen schon erfolgreich zur Bestimmung von regionalen Hochwasserkennwerten (z. B. MERZ UND BLÖSCHL 2005) und auch Niedrigwasserkennwerten angewandt (LAAHA 2008).

Im traditionellen „Ordinary-Kriging-Verfahren“ wird die zu schätzende Größe (hier Residuen an Gewässerquerschnitten ohne Pegel) als gewichtetes Mittel der gemessenen Größe (hier Residuen an Pegeln) in der Nachbarschaft berechnet (siehe folgenden Abschnitt „Ergebnisse“).

$$\hat{z}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(\mathbf{x}_i) \quad (3)$$

λ_i ist das Gewicht der Messung an der Position $\mathbf{x}_i$ und n ist die Anzahl der benachbarten Stationen, die zur Interpolation benutzt werden. Die Gewichte sind abhängig von der Distanz der Stationen zur Position $\mathbf{x}_0$ und werden über das Semivariogramm bzw. die Kovarianz ermittelt.

Im traditionellen Ordinary-Kriging-Verfahren wird die euklidische Distanz zwischen Punkten, ähnlich der Inversen-Distanz-Methode, zur Berechnung der Gewichte verwendet. In der Einzugsgebietshydrologie ist jedoch die rein euklidische Distanz zwischen Gebieten nicht das beste Maß zur Beschreibung der Ähnlichkeit. Gebiete sind entlang des Gewässernetzes in Teileinzugsgebiete geordnet. Ober- und Unterliegergebiete sind hydrologisch ähnlicher als Gebiete am benachbarten Gewässer. Daher wurde in diesem Projekt ein neues Verfahren, Top-Kriging (SKØIEN U. A. 2006) angewandt, welches die Topologie der Einzugsgebiete berücksichtigt.

Durch diese Eigenschaft von Top-Kriging ist es möglich, die Relationen von Ober- und Unterlieger topologisch korrekt zu berücksichtigen, im Gegensatz zum Ordinary-Kriging-Verfahren, wo dies nicht möglich ist.

Ergebnisse

Datenbasis für die Anwendung des Top-Kriging bilden die Residuen der Pegeleinzugsgebiete. Die Residuen sind die Differenz zwischen den beobachteten (Pegelstatistik) und den berechneten MHq (Ergebnisse der multiplen linearen Regression).

Diese Differenzen (Residuen) wurden anschließend mittels des Top-Krigings auf das Untersuchungsgebiet übertragen. In Abbildung 32 sind die Residuen der Pegel und der Teilgebiete dargestellt. Anhand der Farbgebung erkennt man, wie die Residuen der Pegel topologisch korrekt auf die Einzugsgebiete übertragen wurden. Maßgebend für die unbeobachteten Oberläufe der Gewässer sind die Residuen des nächstgelegenen Pegels am gleichen Gewässer.

Mit den regionalisierten Residuen konnten dann die mittels der multiplen linearen Regression bestimmten MHq-Werte (Abschnitt A 3.3.1) beaufschlagt werden. Im Ergebnis bedeutet das, dass die Pegeleinzugsgebiete die beobachteten MHq-Werte aufweisen. Des Weiteren wurden die Abweichungen (Residuen) zwischen beobachteten

und berechneten MHq-Werte auf benachbarte ähnliche Gebiete (ähnliche Größe und Entfernung vom beobachteten Pegeleinzugsgebiet) übertragen, so dass mögliche Über- bzw. Unterschätzungen von MHq-Werten durch die Regressionsmodelle in den unbeobachteten Gebieten in gewissem Maße ausgeglichen werden konnten.

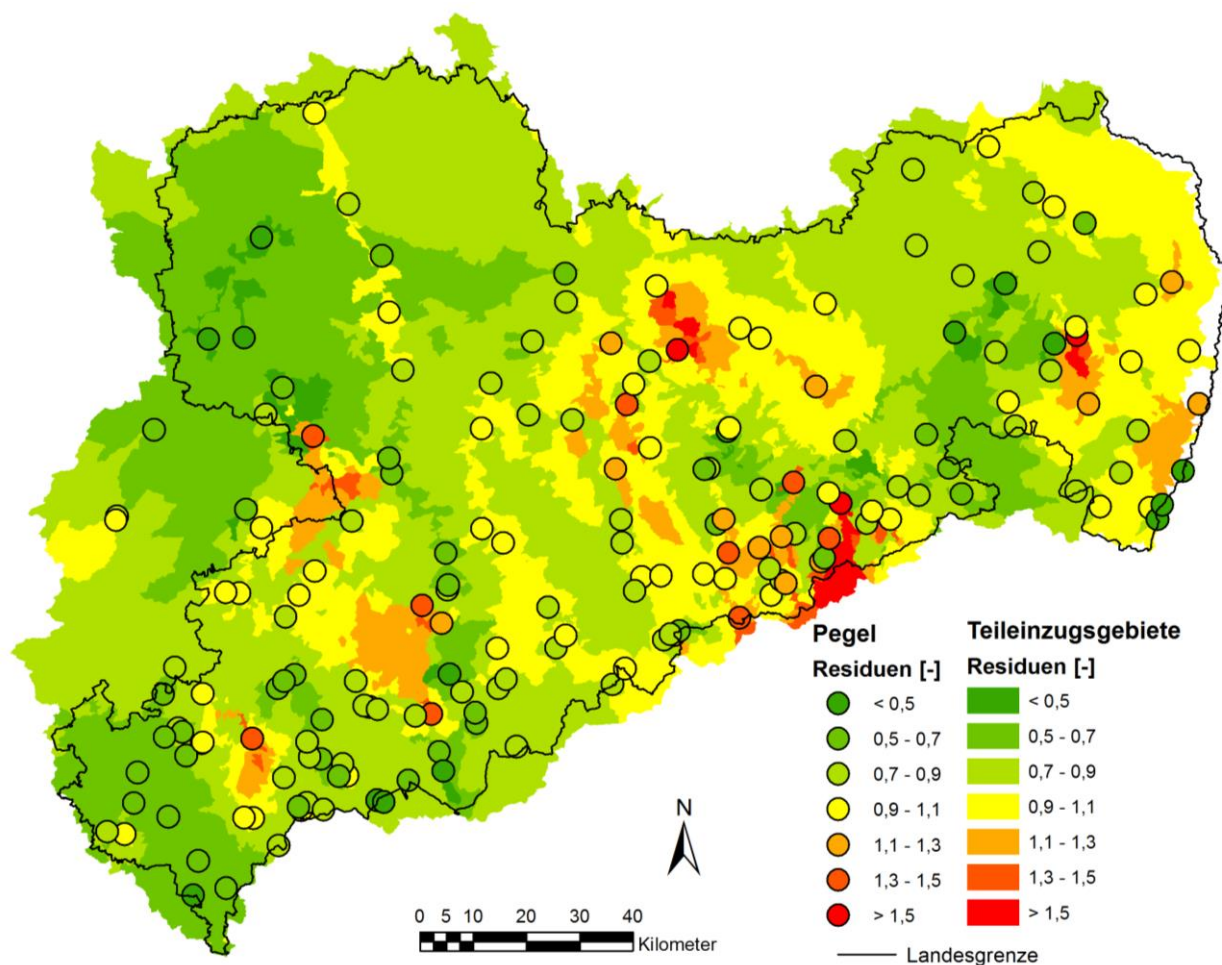


Abbildung 32: Residuen der Pegel und der Teileinzugsgebiete des Untersuchungsgebietes

A 3.3.3 Index-Flood-Verfahren zur Bestimmung der HQ_T

Ein in der hydrologischen Literatur weit verbreitetes Verfahren zur räumlichen Übertragung von Hochwasserwerten ist die Ausweisung von „homogenen“ Regionen, in denen ein einheitliches Hochwasserverhalten angenommen wird. Die Idee des Ansatzes ist, dass Daten (z. B. Hochwasserwerte) innerhalb einer homogenen Region zusammengefasst (d. h. gepoolt) werden, um damit die Aussagekraft über das Hochwasserverhalten zu steigern.

Die bekannteste Methode, welche auf der Bestimmung homogener Regionen (im Englischen oft „Pooling Group“ genannt) beruht, ist das Index-Flood-Verfahren (DALRYMPLE 1960). Das Index-Flood-Verfahren besteht aus drei Schritten. Im ersten Schritt werden homogene Regionen gefunden. In einem zweiten Schritt werden die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven der Pegel innerhalb einer homogenen Region mit den vieljährigen mittleren Jahreshochwasserscheiteldurchflüssen MHQ (der Index-Flood) normiert und zu einer einzigen (dimensionslosen) regionalen Verteilung (der „Growth Curve“) zusammengefasst (gepoolt). Für Pegelquerschnitte mit Durchflussbeobachtungen werden schließlich in einem dritten Schritt deren MHQ mit der Growth Curve der jeweiligen Region multipliziert, wodurch sich die gesuchten Hochwasserscheiteldurchflüsse mit Jährlichkeit HQ_T ergeben. Für Ge-

wässerquerschnitte ohne Durchflussbeobachtungen werden die MHQ aus Beziehungen zu diversen Einzugsgebietscharakteristika ermittelt, z. B. über eine multiple lineare Regression.

Methodische Grundlagen

Das Index-Flood-Verfahren beruht auf der Annahme, dass innerhalb einer homogenen Region die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven aller Gebiete einer regionalen Verteilung (der Growth Curve) folgen und sich nur durch einen Normierungsparameter (der „Index-Flood“) unterscheiden. Ein Hochwasserscheiteldurchfluss einer gegebenen Jährlichkeit T berechnet sich somit nach:

$$HQ_i = MHQ_i \cdot x_T \quad (4)$$

HQ_i ist die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve im Gebiet i , MHQ_i die Index-Flood im Gebiet i und x_T die Growth Curve, d. h. die dimensionslose Hochwasserverteilungsfunktion der Region. Die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven innerhalb einer Region unterscheiden sich deshalb nur durch ihre Lage bzw. ihr Niveau (= Index-Flood). Die Form der Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve ist für alle Gebiete innerhalb der Region gleich.

Die Berechnung der Growth Curve erfolgt anhand der von HOSKING und WALLIS vorgeschlagenen Methode unter Verwendung der L-Momente, da diese Methode durch ihre zahlreiche Anwendung in den letzten Jahren als „Standard-Verfahren“ in der hydrologischen Literatur angesehen wird (HOSKING und WALLIS 1997).

Die Growth Curves werden entsprechend den festgelegten Regionen 1 und 2 ermittelt. Die Lage der Regionen ist aus Abbildung 31 zu entnehmen.

Ergebnisse

Die Growth Curve wurde für jede Region ermittelt. Für viele Gebiete in Sachsen ist ein jahreszeitlich unterschiedliches Hochwasserverhalten zu beobachten. Um diese Unterschiede der Hochwassergenese in der statistischen Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten zu berücksichtigen, wurde eine saisonale Hochwasserstatistik angewandt und die Parameter einer Allgemeinen Extremwertverteilung (AEV) berechnet (Abschnitt A 3.1.2). Mit Hilfe dieser Parameter wurden anschließend die L-Momente für jeden Basispegel berechnet.

Eine Grundlage für die Anwendung des Index-Flood-Verfahrens ist es, dass die in einer Region verwendeten Pegel einen ausreichenden regionalen Zusammenhang besitzen. HOSKING UND WALLIS (1997) schlagen hierfür das Heterogenitätsmaß H vor, das auf den L-Momenten bzw. daraus gebildeten Quotienten, den sogenannten L-Momenten-Quotienten (L-CV, L-Skewness, L-Kurtosis) beruht.

Pegel, die nicht dem mittleren Verhalten der so bestimmten Größen in der Region entsprechen, wurden entfernt. Die nicht berücksichtigten Pegel sind in Tabelle 4 enthalten:

Auf Basis der reduzierten Pegelanzahl wurden anschließend mittels der L-Momente die Parameter der Growth Curve der Regionen 1 und 2 bestimmt, die in Tabelle 5 enthalten sind.

Tabelle 4: Übersicht der Pegel mit signifikanten Abweichungen vom mittleren Verhalten der Pegel der jeweiligen Region (Index-Flood-Verfahren)

Region 1	Region 2
Böhlen 1/Pleiße	Cämmerswalde-Neuwersdorf/Flöha
Garsebac /Triebisch	Neundorf/Gottleuba
Hohberg/Rosenbach	
Kotitz/Kotitzer Wasser	
Rennersdorf 2/Petersbach	
Rennersdorf 6/Berthelsdorfer Wasser	
Thieschitz (Thüringen)/Erlbach	
Trado 2+3/Schwarze Elster	

Tabelle 5: Parameter der Growth Curve der saisonalen HQ-Statistik

Region	Modell	Lageparameter ξ	Anstiegsparameter α	Krümmungsparameter κ
1	Allgemeine Extremwertverteilung	0,6695	0,3112	-0,3331
2	(AEV)	0,6357	0,2702	-0,4435

Mit den Parametern der bevorzugten regionalen Verteilungsfunktionen wurden für jede Region separat die normierten Quantile der Hochwasserwahrscheinlichkeitsfunktionen x_T nach Gleichung (5) bestimmt (DVK 1999):

$$x_T = \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \cdot \left[1 - \left(-\ln(P_u^*) \right)^\kappa \right] \quad (5)$$

P_u^* ist darin die Unterschreitungswahrscheinlichkeit (Gleichung (6)), die für alle Jährlichkeiten T wie folgt berechnet wird:

$$P_u^* = 1 - \frac{1}{T} \quad (6)$$

In Tabelle 6 sind die normierten Quantile der Hochwasserwahrscheinlichkeitsfunktionen für jede Region enthalten.

Mit der Kenntnis der MHQ für beobachtete und unbeobachtete Gebiete und der Kenntnis der Hochwasserwahrscheinlichkeitsfunktion ließen sich nach Gleichung (4) die Hochwasserwahrscheinlichkeitskurven für jedes Gebiet berechnen.

Tabelle 6: Normierte Quantile der Hochwasserwahrscheinlichkeitsfunktion x_T für jede Region

Region	normierte Quantile x_T für $T [a] =$							
	2	5	10	20	25	50	100	200
Unterschreitungs- wahrscheinlichkeit	0,606*	0,818*	0,900	0,950	0,960	0,980	0,990	0,995
Region 1 (Nordregion)	0,912	1,328	1,712	2,248	2,447	3,163	4,060	5,188
Region 2 (Südregion)	0,855	1,266	1,679	2,300	2,543	3,464	4,711	6,404

*Korrektur der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten für kleine Wiederkehrintervalle (DVWK 1999)

A 3.3.4 Erstellung von HQ_T -Längsschnitten mit einem Regressionsansatz

Für eine Reihe größerer Flüsse wurden zusätzlich zur Anwendung des Vorzugsverfahrens HQ_T -Längsschnitte erstellt. Dieses Regionalisierungsverfahren, bei dem die HQ_T über die Fließlänge des Hauptflusses dargestellt werden, eignet sich besonders für diejenigen großen Fließgewässer, an denen sich mindestens zwei Pegel mit genügend langen Durchflussbeobachtungsreihen befinden und/oder die Einzugsgebietsflächen der seitlichen Zuflüsse im Verhältnis zu denen des Hauptflusses klein sind bzw. die Verformung der Hochwasserwelle des Hauptflusses dominant ist. An der Lausitzer Neiße war der HQ_T -Längsschnitt außerdem notwendig, da aufgrund fehlender Gebietskenngrößen (ein großer Teil des Einzugsgebietes liegt in Polen und Tschechien) die oben beschriebenen Regionalisierungsverfahren nicht angewendet werden konnten. In Tabelle 7 sind die Gewässerabschnitte der Flüsse angegeben, für die HQ_T -Längsschnitte erstellt worden sind. Als Stützstellen für die HQ_T -Längsschnitte wurden die Ergebnisse der HQ-Statistik der Basispegel verwendet, die in den jeweiligen Gewässerabschnitten liegen oder diese begrenzen.

Tabelle 7: Gewässerabschnitte der erstellten HQ_T -Längsschnitte

	Gewässer	von	bis
1	Elbe	Tschechische Staatsgrenze	Landesgrenze zu Sachsen-Anhalt
2	Große Röder	Mündung der Schwarzen Röder	Gabelwehr Zabeltitz
3	Vereinigte Mulde	Vereinigung von Zwickauer Mulde und Freiburger Mulde	Landesgrenze zu Sachsen-Anhalt
4	Zwickauer Mulde	Schwarzwassermündung	Vereinigung mit der Freiburger Mulde
5	Würschnitz/Chemnitz	Pegel Harthau	Mündung in Zwickauer Mulde
6	Freiberger Mulde	Gimmlitzmündung	Vereinigung mit der Zwickauer Mulde
7	Zschopau	Preßnitzmündung	Mündung in Freiberger Mulde
8	Flöha	Mündung der Schwarzen Pockau	Mündung in Zschopau
9	Weißer Elster	Tschechische Staatsgrenze	Pegel Oberthau
10	Pleiße	Pegel Neukirchen 1	Mündung in Weißer Elster
11	Spree	Mündung des Löbauer Wassers	Landesgrenze zu Brandenburg
12	Mandau	Pegel Seifhennersdorf	Mündung in die Lausitzer Neiße
13	Lausitzer Neiße	Pegel Hartau	Pegel Klein Bademeusel

Methodische Grundlagen

Basis für die Erstellung der HQ_T -Längsschnitte bildet die Regressionsgleichung der Form:

$$\ln(Hq_T) = \ln(b) - c(T) \cdot \ln(A_E) \quad (7)$$

mit der die T-jährliche Hochwasserscheiteldurchflussspende Hq_T mit der Einzugsgebietsfläche A_E verknüpft wird (DWA 2012).

Für die in Tabelle 7 angegebenen Gewässerabschnitte wurden die Parameter $c(T)$ und $\ln(b)$ separat für jede Fließstrecke zwischen den benachbarten Pegeln sowie einzeln für MHQ und jede Jährlichkeit T nach folgenden Gleichungen berechnet, wobei mit „oberhalb“ in Fließrichtung gesehen der Pegel am Beginn der Fließstrecke und mit „unterhalb“ der Pegel am Ende der Fließstrecke bezeichnet worden ist:

$$c(T) = \frac{\ln(Hq_{T,oberhalb}) - \ln(Hq_{T,unterhalb})}{\ln(A_{E,unterhalb}) - \ln(A_{E,oberhalb})} \quad (8)$$

$$\ln(b) = \ln(Hq_{T,oberhalb}) + c(T) \cdot \ln(A_{E,oberhalb}) \quad (9)$$

Im Falle einer Verringerung von T-jährlichen Hochwasserscheiteldurchflussspenden Hq_T mit zunehmenden Einzugsgebietsfläche des Hauptfließgewässers wurde in den Gleichungen (7) bis (9) die Fließlänge L anstelle der Einzugsgebietsfläche A_E verwendet. Zur Aufstellung der Regressionsgleichungen wurden die Ergebnisse der lokalen Pegelstatistik herangezogen (Abschnitt 1.2). Die einzelnen Regressionsgleichungen sind für unterschiedliche Hochwasserscheiteldurchflüsse (MHQ, HQ_2 , ... , HQ_{200}) voneinander unabhängig.

Ergebnisse

In den folgenden Abbildung 33 bis 35 sind beispielhaft die zu benutzenden MHQ- und HQ_T -Längsschnitte für die Zschopau/Freiburger Mulde/Vereinigte Mulde, Weiße Elster von der tschechischen Staatsgrenze bis zur Mündung der Göltzsch und die Lausitzer Neiße, die alle drei keine historischen Hochwasser berücksichtigen, dargestellt.

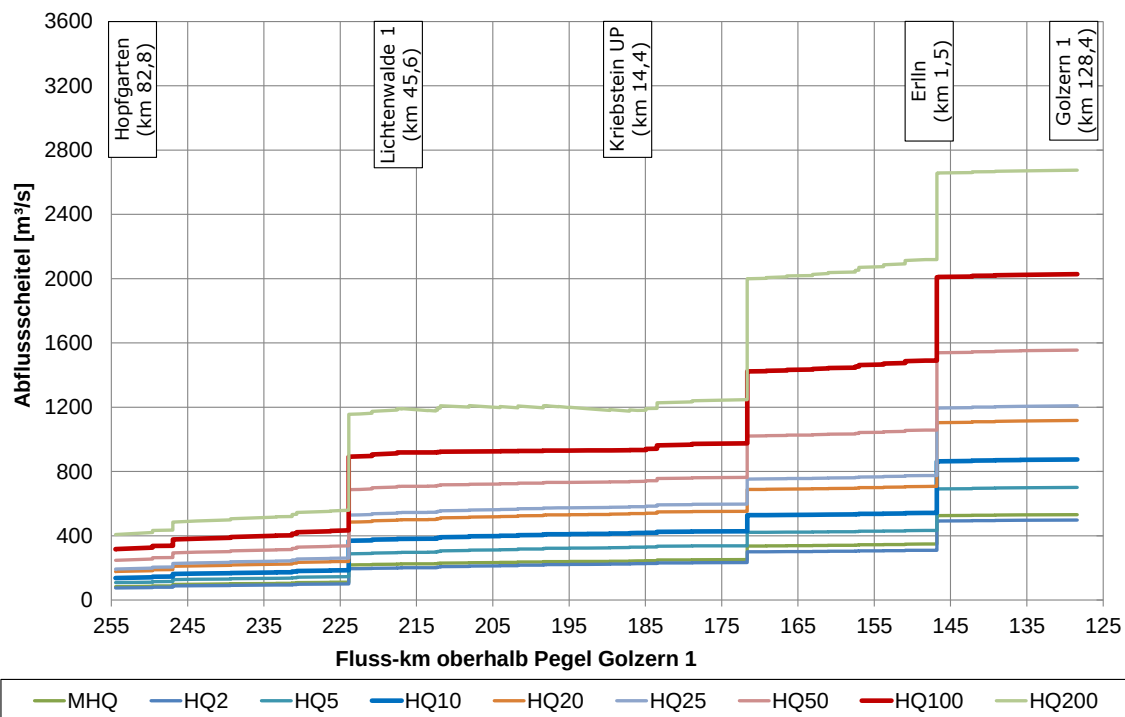


Abbildung 33: MHQ- und HQ₂- bis HQ₂₀₀-Längsschnitte der Zschopau, Freiberger und Vereinigte Mulde vom Pegel Hopfgarten bis zum Pegel Golzern 1

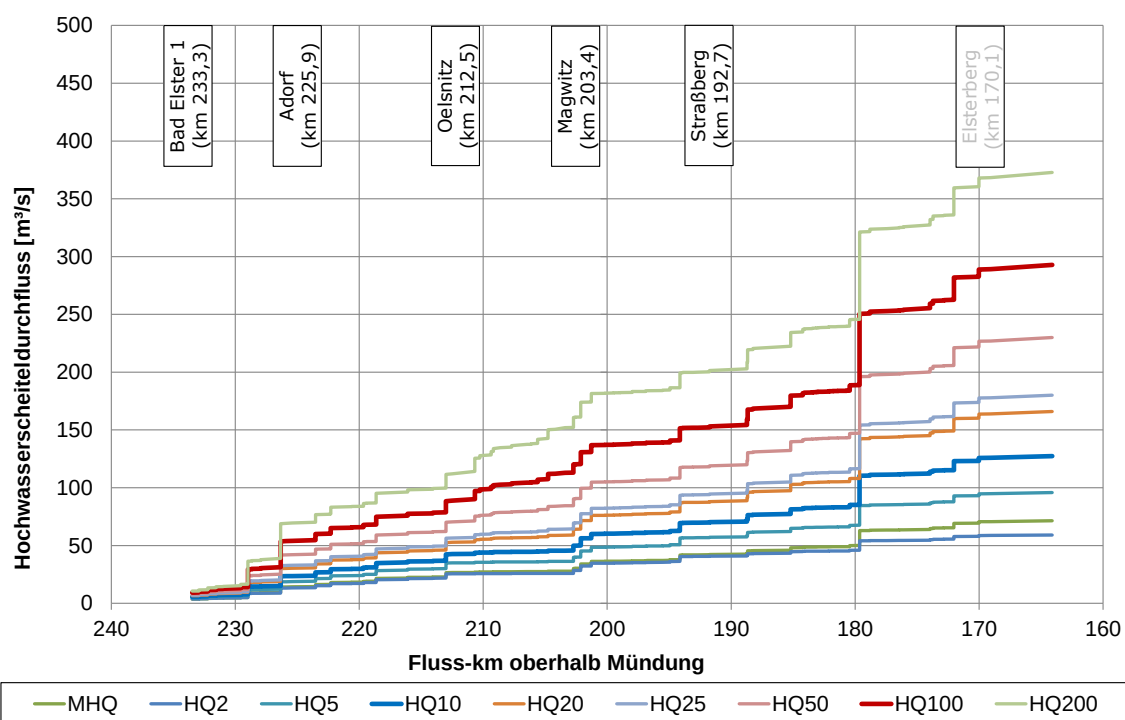


Abbildung 34: MHQ- sowie HQ₂- bis HQ₂₀₀-Längsschnitte der Weißen Elster von der tschechischen Staatsgrenze bis zur Mündung der Göltzsch

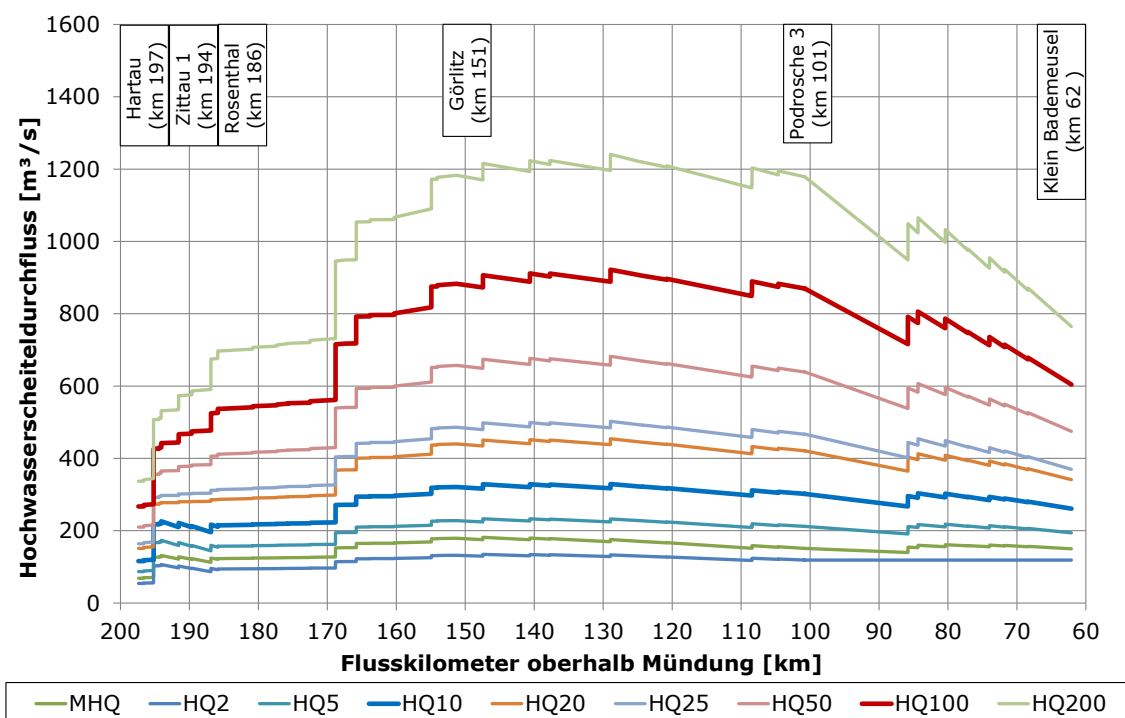


Abbildung 35: MHQ- sowie HQ₂- bis HQ₂₀₀-Längsschnitte der Lausitzer Neiße vom Pegel Hartau bis zum Pegel Klein Bademeusel (Brandenburg)

Für den Längsschnitt der Elbe wurden die Ergebnisse aus FLYS auf Basis der HQT aus dem Bericht BfG-1650 (BfG 2009) verwendet. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um einen reinen Längsschnitt der Elbe handelt, deren Zuflüsse kein Hochwasser führen.

A 3.3.5 Erstellung von HQ_T-Längsschnitten für beeinflusste Gewässerabschnitte

Eine besondere anthropogene Beeinflussung stellen Talsperren dar. Durch ihre Bewirtschaftung verändern diese das Abflussverhalten von Hoch- und Niedrigwasser im Unterlauf. Wie weit die Beeinflussungen im Unterlauf von Talsperren reichen, ist sehr unterschiedlich und hängt vor allem vom zur Verfügung stehenden Hochwasserrückhalteraum und der Einzugsgebietsgliederung ab. Es wurde in enger Zusammenarbeit mit der Landestalsperrenverwaltung Sachsen (LTV Sachsen) für jede Talsperre und jedes Hochwasserrückhaltebecken mit signifikanten Einfluss auf das Hochwasserverhalten festgelegt, ab welcher Entfernung der Einfluss von Stauanlagen vernachlässigt werden kann. Der durch eine oder ggf. mehrere Stauanlagen beeinflusste Fließgewässerbereich im Stauanlagenunterlauf wird dabei durch gesonderte Gutachten der LTV Sachsen belegt.

A 3.3.6 Spezielles Vorgehen im ostsächsischen Tieflandbereich zur Erstellung der HQ_(T)-Längsschnitte

Einen Sonderfall stellen die überwiegend durch Tieflandcharakter geprägten Einzugsgebiete der Schwarzen Elster und der Spree sowie teilweise der Mandau dar. Die HQ_T-Werte werden hier stark durch Translations- und Retentionseffekte beeinflusst. Um die Effekte in diesen Gebieten abbilden zu können, wurden Wasserspiegellagen-Berechnungen mittels 2D-HN-Modellen (Modell HydroAS-2D) notwendig. Die dafür benötigten Ganglinien wurden

mittels N-A-Modellen (Modelle NASIM und ArcEGMO) berechnet. Vor der Erstellung von N-A-Modellen sind die Kalibrierungsereignisse mittels 2D-HN-Modellierungen zu plausibilisieren. Erste Modellierungen haben in diesem Zusammenhang gezeigt, dass es teilweise notwendig ist, Schlüsselkurven an Pegeln, insbesondere im Ausuferungsbereich, mittels 2D-HN-Modellierung zu bewerten. Die anschließende Kopplung eines 2D-HN-Modells mit einem N-A-Modell verspricht für die im Tiefland oft stark verzweigten Gewässer eine gute Abbildung der Flächenretentionseffekte. Spezielle Effekte wie beispielsweise Beeinflussungen durch Grabenführungen und Wehre können entsprechend standortkonkret abgebildet werden.

Die Gesamtheit der hydrologischen und hydraulischen Untersuchungen bildet die Grundlage zur Bearbeitung der Aufgabenstellungen nach diesbezüglicher EU-Gesetzgebung (Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie) und aller weiterreichenden, wasserfachlichen Beurteilungen in den betreffenden Flussgebieten. Die 2D-HN-Modellierung gibt dabei u. a. auch Auskunft über den Einfluss der Landnutzung auf Abflüsse. Es wird möglich, den Einfluss der Saisonalität (Sommer-/Winterhalbjahr, Vegetationsperioden etc.) und des Unterhaltungszustand des Gewässers zu quantifizieren.

Die 2D-HN-Modelle werden anhand beobachteter Ereignisse kalibriert. Vorrangig kommen hier die Ereignisse der Jahre 2010 und 2013 in Betracht. Neben den Pegelaufzeichnungen werden eingemessene Hochwassermarken zur Kalibrierung bzw. Validierung herangezogen. Darüber hinaus werden Informationen der LTV-Flussmeister, von Vertretern der Kommunen, Einsatzkräften der Feuerwehren und Anwohnern geprüft, um in kritischen Bereichen mögliche hydraulische Wechselwirkungen zu erkennen und in Modellen abbilden zu können. Die 2D-HN-Modelle werden dabei auf Grundlage aktueller terrestrischer Vermessungsdaten (Ufer-/Mauerhöhen, Querbauwerke (Brücken, Straßendämme, Wehre etc.), Gebäude, Nebengewässer, bereits umgesetzte HWS-Maßnahmen etc.) und dem aktuellen DGM2 erstellt.

Mit Fertigstellung der 2D-HN-Modelle entstehen die Eingangsdaten für die N-A-Modelle zur Kalibrierung bzw. Validierung. Die Kalibrierung der N-A-Modelle erfolgte teilweise in Rückkopplung mit dem 2D-HN-Modell. Diese sehr aufwändige iterative Herangehensweise verspricht dabei eine hohe Modellgüte.

Nach Abschluss der Kalibrierung bzw. Validierung der N-A-Modelle werden mit Bemessungsniederschlägen HQ_T -Ganglinien berechnet. Auch hier wurde eine umfangreiche Sensitivitätsanalyse vorgenommen, um die Spannbreite der in der Natur vorkommenden Variabilität im Modell abbilden zu können.

Die verwendeten Bemessungsniederschläge entstammen der STRASA-Studie des DWD (Starkniederschlagsregionalisierung – Auswertung für Sachsen), welche im Jahr 2008 speziell für das Bundesland Sachsen extremwertstatistische Auswertungen des Niederschlages nach dem KOSTRA-DWD-Prinzip für verschiedene Dauerstufen quantifiziert.

Letztlich werden die mit diesem Verfahren ermittelten HQ_T u. a. an den Landespegeln mit den Regionalisierungsergebnissen verglichen und von LHWZ und LTV gemeinsam bewertet.

Für die folgenden Flusseinzugsgebiete wurden die HQ_T wie oben beschrieben und unter Berücksichtigung der Verfahrensweise nach Punkt 3.5 untersucht.

■ Spree

- Spree oberhalb TS Bautzen

- Spree unterhalb TS Bautzen bis Landesgrenze Brandenburg

- Schwarzer Schöps oberhalb TS Quitzdorf
- Schwarzer Schöps unterhalb TS Quitzdorf bis Mündung Spree
- Weißer Schöps (einschließlich Verlegungsstrecke)
- Löbauer Wasser oberhalb Pegel Gröditz 2
- Löbauer Wasser unterhalb Pegel Gröditz 2 bis Mündung Spree
- Altes Fließ
- Kleine Spree

■ Mandau

- Mandau bis Mündung Neiße
- Lausur bis Mündung Mandau
- Landwasser bis Mündung Mandau

■ Schwarze Elster

- Schwarze Elster bis Mündung Hoyerswerdaer Schwarzwasser
- Hoyerswerdaer Schwarzwasser
- Schwarze Elster bis Landesgrenze Brandenburg

U. a. für das Mandau-Gebiet ergab sich, dass die mit dem Vorzugsverfahren bestimmten HQ_T benutzt werden können.

A 3.4 Berechnung und Plausibilitätsprüfung von regionalisierten HQ_T

Die Berechnung der HQ_T und ihrer Spenden Hq_T für die Zufluss- und Ausflussquerschnitte der Teileinzugsgebiete auf Basis von multipler linearer Regression zur Bestimmung des MHQ (Abschnitt 3.1), Top-Kriging zur Regionalisierung der Residuen (Abschnitt A 3.3.2) und Index-Flood-Verfahren zur Ermittlung der regionalen Hochwasserverteilungsfunktion (Abschnitt A 3.3.3) erfolgte in MS Excel. Anschließend wurden die Berechnungsergebnisse in ArcGIS mit den Geometrien der Teileinzugsgebiete verbunden. Als Ergebnis wurde ein Teileinzugsgebiets-Shape mit den HQ_T und Hq_T für die Zufluss- und die Ausflussquerschnitte erhalten. Den „Quellgebieten“, die keinen Zuflussquerschnitt haben, wurde in den entsprechenden Attributfeldern der Wert „-9999“ zugeordnet. Insgesamt wurden für 3467 Zu- und 6358 Ausflussquerschnitte die HQ_T und Hq_T berechnet.

Wie die Ergebnisse der Anwendungen der Regionalisierungsverfahren (multiple lineare Regression und Index-Flood-Verfahren) zeigten, ergaben sich bereits für einzelne Pegel deutliche Abweichungen der MHQ und HQ_T von den aus den Pegelbeobachtungen gewonnenen Werten der Hochwasserstatistik. Umso mehr besteht für un beobachtete Gewässerquerschnitte die Möglichkeit, dass sich aufgrund ihrer spezifischen Kombination von Gebietskenngrößen bei der Anwendung der Regressionsmodelle für MHQ nicht plausible Resultate ergeben, die sich auf die HQ_T übertragen. Daher wurden die Berechnungsergebnisse aus Abschnitt A 3.5 verschiedenen Prüfungen unterzogen, um nicht plausible Berechnungsergebnisse herauszufiltern.

A 3.4.1 Wertebereiche der eingehenden Gebietskenngrößen

Die Regressionsmodelle, die zur Bestimmung der MHQ für das Index-Flood-Verfahren verwendet wurden, sind optimal an die Datenkollektive der einbezogenen Pegel angepasst. Deshalb gelten die Regressionsmodelle streng genommen nur für die Wertebereiche der Regressoren (Gebietskenngrößen), die in die Regressionsanalyse eingingen. Abgesehen von den Wertebereichen sind dabei auch die Kombinationen der einzelnen Gebietskenngrößen von Bedeutung.

Liegen die Werte einzelner Gebietskenngrößen, die in die Regressionsanalyse der MHQ eingingen, für ein unbeobachtetes Gebiet deutlich über oder unter den Extrema der Pegelbezugsgebiete, so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass es bei der Anwendung der Regressionsmodelle zu nicht plausiblen Ergebnissen kommt. Somit stellt ein Vergleich der Gebietskenngrößen für die Aussagequerschnitte mit den Wertebereichen der berücksichtigten Pegelbezugsgebiete eine erste Möglichkeit dar, Hinweise zu erhalten, wo die Anwendung der Regionalisierungsmodelle nur eingeschränkt sinnvoll ist.

Tabelle 8 zeigt die Wertebereiche der Gebietskenngrößen der Pegelbezugsgebiete im Vergleich zu den Minima (min) und Maxima (max) der Gebietskenngrößen aller Zu- und Ausflussquerschnitte der Teileinzugsgebiete nach dem Wasserlaufverzeichnis (Stand 2015) einer hochwasserhomogenen Region, für die schließlich HQ_T und Hq_T berechnet wurden. Für die praktische Umsetzung wurden als Schwellenwerte jeweils 10 % unter bzw. über dem minimalen (min) und maximalen (max) Wert der Gebietskenngröße der Basispegel, also 0,9·min und 1,1·max, festgelegt. Werden diese für mindestens eine Gebietskenngröße unter- bzw. überschritten, so erscheint in der Web-Anwendung automatisch die Meldung „Gebietskenngröße außerhalb des Wertebereichs“. In diesem Fall sind die Ergebnisse der Regionalisierungsmodelle bzw. die für den Auswahlquerschnitt angegebenen HQ_T anderweitig auf Plausibilität, z. B. durch Vergleich mit den HQ_T gleich großer Nachbargebiete, zu prüfen.

Die Anzahl der Gewässerquerschnitte, deren Gebietskenngrößen innerhalb der mit 10 % beaufschlagten Wertebereiche der Basispegel liegen, ist der Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 8: Wertebereich der Gebietskenngrößen der Basispegel und minimale bzw. maximale Gebietskenngrößen aller Zu- und Ausflussquerschnitte der jeweiligen Region

			Basispegel				Alle Zu- und Ausflussquerschnitte	
			0,9·min	min	max	1,1·max	min	max
Region 1	Einzugsgebietsfläche	km ²	2,66	2,95	2082	2290	<0,01	6327
	mittlere Geländehöhe	m	129	144	612	673	75,6	690
	bebauter Anteil	%	0,00	0,00	68,8	75,7	0,00	100
	nutzbare Feldkapazität	mm	104	116	226	249	76,2	267
Region 2	Einzugsgebietsfläche	km ²	1,56	1,73	758	834	<0,01	2984
	mittlerer Jahresniederschlag	mm	671	745	1338	1472	452	1382
	Flusssichte	-	0,73	0,81	9,03	8,84	6,75	101
	hydraulische Leitfähigkeit	cm/d	11,4	12,6	55,9	61,5	<0,01	57,0

Tabelle 9: Anzahl der Gewässerquerschnitte mit Gebietskenngrößen innerhalb der beaufschlagten Wertebereiche der Basispegel

Region		1	2
Alle Zu- und Ausflusssknoten	Anzahl	5180	4645
Gebietskenngrößen innerhalb der beaufschlagten Wertebereiche der Basispegel	Anzahl	3741	3415
	%	72,2	73,5

Der Anteil der Gewässerquerschnitte mit Gebietskenngrößen innerhalb der beaufschlagten Wertebereiche der Basispegel liegt bei 72,2 % in der Region 1 und 73,5 % in der Region 2. Die maßgebliche Gebietskenngröße, die den Wertebereich einschränkt, ist die Einzugsgebietsfläche.

In DHI WASY (2015a) wurde nicht ausgeschlossen, dass es bei der Anwendung der Regressionsmodelle zu nicht plausiblen Ergebnissen kommt, obwohl alle Gebietskenngrößen in den festgelegten Plausibilitätsbereichen liegen. Deshalb reicht für die Plausibilitätsprüfung die alleinige Überprüfung der Gebietskenngrößen nicht aus, sondern es muss darüber hinaus auch die direkte Überprüfung der Hochwasserscheiteldurchflussspenden mit Jährlichkeit H_{QT} erfolgen.

A 3.4.2 Untersuchung anthropogener und weiterer Beeinflussungen

Bezüglich der Ausweisung der H_{QT} -Hochwasserscheiteldurchflüsse für den Stauanlagenhauptzufluss, die Stauanlagen-sperrstelle als auch den beeinflussten Stauanlagenunterlauf wurden mehrheitlich die der Landestalsperrenverwaltung (LTV) vorliegenden Ergebnisse aus Niederschlag-Abfluss-Modellierungen (in der Vielzahl der Untersuchungen unter Anwendung des N-A-Modells NASIM) genutzt.

In Würdigung der herausgehobenen wasserwirtschaftlichen Bedeutung und des Gefahrenpotentials der Stauanlagen berücksichtigen diesbezügliche H_{QT} -Untersuchungen entsprechende Sicherheitszuschläge. Zudem werden nach einem LTV-internen Bemessungskonzept für Niederschlag-Abfluss-Modellierungen zu Stauanlagen zu einem Wiederkehrintervall T für H_{QT} mehrere Niederschlagsdauern D ($1 \text{ h} \leq D \leq 72 \text{ h}$) berücksichtigt. Die Niederschlagsdauer D wird für ein zu untersuchendes H_{QT} einschließlich der zugehörigen Ganglinie maßgebend und ist somit für Bemessungszwecke zu nutzen, welche in der Stauanlage den höchsten Wasserstand bzw. die höchste Wildbettabgabe bedingt. Das beschriebene Bemessungskonzept der LTV wurde auch im Rahmen der hier bearbeiteten amtlichen Hydrologie sowohl für bestehende als auch geplante Stauanlagen vom Eigeneinzugsgebiet bis zu den beeinflussten Unterläufen angewendet. Infolge dieser LTV-internen Betrachtungen können im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem Regionalisierungskonzept teilweise differierende Ergebnisse auftreten.

Nur im Fall einer guten Übereinstimmung der Ergebnisse aus der Niederschlag-Abfluss-Modellierung der LTV für eine Stauanlage mit den Ergebnissen aus der Regionalisierung (Übereinstimmung im Bereich von ca. $\pm 15 \%$) wurde auch im Stauanlagenbereich (Hauptzufluss und Sperrstellenzufluss sowie stauanlagenbeeinflusster Unterlauf) ausschließlich mit den Ergebnissen der Regionalisierung gearbeitet. Dies wurde mit dem Ziel vorgenommen, nach Möglichkeit die Talsperrengutachten an die Ergebnisse des Regionalisierungskonzeptes anzupassen. Eine Bereinigung der natürlichen, unbeeinflussten Regionalisierungsergebnisse um den Einfluss von Stauanlagen wurde im Fall der Nutzung der Regionalisierung für den Stauanlagenbereich wie nachfolgend beschrieben auf der Grundlage einer Praxisabschätzung vorgenommen.

Die Beeinflussung eines Unterliegergebietes durch eine Stauanlage kann bei Hochwasser durch zwei verschiedene Szenarien gegeben sein.

■ Szenario 1:

- Eine Stauanlage kommt nicht zum Überlauf über die Hochwasserentlastungsanlage, hält damit den Zufluss Z (m^3/s) aus dem ihr angeschlossenen Einzugsgebiet A_E (km^2) zurück und realisiert an den Unterlauf eine konstante (schadlose) Wildbettaabgabe WB (m^3/s). Es gilt dabei $Z \geq WB$ für Stauanlagenzufluss und Wildbettaabgabe.
- Es wird unterstellt, dass sich die Stauanlagenwirkung ausschließlich auf den Bereich zwischen Stauanlagensperrstelle (Eigeneinzugsgebiet der Stauanlage A_E) und einer Einzugsgebietsgröße im Unterlauf vom fünffachen A_E erstreckt.
- Damit beträgt das beeinflussbare Einzugsgebiet unterhalb einer Stauanlage dem vierfachen A_E .
- Die HW-Rückhaltewirkung einer Stauanlage beträgt an der Sperrstelle bei einer Einzugsgebietsgröße von $A_E = (Z - WB)$ und im Unterliegergebiet bei einer Einzugsgebietsgröße in der Größenordnung des fünffachen A_E (km^2) = 0.
- Unter der Annahme einer mit wachsender Einzugsgebietsgröße im Unterlauf proportional abnehmenden HW-Schutzwirkung $SW1$ (m^3/s) einer Stauanlage beträgt im Bereich vom X -fachen A_E mit ($1 \leq X \leq 5$) diese HW-Schutzwirkung

$$\blacksquare SW1 = (Z - WB) \cdot \frac{(5-X)}{4}$$

- Die Differenz der HQ_T -Scheitelwerte aus der Regionalisierung von einem Unterliegereinzugsgebiet einer Stauanlage im Bereich des X -fachen A_E mit ($1 \leq X \leq 5$) und der Stauanlagensperrstelle bei A_E soll mit Z_{XAE} bezeichnet werden. Dann kann das um den Stauanlageneinfluss bereinigte Regionalisierungsergebnis $A_{Regio_{TSber}}$ wie folgt berechnet werden:

$$1. \quad A_{Regio_{TSber}} = WB + Z_{XAE} + (Z - WB) - SW1$$

$$2. \quad A_{Regio_{TSber}} = WB + Z_{XAE} + (Z - WB) \cdot \frac{(X-1)}{4}$$

■ Szenario 2:

- Eine Stauanlage kommt, im Regelfall bei relativ großen und zugleich seltenen HW-Ereignissen, zum Überlauf über die HW-Entlastungsanlage. Nachdem ab HW-Ereignisbeginn zunächst die Wildbettaabgabe WB über die Grundablassanlage realisiert wurde, wird im weiteren Verlauf ein HW-Überlauf mit dem Scheitelwert $\ddot{U}L$ (m^3/s) an das Wildbett abgegeben. Es gilt dabei $Z \geq \ddot{U}L \geq WB$ für Stauanlagenzufluss, Überlauf und Wildbettaabgabe.
- Es wird auch in Szenario 2 unterstellt, dass sich die Stauanlagenwirkung ausschließlich auf den Bereich zwischen Stauanlagensperrstelle (Eigeneinzugsgebiet der Stauanlage) A_E (km^2) und einer Einzugsgebietsgröße vom fünffachen A_E (km^2) erstreckt.
- Damit beträgt das beeinflussbare Einzugsgebiet unterhalb einer Stauanlage dem vierfachen A_E (km^2).
- Die HW-Rückhaltewirkung einer Stauanlage beträgt im Fall eines Überlaufes über die HW-Entlastungsanlage an der Sperrstelle bei einer Einzugsgebietsgröße von $A_E = (Z - \ddot{U}L)$ und im Unterliegergebiet bei einer Einzugsgebietsgröße vom fünffachen A_E (km^2) = 0.

- Die Differenz der HQ_T -Scheitelwerte aus der Regionalisierung von einem Unterliegereinzugsgebiet einer Stauanlage im Bereich des X-fachen A_E mit $(1 \leq X \leq 5)$ und der Stauanlagensperrstelle bei A_E soll wieder mit Z_{XAE} bezeichnet werden.
- Unter der Annahme einer mit wachsender Einzugsgebietsgröße im Unterlauf proportional quadratisch abnehmenden HW-Schutzwirkung einer Stauanlage beträgt jetzt im Bereich des X-fachen A_E mit $(1 \leq X \leq 5)$ das um den Stauanlageneinfluss bereinigte Regionalisierungsergebnis in Analogie zu Szenario 1

$$\blacksquare B \text{ Regio}_{TSber} = WB + Z_{XAE} + (Z - \ddot{U}L) \cdot \left[\frac{(X-1)}{4} \right]^2.$$

- Das Vorgehen in Szenario 2 wurde gewählt, um im Vergleich zu Szenario 1 den zeitlichen Versatz eines Stauanlagenüberlaufes im Vergleich zu einer konstanten Grundablassabgabe zu berücksichtigen. Dies hat im Regelfall zur Folge, dass der zeitlich verzögerte Stauanlagenüberlauf auf eine im weitergehenden Unterlauf bereits im absteigenden HW-Ast befindliche HW-Welle trifft und damit die Wirkung eines Stauanlagenüberlaufes im Vergleich zur natürlichen, unbeeinflussten HW-Welle ab einer gewissen Größe eines Unterliegereinzugsgebietes bzw. einer gewissen Laufweglänge sich relativiert und kleiner wird.

■ Kombination aus Szenario 1 und Szenario 2:

- Die HW-reduzierende Wirkung einer Stauanlage folgt aus der Kombination der Szenarien 1 und 2 für die gesamte Lauflänge des beeinflussbaren Unterlaufes. Dabei ist für jeden zu untersuchenden Querschnitt der Wert
 - $\text{Max}(A \text{ Regio}_{TSber}; B \text{ Regio}_{TSber})$
für die Ermittlung des Bemessungswertes HQ_T unter Berücksichtigung des Stauanlageneinflusses zu ermitteln.
 - Im Regelfall wechselt der maßgebende Einfluss von $B \text{ Regio}_{TSber}$ (Stauanlagenüberlauf und Zwischengebietsabflüsse aus dem absteigenden HW-Ast) auf $A \text{ Regio}_{TSber}$ (Grundablassabgabe und natürlicher HW-Scheitel aus den Zwischengebieten) mit zunehmender Einzugsgebietsgröße bzw. Laufweglänge im stauanlagenbeeinflussten Unterlauf.

Beispiel zur Anwendung der Bereinigung von Regionalisierungsergebnissen um den Stauanlageneinfluss:

In einem frei gewählten Beispiel hat eine Talsperre ein Eigeneinzugsgebiet von 100 km². Die Talsperre realisiert bei HQ_{100} eine Wildbettaabgabe WB von 10,0 m³/s, läuft aber im Verlauf des Ereignisses über die HW-Entlastungsanlage mit einem Scheitel von $\ddot{U}L$ 40,0 m³/s über. In der nachfolgenden Tabelle 10 wird die Bereinigung der Regionalisierungsergebnisse (Spalte 2) für das Unterliegereinzugsgebiet von der Sperrstelle bis hin zu 500 km² Einzugsgebiet (Spalte 1) dargestellt. Spalte 3 enthält die Scheiteldifferenzen beliebiger Unterliegereinzugsgebiete zur Sperrstelle. In Spalte 4 wurden die Regionalisierungsergebnisse um den Stauanlageneinfluss unter der Annahme einer durchgängigen Wildbettaabgabe aus der Stauanlage von 10,0 m³/s nach $A \text{ Regio}_{TSber}$ berechnet. In Spalte 5 erfolgt die Berechnung der Regionalisierungsergebnisse unter Bereinigung des Stauanlageneinflusses unter Ansatz des Überlaufscheitels von 40,0 m³/s nach $B \text{ Regio}_{TSber}$. In Spalte 6 folgt schließlich der maßgebende HW-Längsschnitt für die Beispiel-Stauanlage als Maximum der Spalten 4 und 5. An der Sperrstelle ist dabei der Überlaufscheitel von 40,0 m³/s maßgebend. Dieser Überlaufscheitel bestimmt bis zu einem Unterliegereinzugsgebiet von 300 km² den HW-Längsschnitt. Für größere Unterliegereinzugsgebiete wird die Grundablassabgabe von 10,0 m³/s im Zusammenhang mit den natürlichen HW-Scheiteln der Unterliegerzwischen-einzugsgebiete maßgebend. Nach 500 km² Unterliegereinzugsgebiet ist, wie anfänglich angenommen, keine HW-reduzierende Stauanlagenwirkung mehr zu verzeichnen.

Weitere signifikante anthropogene Beeinflussungen sind in den Bereichen bereits eingestellter oder noch aktiver Braunkohleförderung zu finden. Aufgrund der Entstehung von Tagebaurestseen, großflächigen Grundwasserabsenkungen, Errichtung von Dichtwänden, Verlegung von Flüssen und der Veränderungen der Boden- und Vegetationsstruktur, die auch Jahrzehnte nach Schließung der Tagebaue noch nachweisbar sind, ist ein natürliches Abflussverhalten nicht gegeben. Hierbei sind vor allem das Lausitzer und das Mitteldeutsche Braunkohlenrevier zu nennen, die sich somit dem hier verwendeten herkömmlichen Regionalisierungs- und Berechnungsansatz verschließt.

Tabelle 10: Berechnungsbeispiel zum Stauanlageneinfluss auf den Unterlauf bei Nutzung von Regionalisierungsergebnissen

A_E km ²	QS aus HQ-Regio m ³ /s	Z_{XAE} m ³ /s	A Regio _{TSber}	B Regio _{TSber}	Max.(Sp. 4; 5)
1	2	3	4	5	6
100	100	0,000	10,0	40,0	40,0
150	143	43,0	64,3	83,9	83,9
200	180	80,0	113	124	124
250	213	113	157	161	161
300	240	140	195	195	195
350	263	163	229	226	229
400	280	180	258	254	258
450	293	193	282	279	282
500	300	200	300	300	300

In der interaktiven Karte besonders gekennzeichnet wurden auch solche Fließgewässerabschnitte, von denen künstlich angelegte Umfluter oder Hochflutbetten abzweigen, die eine Aufteilung der HQ_T im Talquerprofil oder eine Überleitung in ein benachbartes Fließgewässer bewirken. Meistens wird diese Aufteilung in Abhängigkeit vom Durchfluss oder Wasserstand mittels beweglicher Wehre anhand von Steueranweisungen geregelt. Beim Abruf der Durchflusskennwerte in einem solchen Fließgewässerquerschnitt erscheint die Meldung „Achtung, Umfluteinfluss. Datenabfrage bei der Landestalsperrenverwaltung.“

Einen dritten Aspekt stellen rückstaubeinflusste Bereiche dar. Aufgrund topologischer Gegebenheiten wird das Hochwasser eines Hauptgewässers in ein einmündendes Gewässer rückgestaut, so dass im rückstaubeinflussten Mündungsbereich des Nebengewässers die HQ_T des Hauptgewässers und nicht die des Nebengewässers entscheidend für die dort auftretenden Hochwasserstände und damit deren hydraulischen Berechnung sind.

Die hier aufgeführten Beeinflussungen können mit der vorgestellten Methode nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden diese Bereiche mit entsprechenden Hinweisen in der Web-Anwendung versehen (Abschnitt 2.1).

A 3.4.3 Korrektur von nicht plausiblen MHQ und HQ_T im Längsschnitt

Bei der Prüfung der Plausibilität der mit dem Vorzugsverfahren berechneten HQ_T im Flusslängsschnitt wurde davon ausgegangen, dass die HQ_T im Längsschnitt mit größer werdender Einzugsgebietsfläche zunehmen bzw. zumindest konstant bleiben sollten. Demzufolge wurde eine Abnahme der HQ_T mit zunehmender Einzugsgebietsfläche als nicht plausibel angesehen. Aus hydrologischer Sicht ist das aus verschiedenen Gründen nicht völlig korrekt. Abnehmende Abflüsse im Längsschnitt können hydraulisch begründet sein, z. B. durch Wellenabflachung infolge Ausuferung in Gewässerabschnitten mit relativ breiten Sohlentälern und relativ geringen Zuflüssen aus den dort mündenden Nebengewässern. Im Interesse einer automatisierten Abarbeitung der Plausibilitätsprüfung, deren Notwendigkeit sich allein schon aus der Datenmenge ergab, wurden derartige Phänomene an dieser Stelle jedoch nicht berücksichtigt.

Im Zuge der Plausibilitätsprüfung wurden drei Fälle unterschieden, die jeweils ein nicht plausibles Ergebnis anzeigen. Zur Illustration dieser Fälle dient Abbildung 36. Zur Bestimmung dieser nicht plausiblen Fälle wurden die folgenden drei Prüfkriterien formuliert:

1. Sind die MHQ bzw. HQ_T am Zuflussquerschnitt größer als die MHQ bzw. HQ_T am Ausflussquerschnitt desselben Teilgebietes?
■ $Q_Z(3) > Q_A(3)$ in Abbildung 36
2. Sind die MHQ bzw. HQ_T am Zuflussquerschnitt eines Teilgebietes kleiner als die MHQ bzw. HQ_T am Ausflussquerschnitt des Oberliegerteilgebietes?
■ $Q_Z(3) < Q_A(1)$ oder $Q_Z(3) < Q_A(2)$ in Abbildung 36
3. Sind die MHQ bzw. HQ_T am Zuflussquerschnitt eines Teilgebietes größer als die Summe der MHQ bzw. HQ_T der Ausflussquerschnitte der Oberliegerteilgebiete?
■ $Q_Z(3) > Q_A(1) + Q_A(2)$ in Abbildung 36

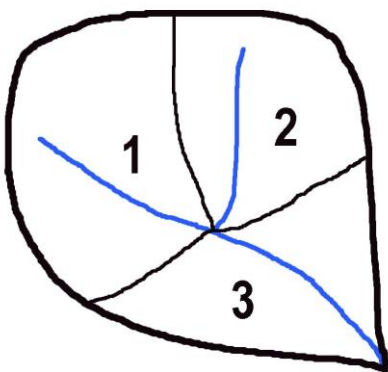


Abbildung 36: Prinzipskizze zur Plausibilitätsprüfung

Nur für Fall 1 kann es eine hydrologische Begründung geben (siehe oben.). Die Fälle 2 und 3, die sich gegenseitig ausschließen, können dagegen hydrologisch nicht begründet werden. Sie sind allein eine Folge der sprunghaften Änderung der in den Regressionsgleichungen berücksichtigten Gebietskenngrößen oberhalb und unterhalb der Mündung von Nebengewässern und damit verfahrensbedingt.

Zur Plausibilisierung von T-jährlichen Hochwasserscheiteldurchflüssen HQ_T , die nach den Prüfkriterien 2 und 3 im Gewässerlängsschnitt nicht plausibel bzw. im Fall 1 als nicht plausibel betrachtet worden sind, wurde in DHI WASY (2009) ein spezielles Werkzeug in ArcView 3 als Avenue-Script entwickelt. Mit dessen Hilfe wurden alle unplausiblen MHQ bzw. HQ_T auf den kleinstmöglichen plausiblen Wert angehoben. Da die drei Prüfkriterien nicht in einem Schritt bearbeitet werden konnten, wurden zuerst alle Gewässer separat im Längsschnitt betrachtet. Die Hochwasserscheiteldurchflüsse müssen entsprechend der Prüfkriterien 1 und 2 mit zunehmender Einzugsgebietsfläche (Gewässerlänge) zunehmen bzw. gleich bleiben. War dies nicht der Fall, wurde der Hochwasserscheiteldurchfluss auf den höheren Wert des Oberliegerquerschnittes angehoben. Diese Prozedur wurde so lange wiederholt, bis monoton steigende oder gleichbleibende MHQ bzw. HQ_T im Längsschnitt gewährleistet wurden (Abbildung 37). Im nächsten Schritt wurden die MHQ bzw. HQ_T der Nebengewässer entsprechend des Prüfkriteriums 3 plausibilisiert. In einem dritten Schritt wurden die Hochwasserscheiteldurchflüsse in Bezug auf die Nebengewässer hinsichtlich des Prüfkriteriums 2 plausibilisiert, indem gegebenenfalls der Zufluss des Hauptgewässers auf den Abfluss des Nebengewässers angehoben wurde. Da diese Änderungen wiederum Einfluss auf den ersten und zweiten Schritt haben können, wurde die gesamte Prozedur, wenn nötig, bis zu viermal durchgeführt.

Die Plausibilisierung der Hochwasserscheiteldurchflüsse im Gewässerlängsschnitt wurde für MHQ und HQ_T mit $T = 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100$ und 200 a getrennt durchgeführt.

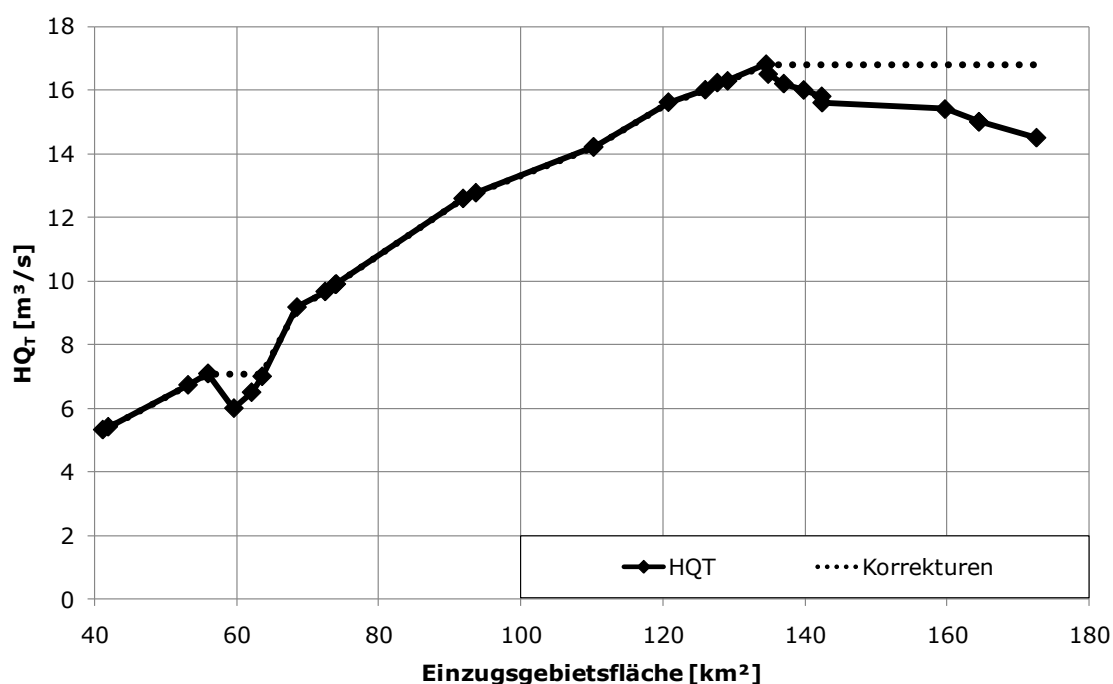


Abbildung 37: Beispiel einer HQ_T -Korrektur im Längsschnitt durch Anhebung auf den jeweils kleinstmöglichen plausiblen HQ_T

A 3.5 Ergebnisse von Vorzugsverfahren und HQ_T -Längsschnitten

Die berechneten und entsprechend Abschnitt A 3.4.3 (Vorzugsverfahren) plausibilisierten bzw. korrigierten MHQ und HQ_T wurden anschließend mit den MHQ- und HQ_T -Längsschnitten zusammengeführt. Durch das Zusammenführen der Ergebnisse der beiden verschiedenen Regionalisierungsverfahren bestand die Möglichkeit, dass die in Abschnitt 4.3 benannten Fälle nicht plausibler MHQ und HQ_T erneut auftraten. Bezüglich des Falls 1, für den es eine hydrologische Begründung geben kann, ist dieser Effekt z. B. für die Lausitzer Neiße oder den Unterlauf der Weißen Elster bekannt. Wegen der Plausibilität der Abnahme der MHQ und HQ_T mit zunehmender Gewässerlänge bzw. Einzugsgebietsfläche in einigen Abschnitten der 15 großen Fließgewässer, wurden diese nicht nochmals korrigiert bzw. im Längsschnitt angehoben. Hinsichtlich der Fälle 2 und 3, die dagegen hydrologisch nicht begründet werden können, sind die entsprechenden Unplausibilitäten unter Umständen an den Gewässerquerschnitten mit seitlichen Zuflüssen anzutreffen. Eine diesbezügliche Plausibilitätsprüfung im Bereich der Längsschnitte wurde nicht durchgeführt, da eine Korrektur zur hydrologisch nicht erklärbaren Erhöhung der MHQ und HQ_T führen würde und deshalb im Bereich der abgestimmten HQ_T -Längsschnitte nicht erwünscht war.

In Abbildung 38 sind beispielhaft die Ergebnisse für die 100-jährliche Hochwasserscheiteldurchflussspende Hq_{100} an den Zufluss- und Ausflussquerschnitten der Teileinzugsgebiete des Wasserlaufverzeichnisses 2015 dargestellt. Da unterschiedlich große Teileinzugsgebietsflächen dieser Kartendarstellung zu Grunde liegen, darf sie nicht überbewertet oder fehlinterpretiert werden, da die Hochwasserscheiteldurchflussspenden Hq gleicher Jährlichkeit T gesetzmäßig aus verschiedenen Gründen mit zunehmender Einzugsgebietsfläche nichtlinear abnehmen.

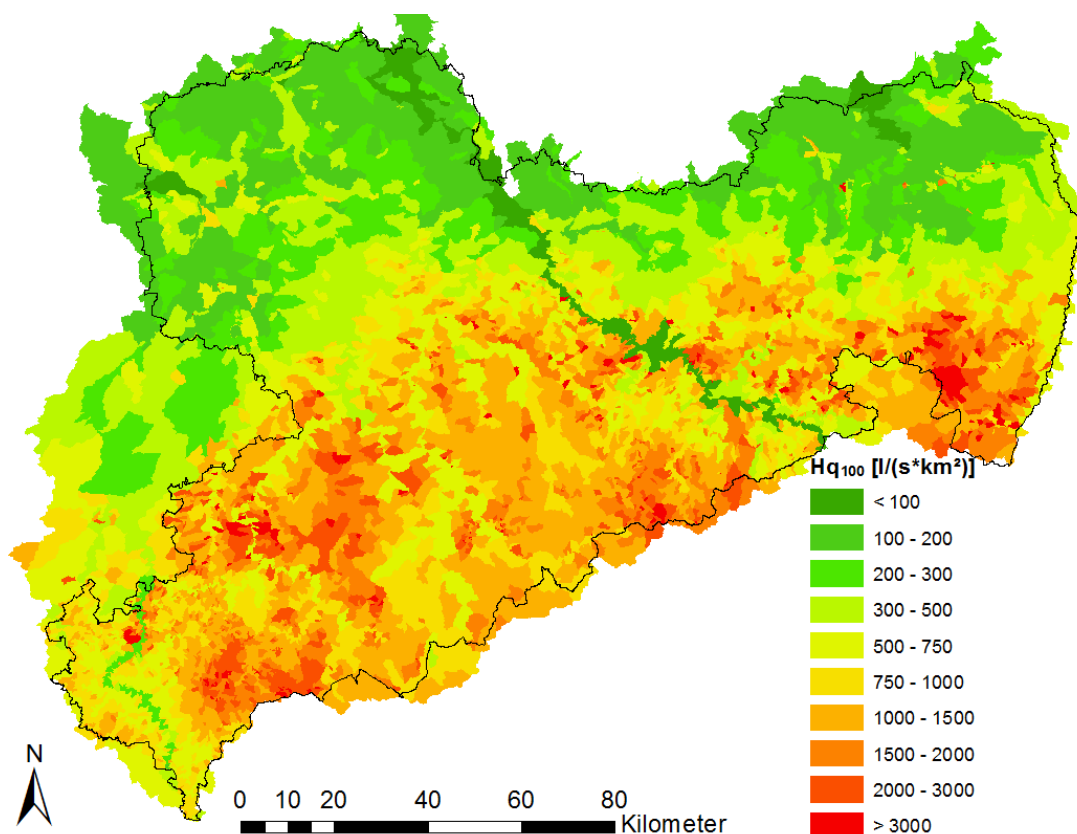
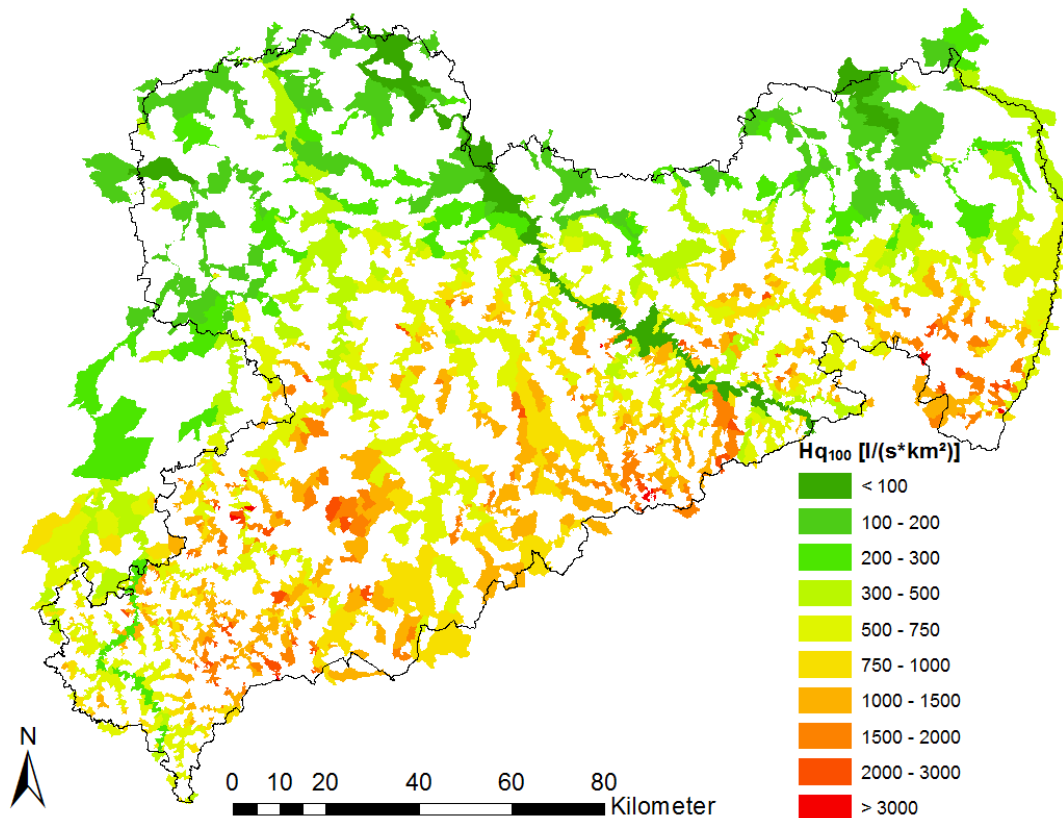


Abbildung 38: 100-jährliche Hochwasserscheiteldurchflusspenden Hq_{100} an den Zufluss- (oben) und Ausflussknoten (unten) der Teileinzugsgebiete

Literaturverzeichnis

- AKAIKE, H. (1973): Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In: PETROV, B. N. (Hrsg.): Proceedings of the Second International Symposium on Information Theory, Budapest.
- BFG (2009): Einheitliche Grundlage für die Festlegung der Bemessungswasserspiegellagen der Elbe auf der frei fließenden Strecke in Deutschland. Bericht BfG-1650, Koblenz.
- BLÖSCHL, G. (2006): Geostatistische Methoden bei der hydrologischen Regionalisierung. In: Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer, Band, 197, Technische Universität Wien, pp. 21-40.
- CONRADT, T.; KALTOFEN, M.; HENTSCHEL, M.; HATTERMANN, F. & WECHSUNG, F. (2007): Impacts of global change on water-related sectors and society in a trans-boundary central European river basin, Part 2: from eco-hydrology to water demand management, in Lindenschmidt, K.-E., ed., Advances in Geosciences: Large-scale hydrological modelling and the European Union water policies, Volume 11, S. 93-99.
- DALPYMPLE, T. (1960): Flood-frequency analysis - manual of hydrology, part 3. U. S. Geological Survey, Water Supply Paper 1543-A, Washington.
- DHI WASY (2009): Landeseinheitliche Regionalisierung von Hochwasserabflüssen im Land Brandenburg. Schlussbericht, DHI-WASY GmbH im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg.
- DHI WASY (2010a): Überarbeitung des im Land Rheinland-Pfalz genutzten Verfahrens zur Regionalisierung von Hochwasserabflüssen. Schlussbericht, DHI-WASY GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz.
- DHI WASY (2010b): Flächenhafte Bestimmung von Hochwasserspenden. Schlussbericht, DHI-WASY GmbH im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- DHI WASY (2012): Hochwasserregionalisierung Thüringen. Schlussbericht, DHI-WASY GmbH im Auftrag der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie.
- DHI WASY (2014): FuE Projekt KliWES - Teil Mindestwasserabfluss. Abschlussbericht, DHI-WASY GmbH im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- DHI WASY (2015a): Neubestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten nach dem Hochwasser im Jahr 2013. Schlussbericht, DHI-WASY GmbH im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- DHI WASY (2015b): DHI-WASY Software HQ-EX 4.0 Programm zur Berechnung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten – Benutzerhandbuch. DHI-WASY GmbH, Berlin.
- DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblatt 251, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- DWA (2009): Regionalisierung von Niedrigwasserkenngrößen. DWA-Themen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, August 2009.
- DWA (2012): Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Merkblatt DWA-M 552, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- DYCK, S.; GRÜNEWALD, U.; HANSEL, N.; KLUGE, C.; LAUTERBACH, D. UND SCHRAMM, M. (1980): Angewandte Hydrologie. Teil 1: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse. 2. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin.
- EU-WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (EG-Wasserrahmenrichtlinie).

- FISCHER, M. (2008): Regionalisierung von Niedrigwasserabflüssen im Einzugsgebiet der Mulde mit Hilfe von statistischen Verfahren, Diplomarbeit, TU Dresden, Fakultät für Forst-, geo- und Hydrowissenschaften, Institut für Hydrologie und Meteorologie.
- FÜGNER, D., SCHRAMM, M., PETER, A. UND SCHIEKEL, P. (1990): Neue Methoden zur Berechnung von Hochwasserscheiteldurchflüssen mit Wahrscheinlichkeitsaussage. *Wasserwirtschaft – Wassertechnik*, 40 Heft 5, S. 112-114.
- GLOS, E. UND LAUTERBACH, D. (1972): Regionale Verallgemeinerung von Niedrigwasserdurchflüssen mit Wahrscheinlichkeitsaussage. *Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft*, Herausgegeben vom Institut für Wasserwirtschaft Berlin, Heft 37, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- HAUPT, R. (2000): Regionalisierung von Hochwasserkennwerten in Mecklenburg-Vorpommern. Institut für Kulturtechnik und Siedlungswasserwirtschaft der Universität Rostock, Eigenverlag.
- HOSKING, J. R. M. UND WALLIS, J. R. (1997): *Regional frequency analysis: an approach based on L-moments*. Cambridge University Press, Cambridge.
- LAAHA, G. (2008): Aspekte der statistischen Modellierung raumbezogener Umweltdaten am Beispiel von Abflussdaten. Universität für Bodenkultur Wien; Habilitation im Fach Umweltstatistik.
- LAAHA, G. & BLÖSCHL, G. (2006): A comparison of low flow regionalisation methods – catchment grouping. *Journal of Hydrology*, 323, 1-4.
- LAWA (2001): Empfehlungen zur Ermittlung von Mindestwasserabflüssen in Ausleitungsstrecken von Wasserkraftanlagen und zur Festsetzung im wasserrechtlichen Vollzug. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Schwerin, Juli 2001.
- LAWA (2013): Analyse, Dargebot und Nutzung - Textbausteine für die 2. Bewirtschaftungspläne WRRL sowie Empfehlung zur Darstellung der deutschen Position zum ökologischen Mindestwasserabfluss für den europäischen CIS-Prozess. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Magdeburg, Entwurfssfassung vom 16. September 2013.
- LfULG (2008): Europäische Wasserrahmenrichtlinie - Neue Impulse für Sachsen. Informationsblatt Nr. 5 des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Dresden, November 2008.
- MERZ, R. AND BLÖSCHEL, G. (2005): Flood frequency regionalisation – spatial proximity vs. catchment attributes. *Journal of Hydrology*, 302, 283-306.
- MNULV (2005): Handbuch Querbauwerke – Kapitel 13: Mindestabfluss in Ausleitungsstrecken. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), Düsseldorf, 2005.
- PABSTMANN, U.; PRÜß, M. & BÜTTNER, U. (1998): Das Abflussregime als Grundlage für ökologisch begründete Mindestwasserabflüsse für Ausleitungsstrecken von Kleinwasserkraftanlagen. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen (DGM)*, 42. Jahrgang, Heft 5, S. 195-200, Koblenz.
- REGIONALER PLANUNGSVERBAND LEIPZIG-WESTSACHSEN (2012): Entwicklung des Wasserhaushalts im Südraum Leipzig unter dem Ansatz einer regionalen Klimaprojektion. Regionaler Planungsverband Leipzig-West Sachsen, Leipzig.
- SCHUMANN, A. (2005): Hochwasserstatistische Bewertung des Auguthochwassers 2002 im Einzugsgebiet der Mulde unter Anwendung der saisonalen Statistik. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 49 Heft 4, S. 200-206.
- WALTHER, J., FISCHER, B., HORN, S., MERZ, R., SALINAS ILLARENA, J. L. UND LAAHA, G. (2012): Flächenhafte Bestimmung von Hochwasserspenden. *Schriftenreihe des LfULG Sachsen*, Heft 3/2012, 132 S.
- WILLEMS, W. UND HIRSCHHÄUSER, T. (2004): Regionalisierung von Niedrig- und Mittelwasserkenngrößen sowie ökologischen Indizes in Schleswig-Holstein. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Jahrgang 48, Heft 4, S. 184-191.

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0, Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de
Das LfULG ist eine nachgeordnete Behörde des
Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft.

Autoren:

Antje Becker, Romy Ehrcke, Björn Fischer, Susanna Horn, Katharina Köpp-
Klausch, Stephanie Kübler
DHI WASY GmbH, Volmerstraße 8, 12489 Berlin
Telefon: + 49 30 679998-0, Telefax: + 49 30 679998-99
E-Mail: mail@dhi-wasy.de

Evelin Bohn, Uwe Büttner, Holm Friese, Erhard Wolf
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe
Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden
Telefon: + 49 351 8928-4512, Telefax: + 49 351 8928-4099
E-Mail: Uwe.Buettner@smul.sachsen.de

Maik Ulrich, Ulf Winkler
Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen
Referat Wassermenge
Bahnhofstraße 14, 01782 Pirna
Telefon: + 49 3501 796-0, Telefax: + 49 3501 796-103
E-Mail: Poststelle@ltv.sachsen.de

Redaktion:

Uwe Büttner, Holm Friese, Erhard Wolf
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe
Zur Wetterwarte 11, 01109 Dresden
Telefon: + 49 351 8928-4512, Telefax: + 49 351 8928-4099
E-Mail: Uwe.Buettner@smul.sachsen.de

Titelfoto:

Fließgewässerabschnitt der Kleinen Röder (Bildarchiv LfULG)

Redaktionsschluss:

21.06.2019

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-
Datei unter <https://publikationen.sachsen.de> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen
ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit her-
ausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwe-
cke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen. Missbräuch-
lich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informations-
ständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipoli-
tischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an
Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de