

Forschungsbericht KLIMOPASS

# Operationelle Niedrigwasserklassifizierung - Entscheidungsgrundlage zur Anpassung des Niedrigwassermanagements an Klimawandel und Landnutzungsänderungen (NieKlass BW)

VON Dr.-Ing. I. Haag-Wanka, D. Varga

Gefördert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und  
Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)

Juli 2013

<b>HERAUSGEBER</b>	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
<b>KONTAKT</b>	Dr. Kai Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, <a href="mailto:Kai.Hoepker@lubw.bwl.de">Kai.Hoepker@lubw.bwl.de</a> ;
<b>AUFTRAGGEBER</b>	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Forschungsprogramm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden- Württemberg (KLIMOPASS)
<b>BEARBEITUNG</b>	Dipl.-Geogr. Nicole Henn, M.Sc. Julia Krumm, Dipl.-Ing. Annette Luce, Dr.-Ing. Greta Moretti, Dipl.-Hyd. Angela Sieber, Dipl.-Geoökol. Daniel Varga, Dr.-Ing. Ingo Haag-Wanka Hydron Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH Haid-und-Neustr. 7 76131 Karlsruhe
<b>BEZUG</b>	<a href="http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/">http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/</a> ID Umweltbeobachtung U61-W03-N11
<b>STAND</b>	Juli 2013, Internetausgabe September 2013

<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>6</b>
<b>1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG</b>	<b>9</b>
<b>2 ANFORDERUNGEN AN DIE NIEDRIGWASSERFRÜHWARNUNG UND VORGEHENSWEISE</b>	<b>11</b>
2.1 Anforderungen an die Niedrigwasserfrühwarnung	11
2.1.1 Grundlegendes	11
2.1.2 Klassifizierung	11
2.1.3 Visualisierung	12
2.2 Detailkonzept zur technischen Umsetzung der Niedrigwasser-Klassifizierung	12
2.2.1 Ausgangssituation	12
2.2.2 Konzeptionelle Vorgehensweise	13
2.2.3 Weiterentwicklungsbedarf von LARSIM	17
<b>3 GRUNDLEGENDE ANALYSEN</b>	<b>19</b>
3.1 Pegelplausibilisierung	19
3.2 Nachführung der Gebietsspeicher	21
3.2.1 Grundlagen	21
3.2.2 Auswertung	21
3.2.3 Spezielle Betrachtungen an einzelnen Pegeln	28
3.3 ARIMA-Korrektur	30
3.3.1 Grundlagen	30
3.3.2 Beispiele	31
3.3.3 Weiterentwicklung der ARIMA-Korrektur bei instationären Bedingungen im Niedrigwasser	32
3.3.4 Entwicklungsmöglichkeiten	34
3.4 Folgerungen und Empfehlungen	35
3.4.1 Technische Verbesserungen bei der operationellen Niedrigwasser-Frühwarnung	35
3.4.2 Konsequenzen für die weitere Bearbeitung	36
<b>4 LARSIM-NIEDRIGWASSER-MODELL AM BEISPIEL DES WHM BODENSEE</b>	<b>37</b>
4.1 Pegelbewertung der LUBW	37
4.2 Plausibilisierung	38

4.3	Konsistenzprüfung anhand der Abflussspenden	40
4.4	Nachführungsfaktoren	44
4.5	Vorgehensweise bei Durchführung und Auswertung der Vorhersagetests	45
4.6	Ergebnisse der Vorhersagetests	47
4.7	Konsequenzen aus der Analyse des Niedrigwassermodells Bodensee	50
<b>5</b>	<b>LARSIM-NIEDRIGWASSER-MODELL UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON KLÄRANLAGEN AM BEISPIEL VON REMS UND MURR</b>	<b>51</b>
5.1	Motivation	51
5.2	Trockenwetterabflüsse der Kläranlagen	52
5.2.1	Grundlagen	52
5.2.2	Methode zur Ermittlung der Trockenwetterabflüsse	53
5.2.3	Berechnung von Ganglinien der Trockenwetterabflüsse	60
5.3	Berücksichtigung der Kläranlagen im Modell	62
5.4	Konsistenzprüfung anhand der Abflussspenden	62
5.5	Kalibrierung	65
5.6	Vorgehensweise bei Durchführung und Auswertung der Vorhersagetests	66
5.7	Ergebnisse der Vorhersagetests	67
5.7.1	Ergebnisse der Vorhersagetests für die Rems	67
5.7.2	Ergebnisse der Vorhersagetests für die Murr	70
5.8	Anpassung der Regionalisierung	72
5.9	Korrekturfaktoren zwischen NQ-Regionalisierung und LARSIM-Berechnung	73
5.10	Konsequenzen aus der Analyse des Niedrigwassermodells für Rems und Murr	77
<b>6</b>	<b>TECHNISCHE UMSETZUNG UND EINRICHTUNG EINER OPERATIONELLEN MODELLUMGEBUNG</b>	<b>78</b>
6.1	Operationelle Niedrigwasservorhersage	78
6.2	Optimierung der Auswertungsknoten	79
6.3	Regionalisierung der Niedrigwasserklassifizierung	80
6.4	Visualisierung der Niedrigwasserfrühwarnung	81
6.5	Geplante technische Umsetzungen	84
6.5.1	Verbesserung der ARIMA-Korrektur	84
6.5.2	Optimierung der Nachführung	84

<b>7</b>	<b>VORGEHENSWEISE FÜR DIE ERSTELLUNG EINES KONSISTENTEN LANDESWEITEN NIEDRIGWASSER-VORHERSAGEMODELLS</b>	<b>85</b>
<b>8</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK</b>	<b>89</b>
	<b>LITERATUR</b>	<b>92</b>

---

# Zusammenfassung

Die Folgen des globalen Klimawandels mit den unmittelbaren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Abflussverhältnisse stellen das Niedrigwassermanagement vor besondere Herausforderungen. In diesem Zusammenhang stellt eine verlässliche Niedrigwasser-Frühwarnung ein wichtiges Instrument für den Umgang mit diesen Herausforderungen dar.

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war es daher, die Voraussetzungen für ein belastbares landesweites Niedrigwasser-Frühwarnsystem zu schaffen und weitere Verbesserungspotentiale aufzuzeigen.

In Abstimmung mit der Hochwasservorhersagezentrale der LUBW (HVZ) und dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), Bereich Hydrologie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurde ein Konzept für ein solches Niedrigwasser-Frühwarnsystem entwickelt.

Auf Grundlage der Konzeption erfolgte die Analyse des vorhandenen Instrumentariums aus LARSIM Modellen, Regionalisierung und verfügbaren Daten. Diese zeigte, dass für ein verlässliches Niedrigwasser-Vorhersagesystem Weiterentwicklungen an LARSIM notwendig bzw. wünschenswert sind, eine konsistente Kombination der verwendeten Pegel unerlässlich ist und die adäquate Berücksichtigung von Punktquellen (Kläranlagen, Karstquellen) empfehlenswert ist.

Die als unbedingt notwendig erachteten LARSIM-Weiterentwicklungen zur Visualisierung der operationellen Modellnachführungsfaktoren sowie die Berechnungen und Ausgaben zur Niedrigwasserklassifizierung wurden unmittelbar umgesetzt und angewandt. Darüber hinaus wurden weitere Verbesserungspotentiale vor allem hinsichtlich der operationellen Modellnachführung und der ARIMA-Korrektur im Niedrigwasserbereich identifiziert, die zukünftig umgesetzt werden sollten. Diese weiteren Verbesserungen können auch zu einem späteren Zeitpunkt in ein bereits im Betrieb befindliches Niedrigwasser-System integriert werden.

Anhand von zwei Beispielregionen wurde die Konzeption des Niedrigwasser-Frühwarnsystems unter Berücksichtigung der LARSIM-Weiterentwicklungen umgesetzt, getestet, analysiert und optimiert. Für die Analyse wurden sowohl bewährte Methoden verwendet, als auch neue Werkzeuge entwickelt.

Mit den konsistenten Niedrigwasser-Vorhersagesystemen wird insbesondere die Vorhersage der Abflüsse für Gewässerknoten in den Einzugsgebieten wesentlich realistischer als mit den alten operationellen Modellen. Sprunghafte Veränderungen der vorhergesagten Abflüsse an den Grenzen zwischen Pegelkontrollbereichen werden weitgehend unterbunden. Damit wurde eine elementare Voraussetzung für eine stabile und belastbare Niedrigwasser-Frühwarnung geschaffen.

Anhand des Rems-Murr-Gebiets wurde gezeigt, dass die örtlich korrekte Berücksichtigung dynamischer Kläranlagen-Trockenwetterabflüsse sowohl bei der Simulation und Vorhersage mit LARSIM als auch bei der landesweiten Regionalisierung von Niedrigwasserkennwerten praktikabel ist. Durch die gleichzeitige Berücksichtigung der Kläranlagen-Trockenwetterabflüsse in Regionalisierung und LARSIM wurde die Konsistenz zwischen beiden Modellansätzen deutlich erhöht. Zudem wird durch die Einbeziehung der Punktquellen die tatsächliche räumliche Verteilung der Niedrigwasserabflüsse an den Gewässerknoten wesentlich realistischer abgebildet. Die adäquate Einbeziehung von Kläranlagen in den LARSIM Modellen und in der Re-

gionalisierung ist also praktikabel und im Sinne einer belastbaren Niedrigwasser-Frühwarnung empfehlenswert.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden zudem alle technischen Voraussetzungen für die Umsetzung der landesweiten Niedrigwasser-Frühwarnung geschaffen. Die anzuwendende Technik wurde erfolgreich getestet. Abschließend wurden klare Empfehlungen zur praktischen Umsetzungen dieses landesweiten Systems abgeleitet und formuliert. Damit sind die Voraussetzungen für eine erfolgreiche landesweite Niedrigwasser-Frühwarnung und die zukünftige Veröffentlichung entsprechender Warnkarten geschaffen.





# 1 Hintergrund und Zielsetzung

Aufgrund des prognostizierten Klimawandels ist für das Landesgebiet von Baden-Württemberg mit einem Anstieg der Lufttemperatur sowie mit einer jahreszeitlichen Umverteilung der Niederschläge (Abnahme der Sommer-Niederschläge, Zunahme der Winter-Niederschläge) zu rechnen. Vor allem in der letzten Dekade des letzten Jahrhunderts (1990er Jahre) konnte in Süd- und Südwestdeutschland ein kontinuierlicher und überdurchschnittlicher Anstieg der Lufttemperaturen beobachtet werden (Zebitsch et. al. 2005). Es ist davon auszugehen, dass der Anstieg der Jahresmitteltemperatur sowie die Verringerung der Niederschläge im Sommerhalbjahr zu einer zeitlichen Ausdehnung der Niedrigwasserperioden im Sommer führen (Hennegriff et. al. 2008). Zudem wird eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit für die Unterschreitung von Extremwerten bei Niedrigwasser erwartet. Somit sind negative Auswirkungen des Klimawandels im Bereich des Niedrigwassers sowohl im mittleren als auch im extremen Verhalten wahrscheinlich.

Da die derzeitige landwirtschaftliche Nutzung unter Umständen durch den Wandel der klimatischen Bedingungen erschwert wird bzw. es räumliche Verlagerungen geben wird (z.B. Anbau von Maispflanzen in höheren Regionen), ist zudem von einer Veränderung der Landnutzung auszugehen. Eventuell wird durch die Erwärmung auch der Anbau neuer Nutzpflanzen ermöglicht (Flaig 2009). Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass auch der Bewässerungsbedarf zunimmt und somit verstärkt Wasser aus den Grundwasservorräten und oberirdischen Gewässern entnommen wird. Diese Veränderungen in der Landnutzung und der Bewässerung werden wiederum Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und insbesondere den Niedrigwasserabfluss haben.

Daher ist es von großer Bedeutung, die Auswirkungen des Klimawandels auf das Niedrigwasser unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Landnutzungsänderungen zu betrachten.

Für diese Aufgaben stellen Wasserhaushaltsmodellierungen ein wirksames Instrument dar. Wasserhaushaltsmodelle simulieren die Abflüsse kontinuierlich unter Berücksichtigung der Landnutzung und unter Verwendung der meteorologischen Größen als Eingangsdaten (Haag & Bremicker 2010). Änderungen in den Eingangsdaten wie die Zunahme der Lufttemperatur und Änderungen in den Landnutzungen wie z.B. Veränderungen der Vegetationsperioden, die für das lokale Niedrigwassermanagement von großer Bedeutung sein können, lassen sich somit sehr detailliert simulieren. Nutzt man zusätzlich meteorologische Vorhersagen, können Wasserhaushaltsmodelle auch Niedrigwasservorhersagen für bis zu sieben Tage in die Zukunft liefern (Luce et al. 2006).

Während Niedrigwasserperioden stellen Wasserentnahmen aus den Oberflächengewässern eine Belastung des Ökosystems dar und führen zu einer Verminderung der Grundwasserreserven. Bislang ist die Einschränkung von Wasserentnahmen für die einzelnen Nutzer während Niedrigwasserphasen an die gemessenen Abflüsse am jeweiligen Pegel im Gewässer geknüpft. An vielen kleinen Gewässern gibt es aber keine Pegel, um lokal spezifisch einen Abfluss festzulegen, unterhalb dessen die Wasserentnahmen einzuschränken sind.

Aus diesem Grund wird die Entwicklung eines Instrumentariums zur operationellen Niedrigwasserklassifizierung angestrebt, mit dem auch für kleine Gewässer ohne Pegel eine verwertbare Abflussvorhersage in Niedrigwasserperioden erstellt werden kann. Dieses Instrumentarium wird in enger Abstimmung mit der Hochwasservorhersagezentrale der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-

Württemberg (LUBW) entwickelt und kann von dieser in einen automatisierten Betrieb überführt werden. Diese Niedrigwasservorhersage kann dann auch für kleinere Einzugsgebiete zur gezielten und vorausschauenden Bewirtschaftung der limitierten Wasservorräte eingesetzt werden.

Das geplante Instrumentarium ermöglicht die Veröffentlichung von täglich aktualisierten Karten im Internet, in denen mit landkreisbezogenen Vorhersagen für die Gewässer mit Einzugsgebieten kleiner 200 km<sup>2</sup> die vorhergesagte Unterschreitung von Niedrigwasser-Kennwerten dargestellt werden. Die Karten sollen für jeweils sieben Vorhersagetage erzeugt werden. Diese Auswertungen können z.B. den baden-württembergischen Landratsämtern als Entscheidungsgrundlage für das Niedrigwassermanagement, d.h. zur Steuerung von Wasserentnahmen, dienen.

Grundlage für die Erstellung eines Instrumentariums für die Niedrigwasserklassifizierung bilden die bei der LUBW flächendeckend für das Landesgebiet von Baden-Württemberg vorliegenden Wasserhaushaltsmodelle auf Basis des Programms LARSIM ("Large area runoff simulation model") (Bremicker 2000, Haag & Bremicker 2010, Bremicker et al. 2013). Diese Wasserhaushaltsmodelle werden derzeit von der LUBW im kontinuierlichen Betrieb für die Erstellung pegelbezogener Hochwasser- und Niedrigwasservorhersagen sowie für die regionsbezogene Hochwasserfrühwarnung eingesetzt (Bremicker 2006, LUBW 2013a). Durch Kombination von Ergebnissen aus den operationellen Wasserhaushaltsmodellierungen mit den Niedrigwasserkennwerten aus der Publikation „Abfluss-Kennwerte in Baden-Württemberg“ (LUBW 2007), Herausgeber LUBW, Bearbeitung Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (Dr. Ihringer) soll erstmalig in Deutschland auch für Gewässerteilstrecken ohne Pegel ein modellgestütztes, vorausschauendes Niedrigwassermanagement ermöglicht werden.

Die vorliegende Studie hat dabei vor allem folgende Ziele:

- Erarbeitung einer grundlegenden Konzeption für die Niedrigwasser-Frühwarnung
- Analyse des bislang vorliegenden Instrumentariums hinsichtlich der Eignung für die Niedrigwasser-Frühwarnung und Ableitung von Weiterentwicklungsbedarf
- Aufbau eines Niedrigwasser-Modells für eine Beispielregion
- Identifikation wesentlicher Defizite und soweit möglich Untersuchung von Ansätzen zu deren Behebung
- Technische Umsetzung für den operationellen Testbetrieb der Niedrigwasser-Frühwarnung
- Empfehlungen für die Erstellung eines landesweiten Niedrigwasser-Frühwarnsystems

# 2 Anforderungen an die Niedrigwasserfrühwarnung und Vorgehensweise

## 2.1 ANFORDERUNGEN AN DIE NIEDRIGWASSERFRÜHWARNUNG

### 2.1.1 GRUNDLEGENDES

In der ersten Projektphase wurden die grundlegenden Anforderungen an das Niedrigwasser-Vorhersagemodell geklärt und die Ausgangssituation detailliert beleuchtet. Die konzeptionelle Umsetzung des Projektes wurde in Besprechungen mit dem Landratsamt Bodenseekreis als Pilotpartner, der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) sowie dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), Bereich Hydrologie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) dargestellt und diskutiert. Dabei wurden problematische Fragen geklärt und eventuell zusätzliche Anforderungen formuliert.

Das Landratsamt Bodenseekreis sucht für interne Anwendungen und externe Nutzer eine Möglichkeit, um festzustellen, ob während Niedrigwasserphasen Wasserentnahmen bei bestimmten Gewässern möglich sind oder nicht. Das System soll einfach und zuverlässig sein. Es soll eine Beurteilung ermöglicht werden, ob ein Gewässer für eine Bewässerungsentnahme ausscheidet und eine plausible Begründung geliefert werden.

Bei für die Wasserentnahme zugelassenen Gewässern, sollen Ist-Zustand und Vorhersage dazu dienen, auf die aktuelle Vor-Ort-Situation zu reagieren und Wasserentnahmen kurzfristig zu genehmigen bzw. zu untersagen.

Da an vielen Zielgewässern keine Pegel existieren, die als Leitpegel genutzt werden könnten, um Wasserentnahmen lokal spezifisch einzuschränken, sollen die regionalisierten Modellergebnisse dazu genutzt werden. Aufgrund des hohen Stellenwertes der NQ-Regionalisierung des KIT bei den zuständigen Landratsämtern, sollen die vom KIT abgeleiteten Kennwerte für die Niedrigwasserklassifizierung genutzt werden.

### 2.1.2 KLASSIFIZIERUNG

Prinzipiell ist für das Landratsamt der Schwellwert MNQ relevant, da sämtliche ökologischen und baulichen Erlässe auf diesen Wert zurückzuführen sind.

Des Weiteren liegen Niedrigwasserjährlichkeiten aus der Regionalisierung vor. Diese können analog der an der Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg eingesetzten Hochwasserregionalisierung für die Klassifikation eingesetzt werden.

Allerdings sind die Niedrigwasserkennwerte für vorgegebene Jährlichkeiten aufgrund der messtechnischen Unsicherheiten im Niedrigwasserbereich als recht unsicher einzustufen. Zudem wird im Verwaltungsverzug häufiger der MNQ oder ein Bruchteil des MNQ verwendet, als Niedrigwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten.

Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, in der vorliegenden Studie die Klassifizierung zunächst auf den MNQ zu beziehen. Eine spätere Erweiterung auf andere Niedrigwasserkennwerte oder Bruchteile des MNQ ist problemlos möglich.

### 2.1.3 VISUALISIERUNG

Eine landkreisbezogene Ergebnisdarstellung von Hochwasser- und Niedrigwasserfrühwarnung ist laut Aussagen des Landratsamtes zu allgemein und hat damit keinen großen Aussagewert. Eine feinere Unterteilung in kleinere Einzugsgebiete, bzw. Teileinzugsgebiete wäre wünschenswert. Für die Hochwasserfrühwarnung ist jedoch eine einzugsgebietsbezogene Darstellung erst ab 200 km<sup>2</sup> vertretbar, da kleine Einzugsgebiete großen Ungenauigkeiten in Bezug auf die Vorhersage von Niederschlagsereignissen unterliegen.

Die Ergebnisse der Niedrigwasserklassifizierung jedoch können für Einzugsgebiete von 50 - 100 km<sup>2</sup> erfolgen, da die Vorhersageunsicherheiten in Niedrigwassersituationen im Vergleich viel geringer sind. Beispielsweise würde die Seefelder Aach im Landkreis Bodensee mit 3 Teileinzugsgebieten dargestellt werden können. Auf den ganzen Bodenseekreis würden etwa 10 Teileinzugsgebiete fallen. Dazu würde sich beispielsweise die Verschneidung der Landreise mit den Einzugsgebieten bzw. den Pegelkontrollbereichen (PKB) anbieten.

## 2.2 DETAILKONZEPT ZUR TECHNISCHEN UMSETZUNG DER NIEDRIGWASSER-KLASSIFIZIERUNG

### 2.2.1 AUSGANGSSITUATION

Ein in sich konsistentes und unter operationellen Bedingungen stabiles Niedrigwasser-Vorhersagemodell ist die grundlegende Voraussetzung für eine zuverlässige und belastbare Niedrigwasser-Frühwarnung. Daher kommt diesem Arbeitsschritt zentrale Bedeutung zu.

Ziel dieses Modells ist es, ausgehend von vertrauenswürdigen Niedrigwasser-Messungen an Pegeln die Abflüsse in die „ungemessenen“ kleineren Gewässer der jeweiligen Einzugsgebiete zu übertragen. Es ist jedoch zu beachten, dass Baden-Württemberg derzeit über kein Niedrigwassermessnetz verfügt. Das Auswahlverfahren für die Pegel, die zum Betrieb des Niedrigwasservorhersagemodells notwendig sind, wird auf Basis statistischer Untersuchungen der plausibilisierten Messwerte und Bewertungen der Vorhersagequalität durchgeführt. Verbesserungen des Modells können nachträglich durch die Erhöhung der Anzahl der Pegel, die verlässliche Niedrigwassermessungen liefern, erreicht werden.

Der Terminus Niedrigwasser bzw. Niedrigwasserphase ist im Betrieb des LARSIM-Vorhersagemodells in Bezug auf die Unterschreitung bestimmter modellinterner Schwellwerte zu verstehen. Operationell wird als obere Grenze des Abflussbereiches der Schwellwert NQM verwendet, der folgendermaßen definiert ist:

$$NQM = MNQ + \frac{1}{2} (MNQ + MQ)$$

MNQ Mittelwert niedrigster Abflüsse

MQ Mittelwert Abfluss

Zur Erstellung des zuverlässigen Niedrigwasser-Vorhersagemodells wird von den bestehenden operationellen LARSIM-Modellen ausgegangen. Allerdings liefern diese bestehenden Modelle in Verbindung mit den

regionalisierten Niedrigwasser-Kennwerten noch keine stabilen belastbaren Klassifikationen und Warnungen. Dafür können verschiedene Gründe genannt werden, die zum einen im Zusammenspiel zwischen den teilweise unplausiblen Messungen und dem verwendeten Wasserhaushalts- bzw. Regionalisierungsmodell zu suchen sind, und zum anderen in den jeweiligen Modellen selbst. Dabei können sowohl Inkonsistenzen zwischen den Modellen eine Rolle spielen, als auch unter Umständen noch nicht berücksichtigte Wasserüberleitungen, Senken oder Punktquellen.

Im Hinblick auf punktuelle Quellen sind im dicht besiedelten Baden-Württemberg Kläranlagen von signifikanter Bedeutung. Eine kürzlich von der LUBW beauftragte Pilotstudie für die Einzugsgebiete von Rems- und Murr hat gezeigt, dass der Anteil des Kläranlagenabflusses an Niedrigwasser-Abflussspenden regional sehr variabel ist. Selbst in größeren Gewässern können Niedrigwasserkennwerte deutlich von Kläranlagenabflüssen beeinflusst sein. Im Rahmen der Pilotstudie wurde vor allem untersucht, ob eine explizite Berücksichtigung von Kläranlagenabflüssen in Wasserhaushaltsmodellen möglich und praktikabel ist und ob diese Berücksichtigung zur besseren räumlichen Abbildung von Niedrigwasserabflüssen führt (LUBW 2012a).

Die in Bezug auf die Niedrigwasser-Klassifizierung wesentlichen Erkenntnisse dieser Studie können wie folgt zusammengefasst werden (LUBW 2012a):

- Der Einfluss der Kläranlagen (KLA) auf Niedrigwasser kann z.T. sehr groß sein.
- Der KLA-Einfluss ist räumlich sehr heterogen
- Als landesweite Daten liegen für die KLA u.a. vor:
  - Standortskordinaten
  - Entwässerungsgebiet der KLA
  - Jahresabwassermenge JAWM (= Abwasser + Niederschlag auf versiegelte Flächen abzüglich Regenüberlauf + Fremdwasser (z.B. Zusickerung aus Grundwasser))
  - Jahreswerte zu den Entlastungsraten der Regenüberlaufbecken
- Der Trockenwetterabfluss (Q<sub>TW</sub>) als Komponente der JAWM kann als relevanter Eingangsdatensatz für die Niedrigwasserregionalisierung bereitgestellt werden.

Im Rahmen der Koordinationsgespräche zwischen der LUBW und dem KIT wurde darauf verwiesen, dass im Laufe der nächsten Monate Veränderungen im Regionalisierungsmodell anstehen, so dass grundlegende Änderungen der Kennwerte zu erwarten sind. So wird beispielsweise ein höher aufgelöstes Höhenmodell verwendet und neue Gewässerstationierungskarten genutzt. Außerdem sollen noch Referenzpegel abgestimmt werden, die als Stützstellen für die Regionalisierung notwendig sind. Im Rahmen dieser Veränderungen ist es prinzipiell möglich und fachlich sinnvoll die relevanten KLA-Trockenwetterabflüsse und deren saisonalen Schwankungen im Regionalisierungstool zu berücksichtigen.

### 2.2.2 KONZEPTIONELLE VORGEHENSWEISE

Zur Verbesserung der Niedrigwasservorhersage und zum Erreichen einer stabilen Niedrigwasser-Frühwarnung ist es erforderlich, im Vorfeld folgende Arbeiten durchzuführen:

#### 1. Vorauswahl zuverlässiger Niedrigwasserpegel:

Auf Grundlage einer internen Pegelbewertung der LUBW und den bisherigen Erfahrungen im operativen Betrieb der Hochwasservorhersagezentrale werden Pegel ausgewählt, die im Niedrigwasserbereich als zuverlässig einzustufen sind.

## 2. Konsistenz der Niedrigwassermessungen:

Die innere Konsistenz der Niedrigwassermessungen an den Pegeln ist im operationellen Betrieb von zentraler Bedeutung. Inkonsistente Abflussmessungen benachbarter Pegel führen einerseits zu pegelkontrollbereichsscharf stark unterschiedlichen Eichparameterwerten. Andererseits entsteht bei der bisher angewandten Nachführung ein „Flickenteppich“ bei der Füllung der Gebietspeicher. Dies zeigt sich beispielhaft in den simulierten Basisabflussspenden in Abbildung 2-1. Infolgedessen können sich an den Grenzen der Pegelkontrollbereiche drastische Unterschiede zwischen den simulierten bzw. vorhergesagten Niedrigwasserabflüssen ergeben, die nicht realistisch sind und somit zu einer unplausiblen Übertragung von Abflüssen in die Einzugsgebiete führen.

Die operationelle Nachführung der Gebietspeicher führt zwar zu guten Ergebnissen an den jeweiligen Pegelstandorten, jedoch ist die resultierende Übertragung in die kleineren Gewässer der einzelnen Pegelkontrollbereiche mitunter unrealistisch. Die exemplarische Darstellung der Nachführungsfaktoren für die Pegelkontrollbereiche in Baden-Württemberg am 25.07.2012 zeigt Abbildung 2-2. Deutlich zu erkennen sind direkt nebeneinander liegende Bereiche mit divergierenden Faktoren (dunkelblau und rot).

Die wesentliche Ursache der unrealistischen Klassifikation der Abflüsse in manchen Bereichen ist somit sicherlich die mangelnde Konsistenz der Niedrigwassermessungen an unterschiedlichen Stellen in Verbindung mit der bislang genutzten Nachführungstechnik.

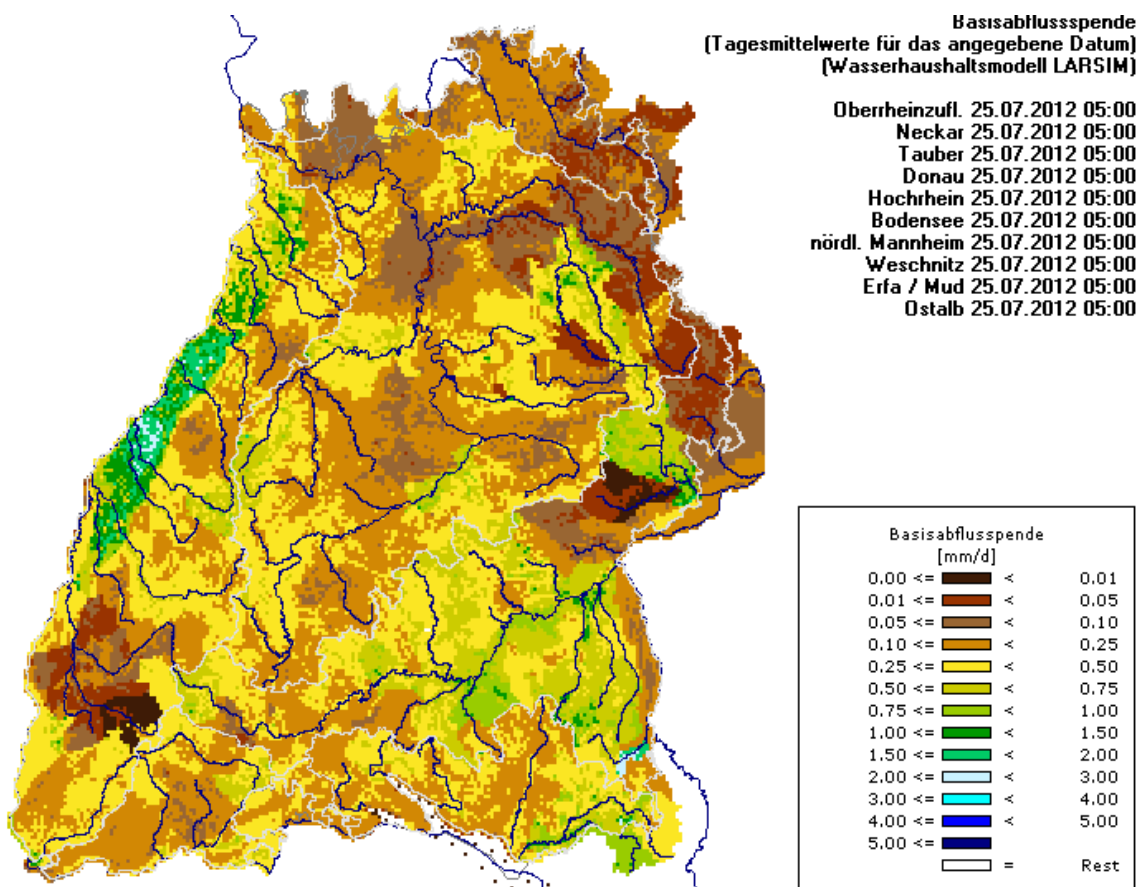
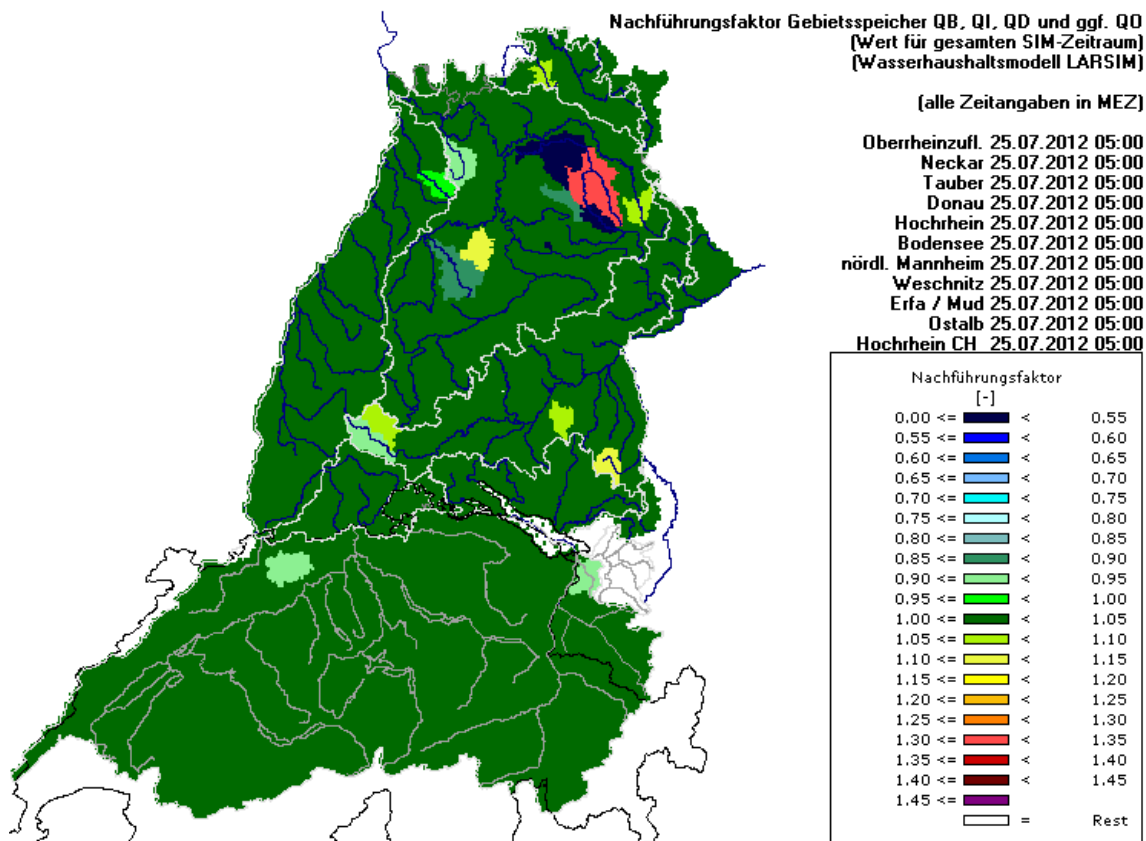


Abbildung 2-1: Räumliche Verteilung der simulierten Basisabflussspenden in den operationellen Wasserhaushaltsmodellen (25.07.2012 05:00).



**Abbildung 2-2: Räumliche Verteilung der operationellen Nachführungsfaktoren (25.07.2012 05:00).**

### 3. Konsistenz zwischen Regionalisierung und LARSIM:

Die Niedrigwasser-Frühwarnung basiert auf einem Vergleich zwischen den durch LARSIM vorhergesagten Abflüssen mit Niedrigwasserkennwerten aus der Regionalisierung für vorgegebene Gewässerknoten. Eine Niedrigwasser-Frühwarnung wird dann ausgesprochen, wenn die Vorhersage einen regionalisierten Niedrigwasser-Kennwert (z.B. MNQ) unterschreitet.

Dabei ist zu beachten, dass LARSIM und die Regionalisierung letztlich zwei unterschiedliche Methoden zur Übertragung von Abflüssen in das Einzugsgebiet darstellen. Aufgrund der unterschiedlichen Methodik und Unterschieden in den berücksichtigten Einflussfaktoren, ist davon auszugehen, dass sich mit LARSIM und der Regionalisierung unterschiedliche Niedrigwasserkennwerte für die Gewässerknoten ergeben.

Daher ist zum einen darauf zu achten, dass in beiden Verfahren möglichst dieselben signifikanten Einflussfaktoren (z.B. Punktquellen wie Kläranlagen oder Karstquellen) berücksichtigt werden. Zum anderen müssen etwaige Unterschiede der Kennwerte, die aus den Modellunterschieden resultieren, identifiziert werden. Dabei ist es grundsätzlich wünschenswert, dass die Unterschiede zwischen den Kennwerten aus beiden Ansätzen möglichst gering sind.

Um die verbleibenden Unterschiede zwischen den Kennwerten aus den beiden Ansätzen aneinander anzupassen, müssen ggf. Korrekturfaktoren ermittelt werden. Diese Korrekturfaktoren stellen die Konsistenz zwischen LARSIM und der Regionalisierung sicher.

#### 4. Aufbau einer Offline-Modellumgebung:

Die Ergebnisse des angepassten Niedrigwassermodells werden analog zu den bereits vorliegenden operationellen Ergebnissen anhand der flächenhaften Darstellungen ausgewertet. Alternativ bzw. ergänzend kann die Auswertung mit statistischen Methoden automatisiert und objektiviert werden.

Auf Grundlage der Auswertung der Offline durchgeführten Vorhersagetests wird das Modell iterativ weiter optimiert. Somit wird letztlich ein Niedrigwasser-Vorhersagemodell zur Verfügung gestellt, dessen Pegel soweit möglich konsistent sind. Dabei wird das Modell ein Kompromiss zwischen dem Maß der Konsistenz und der räumlichen Dichte der Pegel sein.

Diese Arbeiten können selbstverständlich erst dann erfolgen, wenn sowohl Pegelplausibilisierung, Regionalisierung als auch der Aufbau der Wasserhaushaltsmodelle landesweit erfolgt ist. Folglich sind sie noch nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

#### 5. Räumliche Konsistenz der Parameterwerte

Inkonsistenzen zwischen Pegeln können bei der Modellkalibrierung zu großen unplausiblen Sprüngen der Parameterwerte benachbarter Pegelkontrollbereiche führen. Im ersten Schritt sind daher die Parameterwerte, die für die Simulation der Niedrigwasserabflüsse relevant sind, räumlich darzustellen. Im zweiten Schritt kann dann eine Glättung der Parameterwerte über die Grenzen der Pegelkontrollbereiche hinweg vorgenommen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass es zu keiner signifikanten Verschlechterung der Simulationsergebnisse kommt.

Die landesweite Überprüfung der Konsistenz der Parameterwerte kann erfolgen, wenn die Offline-Umgebung steht und alle Wasserhaushaltsmodelle eingebunden sind. Dies ist also auch noch nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

#### 6. Modifizierte Nachführung

Zur Optimierung der Simulation bis zum Vorhersagezeitpunkt bzw. zur Erzeugung eines optimalen Wasserhaushaltszustands für die Berechnung einer Abflussvorhersage werden in LARSIM verschiedene Verfahren zur Nachführung genutzt. Mögliche Verfahren sind dabei die Nachführung der Gebietspeicher und die Nachführung des Wasserdargebots. Die Wahl des Verfahrens wird jeweils durch die vorliegenden Abflussverhältnisse bestimmt (Luce et al. 2006).

Eine zusätzliche Verbesserung des Niedrigwassermodells scheint durch eine Weiterentwicklung der Nachführungsalgorithmen für den Niedrigwasserbereich möglich. Die derzeitige Implementierung der Nachführung ist im Niedrigwasserbereich durch die Nachführung der Gebietspeicher dominiert. Die Optimierung der Speicherfüllungen zum Simulationsbeginn führt zu einer guten Nachbildung des Abflussvolumens im Simulationszeitraum. Dabei werden zumeist nur die Speicher für Interflow und Direktabfluss nachgeführt, während eine Nachführung des Basisabflussspeichers nur stattfindet, wenn der simulierte Anteil des Basisabflusses einen vorgegebenen Mindestanteil am simulierten Gesamtabfluss erreicht. Diese relativ seltenen Nachführungen des Basisabflusses führen zu abrupten Änderungen der Gebietspeicher, die den beschriebenen „Flickenteppich“ der speicherspezifischen Abflussspenden zur Folge haben (Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2). Für die Erstellung der flächenhaften Darstellung in sind weitere LARSIM-Entwicklungen nötig gewesen, die in Kapitel 2.2.3 beschrieben werden.

Die genauen Definitionen der erforderlichen Weiterentwicklungen sollen im Laufe der Projektlaufzeit im Zusammenhang mit den Arbeiten zur „Konsistenz der Niedrigwassermessungen“ ausgearbeitet werden.



## 7. ARIMA-Korrektur im Niedrigwasserbereich:

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Nachführungsfaktoren besteht im Wasserhaushaltsmodell LARSIM die Möglichkeit eine Korrektur der Vorhersagewerte für den Abfluss anhand der Differenz zwischen dem gemessenen und simulierten Abflusswert zum Vorhersagezeitpunkt durchzuführen. In Abhängigkeit von den Abflussverhältnissen können absolute oder relative Verschiebungen der Vorhersage um die berechnete Differenz vorgenommen werden. Diese ARIMA-Korrektur (**A**uto **R**egressive **I**ntegrated **M**oving **A**verage) wird voraussichtlich trotz des konsistenten Modells und der verbesserten Modellnachführung zusätzlich benötigt. Die Untersuchung der Wirkungsweise der ARIMA-Korrektur im Zusammenspiel mit der Nachführung und deren Abstimmung aufeinander ist von zentraler Bedeutung. Daher sollen im ersten Schritt die bereits heute verfügbaren Varianten der Niedrigwasser-ARIMA-Korrektur analysiert werden. Darüber hinaus ist aber möglicherweise auch eine konzeptionelle Weiterentwicklung der ARIMA-Korrektur im Niedrigwasserbereich vorzunehmen, die derzeit aber noch nicht näher spezifiziert werden kann.

## 8. Einfluss von Kläranlagen

Der Einfluss der Kläranlagen auf die Niedrigwasserregionalisierung und –klassifikation im Modell soll ausgehend vom Pilotgebiet Rems-Murr beschrieben werden. Die Kläranlagendaten sollen testweise in Regionalisierungs- und Wasserhaushaltsmodell eingebaut werden. Das Rems-Murr-Gebiet eignet sich dabei besonders als Testgebiet, da hier schon wesentliche Arbeiten durchgeführt worden sind und die Datenlage als günstig einzustufen ist.

Für die Modellanwendung müssen die relevanten Eingangsdaten extrahiert bzw. aus den vorhandenen Kläranlagendaten ermittelt werden. Diese Eingangsdaten müssen zum einen seitens des KIT in das Regionalisierungsmodell eingebaut und bei der Ermittlung der Kennwerte berücksichtigt werden und zum anderen im Wasserhaushaltsmodell verwendet werden, wobei hierzu Nachkalibrierungen des Modells notwendig sind. Hierdurch soll eine Modellumgebung aufgebaut werden, die es erlaubt, die Abflüsse besser in die kleineren Gewässer der Einzugsgebiete zu übertragen, indem die räumliche Heterogenität der punktuelle Einflüsse berücksichtigt werden.

### 2.2.3 WEITERENTWICKLUNGSBEDARF VON LARSIM

Für die Analysen zur Entwicklung eines konsistenten LARSIM-Niedrigwasser-Vorhersagemodells waren zusätzliche LARSIM-Weiterentwicklungen notwendig:

#### Visualisierung der Nachführungsfaktoren:

Bei der Berechnung einer Vorhersage werden die für alle Pegelkontrollbereiche eines Modells bestimmten Nachführungsfaktoren separat für die drei möglichen Verfahren ausgegeben und in einem Präprozessing in Flächengrafiken überführt. Dazu wurde die Option WHM-AUSGABE FLAECHEWERTE um folgende zusätzliche Ausgaben erweitert:

- Faktor zur Nachführung des Wasserdargebots
- Faktor zur Nachführung der Gebietsspeicher für Basisabfluss, Interflow, langsamen und schnellen Direktabfluss
- Faktor zur Nachführung der Gebietsspeicher für Interflow, langsamen und schnellen Direktabfluss

Als Ergebnis der Ausgabe entstehen flächenhafte Darstellungen wie in Abbildung 2-2 beispielhaft dargestellt. Die Analyse der Bilder ermöglicht das Auffinden von Pegelkontrollbereichen (PKB) die häufig nachgeführt werden müssen, bzw. die im Vergleich zu ihrer Umgebung gegensätzliche Nachführungsfaktoren aufweisen.

### **Niedrigwasserklassifizierung:**

An der LUBW wird bereits eine automatisierte Berechnung der Hochwasserjährlichkeit für ausgewählte Gewässerknoten vorgenommen. Ziel ist es dabei, möglichst frühzeitig zu identifizieren, inwieweit es sich bei dem vorhergesagten Hochwasserereignis um ein großes Ereignis mit einer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit handelt. Hierfür werden die von LARSIM berechneten Abflussvorhersagen automatisiert an bestimmten Gewässerpunkten mit den Werten einer Hochwasser-Regionalisierung verknüpft. Die so ermittelten punktuellen Jährlichkeiten werden anschließend regionalisiert und eine landkreisbezogene Karte für die Hochwasserfrühwarnung von Einzugsgebieten < 200 km<sup>2</sup> erstellt und im Internet veröffentlicht.

Analog zu dieser Vorgehensweise soll auch für Abflüsse im Niedrigwasserbereich eine vergleichbare Klassifizierung und Darstellung als Niedrigwasserfrühwarnung erfolgen. Dazu wurde das Programm LARSIM weiterentwickelt. Zum einen muss, analog zur Hochwasserjährlichkeit, eine Verknüpfung von Modellelementen bzw. Gewässerknoten mit den Werten einer der Niedrigwasser-Regionalisierung vorgenommen werden. Zum anderen muss eine Auswertung der Abflüsse zum Vorhersagezeitpunkt und im Vorhersagezeitraum hinsichtlich der Unterschreitung der vorgegebenen Niedrigwasser-Kennwerte erfolgen. Die Auswertung der Kennwerte erfolgt für nutzerrelevante Zeiträume (z.B. für die Vorhersagestunden 1-24, 25-48, 49-72, 73-96, 97-120, 121-144, 145-168). Innerhalb eines Zeitraums wird jeweils der niedrigste vorhergesagte Abfluss ermittelt und klassifiziert. Diese LARSIM-Auswertungsergebnisse werden in Tabellenform ausgegeben.

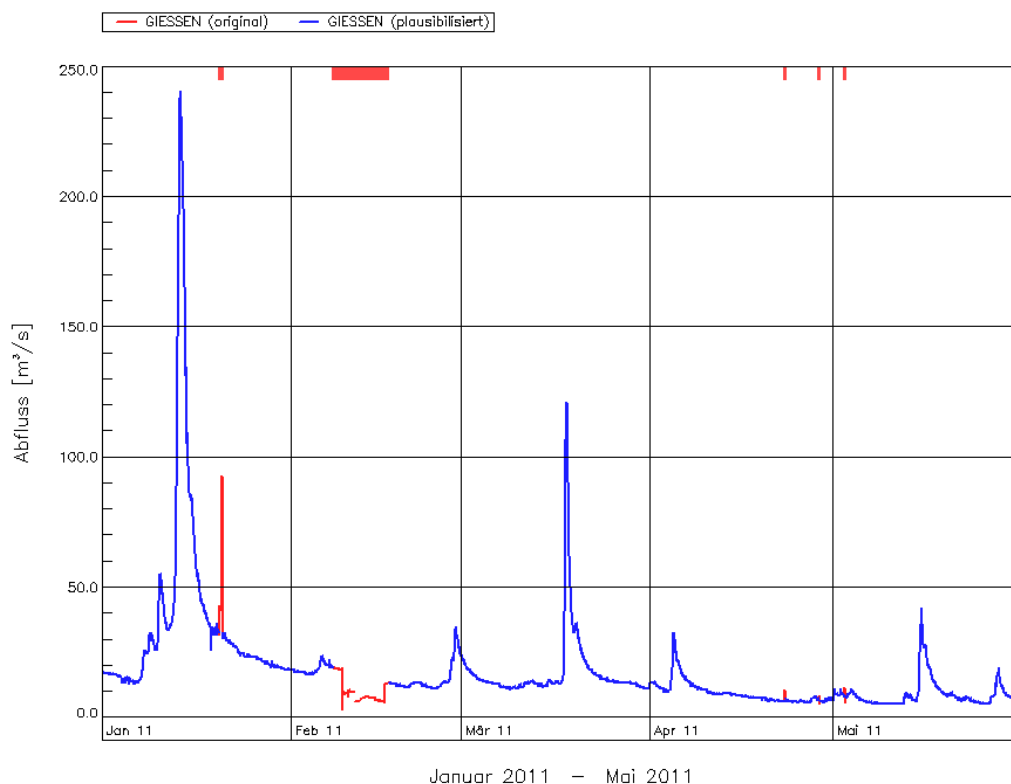
Zur Umsetzung dieser Vorgehensweise müssen die Systemdaten sämtlicher Wasserhaushaltsmodelle für Baden-Württemberg angepasst werden. Zur Visualisierung der Ergebnisse soll eine Karte die Unterschreitung von Kennwerten landkreisbezogen (oder einzugsgebietsbezogen) für die Gewässer mit Einzugsgebieten kleiner 200 km<sup>2</sup> darstellen. Dies bedeutet, dass auf der Karte ganze Landkreise eingefärbt werden. Entsprechend der Karte für die Hochwasserfrühwarnung können so rasch die Bereiche identifiziert werden, in denen der Niedrigwassersituation besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss.

# 3 Grundlegende Analysen

## 3.1 PEGELPLAUSIBILISIERUNG

Für die Prüfung der Konsistenz müssen die verwendeten Pegel bzw. gemessenen Abflussganglinien gründlich plausibilisiert werden. Unplausible Zeitbereiche werden dabei vor der Auswertung entfernt. Da sowohl die meteorologischen Daten als auch die Abflussdaten in stündlicher Auflösung erst im Laufe des Jahres 1996 in ausreichender Qualität und Quantität vorliegen, wurden die Analyse der Abflussdaten erst ab dem 01.01.1997 durchgeführt. D.h. es wurden die Daten von 01.01.1997 bis 31.12.2011 (15 Jahre) in stündlicher Auflösung verwendet. Dabei wurden sowohl geprüfte und teilweise noch ungeprüfte Rohdaten verwendet.

Bei der Plausibilisierung wurde ein einfacher visueller Vergleich der gemessenen Ganglinien von nacheinander angeordneten Pegeln durchgeführt. Teilweise wurde auf Nachbarpegel zugegriffen, falls keine Oberlieger- bzw. Unterliegerpegel vorhanden waren. Unplausible Daten wurden teilautomatisiert aus den Datensätzen entfernt. Abbildung 3-1 zeigt am Beispiel des Pegels Gießen (Argen) die entfernten Daten (rot). Die plausibilisierten Daten (blau) werden für die weiteren Auswertungen benutzt.



**Abbildung 3-1: Plausibilisierung und Bereinigung der Abflussganglinie am Beispiel des Pegels Gießen (Argen)**  
blau – plausible Daten, rot – unplausible Zeitbereiche

Die Auffälligkeiten bei der Plausibilisierung und eine Aufstellung der entfernten Messwerte wurden tabellarisch für jeden Pegel festgehalten. Zur Visualisierung der Ergebnisse, wurde analog zur LUBW-internen Pegelbewertung eine Notenskala angewendet. Die Note 1 steht dabei für „plausibel“, Note 2 für „bedingt plausibel“, Note 3 für „unplausibel“ und Note 4 für „unklar“. Abbildung 3-2 zeigt das Ergebnis des landesweit durchgeführten Plausibilisierung. Die Ergebnisse können bei weiteren Fragestellungen sowie bei der endgültigen landesweiten Erstellung des Niedrigwasservorhersagemodells verwendet werden.

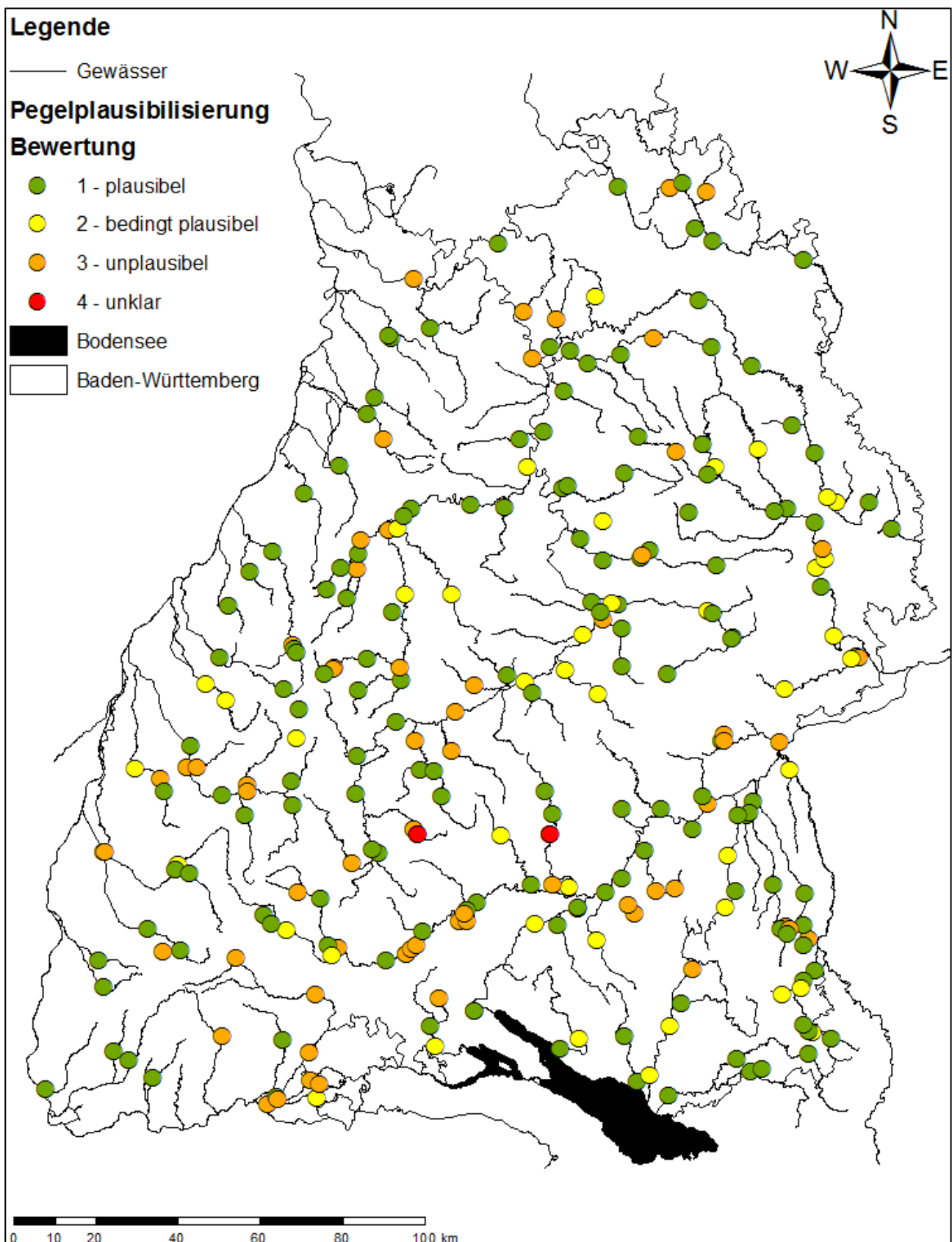


Abbildung 3-2: Darstellung der Ergebnisse der Pegelplausibilisierung für ganz Baden-Württemberg, 1 = „plausibel“, 2 = „bedingt plausibel“, 3 = „unplausibel“, 4 = „unklar“

## 3.2 NACHFÜHRUNG DER GEBIETSSPEICHER

### 3.2.1 GRUNDLAGEN

Zur Optimierung der Simulation bis zum Vorhersagezeitpunkt bzw. zur Erzeugung eines optimalen Wasserhaushaltszustands für die Berechnung einer Abflussvorhersage werden in LARSIM verschiedene Verfahren zur Nachführung genutzt. Für die Nachführung im Niedrigwasserbereich sind drei Varianten zu unterscheiden (vgl. LARSIM-Online-Hilfe, LUBW 2013b):

- Variante I: Nachführung der Gebietsspeicher für Basisabfluss, Interflow, Direktabfluss und ggf. Oberflächenabfluss
- Variante II: Nachführung der Gebietsspeicher für Interflow, Direktabfluss und ggf. Oberflächenabfluss
- Variante III: Nachführung des Wasserdargebots

Die Kriterien für die Auswahl einer geeigneten Nachführungsvariante sind folgende:

- Verwendung Variante I:  
Variante III ist nicht zielführend  
Anteil Basisabfluss zum Vorhersagezeitpunkt  $> 85\%$
- Verwendung Variante II:  
Variante III ist nicht zielführend  
Anteil Basisabfluss zum Vorhersagezeitpunkt  $< 85\%$
- Verwendung Variante III:  
Variante III ist zielführend

Die Nachführung aller Gebietsspeicher (Variante I) erfolgt demnach, wenn eine testweise Nachführung des Wasserdargebots nicht zielführend ist und der Abfluss aus dem Gebietsspeicher für Basisabfluss mindestens 85% vom Gesamtabfluss ausmacht.

Durch die in Kapitel 2.2.2. beschriebenen Weiterentwicklungen ist eine Auswertung der Nachführungsfaktoren möglich. Bei der Berechnung einer Vorhersage werden die für alle Pegelkontrollbereiche eines Modells bestimmten Nachführungsfaktoren separat für die drei Verfahren ausgegeben und in einem Präprozessing in Flächengrafiken überführt.

Die Informationen über die Häufigkeit und Größenordnung der Nachführung können bei der Pegelplausibilisierung bzw. Modellerstellung weiter verwendet werden.

### 3.2.2 AUSWERTUNG

Im Folgenden werden die Ergebnisse der visuellen Auswertung der Flächengrafiken für den Zeitraum 05.01.2012 bis 31.12.2012 dargestellt. Aus den Ergebnissen können gegebenenfalls mögliche Schwachstellen der Verfahren bzw. problematische Pegel identifiziert werden. Bei der kartographischen Darstellung der Nachführungsfaktoren werden 20 Klassen unterschieden, die von  $< 0.55$  bis  $> 1.45$  reichen. Die Klassenweite beträgt dabei 0.05. Bei der nachfolgenden visuellen Auswertung wurden für die einzelnen Pegelkontrollbereiche (PKB) in denen eine Nachführung erfolgt ist, jeweils die Klassenmitte genutzt (d.h. Klasse 0.85 – 0.90 entspricht Nachführungsfaktor = 0.875).

Es wurden nacheinander alle Modellgebiete in Baden-Württemberg untersucht und in tabellarischer Form ausgewertet (siehe Tabelle 3-1). Unabhängig vom bestehenden Abrufintervall wurde die Anzahl der Tage an deren Nachführungen aufgetreten sind festgehalten. Des Weiteren wurde die mittlere Nachführung sowie der Minimal- und Maximalwert ermittelt. Die zusätzlich berechnete Standardabweichung ermöglicht eine Aussage über die Streuung der Nachführungsfaktoren und damit eine Aussage, ob systematische Fehler bei bestimmten PKB vorliegen, oder ob ein PKB variable Nachführungsfaktoren aufweist. Die Tabelle umfasst nur die PKB in denen Nachführungen registriert worden sind. PKB die keinerlei Nachführung im oben genannten Zeitraum unterlagen, sind nicht aufgeführt. Farblich markiert sind Pegel an denen besondere Auffälligkeiten zu beobachten sind (Häufige Nachführungen, besonders hohe oder niedrige Faktoren bzw. einen große Streubreite)

Bei der flächenhaften Darstellung der Nachführungen fallen mehrere Bereiche auf, in denen häufige bzw. unter Umständen Nachführungen mit hohen oder stark wechselnden Faktoren auftreten (Vgl. Abbildung 3-3).

### **Häufigkeit:**

Die häufigsten Nachführungen konnten im Modellgebiet Neckar sowie Ostalb / Westiller festgestellt werden. Am Pegel Schorndorf wurde mit 67 Tagen die maximale Häufigkeit der Nachführungen registriert. Aber auch andere Pegel im Gebiet weisen Nachführungen an über 50 Tagen auf. Die Karte in Abbildung 3-3 (links oben) zeigt die räumliche Verteilung der Häufigkeiten der Nachführung. Hier fallen besonders die Pegel im Kocher- und Jagstgebiet (gelb und orange) mit Nachführungen zwischen 41 bis 60 Tagen auf. Die Pegel Meckesheim (Neckargebiet), Wiesloch und Ubstadt (beide Oberrheinzuflüsse) im Nordwesten des Landes zeigen mit Nachführungen an 21 und 30 Tagen eine Auffälligkeit, da es sich dabei um benachbarte Kopfpegel handelt.

### **Größe des Nachführungsfaktors:**

Die meisten Nachführungen liegen im Mittel zwischen 0.9 und 1.1 (vgl. Abbildung 3-3 rechts oben). Im Einzelnen können dabei aber Pegel identifiziert werden, bei denen die Standardabweichung der Nachführung sehr groß ist ( $> 0.2$ ) (siehe auch Abbildung 3-3 links unten). Dabei können sowohl extrem niedrige als auch extrem hohe Nachführungsfaktoren am gleichen Pegel beobachtet werden. Nicht selten korreliert eine hohe Schwankungsbreite mit einer großen Häufigkeit der Nachführung. Vor allem Pegel im Neckargebiet an Jagst und Kocher aber auch im Bereich der Ostalb und der Westiller können dabei identifiziert werden.

Aufgrund der durchgeführten Analyse und der räumlichen Darstellung können folgende vier Gruppen gebildet werden:

1. Karstgebiete mit unregelmäßigen nicht niederschlagsinduzierten Abflüssen oder Versinkungen
2. Starke Beeinflussung durch Rückhaltebecken (Kocher und Jagstgebiet)
3. Inkonsistenzen zwischen Pegel Ober- und Unterstrom, die auf falsche Wasserstand-Abfluss-Beziehungen oder auf unberücksichtigte Punktquellen oder Wasserentnahmen bzw. Problemen bei der Wasserstandsmessung (Verkrautung) hindeuten
4. Häufig unplausible Abflussmessungen, auch über einen längeren Zeitraum hinweg (z.B. Donau-eschingen)

**Tabelle 3-1: Auswertung der Nachführungsfaktoren der Gebietsspeicher nach den Gesichtspunkten: Anzahl der Tage an denen Nachführungen vorgenommen wurden, Mittelwert, Minimum und Maximum der Nachführungsfaktoren sowie die Standardabweichung. Auswertezeitraum 05.01.2012 – 31.12.2012**

WHM	Name	Anzahl Tage	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Neckar und Zuflüsse	Pforzheim-KLA	1	1.13	1.13	1.13	0.00
	Breitlingen	39	0.72	0.53	1.23	0.22
	Rottweil	36	1.03	0.73	1.48	0.16
	Oberndorf	14	1.15	0.78	1.33	0.15
	Horb	9	0.89	0.68	1.38	0.26
	Owingen	21	0.99	0.80	1.23	0.10
	Bad-Imnau	1	1.38	1.38	1.38	0.00
	Tübingen-Bberg	7	1.29	0.93	1.48	0.19
	Kirchentellinsfurt	4	1.07	0.58	1.23	0.31
	Wannweil	33	1.01	0.83	1.13	0.09
	Riederich	10	1.00	0.80	1.18	0.10
	Oberensingen	9	1.09	0.68	1.48	0.24
	Wendlingen-KLA	3	1.48	1.48	1.48	0.00
	Salach	13	1.10	0.58	1.48	0.19
	Plochingen-Fils	21	0.65	0.53	1.48	0.30
	Schw.-Gmünd-US	43	1.07	0.53	1.48	0.20
	Schorndorf-Bauhof	37	1.03	0.53	1.48	0.25
	Schorndorf	67	0.55	0.53	0.83	0.06
	Neustadt	4	0.93	0.93	0.93	0.00
	Oppenweiler	50	1.02	0.53	1.48	0.18
	Murr	28	0.97	0.53	1.38	0.22
	Altensteig-Steg	17	0.84	0.53	1.48	0.23
	Calw	14	1.23	0.53	1.45	0.24
	Pforzheim-STEG	35	0.96	0.68	1.48	0.17
	Talhausen	37	0.88	0.53	1.48	0.21
	Abtsgmünd	52	1.07	0.73	1.48	0.18
	Wöllstein	27	1.15	0.64	1.48	0.21
	Mittelrot-Linde	50	1.02	0.63	1.48	0.14
	Gaildorf-Sporthalle	52	0.62	0.53	1.48	0.37
	Ohrnberg	33	1.04	0.53	1.48	0.20
	Kocherstetten	56	1.05	0.63	1.48	0.27
	Neuenstadt-Kap.	50	0.98	0.63	1.38	0.14
	Stein	30	1.10	0.53	1.48	0.42
Schwabsberg	14	1.03	0.53	1.43	0.27	
Jagstzell	48	0.97	0.72	1.48	0.18	
Doerzbach	3	1.31	0.83	1.48	0.24	
Sennfeld	20	1.07	0.93	1.18	0.07	
Untergriesheim	6	1.21	0.73	1.48	0.30	
Rockenau-SKA	21	1.18	0.53	1.48	0.45	
Meckesheim	23	0.91	0.53	1.13	0.18	
Main	Hardheim	39	1.05	0.83	1.28	0.11

**Tabelle 3-1 (Fortsetzung): Auswertung der Nachführungsfaktoren der Gebietspeicher nach den Gesichtspunkten: Anzahl der Tage an denen Nachführungen vorgenommen wurden, Mittelwert, Minimum und Maximum der Nachführungsfaktoren sowie die Standardabweichung. Auswertzeitraum 05.01.2012 – 31.12.2012**

WHM	Name	Anzahl Tage	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabweichung
<b>Oberrhein-zuflüsse</b>	Basel	1	0.93	0.93	0.93	0.00
	Schenkenzell	4	1.05	0.68	1.11	0.15
	Ubstadt	26	1.00	0.88	1.13	0.08
	Wiesloch-A.-H.	27	1.04	0.88	1.43	0.10
<b>Hochrhein-zuflüsse</b>	Ewattingen	4	0.93	0.93	0.93	0.00
	Eberfingen	1	1.13	1.13	1.13	0.00
<b>Donau</b>	Bittelschieß	15	1.01	0.93	1.18	0.08
	Donaueschingen Breg	9	0.95	0.88	1.08	0.06
	Donaueschingen Brigach	21	0.98	0.80	1.19	0.12
	Hammereisenbach	9	0.95	0.88	1.08	0.06
	Jettkofen	1	0.53	0.53	0.53	0.00
	Laucherthal	3	0.96	0.88	1.08	0.08
	Mengen	6	0.93	0.75	1.33	0.24
	Menningen	17	0.95	0.88	1.08	0.07
	Tuttlingen	<b>35</b>	1.01	0.83	1.48	0.16
	Unterschmeien	2	0.93	0.93	0.93	0.00
	Fridingen /Bära	5	1.01	0.93	1.08	0.05
	Hundersingen / Donau	2	1.04	0.83	1.25	0.19
<b>Ostalb / Westiller</b>	Achstetten	8	1.29	0.78	1.48	0.24
	Binrot	22	0.99	0.88	1.23	0.10
	Laupheim-Rottum	29	1.01	0.80	1.23	0.15
	Niederkirch	23	1.08	0.88	1.13	0.13
	Lauterach	7	0.95	0.93	1.08	0.05
	Unlingen	<b>56</b>	0.98	0.73	1.48	0.15
	Reichenhofen	<b>38</b>	1.05	0.68	1.48	0.15
	Nibelhöfe	5	0.78	0.53	1.48	0.30
	Lauben	10	<b>0.67</b>	<b>0.53</b>	1.48	0.39
	Friesenhofen	4	1.16	0.88	1.48	0.17
	Bopfingen	25	1.03	0.73	1.48	0.18
	Oberer Steg	17	0.89	0.53	1.48	0.36
	Lontal	<b>48</b>	<b>0.67</b>	<b>0.53</b>	1.48	0.28
	Bächlingen	15	0.98	0.91	1.14	0.08
	Blaubeuren	29	0.99	0.83	1.33	0.11
<b>Bodensee-zuflüsse</b>	Rengers	1	1.45	1.45	1.45	0.00
	Epplings	6	1.15	0.88	1.35	0.17
	Friedrichshafen	2	0.95	0.95	0.95	0.00



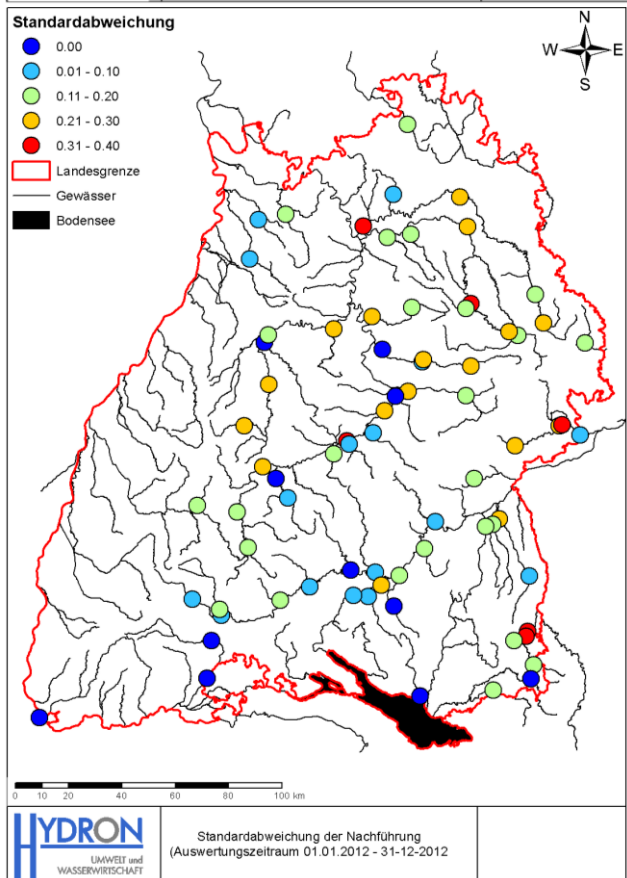
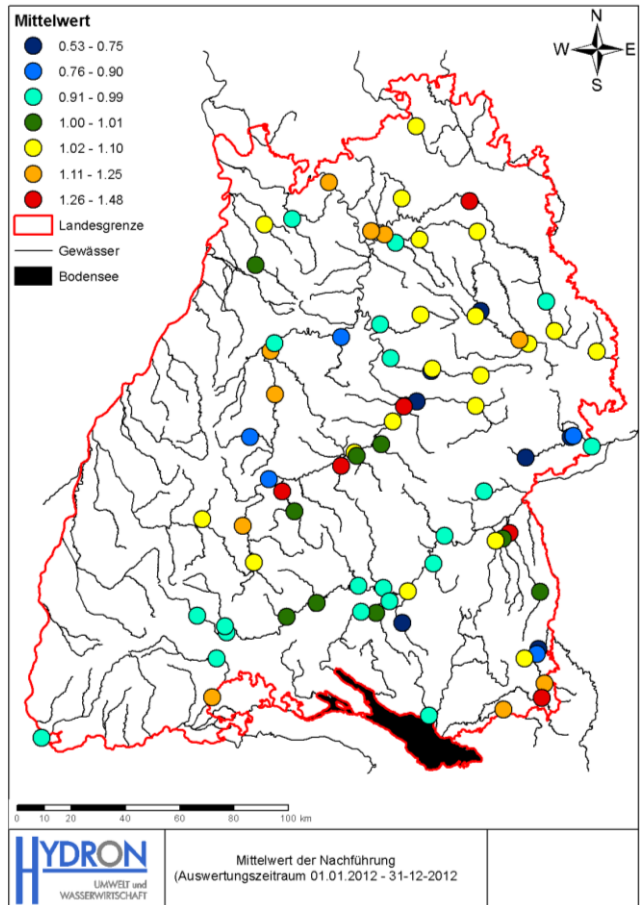
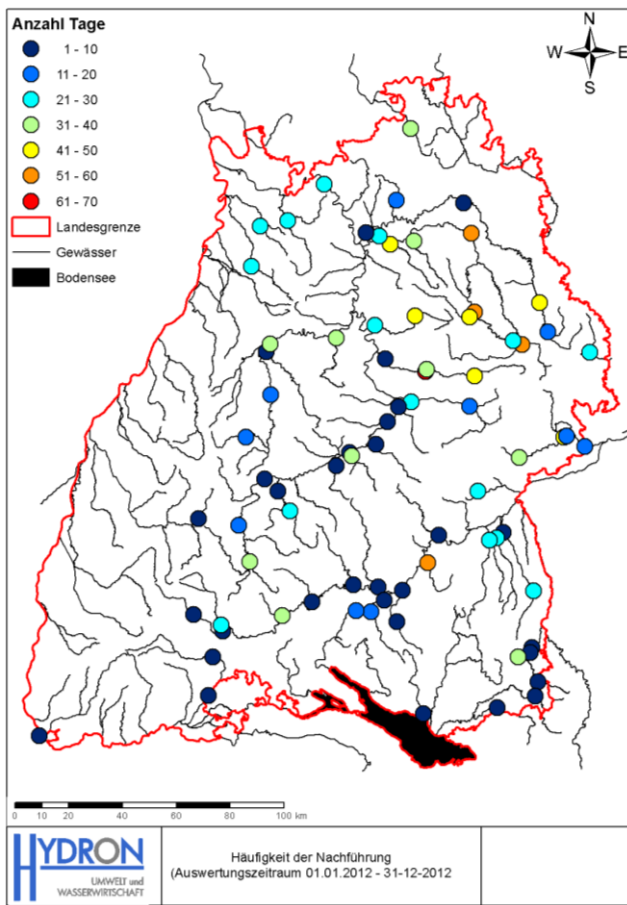
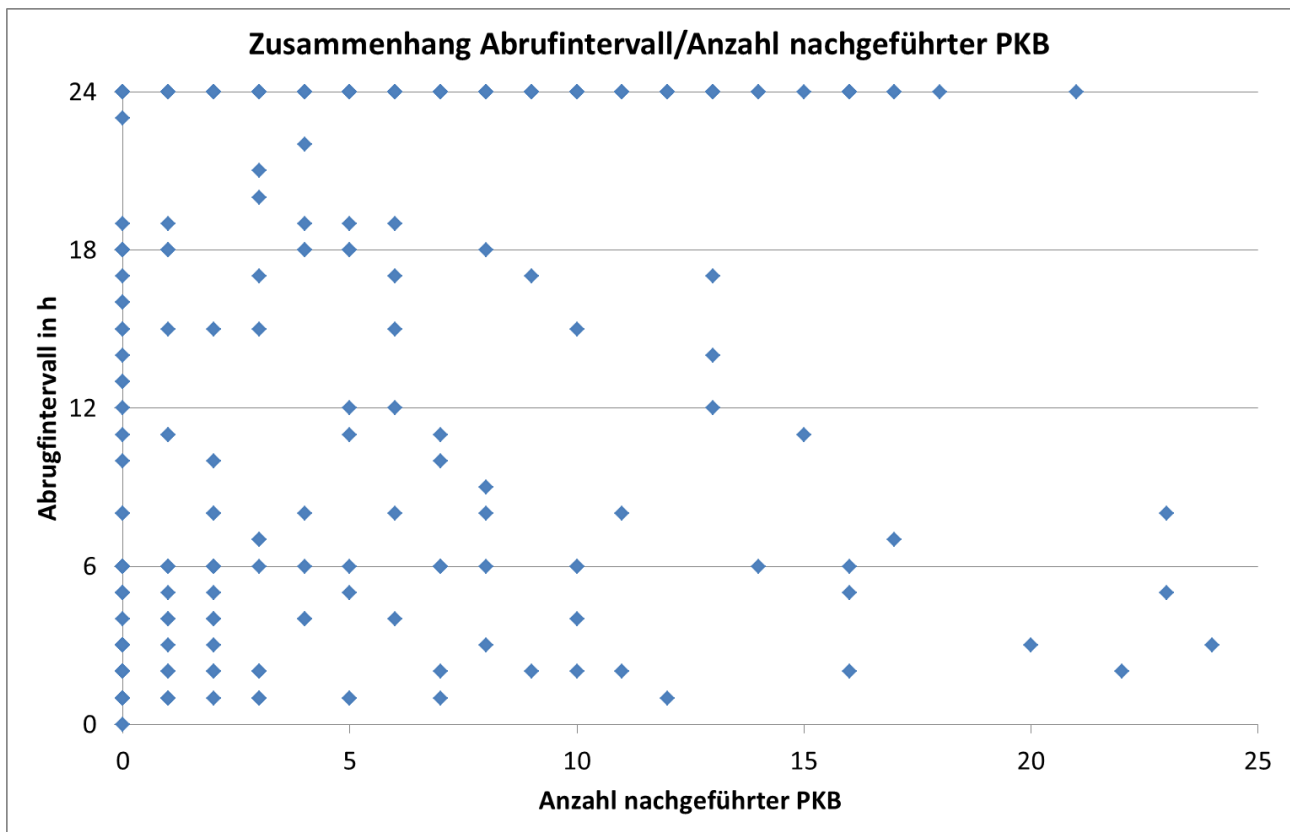


Abbildung 3-3: Auswertung der räumlichen Verteilung der operationellen Nachführungsfaktoren im Jahr 2012

### **Abrufintervall:**

Das Abrufintervall im operationellem Betrieb wechselt zwischen 24 Stunden und 1 Stunde in Abhängigkeit vom aktuellen Betriebszustand (Hochwasserbetrieb, Routinebetrieb...). Dabei könnte eine Abhängigkeit der Nachführung vom Abrufintervall vermutet werden. Im Allgemeinen kann jedoch kein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Nachführungen und dem Abrufintervall erkannt werden (vgl. Abbildung 3-4). Das kann allerdings auch daran liegen, dass zum einen Abrufintervalle unabhängig von der Abflusssituation zu Testzwecken erhöht werden können, und dass zum anderen Abrufintervalle immer für die ganze Landesfläche Gültigkeit besitzen. Ein hohes Intervall kann aufgrund Starkregenwarnungen oder Hochwasserereignissen in einem Landesteil notwendig sein, während in anderen Landesteilen noch Niedrigwasser vorherrscht. So lassen sich direkte Beziehungen zwischen Abrufintervall und Abflusssituation nicht herstellen.



**Abbildung 3-4: Zusammenhang zwischen Abrufintervall und Anzahl nachgeführter Pegelkontrollbereiche (PKB).**

### **Jahresverlauf:**

In den Monaten März bis Juni nimmt die Nachführung aller Gebietspeicher durchschnittlich zu, wobei an vielen Tagen kein einziger Pegelkontrollbereich in Baden-Württemberg mit diesem Verfahren nachgeführt wird (vgl. Abbildung 3-5). An einem Tag werden selten mehr als 15 Pegelkontrollbereiche nachgeführt. Eine weitere Zunahme der Nachführungen ist in den Monaten August und September zu erkennen, wobei an einzelnen Tagen über 20 PKB nachgeführt werden. Abbildung 3-6 zeigt beispielhaft die Flächendarstellung der Nachführungsfaktoren für den vorhersagezeitpunkt 22.08.2012 05:00, als die Gebietspeicher der meisten PKB nachgeführt wurden.

Die verstärkte Häufigkeit der Nachführungen während der Sommermonate ist systemimmanent durch den höheren Grundwasseranteil bei der Abflussbildung zu erklären.

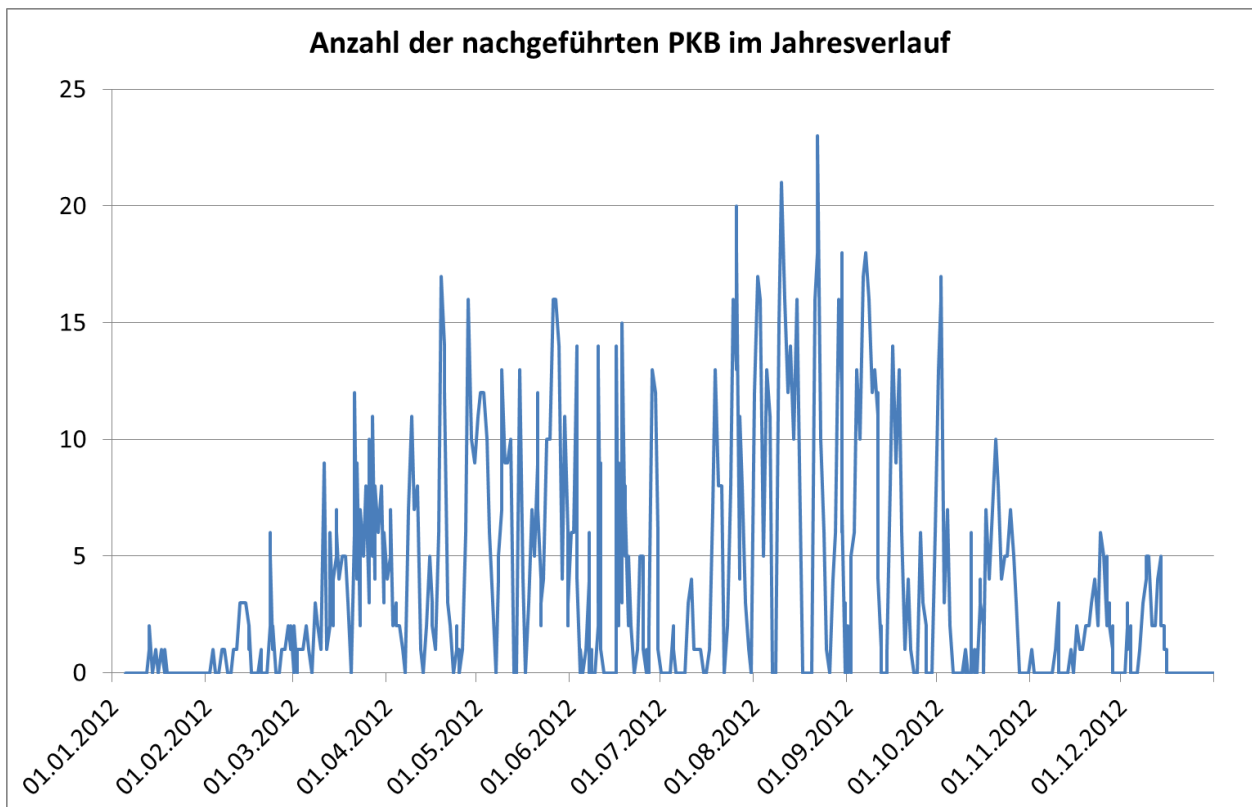


Abbildung 3-5: Auswertung der nachgeführten PKB im Jahresverlauf mit Variante III: Nachführung aller Gebietsspeicher

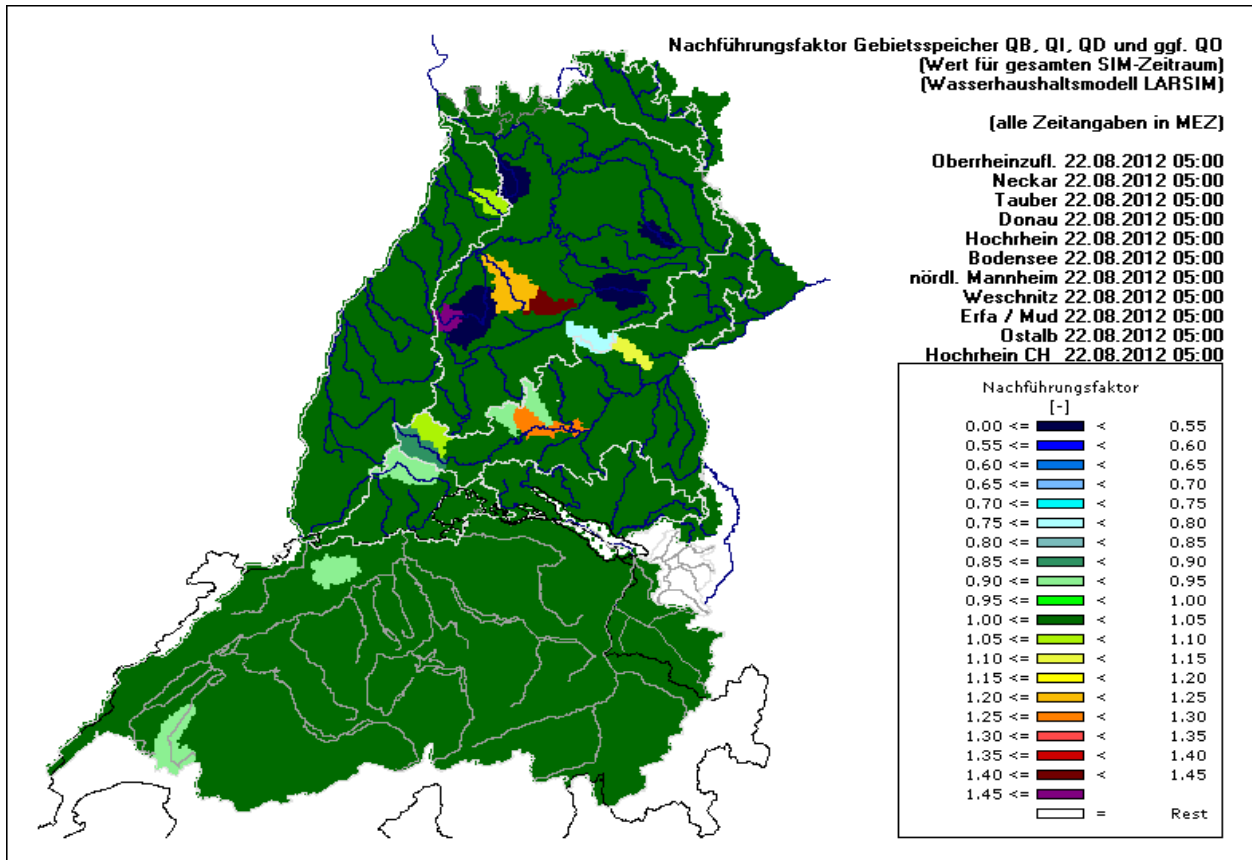


Abbildung 3-6: Beispielhafte Flächendarstellung der Nachführungsfaktoren für den Vorhersagezeitpunkt 22.08.2012 05:00, mit den meisten nachgeführten PKB

### 3.2.3 SPEZIELLE BETRACHTUNGEN AN EINZELNEN PEGELN

#### Karstpegel

Die häufigen und auch fehlerhaften Nachführungen an karstbeeinflussten Pegel lassen sich in den meisten Fällen schwierig begegnen. Dies liegt darin begründet, dass ein im Einzugsgebiet eines Karstpegels gefallener Niederschlag nicht zwangsläufig zu einer Reaktion am Pegel führen muss. Außerdem kann es zu einer Reaktion am Pegel kommen, obwohl kein Niederschlag im Bereich des oberirdischen Einzugsgebietes gefallen ist.

Die Häufigkeit der Nachführungen an karstbeeinflussten Pegeln lässt sich somit nur schwer reduzieren und ist in vielen Fällen sinnvoll und notwendig. Aktuelle Bemühungen der HVZ Baden-Württemberg zielen darauf hin ab, Karstpegel gesondert zu kalibrieren, wobei versucht wird eine Differenzierung zwischen oberirdischem und unterirdischem Einzugsgebiet mit einfließen zu lassen. Möglicherweise reduziert sich hierdurch die Häufigkeit der Nachführung bereits.

#### Abflussanstieg ohne Niederschlagsinput

Durch Messfehler, Ausfall von Niederschlagsmessstationen oder wegen unzureichender Stationsdichte können einzelne Niederschlagsereignisse in manchen Fällen nicht erfasst werden. Andere Ereignisse sind möglicherweise auf anthropogene Einwirkungen durch Steuerung von Kraftwerksanlagen oder Rückhaltebecken verursacht. Solche Ereignisse sind dann in der Messung zu erkennen, während das Wasserhaushaltsmodell in der Simulation das Ereignis nicht nachbilden kann bzw. richtigerweise nicht nachbildet.

Abbildung 3-7 zeigt beispielhaft ein Ereignis, welches durch die Simulation des Wasserhaushaltsmodells nicht nachgebildet wird. Die Nachführung der Gebietspeicher erhöht über den gesamten Simulationszeitraum von zwei Tagen vor dem Vorhersagezeitpunkt den Speicherausfluss und verändert dadurch maßgeblich den Basisspeicher im gesamten PKB, obwohl die Differenz zwischen Messung (blau) und Simulation (grün) nur kurzfristiger Natur ist und eher auf den schnellen Direktabfluss zurückzuführen wäre.

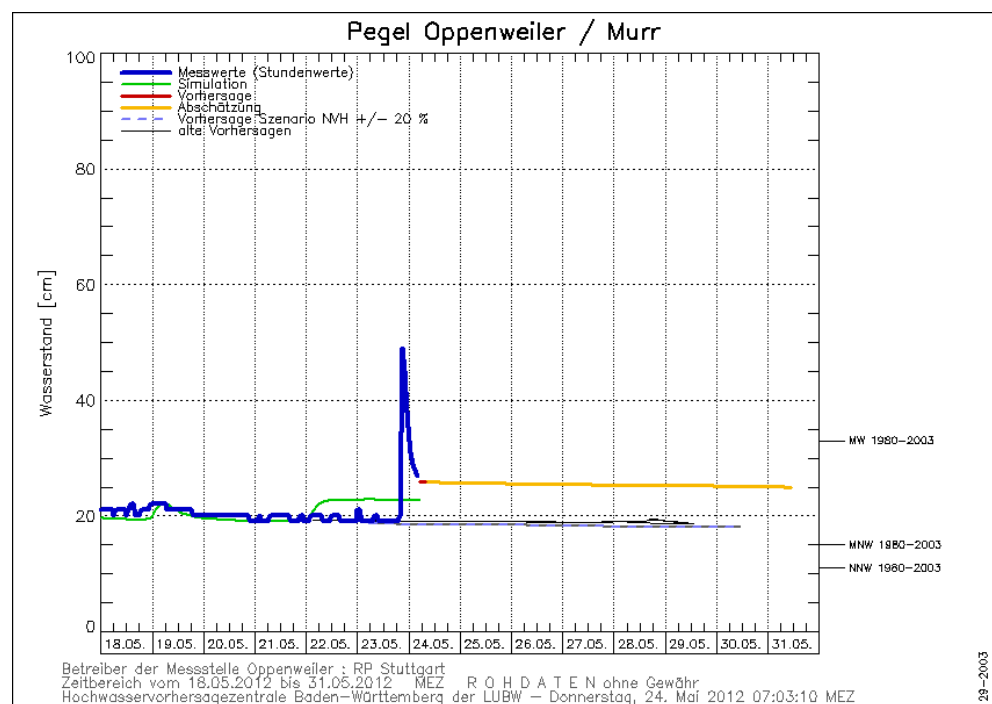


Abbildung 3-7: Nachführung der Gebietspeicher bei Abflussanstieg ohne Niederschlagsinput. Instationarität nur in Messung

## Fehlerhafte Messung

Als problematisch sind auch Alarmtests oder andere unplausible Messwerte einzustufen, die prinzipiell eine ähnliche Wirkung auf die Simulation am Pegel und seinem Unterliegerpegel haben wie Instationaritäten in der Messung. Einzelne kurze Abflussspitzen in den Messwerten können sich dabei durch Nachführungen der Gebietspeicher auf den gesamten Simulationszeitraum auswirken (Abbildung 3-9 links). Außerdem kann es durch Weitergabe der unplausiblen Messwerte an den Unterliegerpegel zu Modellnachführungen kommen, die nicht notwendig sind (vgl. Abbildung 3-9 rechts)

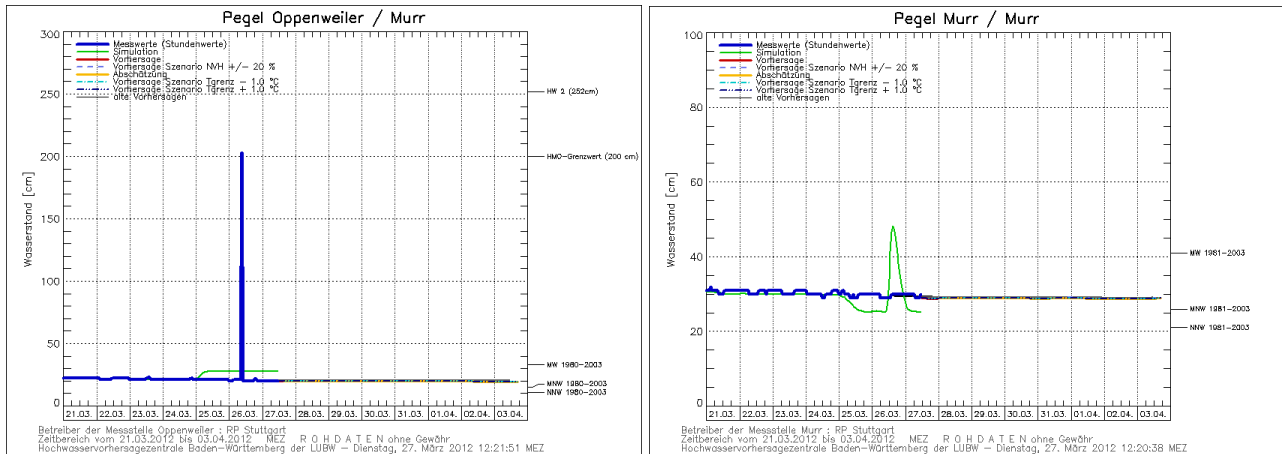


Abbildung 3-8: Nachführung bei fehlerhaften Messwerten am Oberlieger- (links) und Unterliegerpegel (rechts)

In manchen Fällen sind fehlerhafte bzw. unplausible Messwerte über längere Zeiträume in den Eingangsdaten enthalten. Die Abbildung 3-9 zeigt am Beispiel des Pegels Altensteig / Nagold wie sich sprunghafte Veränderungen in der gemessenen Ganglinie auf die Simulation und die Nachführung auswirken. Während in der linken Grafik die Situation festgehalten ist, an der das Wasserhaushaltsmodell durch einen Nachführungsfaktor  $> 1.45$  versucht die Simulation an die Messung anzupassen, ist in der rechten Grafik die Situation 10 Tage später verdeutlicht. Hier beträgt der Nachführungsfaktor im Minimum  $0.625$  und der Effekt umfasst einen Zeitraum von drei Tagen.

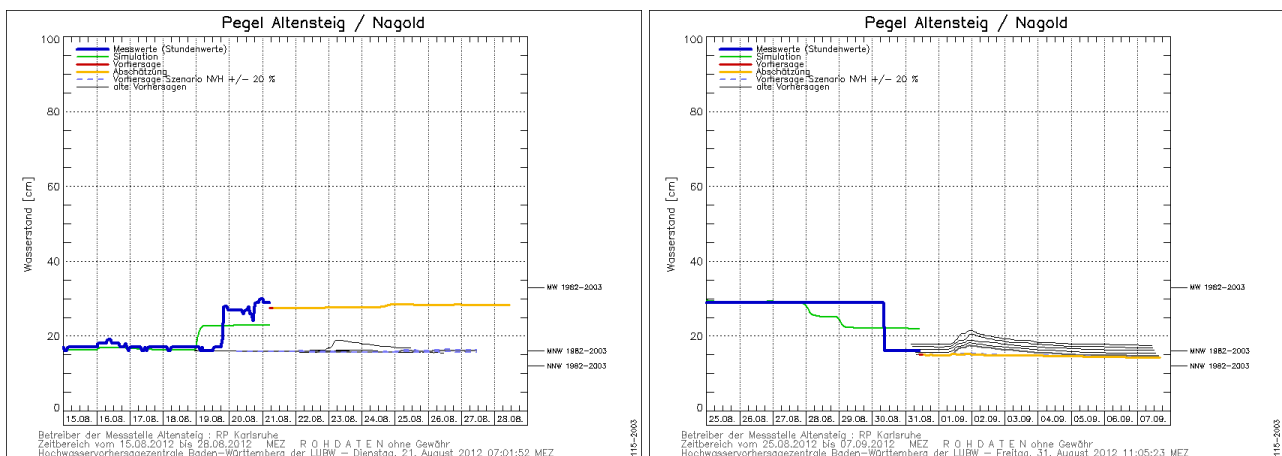


Abbildung 3-9: Nachführung bei fehlerhaften Messwerten. Automatische Umschaltung zwischen Haupt- auf Redundanzmesssystem

### 3.3 ARIMA-KORREKTUR

#### 3.3.1 GRUNDLAGEN

Im Wasserhaushaltsmodell LARSIM besteht neben der im Kapitel 3.2 beschriebenen Nachführung auch die Möglichkeit einer Korrektur der Vorhersagewerte für den Abfluss. Anhand der Differenz zwischen gemessenen und simulierten Abfluss zum Vorhersagezeitpunkt kann die Vorhersage durch absolute oder relative Verschiebung korrigiert werden. Die ARIMA-Korrektur (**A**uto **R**egressive **I**ntegrated **M**oving **A**verage) bezieht sich im Allgemeinen auf die ARIMA-Modelle, die eine effiziente Methode, der Beschreibung stationärer und instationärer Prozesse darstellen (Box 2008). Sie kombinieren Autoregression, Differenzenermittlung und das gleitende Mittel (Moving-Average). Die Grade (p, d, g) beschreiben dabei das verwendete ARIMA-Modell. Der erste Wert „p“ entspricht dem Grad des autoregressiven Modells, der zweite Wert „d“ dem Grad des Differenzenmodells und der dritte Wert „g“ dem Grad des Moving Average Modells.

Im Verfahren zur ARIMA-Korrektur im Wasserhaushaltsmodell LARSIM werden die Grade (0, 1, 0) verwendet. Studien der HVZ haben gezeigt, dass dieses Verfahren die stabilsten Ergebnisse produziert. Es wird sowohl auf die Autoregression, als auch auf das gleitende Mittel verzichtet. Lediglich die Differenzenbildung wird berücksichtigt.

Im Gegensatz zu der Modelloptimierung durch Nachführung von Gebietsspeichern wirkt sich die ARIMA-Korrektur ausschließlich auf den Vorhersagezeitraum. Dabei gilt, je besser die Nachführung der Simulationsganglinie an die tatsächlich gemessenen Werte funktioniert hat, d.h. je besser das Modellergebnis ist, desto geringer fällt die Ergebniskorrektur mittels ARIMA aus. Es kann jedoch immer davon ausgegangen werden, dass es zu systematische Abweichungen zwischen Modellergebnis und Messung kommt, so dass eine nachträgliche Korrektur des Modellergebnisses notwendig ist. Das Ausmaß der Korrektur und die Funktionsweise kann allerdings ereignisabhängig und pegelspezifisch durchgeführt werden. Fehlerhafte sowie unnötige Korrekturen wirken sich auf die Vorhersageganglinie aus, und somit auf die Güte der Niedrigwasserklassifikation. Die Fehlerquellen zu finden, war Aufgabe in diesem Arbeitsschritt. Durch gezielte Eingriffe in die Steuerung bzw. in die Modellstruktur oder sogar den Modellcode soll dann zukünftig die ARIMA-Korrektur verbessert werden. Diese Aufgabe wurde aufgrund der Komplexität zum einen und des Interesses anderer Hochwasservorhersagezentralen zum anderen aus diesem Projekt ausgelagert.

Die bisher in LARSIM implementierten ARIMA-Korrekturen im Niedrigwasserbereich sind (vgl. LUBW 2013b):

WHM-ARIMA-NQ:	Bei stationärem Abfluss: die Korrektur wird auf Basis eines 24-Stunden-Mittelwerts für den gemessenen Abfluss durchgeführt. Bei instationären Abfluss: die Korrektur erfolgt auf Basis des gemessenen Stundenwerts zum Vorhersagezeitpunkt.
WHM-ARIMA-NQ ERWEITERT	Die Anzahl der Stunden zur Mittelung des gemessenen Abflusses zur Bestimmung des Verschiebungsvektors wird pegelspezifisch in einer Steuerdatei (<pegel.stm>) vorgegeben

Im Folgenden wird anhand von Beispielen die Funktionsweise der ARIMA-Korrektur erläutert. Darunter sind sowohl Beispiele für Ereignisse an denen eine ARIMA-Korrektur erforderlich war und funktionierte, als auch Beispiele mit fehlerhaften bzw. unnötigen Korrekturen.

### 3.3.2 BEISPIELE

Abweichungen zwischen Simulation (in Abbildungen grün) und Messung (blau) sind trotz Nachführung unvermeidbar. Abbildung 3-10 verdeutlicht wie eine funktionierende ARIMA-Korrektur die Vorhersage trotz der Differenz zum Vorhersagezeitpunkt auf das richtige Niveau verschieben kann. Im linken Bild wird die Vorhersage (rot bzw. orange) direkt auf den letzten Messwert verschoben. Im Ergebnis ist ein nahtloser Übergang von Messung in die Vorhersage zu sehen. Im rechten Bild wird die Vorhersage auf den Mittelwert der letzten 24 Stunden verschoben. Obwohl der letzte Messwert durch die starke Schwankung nach unten tendiert, bleibt die Vorhersage stabil und führt zu einer realistischen Vorhersage.

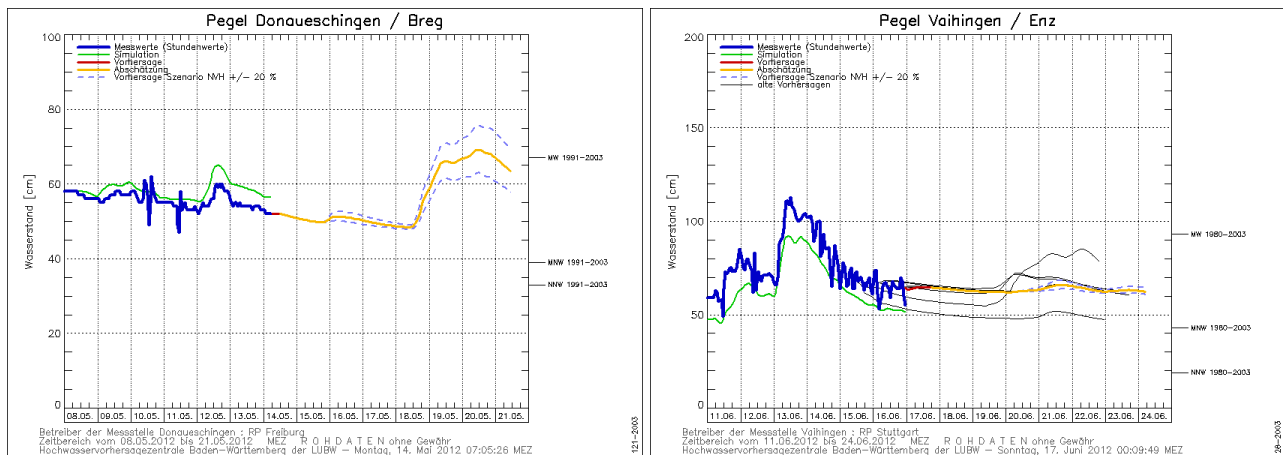


Abbildung 3-10: Beispiele für funktionierende ARIMA-Korrektur

Falsche bzw. unnötige ARIMA-Korrekturen können sehr negative Auswirkungen auf die Vorhersageganglinie haben (siehe Abbildung 3-11). Im linken Bild am Pegel Kocherstetten ist eine Situation dargestellt, als das Modell trotz durchgeführter Nachführung im Simulationszeitraum das Ereignis nicht vollständig abbilden kann. Das Ereignis wird unterschätzt. Die anschließende ARIMA-Korrektur verschiebt die Vorhersage nach oben, so dass Messung und Vorhersage ineinander übergehen. Allerdings wird dadurch das Niveau des Basisabflusses beeinflusst. Die Niedrigwasserklassifizierung für die folgenden Tage würde von einem viel zu hohen Abfluss ausgehen und wäre fehlerhaft.

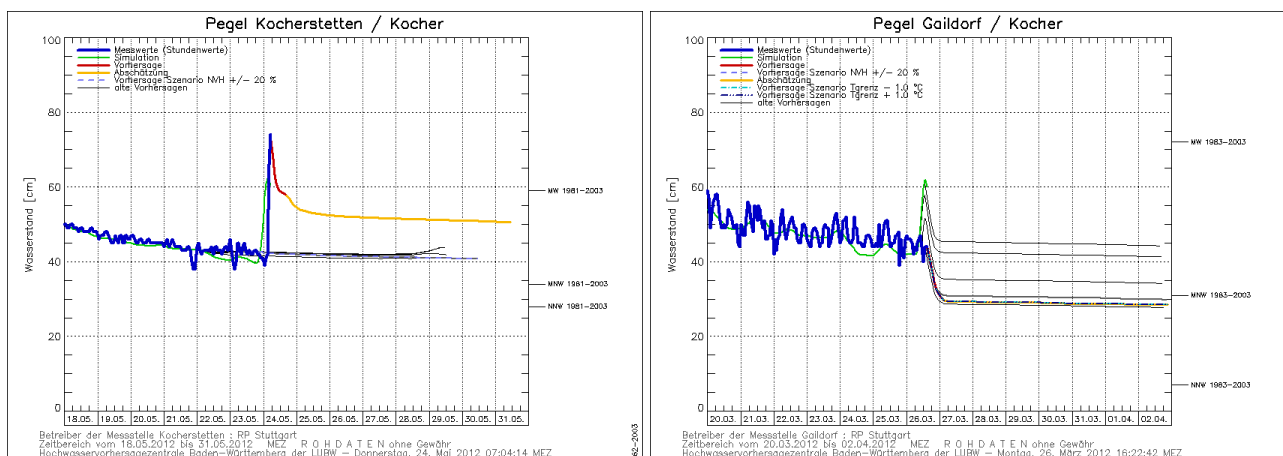


Abbildung 3-11: Beispiele für fehlerhafte ARIMA-Korrektur bei Unterschätzung (links) und Überschätzung (rechts)



Im zweiten Beispiel (Abbildung 3-11, rechts) wird eine Instationarität im Modell simuliert, die in der Realität nicht aufgetreten ist. Die dünnen schwarzen Ganglinien zeigen die Ergebnisse der letzten Modellläufe. Da stündlich gerechnet wurde, ist durch die ARIMA-Korrektur der Basisabfluss im Vorhersagezeitraum mit jeder Vorhersagestunde tiefer. Die Niedrigwasserklassifikation würde in diesem Falle unplausibel niedrige Werte ausgeben.

Um solchen Effekten entgegenzuwirken wurde die LARSIM-Option WHM-ARIMA-INSTATIONAER eingeführt und die Nachführung im Niedrigwasser unterbunden. Im Laufe des Sommers 2012 wurde ausgiebig die Wirkungsweise getestet.

### 3.3.3 WEITERENTWICKLUNG DER ARIMA-KORREKTUR BEI INSTATIONÄREN BEDINGUNGEN IM NIEDRIGWASSER

Die Option WHM-ARIMA INSTATIONAER bewirkt, dass die ARIMA-Korrektur bei instationären Abflussverhältnissen im NQ- bzw. MQ-Bereich nicht auf alle Zeitschritte des Vorhersagezeitraums angewendet wird. Anstelle dessen erfolgt ab dem Vorhersagezeitpunkt über eine definierte Anzahl von Stunden eine lineare Reduktion der ARIMA-Korrektur vom Absolutwert auf den Wert Null. Der Parameter (Ari\_h\_instat), der die Anzahl der Stunden für die lineare Reduktion steuert, kann pegelspezifisch festgelegt werden.

In Abbildung 3-12 ist am Beispiel des Pegels Neustadt / Rems dargestellt, wie die ARIMA-Korrektur die Vorhersage zum Vorhersagezeitpunkt anhand der gemessenen Ganglinie korrigiert. Die Simulation liegt deutlich unterhalb der Messung. Im Laufe von 12 Stunden (durch Ari-h-instat festgelegt) wird die ARIMA-Korrektur der Vorhersage linear reduziert. Nach 12 Stunden verläuft die neue Vorhersage entlang der ursprünglich von LARSIM berechneten Vorhersage. Die starken Schwankungen des Basisabflusses von einem Vorhersagezeitpunkt zum anderen (sich Abbildung 3-11 links) werden dadurch unterdrückt.

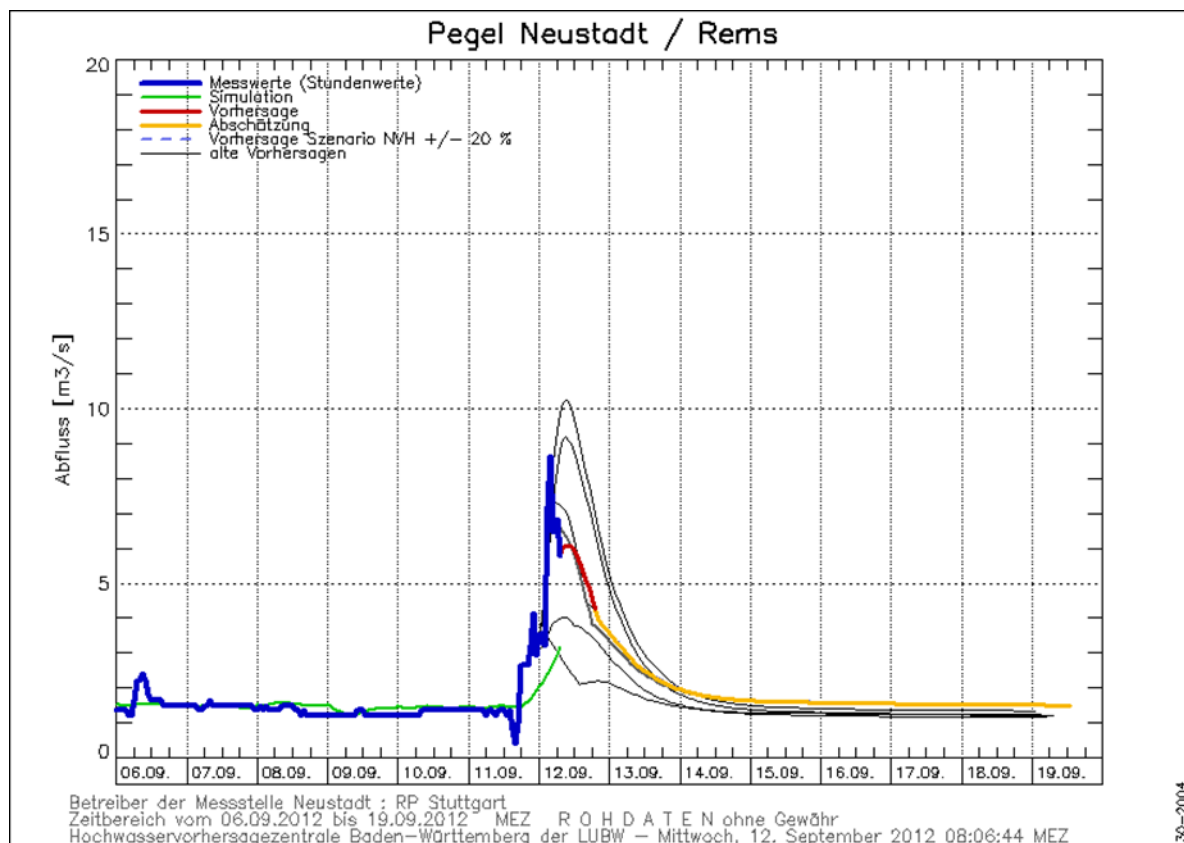
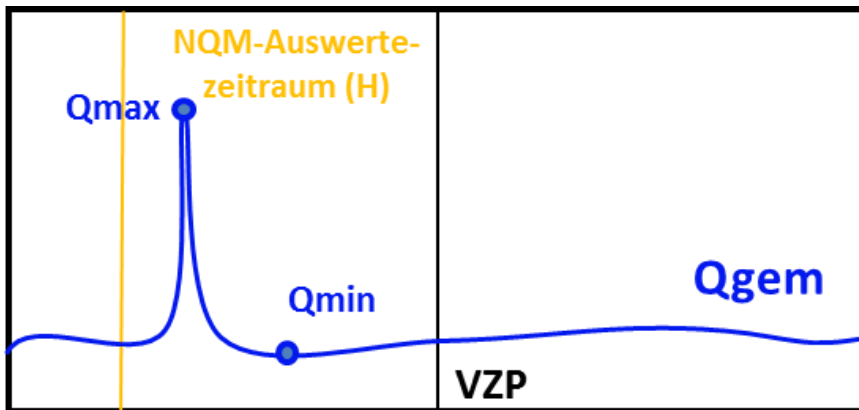


Abbildung 3-12: Funktionierende ARIMA-Korrektur mit Option WHM-ARIMA-INSTATIONAER

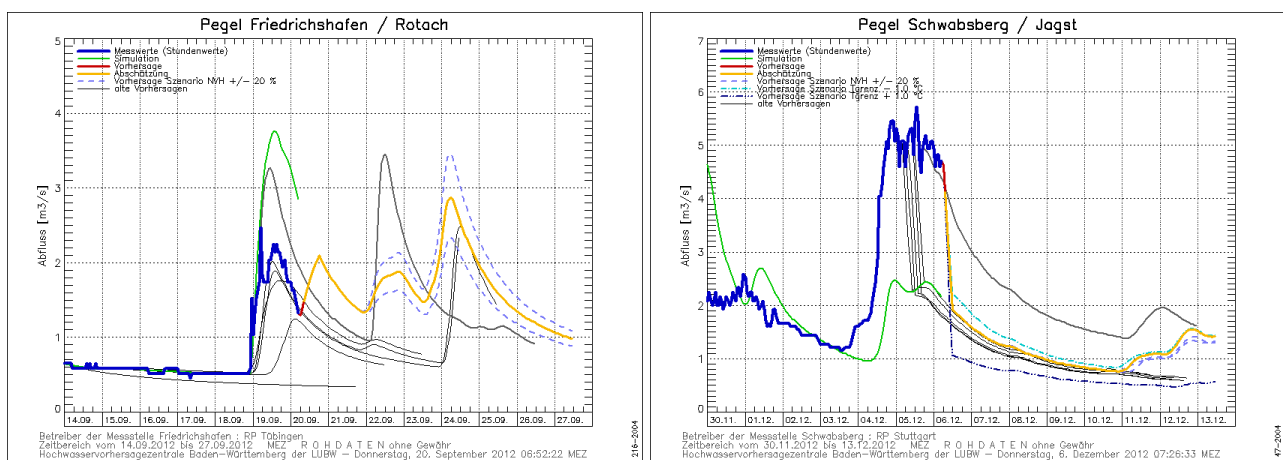


Grundlage für die ARIMA-Korrektur ist die Bestimmung der Abflussverhältnisse vor dem Vorhersagezeitpunkt (vgl. Abbildung 3-13). Über den Einzelparameter NQM-AUSWERTEZEIT (H) kann der Zeitraum zur Auswertung des gemessenen oder simulierten Abflusses in Stunden vor dem Vorhersagezeitpunkt definiert werden. Der Einzelparameter QMIN/QMAX [%] definiert wiederum den Schwellenwert für die Schwankungsbreite des gemessenen Abflusses im Auswertzeitraum zur Beurteilung, ob stationäre oder instationäre Abflussverhältnisse im NQ- bzw. MQ-Bereich vorliegen. Unterschreitet der Quotient aus dem minimalen und maximalen Wert des gemessenen Abflusses den Wert des Einzelparameters QMIN/QMAX [%], wird von instationären Abflussverhältnissen ausgegangen. In diesem Falle wird die ARIMA linear reduziert und die Nachführung unterbunden, um negative Beeinflussungen des Basisabflusses zu unterbinden..



**Abbildung 3-13: Bestimmung des Abflussverhältnisse im Auswertzeitraum vor dem Vorhersagezeitpunkt. Aktuelles Verfahren**

Bei dieser Art der Bestimmung wird jedoch die Länge der Instationarität vernachlässigt. Nicht nur kurze instationäre Verhältnisse (z.B. aufgrund von Messfehler), sondern auch durch Niederschlag bzw. Schneeschmelze hervorgerufene länger andauernde Abflusserhöhungen unterhalb der Hochwasserschwelle werden nicht nachgeführt (siehe Abbildung 3-14). Dabei können zum Vorhersagezeitpunkt große Differenzen zwischen Simulation und Messung, so dass bei unzureichender Länge des Reduktionszeitraumes eine zweite nachlaufende Spitze entsteht (Abb. Links) bzw. ein unrealistischer Sprung in der Vorhersage (Abb. Rechts).



**Abbildung 3-14: Fehlerhafte ARIMA-Korrektur mit Option WHM-ARIMA-INSTATIONAER**

### 3.3.4 ENTWICKLUNGSMÖGLICHKEITEN

#### 1. Ausdehnung eines Ereignisses

Ein Lösungsvorschlag für eine bessere Bestimmung der Abflussverhältnisse inklusive der Berücksichtigung der Länge des Ereignisses ist die Einführung eines zusätzlichen Kriteriums zur Beurteilung der zeitlichen Ausdehnung eines Ereignisses, z.B. Quotient aus mittlerem und maximalem Abfluss im NQM-Auswertezeitraum (Einzelparameter  $Q_{mit}/Q_{max}$  [%]) (vgl. Abbildung 3-15). Eine Unterbindung der WHM-Nachführung erfolgt dann erst bei Unterschreitung des Einzelparameters  $Q_{min}/Q_{max}$  [%] sowie der Unterschreitung des Einzelparameters  $Q_{mit}/Q_{max}$  [%].

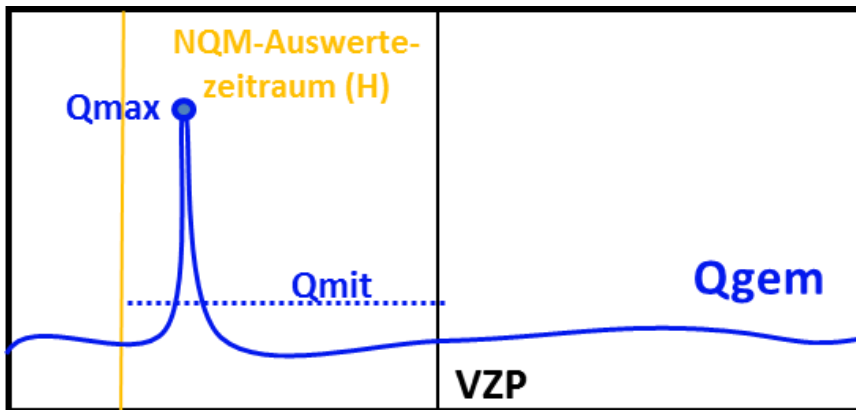


Abbildung 3-15: Erweiterungsmöglichkeit zur Bestimmung des Abflussverhältnisse im Auswertezeitraum vor dem Vorhersagezeitpunkt.

#### 2. Flexibler Reduktionszeitraum

Die Festlegung des Reduktionszeitraumes auf eine definierte Anzahl von Stunden bringt eine gewisse Einschränkung der Möglichkeiten. Je nach Abflussereignis sind mehr oder weniger Stunden notwendig um die Diskrepanz zwischen Simulation und Messung auszugleichen. Als Lösung bietet sich die Bestimmung der prozentualen ARIMA-Korrektur am Vorhersagezeitpunkt.

$$(Q_{gem}-Q_{sim})/Q_{sim} = p \quad \text{wenn } Q_{sim} > Q_{gem}$$

$$(Q_{gem}-Q_{sim})/Q_{gem} = p \quad \text{wenn } Q_{sim} < Q_{gem}$$

Die minimale Anzahl der Stunden zur Reduktion des ARIMA-Verschiebungsvektors berechnet sich durch Multiplikation der prozentualen ARIMA-Korrektur mit einem Faktor:

$$P \cdot \text{ARIMA-Vektor (h)} = n_{red}$$

Überschreitet der Pegelparameter  $Ari\_h\_instat$  die berechnete minimale Anzahl an Stunden, erfolgt die Reduktion weiterhin anhand von  $Ari\_h\_instat$ .

#### 3. Berücksichtigung von Messung und Simulation

Die ARIMA-Korrektur wird sowohl durch Instationaritäten in der Messung als auch in der Simulation beeinflusst. Daher sollten beide Datensätze vor dem Vorhersagezeitpunkt ausgewertet werden. Sind Simulation und / oder Messung instationär, erfolgt die Reduktion des ARIMA-Verschiebungsvektors.

#### 4. Anpassung des Auswertzeitraumes

Gegebenenfalls kann auch eine Kürzung des Auswertzeitraumes zur besseren Bestimmung kurzer Instationaritäten in Erwägung gezogen werden.

### **3.4 FOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN**

#### **3.4.1 TECHNISCHE VERBESSERUNGEN BEI DER OPERATIONELLEN NIEDRIGWASSER-FRÜHWARNUNG**

Grundsätzlich ist von einer Nachführung des Gebietsspeichers für Basisabfluss bei kurzzeitigen instationären Bedingungen abzuraten, da die langfristigen Folgen für die Abflussverhältnisse am Pegel und in seinem Kontrollbereich als nachteilig einzustufen sind. Kurzfristige instationäre Bedingungen können folgenden Ursachen zugeordnet werden:

1. Messfehler am Pegel
2. Technische Fehler: Umschaltung zwischen Haupt- und Redundanzsystem bei gleichzeitiger starker Abweichung beider Systeme.
3. Messfehler in der Niederschlags erfassung: Kleinere Niederschlagsereignisse, die von umliegenden Niederschlagsstationen nicht oder nur unzureichend registriert worden sind.
4. Anthropogene Ursache: Alarmtests oder unregelmäßige Einflussnahme wie Kraftwerksregelungen

Aufgrund dieser Erkenntnisse ist frühzeitig bei der Datenkontrolle in der Datenbank der Hochwasservorhersagezentrale (HVZ-DB) zu empfehlen, Messwertausreißer als Fehlwerte zu deklarieren, bzw. diese durch plausible Handwerte oder durch die Nutzung des Redundanzsystems zu ersetzen. Vor allem die Weitergabe fehlerhafter Messwerte an Unterliegerpegel führt zu großräumigen Effekten die vermeidbar sind. Langfristig sollte daher eine automatische Erkennung von unplausiblen Daten innerhalb der HVZ-DB oder vollautomatisch durch das WHM LARSIM vor Ausführung der Berechnungen durchgeführt werden.

Bei der automatischen oder halbautomatischen Umschaltung zwischen Haupt- und Redundanzsystem ist vorher gewissenhaft zu prüfen, ob beide Systeme ersetzbar sind, bzw. ob plausible Messwerte geliefert werden. Sollte diese Entscheidung nicht getroffen werden können, sollte der betroffene Pegel auf Wartung gesetzt werden. Dies geschieht bei der täglichen Kontrolle der Modellergebnisse manuell durch den diensthabenden Hydrologen.

Kleinere Niederschlagsereignisse, die in der Regel kurze schnelle Anstiege der Abfluss bzw. Wasserstandkurve zur Folge haben, sollten allerdings modellintern erkannt werden und zu einer modifizierten Nachführung im Niedrigwasserbereich führen. Dafür muss modellintern nicht nur die Höhe der Instationarität bestimmt werden, sondern auch deren Länge. Als mögliche Größe für die Ermittlung wird der Quotient  $Q_{mit}/Q_{max}$  vorgeschlagen.

Des Weiteren sollte die ARIMA-Korrektur mit der Vorhersagetiefe abnehmen und weiter in der Zukunft liegende Werte durch die unkorrigierte Vorhersage abbilden. Dadurch würden die Schwankungen der fernen Vorhersage verhindert werden und der Basisabfluss würde stabiler abgebildet werden.

Beobachtungen aus dem operationellen Betrieb sowie Entwicklungsbedarf bzw. Wünsche sollen von den verschiedenen Hochwasservorhersagezentralen zusammengetragen werden. Die Ergebnisse werden in die Weiterentwicklung von LARSIM im Rahmen eines eigenen Projektes fließen.

#### **3.4.2 KONSEQUENZEN FÜR DIE WEITERE BEARBEITUNG**

Die zuvor erläuterten Probleme, die bei Messung, Nachführung, ARIMA-Korrektur und der anthropogenen Einflussnahme entstehen, können im Rahmen dieses Forschungsprojektes nur bedingt nachgegangen werden, da es hierzu mitunter erhebliche Anpassungen im Programmcode von LARSIM bedarf.

Die fehlerhaften Messungen wurden für Kalibrierung und Vorhersagetests weitestgehend plausibilisiert. Grobe Ausreißer und unplausible Bereiche wurden aus den Datensätzen entfernt. Dennoch können nicht alle unplausiblen Messwerte identifiziert werden, da sie mitunter als kleine Zacken auftreten, die durch ihre Vielzahl manuell nicht bereinigt werden können. Zumal stellt sich das Problem von Ausreißern auch später im operationellen Betrieb. Die Ergebnisse der Vorhersagetests müssen daher stets im Hinblick der mitunter sehr schlechten ARIMA-Korrekturen betrachtet werden. Die Umsetzung eines erneuerten Verfahrens wird aktuell mit der Entwicklergemeinschaft von LARSIM besprochen. Die Umsetzung und die erforderlichen Testrechnungen stehen hier jedoch noch aus und stellen sich als schwierig dar.

Den häufigen Nachführungen, insbesondere des Gebietsspeichers, wird versucht durch geeignete Auswahlverfahren der Pegel zu begegnen. Verhalten sich alle Pegel in einem Gebiet konsistent zueinander kann die Nachführungshäufigkeit reduziert werden. Auch widersprüchliche Nachführungsfaktoren sollten auf diese Weise abnehmen. Die genaue Herangehensweise wird in Kapitel 4.3 und 5.4 beschrieben.

Die meisten Probleme, die während der Bearbeitung auftraten und sich deutlich negativ auf das Vorhersageergebnis auswirken können, bedürfen weitreichendere Anpassungen als diese im Rahmen dieser Untersuchung möglich sind. Bei allen in Kapitel 4 und 5 beschriebenen Verfahren wurde aber versucht den Schwierigkeiten bei der Aufstellung von Niedrigwassermodellen Rechnung zu tragen und Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

# 4 LARSIM-Niedrigwasser-Modell am Beispiel des WHM Bodensee

## 4.1 PEGELBEWERTUNG DER LUBW

Auf Basis der Validierung der Abfluss-Wasserstands-Beziehung wurde einmalig eine grobe vorläufige Abschätzung vorgenommen. Die Grob-Bewertungen liegen LUBW-intern als Farbkodierung sowie als Textbeschreibung tabellarisch für alle operationell genutzten Pegel sowie einige wenige zusätzliche Pegel vor. Im Rahmen des Projektes wurden diese kartographisch ausgewertet (siehe Abbildung 4-1). Es wird jedoch seitens der zuständigen Bearbeiter bei der LUBW darauf verwiesen, dass diese Validierungen nur vorläufigen Charakter haben, und dass im Laufe der weiteren Plausibilisierung der Pegeldata seitens der LUBW möglicherweise andere Bewertungen abgegeben werden.

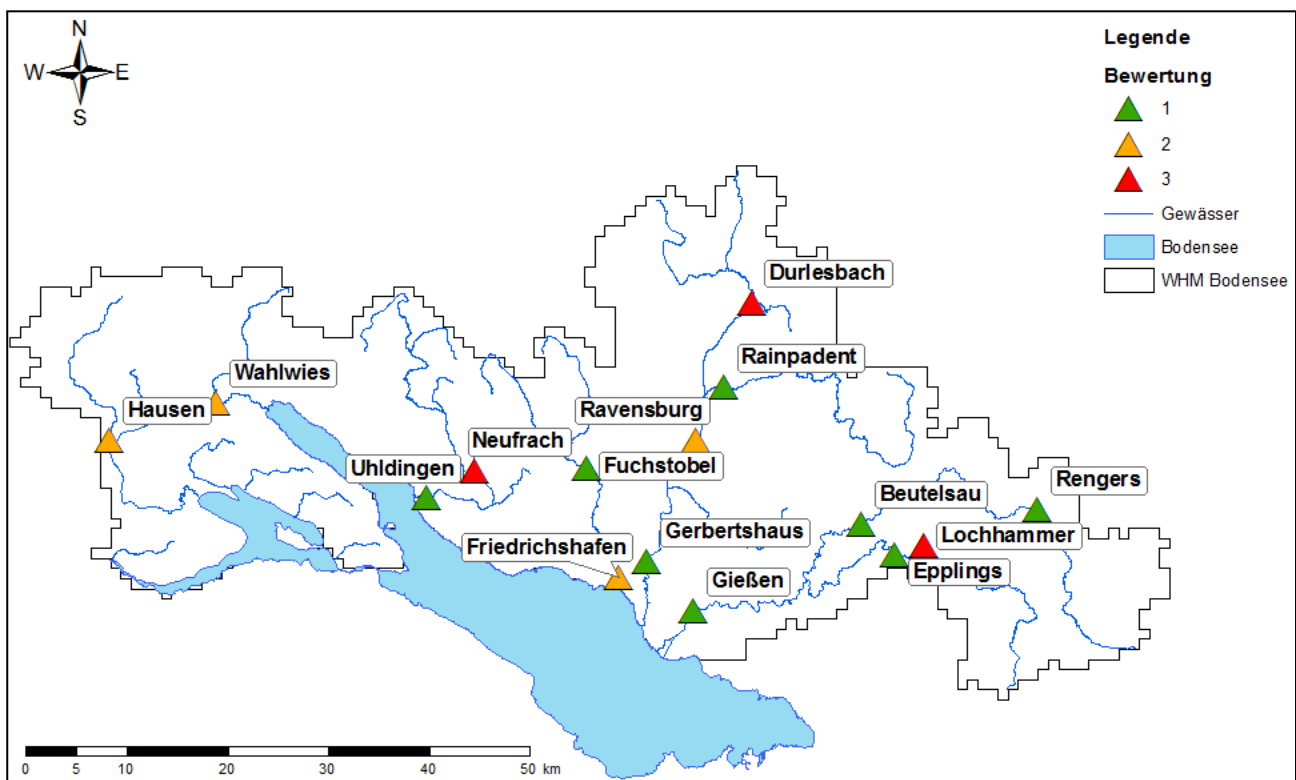


Abbildung 4-1: Darstellung der Pegelbewertung der LUBW für die Pegel im Bereich des WHM Bodensee . Die Note 1 steht für „gut geeignet“, 2 für „geeignet“, 3 für „weniger geeignet“ und 4 für „nicht geeignet“.

Anhand dieser Grob-Bewertungen ist im Vorfeld ersichtlich, welche Pegel unter Umständen nicht zu einem konsistenten Gesamtsystem gehören. Beispielsweise sind die Pegel Lochhammer (Gießbach), Durlesbach (Schussen) und Neufrach (Deggendorfer Aach) mit einer schlechten Bewertung ausgewiesen. Daher ist zu erwarten, dass diese Pegel inkonsistente Messungen aufweisen.

#### 4.2 PLAUSIBILISIERUNG

In Tabelle 4-1 sind die Pegel im Gebiet des WHM Bodensee aufgelistet, die in die Plausibilisierung eingegangen sind. Die Benotung der einzelnen Pegel kann ebenfalls aus dieser Tabelle entnommen werden. Abbildung 4-2 zeigt die Plausibilisierungsergebnisse anhand einer Kartendarstellung für das WHM Bodensee. Die Pegel wurden dabei gemäß der ihnen zugeteilten Benotung farblich gekennzeichnet. Die meisten Pegel wurden als plausibel im Niedrigwasserbereich eingestuft.

**Tabelle 4-1: Liste der plausibilisierten Pegel im Bereich des WHM Bodensee. Note 1 = „plausibel“, Note 2 = „bedingt plausibel“, Note 3 = „unplausibel“, Note 4 = „unklar“.**

Name	Gewässer	Rechtswert	Hochwert	Einzugsgebiet [km <sup>2</sup> ]	Ergebnis
Aach-NW	Radolfzeller Aach	3488836	5300498	-	3
Beutelsau	Untere Argen	3561514	5285482	255.67	1
Durlesbach	Schussen	3550622	5307442	268.86	3
Epplings	Obere Argen	3564855	5282439	164.79	1
Friedrichshafen	Rotach	3537349	5280200	131.59	1
Fuchstobel	Rotach	3534189	5291021	68.33	1
Gerbertshaus	Schussen	3540244	5281721	782.01	2
Gießen	Argen	3544866	5276797	639.34	1
Hausen	Saubach	3486942	5293765	144.43	1
Lochhammer	Gießbach	3567653	5283277	30.14	1
Neufrach	Deggenhauser Aach	3523189	5290683	74.87	2
Rainpadent	Wolfegger Ach	3547887	5299039	165.37	2
Ravensburg	Schussen	3545088	5293766	635.69	2
Rengers	Untere Argen	3579004	5286852	131.4	1
Rielasingen	Radolfzeller Aach	3487996	5288842	204.54	2
Uhldingen	Seefelder Aach	3518345	5288027	271.41	1
Wahlwies	Alte Aach	3497539	5297454	214	3
Wahlwies	Stockacher Aach	3497506	5297481	214	1

Der Pegel Durlesbach (Schussen) fällt, wie schon bei der LUBW-internen Pegelbewertung auch in der Plausibilisierung durch eine schlechte Benotung auf. Nach Auskunft des Pegelsachgebietes der LUBW ist die W-Q-Beziehung des Pegels nur durch sehr wenige Werte belegt. Im Vergleich zum benachbarten Pegel Rainpadent ist ein deutliches Auseinanderdriften in den letzten Jahren erkennbar.

Der Pegel Aach-NW weist viele Sprünge in der Abflussganglinie auf, weshalb dieser auch als unplausibel gekennzeichnet wurde.

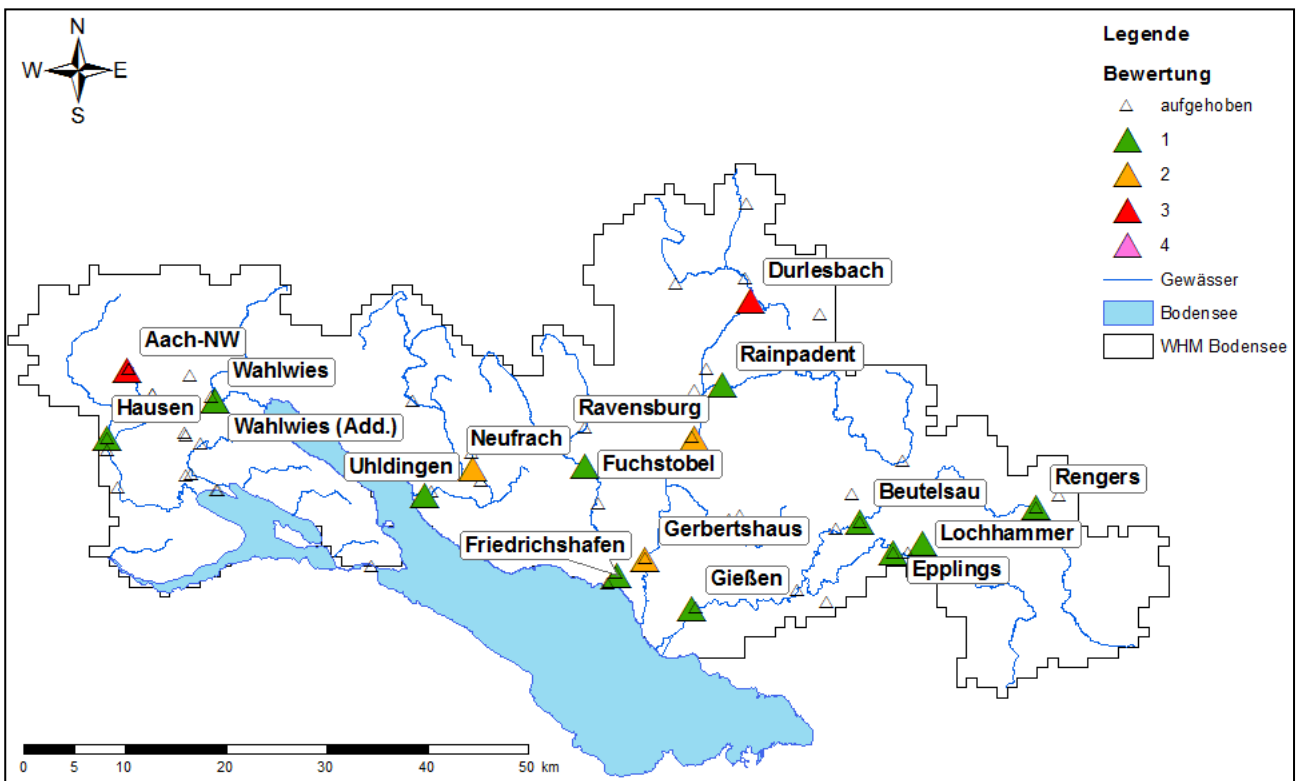


Abbildung 4-2: Darstellung der Ergebnisse der Pegelplausibilisierung, 1 = plausibel, 2 = bedingt plausibel, 3 = unplausibel, 4 = unklar

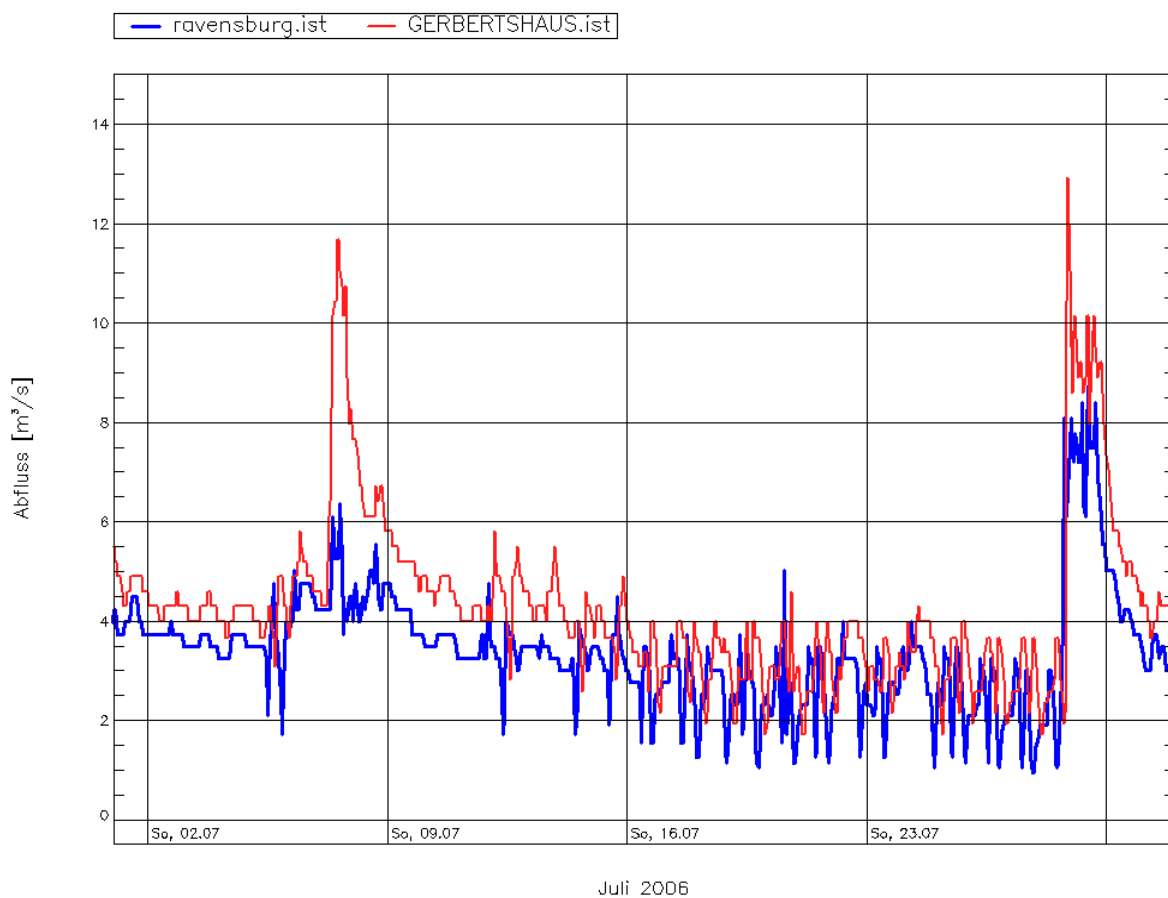


Abbildung 4-3: Ausschnitt aus den Datensätzen der Pegel Ravensburg (blau) und Gerbertshaus (rot) mit kurzzeitigen Schwankungen des Abflusses im Niedrigwasser

Die Pegel Ravensburg und Gerbertshaus scheinen zusammenzupassen. Allerdings weisen beide Pegel Unregelmäßigkeiten im Niedrigwasser in Form von starken kurzzeitigen Schwankungen auf (siehe Abbildung 4-3), so dass bei der Benotung eine 2 vergeben wurde. Dabei ist zu beachten, dass unregelmäßige Schwankungen insbesondere im Niedrigwasserbereich häufig auftreten können.

#### 4.3 KONSISTENZPRÜFUNG ANHAND DER ABFLUSSSPENDEN

Für die Analyse der Konsistenz zwischen benachbarten Pegelkontrollbereichen (PKB), wurde auf die flächenhafte Darstellung der Abflusspenden zurückgegriffen. Durch dieses Vorgehen wird deutlich, welche Niedrigwasserabflussmessungen plausibel zusammenpassen. Es wird davon ausgegangen, dass benachbarte PKB bei gleicher bzw. ähnlicher landschaftlicher Ausprägung ähnliche Abflusspenden aufweisen.

Im ersten Schritt wurden die mittleren Niedrigwasserabflüsse, der aktuellen an der LUBW vorhandenen Niedrigwasser-Regionalisierung dargestellt (siehe Abbildung 4-4). Dies ermöglicht die Prüfung und Bewertung der Qualität bzw. der Konsistenz der Kennwerte der Regionalisierung. Auffällig bei der Darstellung ist der Umfang der vorkommenden Abflusspenden. Die minimalen Werte liegen bei unter  $1 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  im Westen des Gebietes (Pegel Hausen/Saubach - dunkelorange), während die maximalen Werte über  $10 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  erreichen (Pegel Beutelsau und Lochhammer - beide dunkelblau). Auch wenn geographisch eine Zunahme des Niederschlags von West nach Ost zu erklären ist, so ist die starke Variabilität der Abflusspenden benachbarter PKBs zu groß. Beispielweise ist der PKB des Pegels Rengers ganz im Osten zu nennen. Dieses Gebiet weist mit knapp  $4 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  eine deutlich geringere Abflussspende auf, als der direkt darunter liegende PKB Beutelsau.

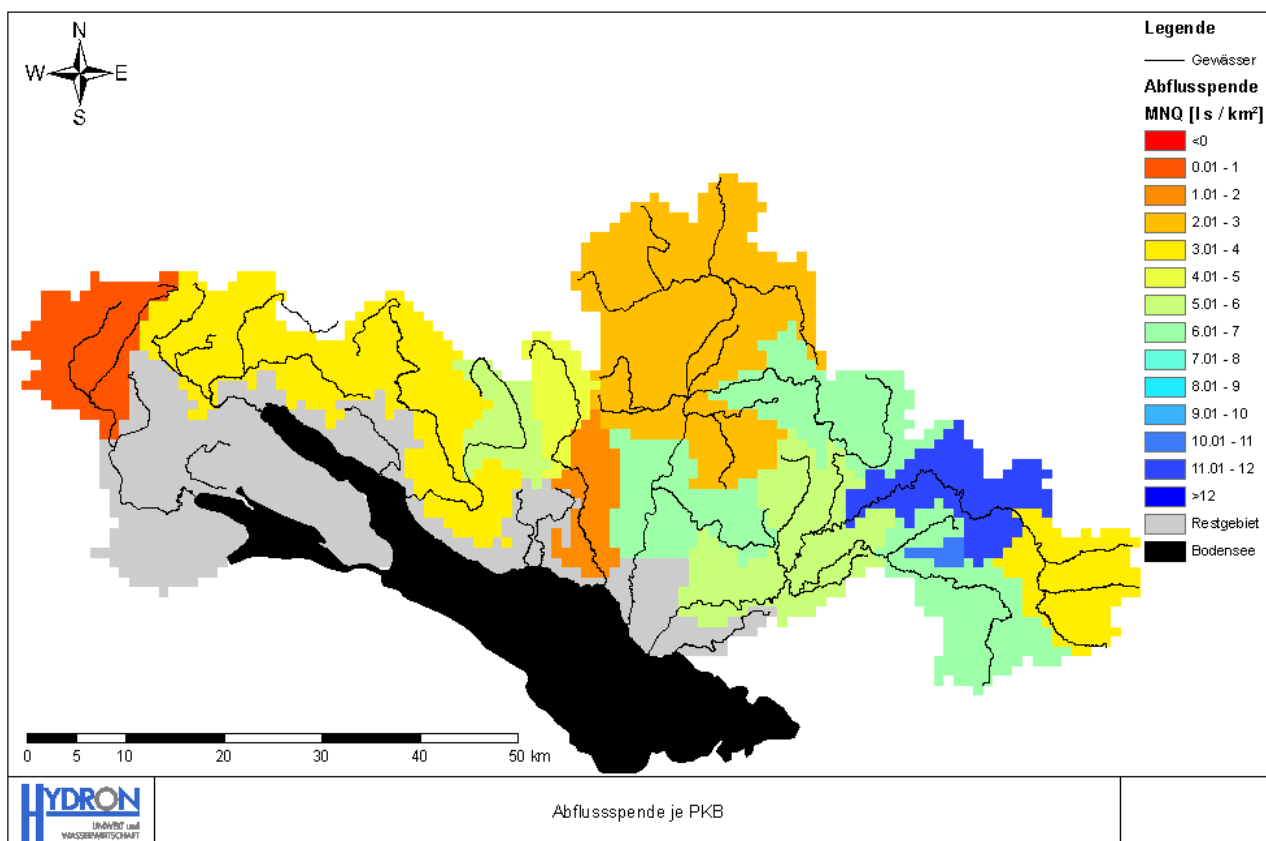
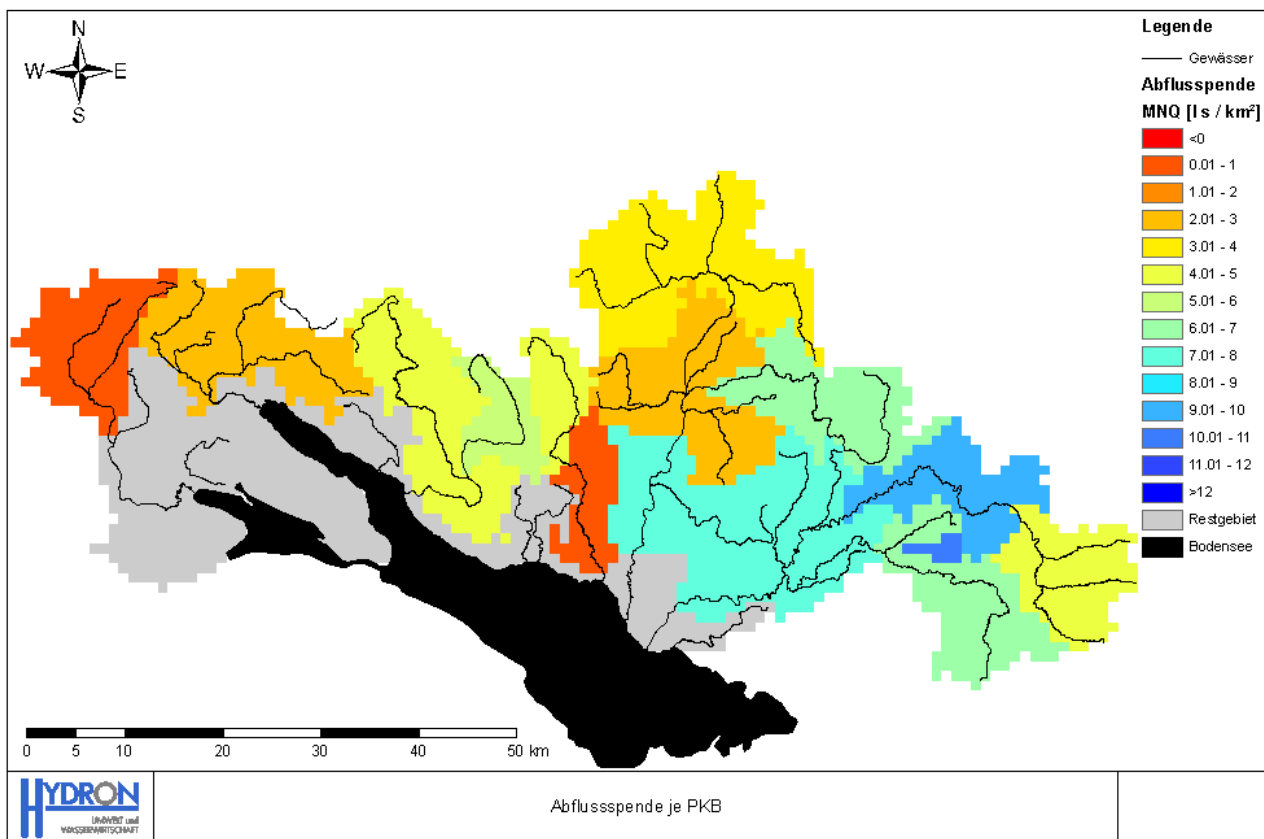


Abbildung 4-4: Flächenhafte Darstellung der MNQ-Abflussspende (mittlere Niedrigwasserabflussspende) auf Basis der Niedrigwasser-Regionalisierung für alle Pegel im Bereich des WHM-Bodensee





**Abbildung 4-5: Flächenhafte Darstellung der MNQ-Abflusspende (mittlere Niedrigwasserabflusspende) auf Basis der Klassifizierung der LUBW für alle Pegel im Bereich des WHM-Bodensee**

Außer den Abflusskennwerten der Regionalisierung sind für Baden-Württemberg auch Abflusskennwerte der LUBW vorhanden. Bei der Erstellung dieser Kennwerte wurden Korrekturen auf Basis von gemessenen Abflüssen durchgeführt. Allerdings zeigt sich auch bei der flächenhaften Darstellung der Abflusspenden des MNQ aus der Klassifizierung der LUBW ein ähnlich inhomogenes Muster (siehe Abbildung 4-5). Der PKB Beutelsau erreicht zudem mit über  $9 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  immer noch sehr hohe Werte, während die benachbarten PKBs deutlich darunter liegen.

Im zweiten Schritt wurden daher aus den plausibilisierten Abflussganglinien der Jahre 1997 bis 2011 Abflusskennwerte (MNQ) ermittelt und als Abflusspenden flächenhaft dargestellt. Neben der genaueren Kontrollmöglichkeit der verwendeten Eingangsdaten, bietet sich durch die Hinzunahme zusätzlicher, bisher nicht verwendeter Pegel, die Möglichkeit konsistentere Muster zu erlangen.

Zuerst wurden die mittleren Niedrigwasser-Abflusspenden sämtlicher Pegel, deren Abflussdaten zur Verfügung standen, visualisiert. Die flächenhafte Darstellung der zugehörigen Abflusspenden zeigt Abbildung 4-6. Bei folgenden Pegelkontrollbereichen (PKB) sind Auffälligkeiten aufgetreten:

- Der PKB Rielasingen an der Radolfzeller Aach im äußersten Westen des Gebietes weist mit über  $55 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$  eine extrem hohe Abflusspende auf (dunkelblau). Die Radolfzeller Aach entspringt im Aachtopf, dessen Wasser hauptsächlich aus dem Einzugsgebiet der Donau stammt. Insofern handelt es sich hier um einen Sonderfall, der durch die massiven Karsteinflüsse erklärt werden kann. Da der Pegel Aach-NW unplausible Messwerte liefert, ist die wahre Abflusspende der Radolfzeller Aach (ohne das Karstwasser aus der Donau) nicht zu bestimmen.

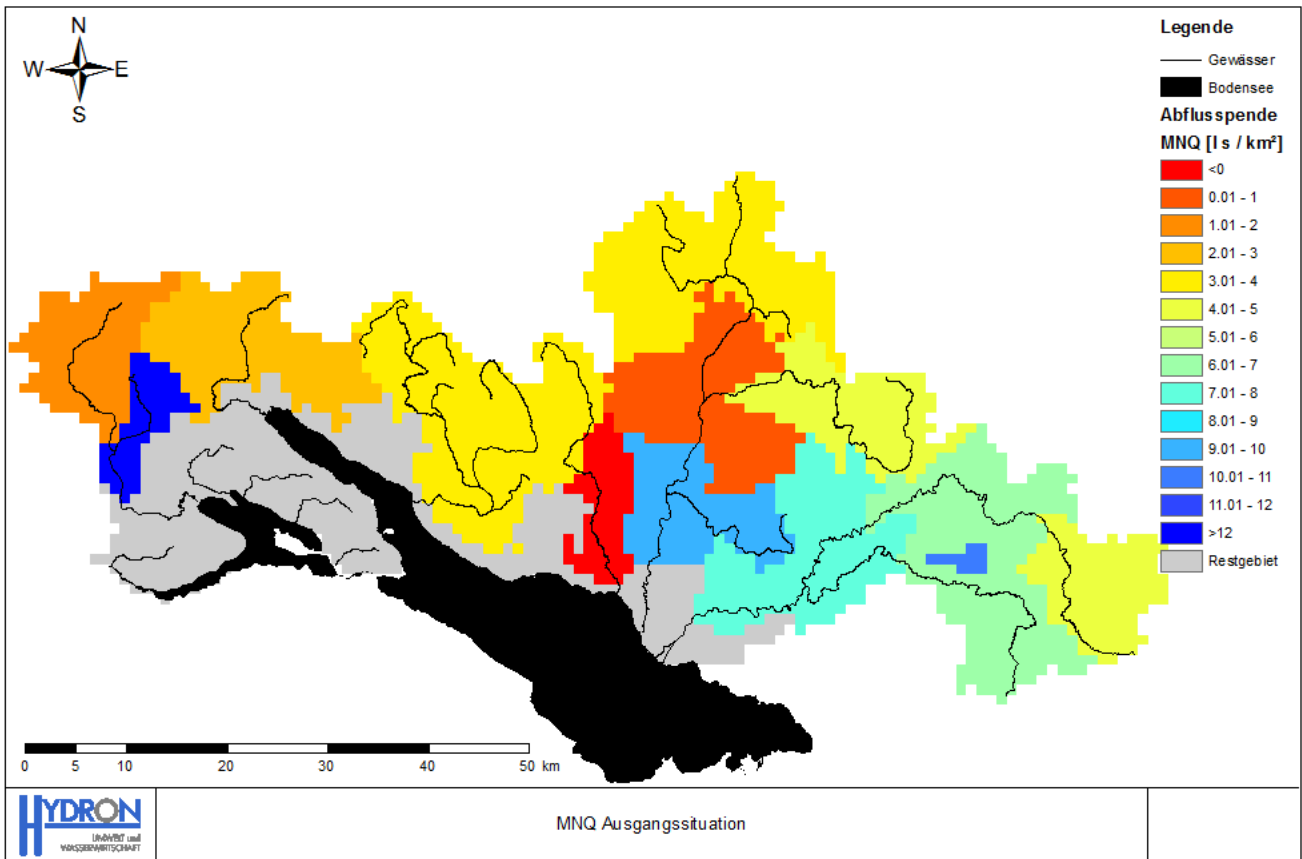


Abbildung 4-6: Flächenhafte Darstellung der MNQ-Abflusspende auf Basis der plausibilisierten Abflussganglinie für alle Pegel (Ausgangszustand)

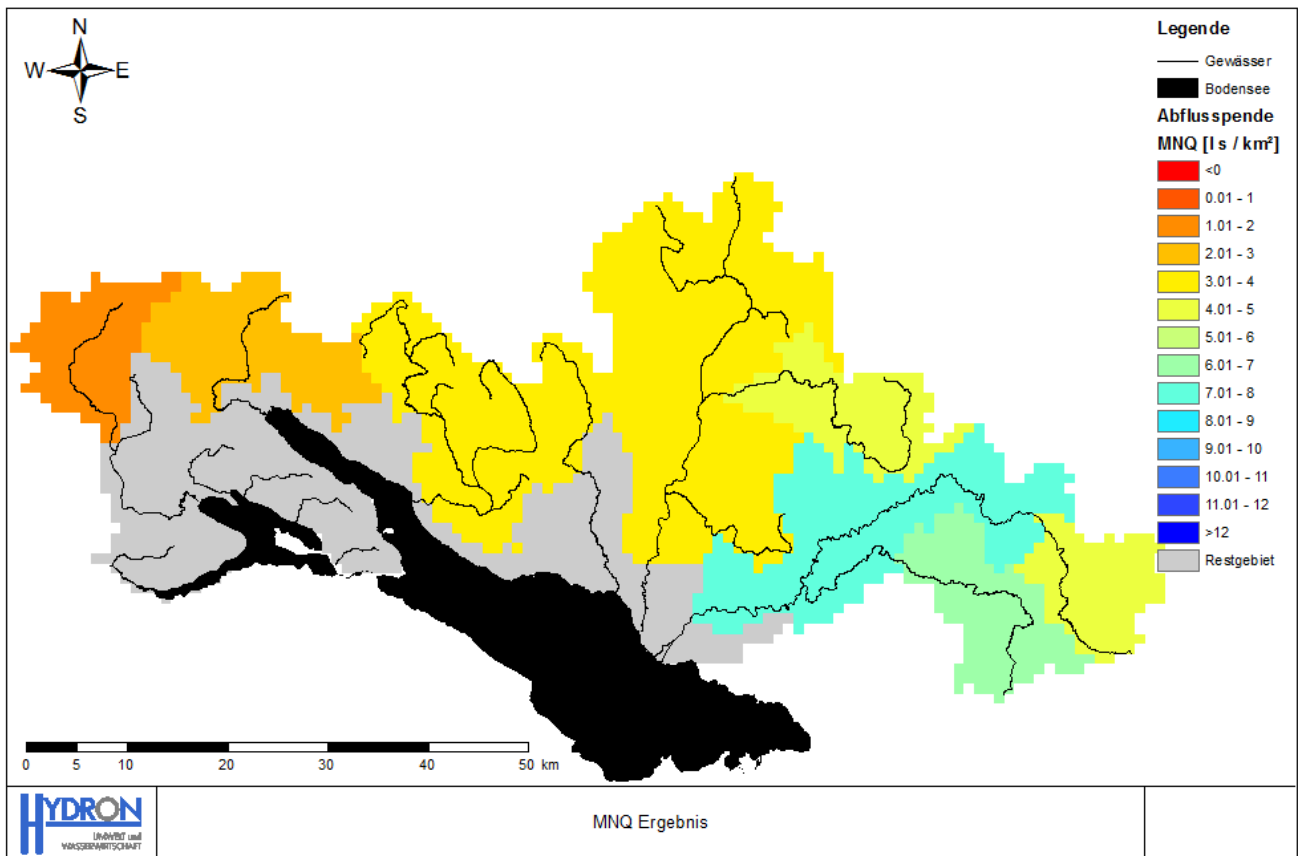


Abbildung 4-7: Flächenhafte Darstellung der MNQ-Abflusspende auf Basis der plausibilisierten Abflussganglinie für plausible Pegel (Finalzustand)

- Der PKB Friedrichshafen (dunkelrot) weist eine negative Abflusssspende auf. Da im Gebiet keine Flussversinkungen bekannt sind, kann davon ausgegangen werden, dass entweder der Pegel selbst, oder der Oberliegerpegel (Fuchstobel) unplausible Messwerte liefert.
- Beim PKB Lochhammer (kleiner dunkelblauer Bereich im Osten des WHM Bodensee) beträgt die Abflusssspende ca. 11 l/(s·km<sup>2</sup>). Im Vergleich zu den umliegenden PKBs scheinen auch hier unplausible Messungen vorzuliegen
- Der PKB Ravensburg (orangerot) und der PKB Gerbertshaus (hellblau) weisen stark unterschiedliche Abflusssspenden auf. Dabei ist offenbar Ravensburg vom Niveau zu niedrig.

In einem iterativen Prozess konnte durch sukzessives Entfernen von Pegeln eine finale Darstellung der Abflusssspenden erzielt werden (siehe Abbildung 4-7). Dabei wurde auf die Erkenntnisse der Pegelbewertung und der Pegelplausibilisierung zurückgegriffen. Die Pegel Neufrach und Durlesbach wurden aufgrund der schlechten Bewertung entfernt, die Pegel Friedrichshafen, Beutelsau, Ravensburg und Lochhammer aufgrund der Inkonsistenzen in der Darstellung der Abflusssspenden. Der Pegel Rielasingen wurde ebenfalls entfernt, da aufgrund der unplausiblen Messungen des Oberliegerpegels Aach-NW keine Möglichkeit bestand die Abflusssspende auf dem Gebiet des WHM Bodensee zu bestimmen.

Im Ergebnis ist ein homogenes Bild der Abflusssspenden zu sehen, die einen Anstieg von 1 l/(s·km<sup>2</sup>) im Westen (Hausen) bis zu 8 l/(s·km<sup>2</sup>) im Osten (Gießen) aufweist.

Die damit als zuverlässig eingestuften Pegel (siehe Tabelle 4-2) können im Folgenden zur Erstellung des konsistenten Niedrigwasser-Frühwarnmodells Bodensee verwendet werden.

**Tabelle 4-2: Zusammenstellung der nach der Analyse der Abflusssspenden als zuverlässig eingestuften Pegel im WHM Bodensee**

STANDORT	Gewässer	PKB-Größe [km <sup>3</sup> ]	MNQ [m <sup>3</sup> /s]	MNq [l/(s·km <sup>2</sup> )]
Rengers	Untere Argen	129	0.53	4.1
Epplings	Obere Argen	168	1.1	6.8
Gießen	Argen	355	4.5	7.9
Rainpudent	Wolf. Aach	165	0.69	4.2
Gerbertshaus	Schussen	630	2.9	3.5
Fuchstobel	Rotach	66	0.22	3.4
Uhdlingen	Seef. Aach	275	0.96	3.5
Wahlwies	Stock. Aach	202	0.54	2.7
Hausen	Saubach	148	0.23	1.6

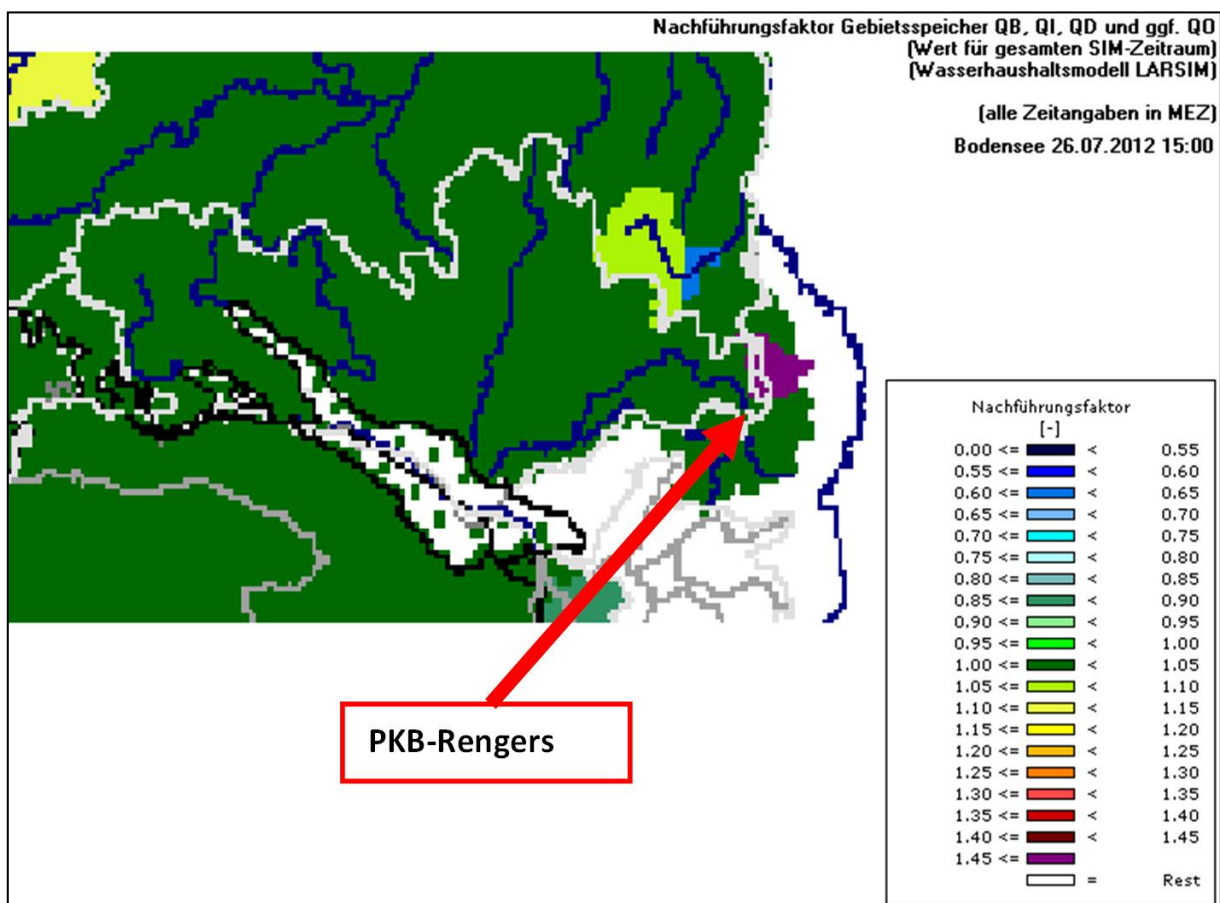
#### 4.4 NACHFÜHRUNGSFAKTOREN

Mit Hilfe der in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Option werden seit Anfang 2012 zu jedem Vorhersagezeitpunkt Flächengrafiken erstellt. Die Nachführungsfaktoren werden für jeden Pegelkontrollbereich (PKB) analysiert und auf der Flächengrafik klassifiziert dargestellt (siehe Kap. 3.2). Es wurden 20 Klassen definiert, die im Bereich zwischen  $<0.55$  und  $>1.45$  liegen. Dabei bedeutet der Faktor 1.00, dass keine Nachführung vorgenommen wurde. Ein Faktor kleiner als 1.00 weist auf eine Erniedrigung des Inhalts des Gebietspeichers eines PKB, während ein Faktor größer als 1.00 eine Erhöhung bedeutet.

Die Flächengrafiken im Bereich des WHM Bodensee wurden für den Zeitraum 05.01.2012 bis 07.08.2012 visuell ausgewertet, um daraus ggf. auf mögliche Schwachstellen der Verfahren bzw. auf problematische Pegel zu schließen. Bei der Analyse wurden PKB identifiziert, bei denen starke Korrekturen durchgeführt wurden, bzw. die Nachführungsfaktoren im Vergleich zum benachbarten PKB widersprüchlich waren.

Im Bereich des WHM Bodensee fielen nur zwei Pegelkontrollbereiche durch gelegentliche Anpassungen auf. Die Faktoren des PKB Epplings betragen im Mai und Juni 2012 an sechs Tagen zwischen 0.95 und 1.35. Der PKB Rengers fiel lediglich durch starke Korrekturen im Hochwasserbetrieb (Vorhersage jede Stunde) am 26.07.2012 mit Änderungen zwischen 1.35 und über 1.45 auf (siehe Abbildung 4-8).

Daher ergibt sich für das WHM Bodensee kein Handlungsbedarf bezüglich der Anpassung der WHM-Nachführung. Die PKB Epplings und Rengers sollten im Rahmen des Vorhersagetests genauer untersucht werden.



**Abbildung 4-8: Räumliche Verteilung der operationellen Nachführungsfaktoren am 26.07.2012 zum Vorhersagezeitpunkt 15:00 – Vergrößerung der Flächendarstellung auf den Bereich des WHM Bodensee.**

#### 4.5 VORGEHENSWEISE BEI DURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG DER VORHERSAGETESTS

Die Pegel in Tabelle 4-2 wurden für den Aufbau einer Offline-Modellumgebung benutzt, um im weiteren Projektverlauf ein stabiles und konsistentes Niedrigwasser-Frühwarnmodell aufzustellen. Dafür wurden Vorhersagetests für den Zeitraum 01.01.1997 bis 31.12.2011 durchgeführt. Es wurde hierbei eine tägliche Vorhersage gerechnet, da bei Niedrigwasserereignissen, anders als im Hochwasserfall, nicht mit plötzlichen Veränderungen des Abflussgeschehens gerechnet werden muss. Bei diesen Tests wird ausgewertet, ob und in welchem Maße sich die Vorhersagequalität des neu aufgestellten Modells im Vergleich zum ursprünglich verwendeten operationellen Vorhersagemodell verändert. Im ursprünglichen Modell wurden dabei die neu eingefügten Pegel nicht mit in das Modell integriert, aber mit ausgegeben. Auf diese Weise wird das Setup hier beibehalten, es kann aber dennoch die Qualität am Pegelstandort betrachtet werden.

Für das neu aufgestellte Modell wurden entsprechend die als ungeeignet definierten Pegel aus dem Setup entfernt und die ARIMA-Korrektur, sowie die Nachführung an den neu hinzugenommenen Pegeln aktiviert.

Die Vorhersagetests werden mit Hilfe des Programms ProFoUnD ausgewertet. Es wurde speziell für die Auswertung von Vorhersagetests entwickelt und für den aktuellen Fall der Niedrigwasserfrühwarnung entsprechend angepasst (Haag & Aigner 2013, Haag et al. 2013).

Bei der Niedrigwasserfrühwarnung wird untersucht, ob die Vorhersagen am ersten bis siebten Vorhersagetag den vorgegebenen Schwellenwert (MNQ) an Gewässerknoten unterschreiten. Ist dies der Fall, wird für den entsprechenden Vorhersagetag eine Niedrigwasserfrühwarnung ausgesprochen. Die Auswertung der Vorhersagetests erfolgte daher mit spezifischem Bezug zu dieser Form der Frühwarnung. Die Gütebewertung basiert daher auf dem Vergleich zwischen vorhergesagten und gemessenen Minimalwerte am ersten (1 – 24 h) bis siebten (145 – 168 h) Vorhersagetag (vgl. Haag & Aigner 2013).

Die Auswertung erfolgte dabei zum einen anhand der kategorischen Güte, die Auskunft darüber gibt, wie gut das Eintreten eines Ereignisses vorherhergesagt werden kann. Im Falle der Niedrigwasserfrühwarnung stellt dabei das Unterschreiten eines Schwellenwerts den Eintritt eines Ereignisses dar. Als kritischer Schwellenwert wurde der MNQ verwendet, der auch für die Frühwarnung angewandt werden soll. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, wurde die Genauigkeit des MNQ an die Genauigkeit der jeweiligen Niedrigwassermessungen an den Pegeln angepasst.

Die Grundlage der kategorischen Gütebewertung bildet die sogenannte Kontingenztafel, die im Falle der hier zu betrachtenden Unterschreitung von MNQ aus den folgenden 4 Elementen besteht:

- a. Hit: Unterschreitung von MNQ wurde vorhergesagt und gemessen
- b. False alarm: Unterschreitung von MNQ wurde vorhergesagt aber nicht gemessen
- c. Miss: Unterschreitung von MNQ wurde nicht vorhergesagt aber gemessen
- d. Correct negative: Unterschreitung von MNQ wurde nicht vorhergesagt und nicht gemessen

Hieraus ergibt sich folgende Kontingenztafel:

	Messung $\leq$ MNQ	Messung $>$ MNQ
VHS $\leq$ MNQ	a	b
VHS $>$ MNQ	c	d

Als am besten geeignetes kategorisches Gütemaß wurde aus der Belegung der Kontingenztafel der Threat Score berechnet:

$$\text{Threat Score} = \frac{a}{a + b + c}$$

Dieser gibt an, wie hoch der Anteil korrekt vorhergesagter Ereignisse an der Summe aller gemessenen und/oder vorhergesagten Ereignisse ist. Der Threat Score nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei die optimale Güte durch einen Wert von 1 angezeigt wird. Zeigt die Vorhersage beispielsweise eine andauernde Unterschreitung des Schwellenwertes an, die Messung liegt aber stets oberhalb, zeigt der Threat Score einen Wert von 0 an. Wird hingegen jedes Ereignis unterhalb des Schwellenwertes vorhergesagt, erreicht der Threat Score einen Wert von 1 (vgl. Haag & Aigner 2013).

Zum anderen wird die kontinuierliche Güte der Niedrigwasservorhersagen mithilfe der mittleren prozentualen Abweichung ausgewertet:

$$\text{Mittlere prozentuale Abweichung [\%]} = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|Q_{gem_i} - Q_{vhs_i}|}{|Q_{vhs_i}|}$$

$Q_{gem_i}$ : gemessener Abfluss zum Zeitpunkt i

$Q_{vhs_i}$ : vorhergesagter Abfluss für den Zeitpunkt i

n: Gesamtzahl aller Wertepaare

Für die Auswertung mit ProFoUnD wurde eine Klassengrenze von  $2 \cdot \text{MNQ}$  angesetzt, so dass sich diese lediglich auf die Vorhersagewerte bezieht, die unterhalb von  $2 \cdot \text{MNQ}$  liegen. Dadurch wird sichergestellt, dass nur die hier relevanten Niedrigwasservorhersagen in die Berechnung der mittleren prozentualen Abweichung einfließen (vgl. Haag & Aigner 2013).

Die mittlere prozentuale Abweichung soll darüber Auskunft geben, wie gut die generelle Modellqualität einzuschätzen ist. Es ist dabei davon auszugehen, dass mit zunehmender Vorhersagetiefe die prozentuale Abweichung zunimmt. Es ist denkbar, dass ein geringer Threat Score (schlechte kategorische Güte) erzielt wird, gleichzeitig aber auch die prozentuale Abweichung sehr gering ist (gute kontinuierliche Güte). Es könnte in einem solchen Fall demnach nicht von einer generell schlechten Vorhersagequalität gesprochen werden.

In allen Ergebnisgrafiken wird jeweils das ursprüngliche (alte) Modell, welches vorrangig zur Vorhersage von Hochwasserereignissen verwendet wurde, mit dem neu erstellten Vorhersagemodell für die Niedrigwasserfrühwarnung verglichen. Hierbei wurden alle Pegel mit einbezogen und für das alte Modell in rot und für das neue Modell mit blau dargestellt. Darüber hinaus werden die Pegel untereinander durch abweichende Strichstärken und Symbole unterschieden.

Kalibrierungen wurden an den Pegeln der neu aufgestellten Modellumgebung nicht durchgeführt. Es ist aber davon auszugehen, dass der Wegfall einiger Kopfpegel eine Nacheichung der Unterliegerpegel notwendig macht. Für den neu hinzugenommenen Pegel Hausen am Saubach wurden ebenfalls keine neuen Eichparameter bestimmt, dies sollte jedoch nachgeholt werden.

Bei den Auswertungen wurden nur drei Pegel untersucht. Dies liegt daran, dass ein Vergleich nur bei Veränderungen Sinn macht. Betrachtet werden daher die Pegel Gießen, Gerbertshaus und Fuchstobel.

Am Pegel Gießen sind Veränderungen zu erwarten, da der Kopfpegel Beutelsau, welcher im bisherigen operationellen Setup enthalten war, entfernt wurde. An den Pegeln Fuchstobel und Gerbertshaus ist mit Veränderungen durch den Wegfall des Pegels Durlesbach bzw. durch die Hinzunahme des Pegels Fuchstobel zu rechnen.

#### **4.6 ERGEBNISSE DER VORHERSAGETESTS**

Die Ergebnisse des Threat Scores zeigen nur sehr geringe Unterschiede für die Pegel Gießen (gelbe Rauten) und Gerbertshaus (hellblaue Quadrate) (siehe Abbildung 4-9). Der Threat Score liegt in beiden Fällen, insbesondere bei zunehmender Vorhersagetiefe unter dem Wert von 0,5, zum Teil auch unter 0,4. Dieses Ergebnis kann nicht als zufriedenstellend bezeichnet werden.

Am Pegel Fuchstobel (rote Kreise) hingegen kann mit dem alten Modell ein höherer Threat Score für den Pegel erreicht werden als mit dem neuen. Betrachtet man hingegen die mittleren prozentualen Abweichungen am Pegel Fuchstobel, so zeigen sich deutlich höhere Abweichungen im alten Modell, insbesondere für die Vorhersagen in den ersten drei Tagen. Mit zunehmender Vorhersagetiefe nähern sich dann die Abweichungen einander an (siehe Abbildung 4-10).

Die Ergebnisse am Pegel Fuchstobel zeigen damit, dass zwar im alten Modell die Unterschreitung des Schwellwertes häufiger korrekt vorhergesagt wurde, gleichzeitig ist aber die grundsätzliche Vorhersagequalität in diesem alten Modell deutlich schlechter.

Bei einer optischen Betrachtung der Vorhersagen vom Sommer 2003 fällt auf, dass die Abweichungen der Vorhersagen aus altem und neuem Modell etwa ähnlich zu bewerten sind (Abbildung 4-11). Im alten Modell liegt dabei jedoch eine systematische Unterschätzung und im neuen Modell eine Tendenz zur Überschätzung vor. Durch die systematische Unterschätzung werden im alten Modell eingetretene Ereignisse quasi immer korrekt vorhergesagt, wodurch sich ein höherer Wert für den Threat Score ergibt. Mit dem alten Modell wird jedoch viel zu häufig ein falscher Alarm ausgelöst, was negativ zu bewerten ist.

Außerdem fällt deutlich auf, dass die Vorhergesagte Ganglinie vom neuen Modell (grüne Ganglinie) häufig Zacken aufweist, die auf die ARIMA-Korrektur zurückzuführen sind. In einigen Fällen wirkt sich die ARIMA-Korrektur an diesem Pegel also offensichtlich negativ auf die Vorhersagequalität aus.

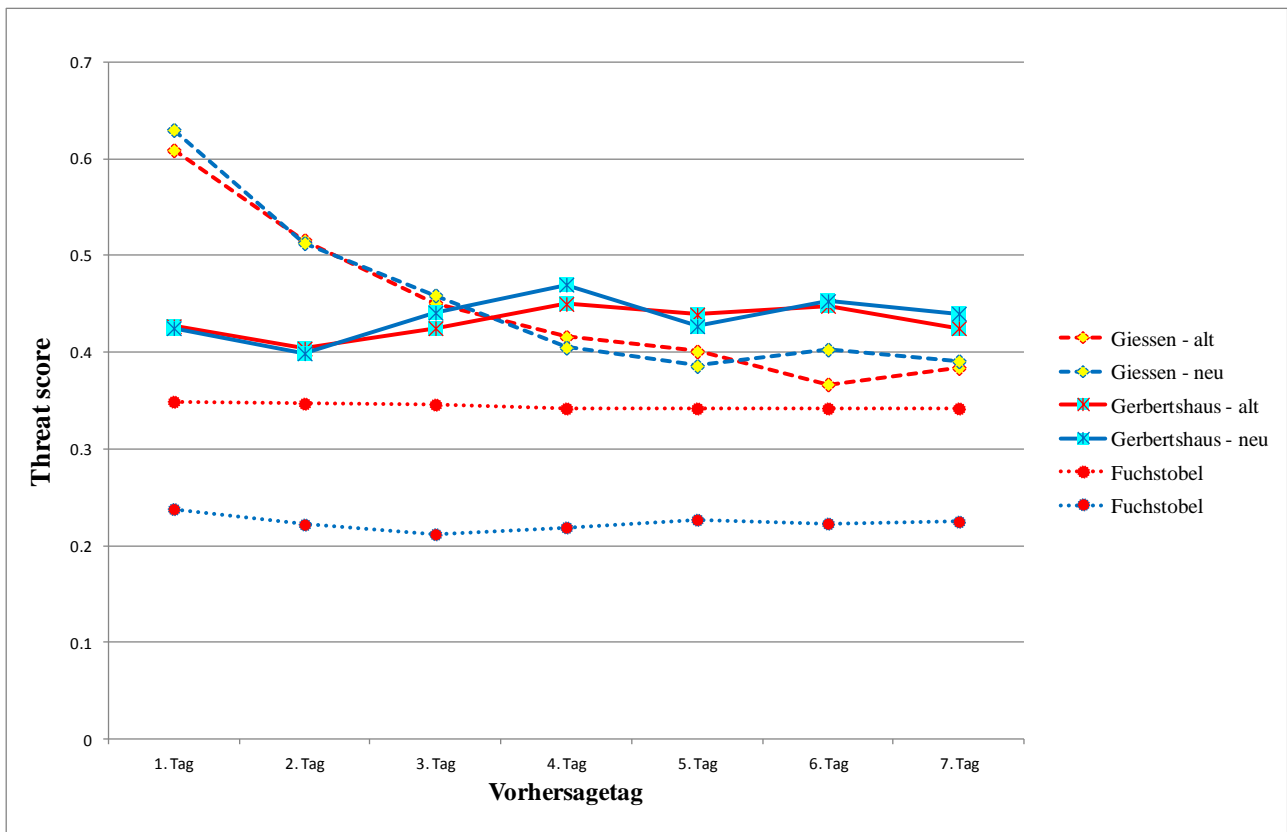


Abbildung 4-9: Threat Score für die ausgewählten Pegelstandorte im Pilotgebiet Bodensee.

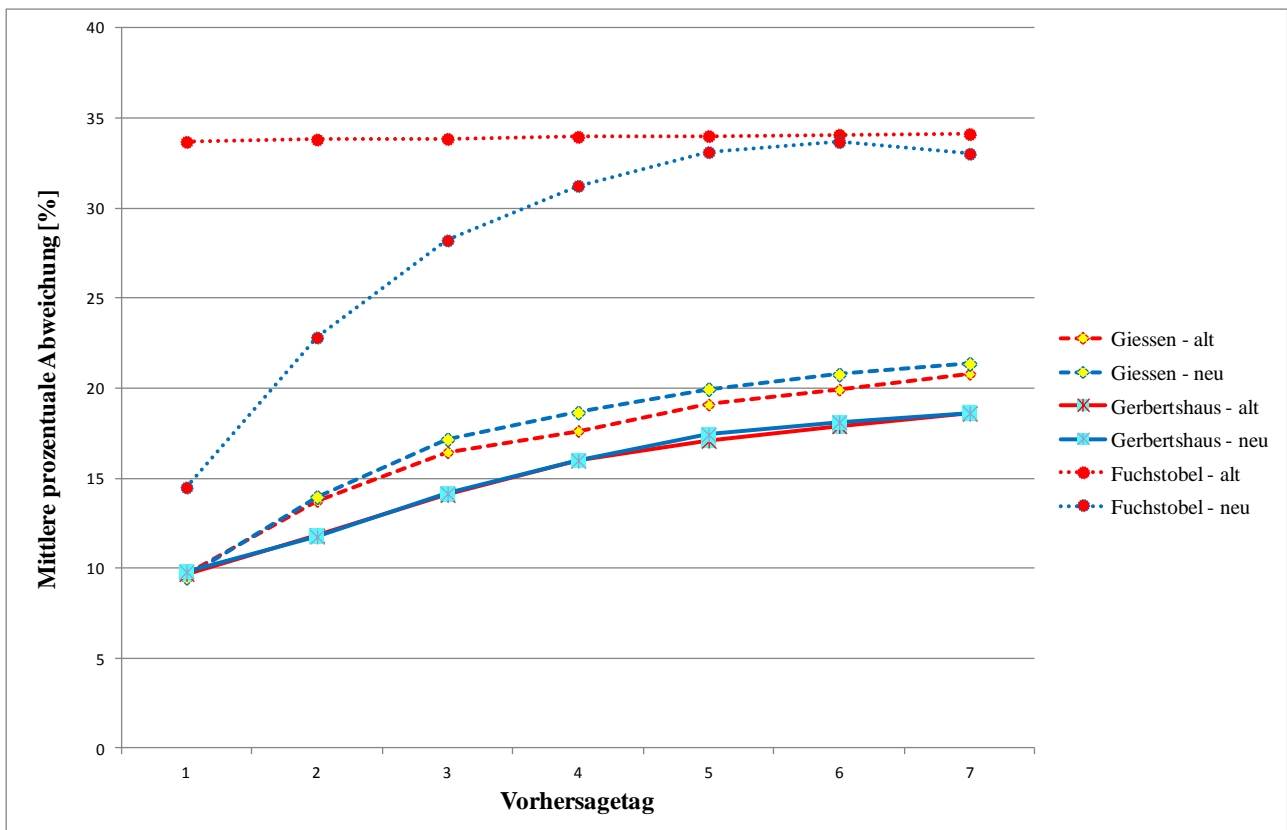


Abbildung 4-10: Mittlere prozentuale Abweichung für die ausgewählten Pegelstandorte im Pilotgebiet Bodensee.

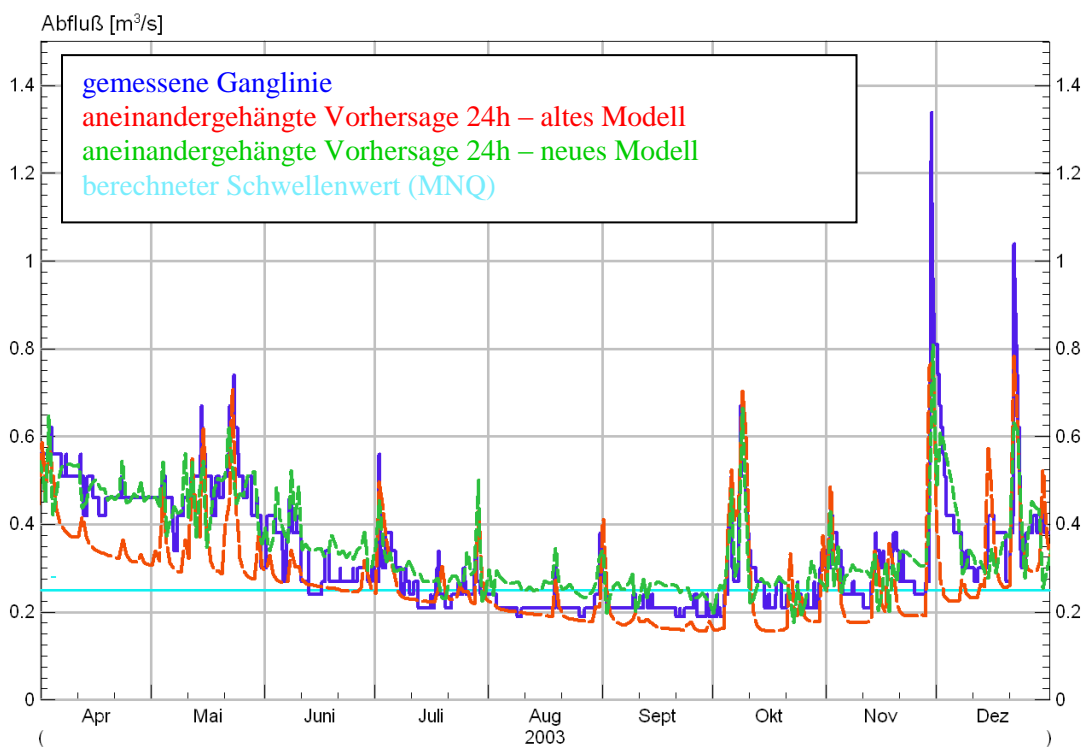


Die prozentualen Abweichungen an den Pegeln Gießen und Gerbertshaus zeigen, wie auch beim Threat Score keine nennenswerten Unterschiede. Eine Nachkalibrierung erscheint jedoch in allen Fällen sinnvoll, da eine Veränderung im Pegelsetup auch stets einen Einfluss auf die Qualität an den unterhalb gelegenen Pegeln hat.

Auch wenn die Ergebnisse hier keine klaren Verbesserungen an den betrachteten Pegeln zeigen, so sollte doch mit berücksichtigt werden, dass durch die Verwendung von nicht plausiblen Pegeln im alten Modellansatz insgesamt keine verlässliche Vorhersage an diesen Pegeln erzielt werden konnte.

Insbesondere ist zu beachten, dass durch unplausible Messungen bzw. ein inkonsistentes Pegel-Setup fehlerhafte Werte auf die Gewässerknotten innerhalb der Einzugsgebiete übertragen werden bzw. massive Sprünge zwischen Pegelkontrollbereichen auftreten. Dadurch kann es zu gravierenden Fehleinschätzungen bei der Niedrigwasserfrühwarnung kommen, die ja nicht anhand der Pegel sondern anhand der Gewässerknotten in den Einzugsgebieten ausgewertet wird. Die Konsistenz und Verlässlichkeit der ausgewählten Pegel ist daher höher zu bewerten als die absolute Vorhersagequalität an einzelnen Pegelstandorten.

Insgesamt zeigen die Vorhersagetests zufriedenstellende Ergebnisse für die beiden Pegel Gießen und Gerbertshaus. Am Pegel Fuchstobel zeigen sich in der gemessenen Ganglinie häufig kleine Sprünge, die womöglich zu häufig unnötigen Korrekturen führen. An diesem Pegel ist daher deutlicher Verbesserungsbedarf vorhanden. Hier könnte vermutlich eine spezifische Kalibrierung weiterhelfen.



**Abbildung 4-11: Aneinandergehängte 24-Stunden-Vorhersagen für den Pegel Fuchstobel im Sommer 2003.**

#### 4.7 KONSEQUENZEN AUS DER ANALYSE DES NIEDRIGWASSERMODELLS BODENSEE

Die grundsätzliche Herangehensweise zur Erstellung eines Niedrigwassermodells kann als stimmig bezeichnet werden. Künftig sollte bei der Aufstellung jedoch immer auch eine Kalibrierung der Pegel, insbesondere für den Niedrigwasserbereich eingeplant werden. Es zeigte sich außerdem, dass die bisher bei der HVZ verwendeten Pegel für den Niedrigwasserbereich nicht zwingend geeignet sind, jedoch andere nicht hochwassersertaugliche Pegel durchaus sinnvoll integriert werden können.

Als problematisch müssen die Bereiche im LARSIM-Niedrigwassermodell für den Bodensee angesehen werden, die nicht durch Pegel abgedeckt sind. Diese liegen im westlichen Bereich und zeichnen sich durch einen deutlichen Karsteinfluss aus. Durch eine Berücksichtigung von punktuellen Quellen (in diesem konkreten Fall Karstquellen) könnten diese Bereiche besser betrachtet und die errechneten Abflussspenden in einen anderen Kontext gebracht werden. Hierdurch würden möglicherweise Pegel ausgewählt werden, welche hier als unplausibel bzw. inkonsistent klassifiziert wurden. Für ein landesweites Niedrigwasser-Frühwarnsystem sollten Punktquellen sowohl in LARSIM als auch bei der Regionalisierung in gleicher Weise berücksichtigt werden.

Im folgenden Pilotgebiet von Rems und Murr liegen zwar keine Karstquellen vor, durch eine Pilotstudie konnte jedoch gezeigt werden, dass der Einfluss von Kläranlagenabflüssen auf das Niedrigwassergeschehen mitunter sehr groß ist. Aus diesem Grund wurde als erweitertes Vorgehen in diesem Gebiet die Kläranlagen als Punktquellen mit berücksichtigt.

Zudem zeigen die Ergebnisse für den Pegel Fuchstobel, dass die ARIMA-Korrektur in ihrer jetzigen Form mitunter negative Auswirkungen auf die Niedrigwasservorhersage und -frühwarnung haben kann. Eine kritische Betrachtung der ARIMA-Korrektur sowie der Modellnachführung mit Blick auf die Niedrigwasserfrühwarnung erscheint daher wünschenswert. Dies kann jedoch nicht im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts erfolgen.

# 5 LARSIM-Niedrigwasser-Modell unter Berücksichtigung von Kläranlagen am Beispiel von Rems und Murr

## 5.1 MOTIVATION

Niedrigwasserabflüsse und deren räumliche Verteilung können in erheblichem Maße durch Abfluss-Punktquellen wie z.B. Karstquellen oder Kläranlagenabläufe beeinflusst werden. So zeigte eine Pilotstudie, die HYDRON im Auftrag der LUBW für das Rems-Murr-Gebiet durchgeführt hat, dass der mittlere Niedrigwasserabfluss in einigen Abschnitten der Rems zu über 50% aus Kläranlagen stammt. In anderen Bereichen tragen Kläranlagen hingegen überhaupt nicht zum Niedrigwasserabfluss bei. Entsprechend können sich die Niedrigwasserabflüsse benachbarter Einzugsgebiete mit ähnlichen naturräumlichen Charakteristika massiv unterscheiden, je nachdem ob sie von relevanten Kläranlagenabflüssen beeinflusst werden oder nicht. Um die Niedrigwasserabflüsse an den Gewässerknoten in den Einzugsgebieten realitätsnah abbilden zu können, ist es also erforderlich, relevante Punktquellen einzubeziehen (LUBW 2012a).

Bei der Niedrigwasser-Frühwarnung werden die mittels LARSIM an bestimmten Gewässerknoten vorhergesagten Abflüsse mit den entsprechenden MNQ-Werten aus der Regionalisierung an diesen Gewässerknoten verglichen (LUBW 2007). Dieser Vergleich zwischen den zeitlich dynamischen LARSIM-Vorhersagen und den statischen Kennwerten aus der Regionalisierung ist die Grundlage dafür, ob eine Niedrigwasser-Frühwarnung ausgesprochen wird oder nicht. Folgerichtig müssen zur bestmöglichen Umsetzung der Niedrigwasser-Frühwarnung die Punktquellen sowohl in LARSIM als auch bei der Regionalisierung berücksichtigt werden.

Um zu untersuchen, wie sich die Berücksichtigung der Punktquellen auf die Niedrigwasser-Frühwarnung auswirkt, bieten sich die Einzugsgebiete von Rems und Murr an (Rems-Murr-Gebiet). Zum einen fallen die Pegel im Rems-Murr-Gebiet dadurch auf, dass sie im operationellen Betrieb recht häufig nachgeführt werden und die Nachführungsfaktoren deutlich von 1,0 abweichen (vgl. Abschnitt 3.2). Dies deutet auf Inkonsistenzen zwischen den Pegeln hin, die zumindest teilweise durch die nicht berücksichtigten Punktquellen bedingt sein könnten. Zum anderen liegen aus der oben genannten Pilotstudie bereits umfangreiche Informationen zu den Kläranlagen im Rems-Murr-Gebiet vor (LUBW 2012a).

Daher bietet es sich an, vor allem folgende Gesichtspunkte am Beispiel des Rems-Murr-Gebiets zu untersuchen:

- Können aus den Jahresabwassermengen (JAWM) und weiteren vorliegenden statistischen Daten der Kläranlagen realistische Ganglinien der Trockenwetterabflüsse (Q<sub>TW</sub>) abgeleitet werden?
- Können diese Q<sub>TW</sub> adäquat in LARSIM und im Regionalisierungsmodell berücksichtigt werden?
- Wird durch die Berücksichtigung der Kläranlagen die räumliche Verteilung der Niedrigwasserabflüsse an den Gewässerknoten realistischer abgebildet?
- Lassen sich durch die explizite, lagetreue Berücksichtigung der Kläranlagen in LARSIM und der Regionalisierung etwaige Unterschiede zwischen beiden Ansätzen verringern (verbesserte Konsistenz zwischen LARSIM und Regionalisierung)?

Um diese Fragen anzugehen, wurde ein exemplarisches LARSIM-Niedrigwassermodell unter Berücksichtigung von Kläranlagen am Beispiel der insgesamt ca. 1 100 km<sup>2</sup> großen Einzugsgebiete von Rems und Murr aufgestellt. Hierzu wurden im ersten Schritt die Trockenwetterabflüsse der 58 Kläranlagen im Gebiet für die Jahre 1991 bis 2011 abgeleitet und als dynamische Ganglinien in das LARSIM-Modell integriert. Zudem wurden die Kläranlagen-Trockenwetterabflüsse bei der Konsistenzprüfung der Pegel anhand der Abflussspenden berücksichtigt. Hierdurch konnte ein konsistentes LARSIM-Modell für das Rems-Murr-Gebiet aufgestellt und unter Berücksichtigung der Kläranlagenabflüsse kalibriert werden. Mit diesem weiterentwickelten Modell wurden anschließend Vorhersagetests durchgeführt und ausgewertet.

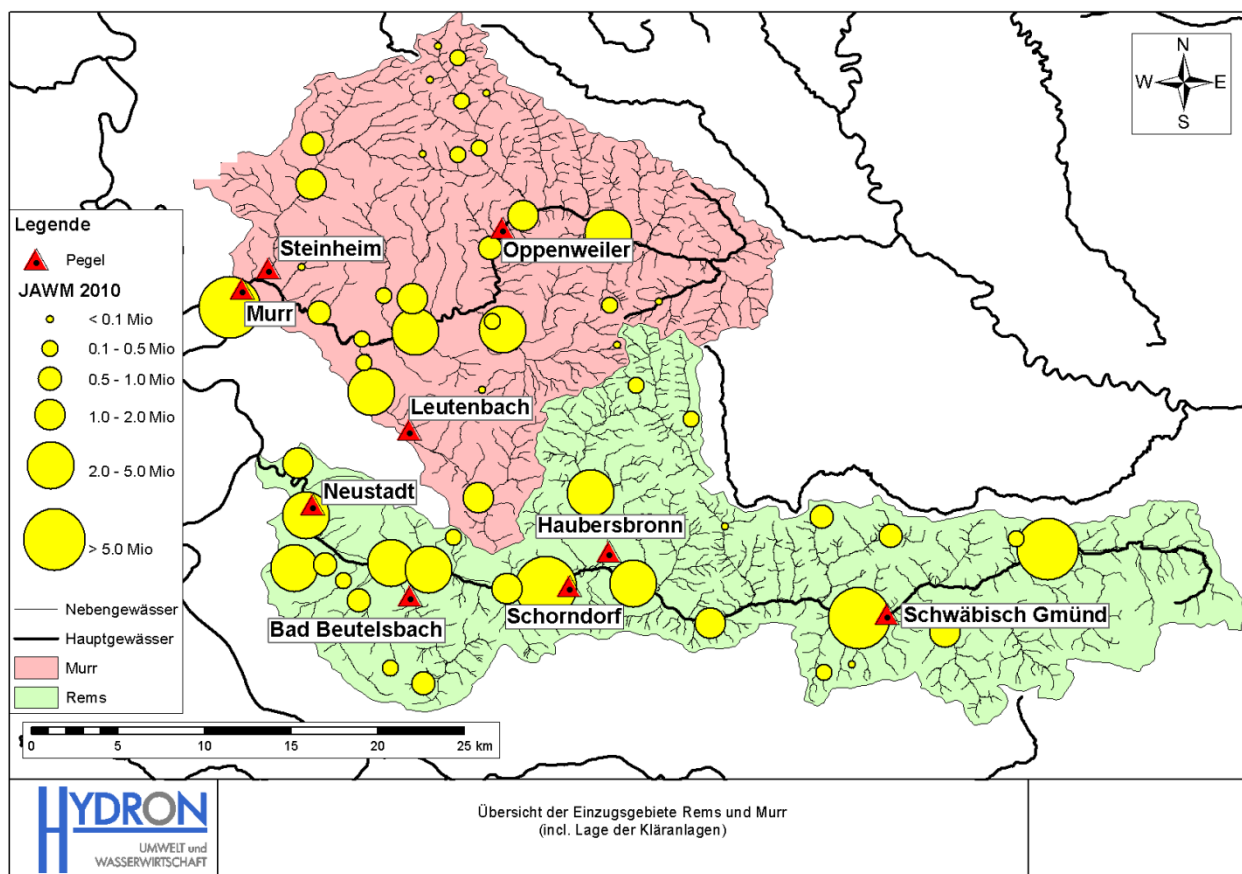
Parallel hierzu wurde auch die Regionalisierung der mittleren Niedrigwasserabflüsse (MNQ) in vereinfachter Weise weiterentwickelt. Hierbei muss betont werden, dass es sich bislang nur um vorläufige Ergebnisse handelt, die jedoch die grundsätzliche Machbarkeit unter Beweis stellen. Hierzu wurden zunächst für alle ca. 1 000 Kläranlagen im Land Baden-Württemberg vereinfachte Kennwerte für die mittleren (Trockenwetter-) Abflüsse und die mittleren (Trockenwetter-) Niedrigwasserabflüsse ermittelt. Diese Kennwerte wurden dann dem KIT (Dr. Ihringer) zur Verfügung gestellt, um hieraus vorläufige MNQ-Kennwerte für die Gewässerknoten im Rems-Murr-Gebiet abzuleiten. Somit stehen für das Rems-Murr-Gebiet nun sowohl ein Niedrigwasser-Vorhersagemodell als auch eine (vorläufige) Niedrigwasserregionalisierung zur Verfügung, die beide den Einfluss von Kläranlagen berücksichtigen.

## **5.2 TROCKENWETTERABFLÜSSE DER KLÄRANLAGEN**

### **5.2.1 GRUNDLAGEN**

Im Rems-Murr-Gebiet liegen insgesamt 58 Kläranlagen mit stark unterschiedlichen Jahresabwassermengen (JAWM). Abbildung 5-1 zeigt das Pilotgebiet Rems (grün) und Murr (rot) mit den potentiell zu verwendenden Pegeln und der Verteilung der Kläranlagen (gelbe Punkte). Die Größe der gelben Punkte stellt die JAWM des Jahres 2010 der jeweiligen Kläranlage dar. Dabei wird deutlich, dass vor allem im Gebiet der Rems etliche Kläranlagen zu finden sind, deren JAWM größer als 2 Mio. m<sup>3</sup> (also größer 63 l/s) ist. In LUBW (2012) konnte gezeigt werden, dass diese Kläranlagen die räumliche Verteilung der Niedrigwasserabflüsse in den Gewässern stark beeinflussen. Somit stellt das Rems-Murr-Gebiet ein geeignetes Testgebiet zur Untersuchung des Einflusses von Kläranlagen dar.

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die aus den JAWM abgeleiteten mittleren Kläranlagenabflüsse nicht geeignet sind, um unmittelbar in der Wasserhaushaltsmodellierung genutzt zu werden. Vielmehr ist in der JAWM unter anderem das über die Kläranlagen abgeführte Niederschlagswasser mit enthalten, welches im WHM LARSIM explizit mit simuliert wird. Der auf versiegelte Flächen fallende Niederschlag wird in LARSIM dabei über einen Direktabflussspeicher dem jeweiligen Vorfluter zugeführt. Daher sollten im WHM LARSIM nur die Trockenwetterabflüsse der Kläranlagen, welche bislang nicht explizit und lagegetreu berücksichtigt werden, als Punktquellen erfasst und integriert werden. Der Niederschlagsanteil am Kläranlagenabfluss wird hingegen weiterhin mit der in LARSIM implementierten Abflussbildung und -konzentration simuliert.



**Abbildung 5-1: Übersicht der Einzugsgebiete Rems und Murr, inklusive der im Gebiet befindlichen Kläranlagen nach Jahresabwassermenge (2010) klassifiziert**

Darüber hinaus unterliegen die Trockenwetterabflüsse (Q<sub>TW</sub>) der Kläranlagen jahreszeitlichen Schwankungen. In den sommerlichen Niedrigwasserphasen weisen auch die Kläranlagen in der Regel geringere Q<sub>TW</sub> auf. Demzufolge sollte für eine bestmögliche Abbildung der Niedrigwasserabflüsse in den Gewässern nicht nur der mittlere jährliche Trockenwetterabfluss der Kläranlagen berücksichtigt werden, sondern der Jahresgang dieses.

Nachfolgend wird daher zunächst die Methodik erläutert, mit der zeitlich dynamische Trockenwetterabflussganglinien für Kläranlagen aus den JAWM und weiteren vorliegenden statistischen Informationen abgeleitet werden können. Zur Ableitung dieser Methode werden neben den für alle Kläranlagen verfügbaren Statistikdaten auch zeitlich hoch aufgelöste Ablaufganglinien für 16 Kläranlagen im Land genutzt, die von der LUBW zur Verfügung gestellt wurden.

Diese Methodik wird dann genutzt, um für die Kläranlagen im Rems-Murr-Gebiet Ganglinien der Trockenwetterabläufe abzuleiten, die in den weiteren Schritten des Projekts genutzt werden.

### 5.2.2 METHODE ZUR ERMITTLUNG DER TROCKENWETTERABFLÜSSE

Im Rahmen der Pilotstudie zur Integration von Kläranlagen in das Wasserhaushaltsmodell LARSIM wurde bereits eine Vorgehensweise zur Ableitung jahresweise konstanter Trockenwetterabflüsse aus den JAWM und weiteren Daten zur Kläranlagenstatistik entwickelt (LUBW 2012a). Bei der Wahl der Methodik lag der Fokus darauf, basierend auf den verfügbaren Daten - insbesondere aus den als verlässlich erachteten Jahresabwassermengen (JAWM) der Kläranlagen - ein möglichst robustes Verfahren abzuleiten, welches die Be-

rücksichtigung der Trockenwetterabflüsse als jahresweise konstante Werte in Simulationen mit dem WHM LARSIM erlaubt.

In Ergänzung zu den Daten, die bereits für die Pilotstudie zur Verfügung standen, konnten von der LUBW zwischenzeitlich zusätzlich Tageswerte der Abläufe der 16 in Tabelle 5-1 aufgeführten Kläranlagen im Land zur Verfügung gestellt werden. Mithilfe dieser Zusatzdaten, konnte die Methodik weiter verbessert werden. Insofern stellt die nachstehend erläuterte Methodik eine Ergänzung und Verbesserung der in LUBW (2012) angewandten Vorgehenseise dar.

**Tabelle 5-1: Als Tageswerte verfügbare Kläranlagenabflüsse**

<b>Kläranlage</b>	<b>Datenverfügbarkeit [Jahre]</b>
Göppingen	13
Schorndorf	3
Kraichtal-Unteröwisheim	8
"Albtal", Waldbronn-Neurod	10
"Murg", Rastatt	10
Pforzheim	6
Baiersbronn-Schönmünzach	9
Görwihl	1
"Oberes Echaztal", Pfullingen	7
Albstadt-Ebingen	12
Salem-Buggensegel	9
Bruchsal	1
"Meckesheimer CENT", Meckesheim	1
Meßkirch	8
"Steinlach-Wiesaz", Gomaringen-Dußlingen	8
"Lauter-Rems", Böbingen	9

**Extrapolation der Jahresabwassermenge**

Die Jahresabwassermengen (JAWM) sind eine zentrale Grundlage der zu ermittelnden dynamischen Trockenwetterabflussganglinien. Für den Zeitraum vor 1997 konnten keine expliziten Angaben zu den Jahresabwassermengen der einzelnen Kläranlagen bereitgestellt werden. Da es ein Ziel war, für den zwanzigjährigen Zeitraum 1991 bis 2010 Trockenwetterabflüsse zur Verfügung zu stellen, mussten für die Jahre 1991 bis 1996 zunächst die JAWM aus den für 1997 bis 2010 vorliegenden JAWM-Daten mit einem einfachen Verfahren extrapoliert werden.

Dazu wurde mithilfe des WHM LARSIM der räumlich gemittelte Jahresniederschlag der Jahre 1991 bis 2010 sowohl für das Rems- als auch für das Murr-Einzugsgebiet ermittelt. Für jede Kläranlage wurde dann ein Faktor aus der mittleren JAWM der Jahre 1997 bis 2010 und der mittleren Niederschlagsmenge desselben Zeitraums berechnet. Dieser Faktor wurde anschließend genutzt, um aus den für die Jahre 1991 bis 1996

bestimmten Jahressummen des Niederschlags die JAWM pro Jahr und Kläranlage für diesen Zeitraum abzuschätzen:

$$JAWM_i = \frac{JAWM_{mean}}{Ngeb_{mean}} \cdot Ngeb_i$$

JAWM <sub>i</sub> :	JAWM für ein extrapoliertes Jahr (i = 1991 ... 1996)
JAWM <sub>mean</sub> :	Mittlere JAWM 1997 bis 2010
Ngeb <sub>i</sub> :	Niederschlag für ein extrapoliertes Jahr (i = 1991 ... 1996)
JAWM <sub>mean</sub> :	Mittlerer Niederschlag 1997 bis 2010

Somit standen für die Kläranlagen im Rems-Murr-Gebiet jahresweise Angaben zur JAWM für den Zeitraum 1991 bis 2010 zur Verfügung.

### **Jahresmittel der Trockenwetterabflüsse**

Die Jahresabwassermengen der Kläranlagen bestehen aus vier Komponenten (vgl. Ruf und Henning 2008, Gujer 2002):

$$JAWM = QH + QG + QNied + QFremd$$

JAWM:	Jahresabwassermenge
QH:	Häusliches Abwasser
QG:	Gewerbliches und industrielles Abwasser
QNied:	Über Kläranlage abgeführtes Regenwasser
QFremd:	Fremdwasser

Das über die Kläranlagen abgeführte Regenwasser wird im WHM LARSIM explizit mit simuliert. Der auf versiegelte Flächen fallende Niederschlag wird in LARSIM dabei über einen Direktabflussspeicher dem jeweiligen Vorfluter zugeführt. Daher sollten im WHM LARSIM nur die Trockenwetterabflüsse der Kläranlagen, welche bislang nicht explizit und lagegetreu berücksichtigt werden, als Punktquellen erfasst und integriert werden. Der Niederschlagsanteil am Kläranlagenabfluss wird hingegen weiterhin mit der in LARSIM implementierten Abflussbildung und -konzentration simuliert.

Die in LARSIM als Punktquellen zu berücksichtigenden Trockenwetterabflüsse bestehen entsprechend aus folgenden Komponenten:

$$QTW = QH + QG + QFremd = JAWM - QNied$$

QTW:	Trockenwetterabfluss
------	----------------------

In den Kläranlagenstatistiken waren kläranlagenspezifische Werte für QH und QG sowie regional differenzierte Faktoren zur Bestimmung des Fremdwasseranteils vorgegeben, die aus Daten des Statistischen Landesamts abgeleitet wurden. Bei einer Ermittlung des QTW über diese Werte ergaben sich jedoch Unplausibi-

litäten. Insbesondere ergaben sich für die Trockenwetterabflüsse häufig größere Werte als für die Jahresabwassermengen.

Daher wurde zur Ermittlung der Trockenwetterabflüsse ein robusteres Verfahren gewählt, das von den als zuverlässig einzustufenden JAWM ausgeht und hiervon das über die Kläranlage abgeführte Niederschlagswasser  $Q_{Nied}$  abzieht. Zur indirekten Bestimmung von  $Q_{Nied}$  wurden die in einem Jahr auf die versiegelten Flächen im Einzugsgebiet jeder Kläranlage fallende Niederschlagsmenge  $Q_R$  sowie kläranlagenspezifische Entlastungsmengen  $Q_E$  genutzt. Beide Größen wurden von der LUBW zur Verfügung gestellt.

Die von versiegelten Flächen abgeleitete Niederschlagsmenge  $Q_R$  setzt sich aus dem über die Kläranlagen abgeleiteten Niederschlagswasser  $Q_{Nied}$  und der über Mischwasserüberläufe entlasteten Niederschlagsmenge  $Q_E$  zusammen.

$$Q_R = Q_{Nied} + Q_E$$

$Q_R$ : von versiegelten Flächen in die Kanalisation abgeleiteter Niederschlag

$Q_E$ : Entlastungsmenge

Daher wurde zur Berechnung des Trockenwetterabflusses wie folgt vorgegangen:

$$Q_{TW} = JAWM - (Q_R - Q_E)$$

Da weder  $Q_R$  noch  $Q_E$  als jahresweise Daten für den gesamten Untersuchungszeitraum zur Verfügung standen, wurde mithilfe der Daten für ein repräsentatives Jahr der Trockenwetterabfluss pro Kläranlage und anschließend der prozentuale Anteil des Trockenwetterabflusses an der zugehörigen Jahresabwassermenge des repräsentativen Jahres ( $F_{Q_{TW}}$ ) bestimmt.

$$F_{Q_{TW}} = Q_{TW} / JAWM$$

$F_{Q_{TW}}$ : relativer Anteil des  $Q_{TW}$  an der JAWM für ein mittleres Jahr

Es wurde weiter davon ausgegangen, dass der für jede Kläranlage einzeln ermittelte Faktor  $F_{Q_{TW}}$  über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant bleibt. Dies stellt eine Vereinfachung dar, die jedoch aufgrund der Datenlage und der angestrebten Genauigkeit vertretbar scheint.

Der für jede Kläranlage spezifisch ermittelte Faktor  $F_{Q_{TW}}$  wurde genutzt, um mithilfe der jahresweise vorliegenden JAWM zunächst eine erste Schätzung des jährlich variierenden Trockenwetterabflusses pro Kläranlage vorzunehmen.

Im Rahmen von LUBW (2012) konnte durch den Vergleich mit Pegelmessungen und die Ableitung von Abflussspenden gezeigt werden, dass die so abgeschätzten jahresweise konstanten Trockenwetterabflüsse der Kläranlagen plausibel sind. Zum damaligen Zeitpunkt lagen jedoch nur an zwei Kläranlagen Tageswerte der Kläranlagenabläufe für je ein Jahr vor.

Durch die nun vorliegenden langjährigen Tageswert-Ganglinien an insgesamt 16 Kläranlagen kann eine weitergehende Überprüfung und eine pauschale Korrektur der oben beschriebenen Abschätzung der jahresweise



konstanten Trockenwetterabflüsse vorgenommen werden. Hierfür wurden für die 16 Kläranlagen die jährlichen Trockenwetterabflüsse mit dem oben beschriebenen Verfahren ermittelt und den gemessenen Trockenwetterabflüssen gegenüber gestellt. Hierbei zeigte sich, dass QTW durch das einfache Schätzverfahren systematisch überschätzt wird. Die Überschätzung liegt zumeist im Bereich von ca. 25%.

Um diese systematische Überschätzung auszugleichen wurde ein einheitlicher Korrekturfaktor  $d$  für die jahresweisen Trockenwetterabflüsse eingeführt, mit dem die rechnerischen QTW an die Messungen der 16 Kläranlagen angepasst wurden. Da die Messwerte der Kläranlagen auch zur Ableitung eines Jahresganges der Trockenwetterabflüsse verwendet wurden, erfolgte die Optimierung des Korrekturfaktors  $d$  im Zuge der unten erläuterten Bestimmung des Jahresganges.

Für die Kläranlagen SKA Löwenstein-Hirrweiler und SKA Lehrhof-Steinheim konnten aufgrund fehlender oder unplausibler Daten kein plausibler Wert für FQTW ermittelt werden. Daher wurde für diese Kläranlagen der Mittelwert der für die übrigen Kläranlagen ermittelten FQTW-Werte genutzt.

### **Vernachlässigung irrelevanter Kläranlagen**

Die Kläranlagen unterscheiden sich hinsichtlich der Höhe des Trockenwetterabflusses sehr stark voneinander. Die für die kleinen Kläranlagen bestimmten Trockenwetterabflüsse liegen teilweise unter 1 l/s, während der höchste Trockenwetterabfluss 304 l/s (SKA Schwäbisch Gmünd) beträgt. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass die größeren abflussstarken Kläranlagen das Niedrigwassergeschehen im Gewässersystem deutlich beeinflussen, während viele kleinere Kläranlagen mit Trockenwetterabflüssen unter 1 l/s keine spürbare Wirkung auf das Abflussgeschehen haben.

Im vorliegenden Projekt wurden Kläranlagen mit sehr niedrigen Abflussmengen vernachlässigt. Dabei wurde die maximale JAWM aller vorliegenden Jahre als Kriterium herangezogen. Kläranlagen deren maximale JAWM  $< 1$  l/s war, wurden nicht berücksichtigt. Dem lag die Überlegung zugrunde, dass bei einer Regionalisierung auf eine Flächengröße von ca. 10 km<sup>2</sup> und einer minimalen Niedrigwasserspense von ca. 1 l/s durch den Wegfall solcher Kläranlagen ein Fehler auftritt, der weniger als 10% der minimalen Niedrigwasserspense beträgt (sofern nicht mehrere Kläranlagen eine solche Fläche beeinflussen). Von den 58 Kläranlagen im Rems-Murr-Gebiet fielen durch die Anwendung dieses Kriteriums 5 Kläranlagen weg (Göppingen-Lenglingen Teichanlage, SKA Lehrhof-Steinheim, SKA Sulzbach-Kleinhöchberg, SKA Backnang-Horbach, SKA Beilstein-Stocksberg).

### **Korrekturfaktor für QTW und Jahresgänge der Trockenwetterabflüsse**

Die zwischenzeitlich vorliegenden Tageswert-Ganglinien ausgewählter Kläranlagen konnten zur weiteren Verbesserung bei der Bestimmung von Kläranlagen-Trockenwetterabflüssen genutzt werden.

Zum einen weisen die nach obiger Beschreibung abgeschätzten jahresweisen QTW erhebliche Unsicherheiten auf. Die QTW-Schätzwerte können nun quantitativ mit den Messungen an den Kläranlagen verglichen und mit einem Faktor korrigiert werden.

Zum anderen stellt die Annahme eines jahresweise konstanten Trockenwetterabflusses eine deutliche Vereinfachung dar. Es ist davon auszugehen, dass die Trockenwetterabflüsse in der Realität einen Jahresgang aufweisen. Diese saisonalen Schwankungen werden u.a. durch den jahreszeitlich variierenden Anteil von Fremdwasser am Kläranlagenabfluss ausgelöst. Daher ist davon auszugehen, dass der Jahresgang des Trockenwetterabflusses je nach Anteil des Fremdwassers an der Jahresabwassermenge einer Kläranlage unter-

schiedlich stark ausgeprägt ist. Anhand der zeitlich hoch aufgelösten Daten können nun typische Jahrgänge der Trockenwetterabflüsse abgeleitet werden.

Der Korrekturfaktor  $d$  für QTW und die Jahrgänge der Trockenwetterabflüsse wurden in einem Zuge ermittelt, weshalb das Vorgehen für beides nachfolgend gemeinsam erläutert wird.

Für die Bearbeitung lagen Tageswerte von insgesamt 16 Kläranlagen vor, die sich größtenteils nicht in den Einzugsgebieten von Rems oder Murr befinden. Die vorhandenen Tageswertdaten des Kläranlagenabflusses deckten unterschiedlich lange Zeiträume ab. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick der genutzten Abflussdaten.

Die Tageswerte der Kläranlagenabflüsse beinhalten wie die Jahresabwassermengen das über die Kläranlagen abgeführte Niederschlagswasser. Im ersten Schritt mussten daher aus diesen Daten Tageswerte des Trockenwetterabflusses abgeschätzt werden. Die Daten wurden gefiltert, um kurze, aus Niederschlagsereignissen entstehende Abflussspitzen zu eliminieren. Dazu wurde ein gleitendes Minimum der Kläranlagenabflussdaten gebildet. Das gleitende Minimum wurde dabei jeweils für einen Zeitraum von 21 Tagen berechnet. Diese gleitenden Minima wurden anschließend als gemessene Trockenwetterabflüsse verwendet.

Zunächst wurden für die 16 Kläranlagen nach oben beschriebenem Verfahren - und soweit noch nicht vorhanden - die jahresweise konstanten Trockenwetterabflüsse als Grundlage für die zu bestimmende Sinusschwingung berechnet. Eine Extrapolation der Jahresabwassermengen war dabei nicht notwendig, da sich die benötigten Jahresabwassermengen jeweils aus den Jahressummen der vorhandenen Tageswerte ergaben.

Dabei wurde davon ausgegangen, dass der Jahrgang dieser Trockenwetterabflüsse unter Nutzung einer Sinusschwingung mit einer Periodendauer von 365 Tagen annähernd abgebildet werden kann. Die Schwingung hat die Form:

$$QTW_d = a \cdot \sin(b \cdot (x + c)) + d \cdot QTW$$

a:	Amplitude
b:	Periodendauer (hier: $2\pi/365$ )
x	Tag im Jahr
c:	Phase
d:	Korrekturfaktor für QTW
QTW:	Jahresmittelwert des Trockenwetterabflusses

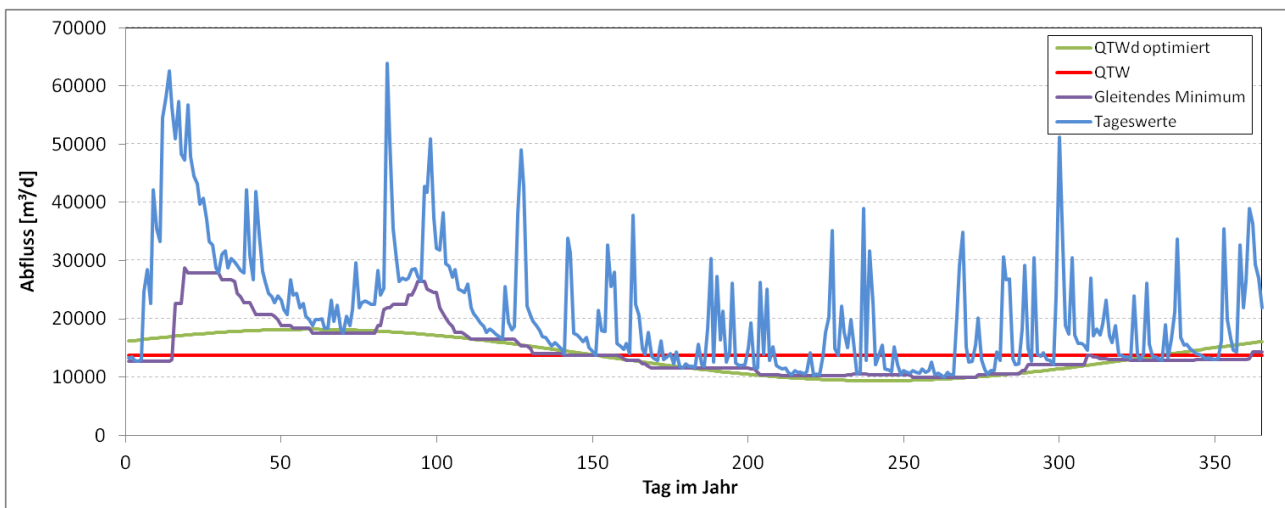
Der Korrekturfaktor (Verschiebung in y-Richtung), die Phase und die Amplitude wurden anhand der vorhandenen Tageswertdaten automatisch optimiert.

Wie oben bereits beschrieben, weisen die aus den Statistiken abgeleiteten jahresweisen Trockenwetterabflüsse QTW eine plausible Größenordnung auf. Im Vergleich mit den jetzt vorliegenden Tageswerten verschiedener Kläranlagen über längere Zeiträume erwiesen sich die jahresweise konstanten Trockenwetterabflüsse und damit die Jahresmittelwerte der abgeleiteten Trockenwetterabflüsse mit Jahrgang tendenziell als zu hoch. Auf Grundlage der nun vorliegenden langjährigen Messungen an mehreren Kläranlagen konnte diese systematische Überschätzung von QTW mithilfe eines Korrekturfaktors ausgeglichen werden.

Hierfür wurde der Korrekturfaktor  $d$  automatisch optimiert. Der Korrekturfaktor  $d$  wurde als einheitlicher Wert für alle Kläranlagen abgeleitet, um die Übertragung der abgeleiteten Schwingung auch auf Kläranlagen ohne Tagesmesswerte zu ermöglichen. Dazu wurde der Wert zunächst für alle Kläranlagen einzeln optimiert. Der Mittelwert aus diesen optimierten Korrekturfaktoren wurde dann als repräsentativ für alle Kläranlagen betrachtet.

Dieselbe Vorgehensweise wurde zur Bestimmung des Parameters  $c$ , welcher die Phasenverschiebung der Schwingung definiert, angewendet. Die Amplitude der Schwingung wurde hingegen für jede Kläranlage einzeln optimiert.

Abbildung 5-2 zeigt beispielhaft für ein Jahr einen mithilfe dieser automatisierten Anpassung berechneten Jahrgang des Trockenwetterabflusses. Es ist erkennbar, dass durch den angepassten Jahrgang der Trockenwetterabfluss der Kläranlage gut nachvollzogen werden kann. Insbesondere die niedrigen Trockenwetterabflüsse im Sommer werden deutlich besser abgebildet, als dies unter Nutzung eines jahresweise konstanten Wertes möglich wäre.



**Abbildung 5-2: Beispielhafter Vergleich des Gesamtabflusses, des gleitenden Minimums, dem mittleren Trockenwetterabflusses und dem angepassten Jahrgang des Trockenwetterabflusses für die Kläranlage Pfellingen im Jahr 2004**

Insgesamt können unter Nutzung der beschriebenen Schwingung die Trockenwetterabflüsse an allen Kläranlagen gut nachvollzogen werden. Es ergibt sich zumeist eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu den konstanten Trockenwetterabflüssen. Für Kläranlagen mit einem sehr gering ausgeprägten Jahrgang ist die erzielte Verbesserung naturgemäß gering.

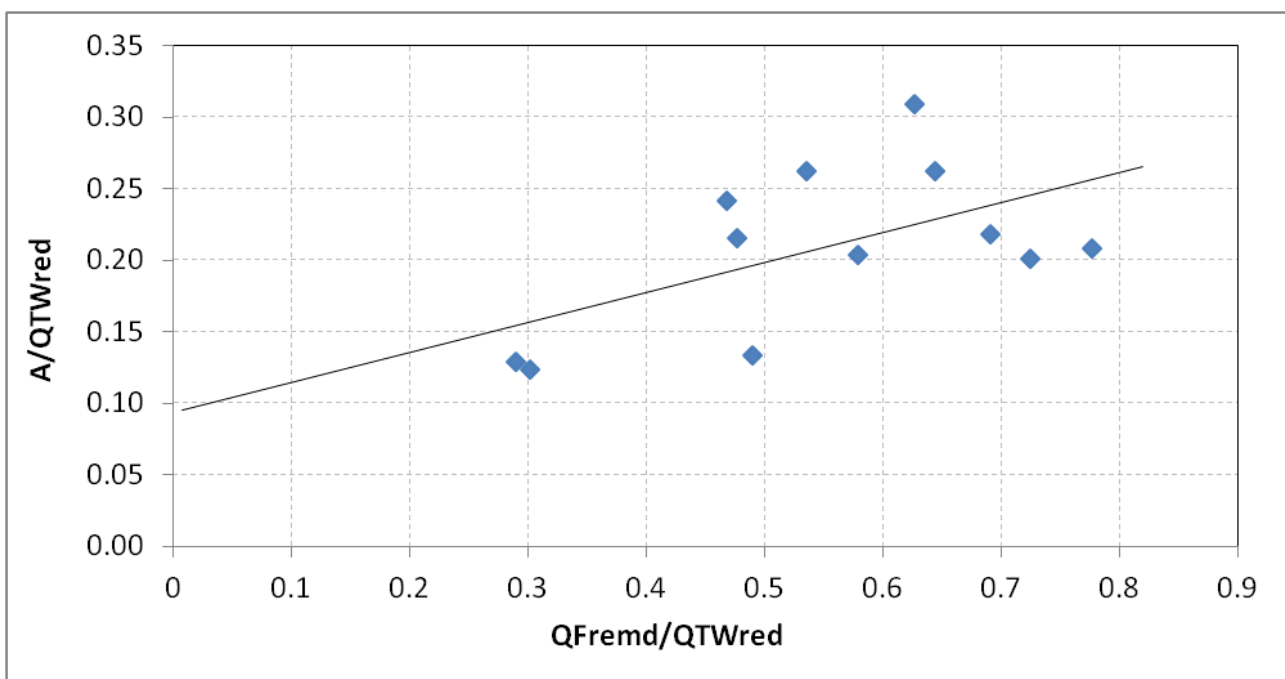
### Amplitude der Jahresschwingung

Um auch für Kläranlagen ohne Tageswertmessungen Amplituden des Jahrgangs abschätzen zu können, wurde davon ausgegangen, dass ein verallgemeinerbarer mathematischer Zusammenhang zwischen der Amplitude des Jahrgangs des Abflusses und dem spezifischen Fremdwasseranteil einer Kläranlage besteht. Bei der Analyse der optimierten Parameterwerte für die Amplitude  $a$  zeigte sich, dass die Amplitude verhältnismäßig größer ausfällt, wenn die Optimierung über sehr wenige Jahre durchgeführt wird. Es muss davon ausgegangen werden, dass diese Amplitude nicht für längere Zeiträume von mehreren Jahren repräsentativ

ist. Daher wurden 4 Kläranlagen mit einer Datenverfügbarkeit von 3 Jahren oder weniger nicht zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Amplitude und Fremdwasser herangezogen.

Der Zusammenhang für die restlichen Kläranlagen ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Die Korrelation erwies sich als statistisch schwach ( $R^2=0,33$ ). Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Ausprägung des Jahresgangs durch weitere Faktoren gesteuert wird. Außerdem wurde der zur Berechnung der Beziehung genutzte Fremdwasseranteil mithilfe der Industrie- und Haushaltsabwassermengen ( $Q_G$  und  $Q_H$ ) für ein einzelnes Jahr bestimmt. Möglicherweise sind die Mengen nicht repräsentativ für einen längeren Zeitraum. Dennoch wurde die Nutzung der Korrelation der Alternative vorgezogen, eine festgelegte, mittlere Amplitude für alle Kläranlagen zu bestimmen.

Die Amplitude der saisonalen Sinusschwingung lässt sich somit gemäß der in Tabelle 5-2 dargestellten Gleichung als Funktion des Fremdwasseranteils abbilden.



**Abbildung 5-3: Zusammenhang zwischen Amplitude und Fremdwasseranteil**

### 5.2.3 BERECHNUNG VON GANGLINIEN DER TROCKENWETTERABFLÜSSE

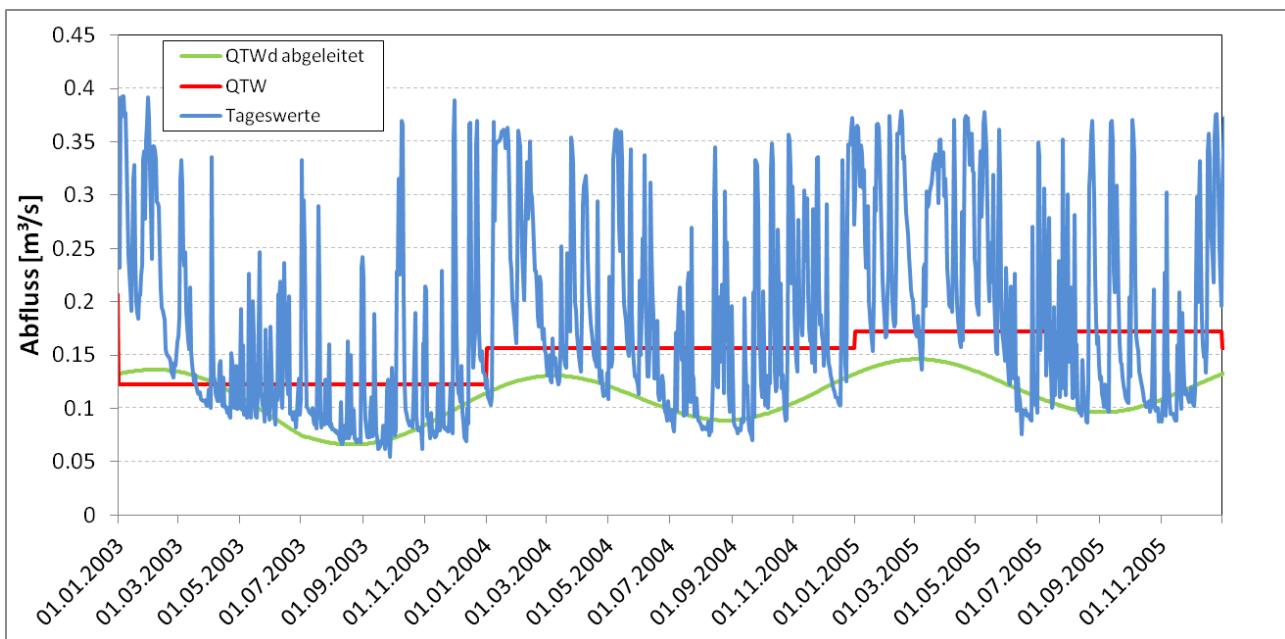
Mithilfe der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Methodik können Tageswertganglinien der Trockenwetterabflüsse für alle Kläranlagen in Baden-Württemberg abgeleitet werden. Hierzu wird zunächst der jahresweise QTW aus den JAWM und weiteren statistischen Daten der Kläranlagen berechnet. Hierauf aufbauend können dann Tageswerte der Trockenwetterabflüsse (QTWd) unter Berücksichtigung der Sinusschwingung und des Korrekturfaktors berechnet werden, wobei die Parameterwerte aus Tabelle 5-2 zu verwenden sind. Die Amplitude  $a$  der Jahresschwingung ist dabei eine Funktion des Fremdwasseranteils.

**Tabelle 5-2: Parameterwerte für die Sinusschwingung und den Korrekturfaktor.**

Parameter	Wert
c	32
d	0.72
a	$0.21 \cdot Q_{\text{Fremd}} + 0.09 \cdot Q_{\text{TW}} \cdot d$

Die JAWM und somit die QTW der Kläranlagen können sich von Jahr zu Jahr merklich unterscheiden. Somit würden sich auch in den abgeleiteten Trockenwetterabflüssen mit Jahrgang (QTWd) Sprünge zwischen den Jahren ergeben, wenn für jedes Jahr der jeweils spezifische mittlere QTW angesetzt würde. Daher wird für jeden Tag ein gleitendes Mittel des Wertes QTW über jeweils ein Jahr (182 Tage vor und 182 Tage nach dem jeweiligen Tag) berechnet. Dieser gleitende QTW wird dann zur Berechnung von QTWd verwendet. Hierdurch ist ein allmählicher, gleitender Übergang zwischen den Jahren gewährleistet.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden Sinusschwingungen auf die gleitenden Mittel der bereits vorliegenden jahresweisen Trockenwetterabflüsse der Kläranlagen im Rems-Murr-Gebiet aufgeprägt. Die Überprüfung der abgeleiteten Werte anhand der vorhandenen Tageswerte ergab gute Ergebnisse. Gegenüber den Jahresmittelwerten für QTW ergeben sich teilweise deutliche Verbesserungen. Dies ist für die größte Kläranlage im Rems-Murr-Gebiet, die Kläranlage Böbingen, beispielhaft in Abbildung 5-4 dargestellt.



**Abbildung 5-4: Vergleich der Tageswerte, der Jahreswerte des Trockenwetterabflusses und der Trockenwetterabflüsse mit dem Jahrgang für die Kläranlage Böbingen**

### 5.3 BERÜCKSICHTIGUNG DER KLÄRANLAGEN IM MODELL

Zur Einbindung der bestimmten Kläranlagenabflüsse musste LARSIM um die Option VERZWEIGUNG EINLEITUNGSGANGLINIE mit der Möglichkeit zum Einlesen von SYN-Dateien erweitert werden. Auf diese Weise wird es möglich, für jede Kläranlage eine Datei im SYN-Format bereitzustellen. Diese werden im Datensatz 12 in der Steuerdatei (<tape10>) über ihren Namen teilgebietsgenau eingelesen. Auch andere Punktquellen können auf diese Weise berücksichtigt werden. Die Auflösung der Einleiterdaten kann damit stundengenau angegeben werden und könnte somit für Karstquellen oder andere Einleiter verwendet werden.

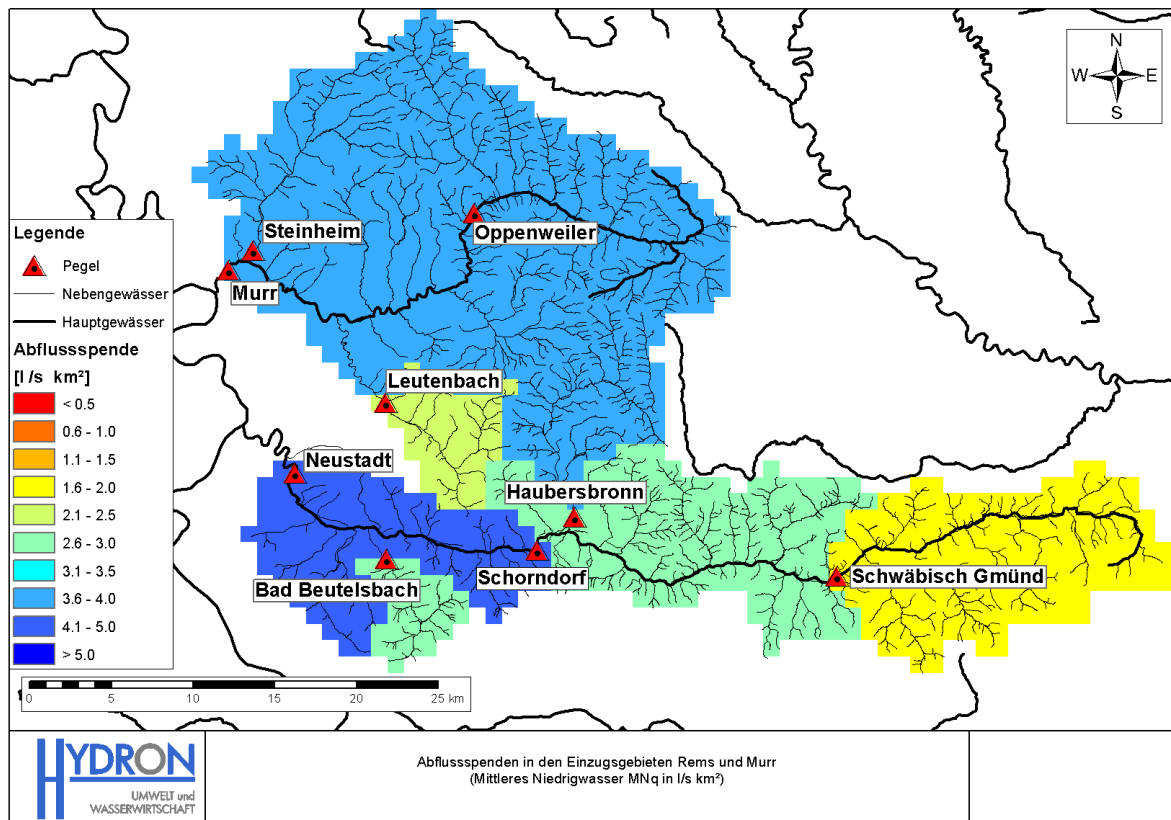
Die Kläranlagen im Rems-Murr-Gebiet wurden gemäß ihrer Lage im Gebiet und ihrer jeweiligen Vorfluter im LARSIM-Modell verdrahtet. Die mit der oben beschriebenen Methode ermittelten Ganglinien der Trockenwetterabflüsse wurden für den gesamten Zeitraum von 1991 bis 2011 vorgegeben. Dadurch werden die Trockenwetterabflüsse aller als relevant erachteten Kläranlagen lagegetreu und mit plausiblen Mengen unter Einbeziehung des Jahresganges im Modell berücksichtigt.

### 5.4 KONSISTENZPRÜFUNG ANHAND DER ABFLUSSSPENDEN

Analog zu dem Vorgehen beim WHM Bodensee wurde im Vorfeld der Kalibrierung und Modellerstellung eine Konsistenzprüfung der im Gebiet vorhandenen Pegel durchgeführt. Anhand der vorplausibilisierten Messdaten an den Pegeln (siehe Kap. 3.1) wurden Niedrigwasserabflussspenden für die jeweiligen Pegelkontrollbereiche berechnet. Im Vergleich zu den ermittelten Abflussspenden beim WHM Bodensee ist in den Einzugsgebieten von Rems und Murr die Streubreite der Abflussspenden geringer. Die minimalen Werte liegen bei 1.7 l/(s·km<sup>2</sup>) bei Schwäbisch Gmünd im Osten des Gebietes und 4.9 l/(s·km<sup>2</sup>) bei Neustadt. Die ermittelten Abflussspenden aller Pegelkontrollbereiche sind in der Tabelle 5-3 aufgeführt und als flächenhafte Darstellung in Abbildung 5-5.

**Tabelle 5-3: Abflussspenden der Pegelkontrollbereiche im Einzugsgebiet von Rems und Murr. Dargestellt ist die Gesamtabflussspende MNq und die flächenbürtige sowie kläranlagenbürtige Abflussspende MNq fl bzw. MNq kl mit und ohne Berücksichtigung des Pegels Schwäbisch Gmünd**

STANDORT	Gewässer	Gesamt	Mit Schw. Gmünd		Ohne Schw. Gmünd	
		MNq [l/(s·km <sup>2</sup> )]	MNq fl [l/(s·km <sup>2</sup> )]	MNq kl [l/(s·km <sup>2</sup> )]	MNq fl [l/(s·km <sup>2</sup> )]	MNq kl [l/(s·km <sup>2</sup> )]
Schw.-Gmünd	Rems	1.7	1.1	0.68	-	-
Haubersbronn	Wieslauf	4.0	3.5	0.54	3.5	0.54
Schorndorf	Rems	2.9	1.5	1.4	1.3	1.0
Beutelsbach-Bad	Schweizerbach	2.6	2.1	0.51	2.1	0.51
Neustadt	Rems	4.9	2.1	2.8	2.1	2.8
Oppenweiler	Murr	3.7	3.3	0.39	3.3	0.39
Leutenbach	Buchenbach	2.3	1.9	0.50	1.9	0.50
Steinheim	Bottwar	3.9	3.5	0.46	3.5	0.46
Murr	Murr	4.0	2.9	1.1	2.9	1.1



**Abbildung 5-5: Flächenhafte Darstellung der Niedrigwasser-Abflussspende in den Einzugsgebieten Rems und Murr**

Da in diesem Gebiet besonders auf die Wirkung der Kläranlagen eingegangen werden sollte, wurden diese explizit bei der Ermittlung der Abflussspenden berücksichtigt. Dazu wurden die ermittelten Trockenwetterabflüsse der Kläranlagen innerhalb eines Pegelkontrollbereiches zu einer virtuellen Ganglinie der kläranlagenbürtigen Abflüsse aufsummiert (Qkl). Für den Zeitbereich 1991 bis 2010 wurde anhand dieser Qkl ein mittlerer kläranlagenbürtiger Niedrigwasserabfluss (MNQ kl) für jeden Pegelkontrollbereich bestimmt. Abbildung 5-6 zeigt die kläranlagenbürtigen Abflussspenden (MNq kl) für die Einzugsgebiete Rems und Murr (siehe auch Tabelle 5-3).. Besonders zu erwähnen ist Bereich zwischen Schorndorf und Neustadt. Dort steigt der MNq kl auf 2.83 l/(s·km<sup>2</sup>) und ist damit zu 57 % am Niedrigwasserabfluss beteiligt.

Für die Bestimmung des flächenbürtigen Abflusses (Qfl) wurde der zuvor ermittelte kläranlagenbürtige Abfluss (Qkl) von jeder gemessenen Ganglinie eines Pegels abgezogen:

$$Q_{fl} = Q_{mess} - Q_{kl}$$

Für jeden Pegelkontrollbereich wiederum wurde anhand dieser neuen Ganglinie der mittlere flächenbürtige Niedrigwasserabfluss und daraus schließlich die flächenbürtige Niedrigwasserabflussspende (MNq fl) ermittelt. Damit sollte bei der Konsistenzprüfung der Pegel die Wirkung anthropogener Einflüsse durch die Kläranlagen behoben werden. Die ermittelten Abflussspenden geben das tatsächliche landschaftsrauminduzierte Abflussverhalten wieder. Die flächenbürtigen Niedrigwasserabflussspenden sind teilweise deutlich niedriger als die anhand der Pegeldata ermittelten Abflussspenden (vgl. Abbildung 5-7). Im Bereich von Schwäbisch Gmünd sinkt die Spende auf 1.07 l/(s·km<sup>2</sup>) während sie sich bei Neustadt auf 2.10 l/(s·km<sup>2</sup>) verringert.

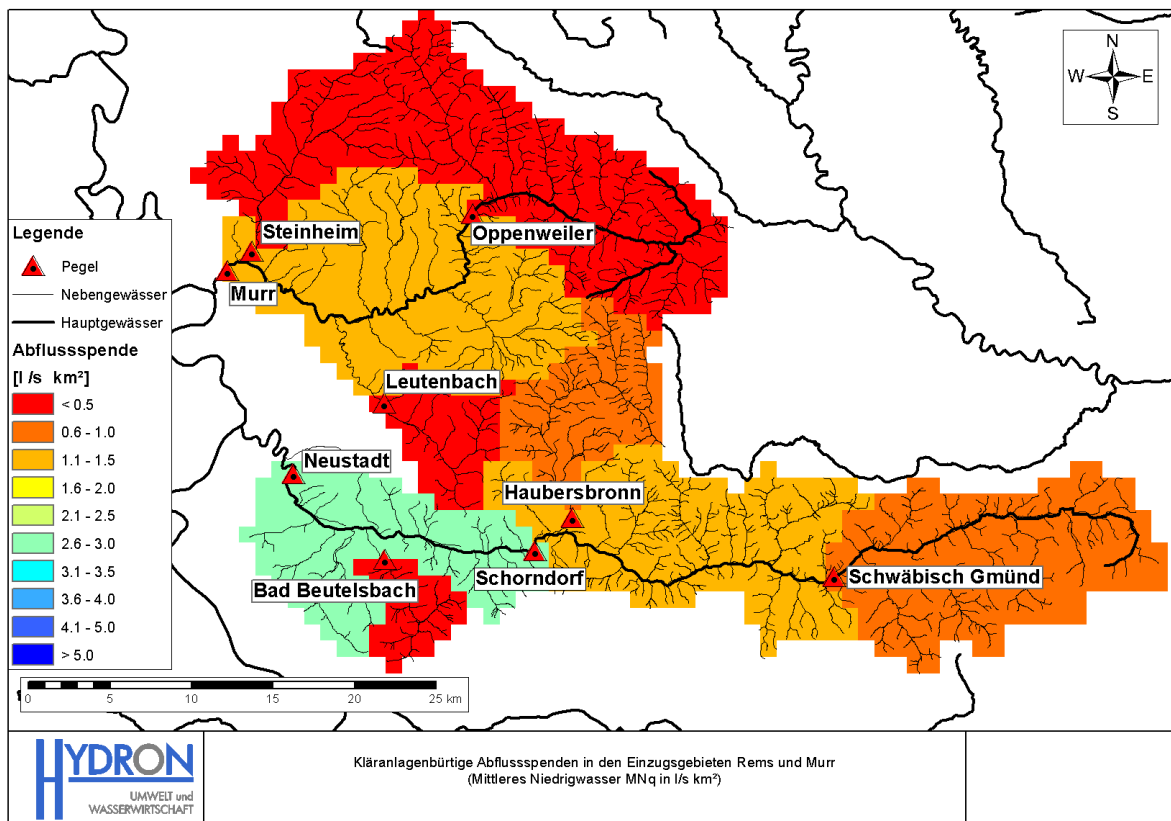


Abbildung 5-6: Flächenhafte Darstellung der kläranlagenbürtigen Niedrigwasser-Abflusspende in den Einzugsgebieten Rems und Murr

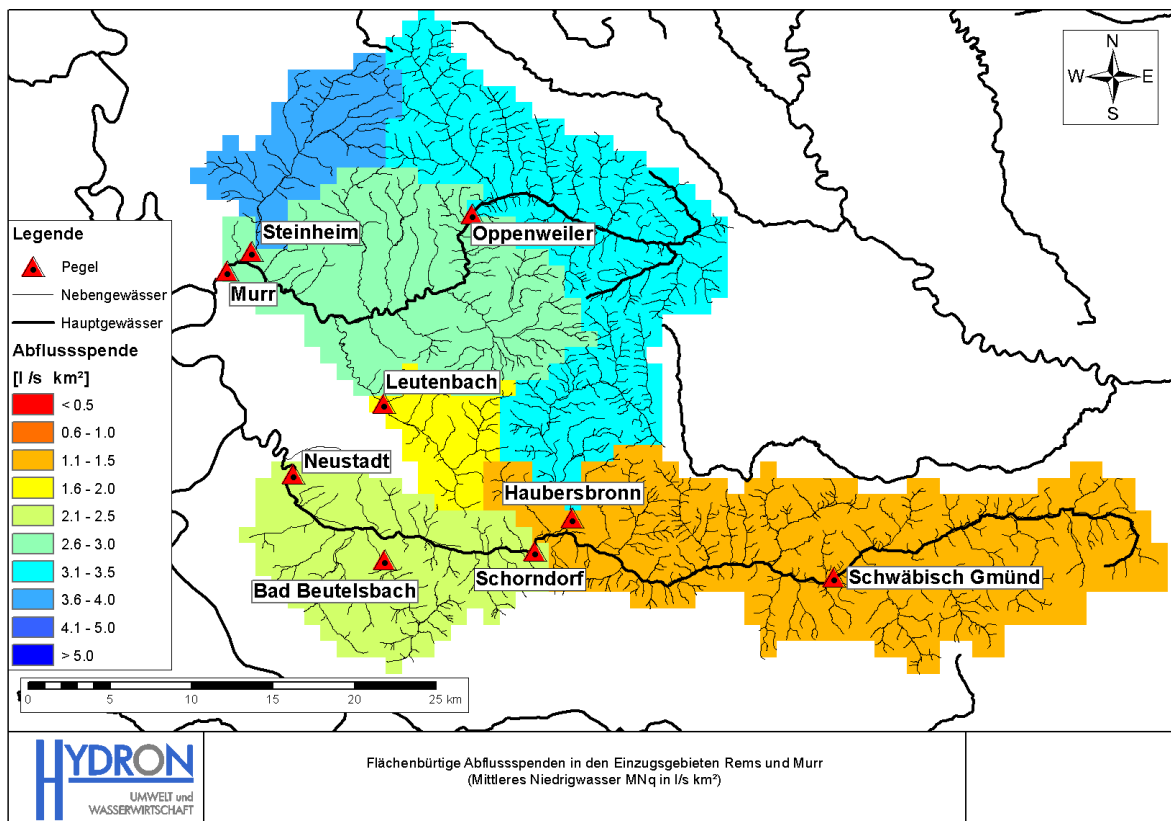


Abbildung 5-7: Flächenhafte Darstellung der flächenbürtigen Niedrigwasser-Abflusspende in den Einzugsgebieten Rems und Murr (finales Setup, ohne Berücksichtigung des Pegels Schwäbisch Gmünd)



Einzelne Pegel der kleinen Nebengewässer, an denen nur kleine Kläranlagen zu finden sind, verändern sich nur im kleinen Rahmen. So sinkt die Spende des Pegelkontrollbereiches Haubersbronn von 3.99 auf 3.47 l/(s·km<sup>2</sup>).

Aufgrund der deutlich niedrigeren Abflussspende des Pegels Schwäbisch Gmünd (1.07 l/(s·km<sup>2</sup>)) wurde dieser Pegel als unplausibel betrachtet. Damit wurde ein deutlich homogeneres Bild erzeugt. Die als zuverlässig eingestuften Pegel (siehe Tabelle 5-4) wurden im Folgenden zur Erstellung des Niedrigwasserfrühwarnmodells Rems-Murrgebiet verwendet.

**Tabelle 5-4: Zusammenstellung nach der Konsistenzprüfung als zuverlässig eingestuften Pegel für die Einzugsgebiete von Rems und Murr**

STANDORT	Gewässer	PKB-Größe [km <sup>3</sup> ]	MNQ [m <sup>3</sup> /s]	MNq [l/(s·km <sup>2</sup> )]
Haubersbronn	Wieslauf	75	0.26	3.5
Schorndorf	Rems	342	0.69	1.3
Beutelsbach-Bad	Schweizerbach	29	0.06	2.1
Neustadt	Rems	124	1.0	2.1
Oppenweiler	Murr	182	0.60	3.3
Leutenbach	Buchenbach	43	0.08	1.9
Steinheim	Bottwar	74	0.26	3.5
Murr	Murr	206	1.5	2.9

## 5.5 KALIBRIERUNG

In den vorhergehenden Schritten wurden sowohl die zu verwendenden Pegel ausgewählt, als auch die Erstellung der Einleiterdateien zur Berücksichtigung der Kläranlagen im Gebiet erläutert. Hierdurch wird es notwendig die Pegel im Gebiet nachzueichen bzw. neu zu eichen. In beiden Gebieten von Rems und Murr wurden kleinere Kopfpegel mit in das Modell aufgenommen, die bisher nicht berücksichtigt wurden. Da sich die Simulationsqualität der Kopfpegel direkt auf die Unterliegerpegel mit auswirkt, werden auch diese nachge-eicht.

Die Hinzunahme von neuen Pegeln im Gebiet macht es notwendig, eine deutlich aufwendigere Kalibrierung durchzuführen. In allen Fällen wurde die Bilanz, also das Verhältnis aus simuliertem zum gemessenen Abfluss, über den Korrekturfaktor für das Wasserdargebot gesteuert und nicht wie sonst üblich, über den Korrekturfaktor für den Niederschlag. Diese Besonderheit lässt sich damit begründen, dass durch das Einleiten der KLA-Abflüsse direkte Einflussnahme am Wasserdargebot vorgenommen wird (vgl. LUBW 2012a). Da die KLA-Daten darüber hinaus auch eine Schwingung enthalten, wirkt sich dies auch auf die simulierte Abflusssdynamik an den Pegelstandorten aus.

Bei der Kalibrierung wurden in erster Linie die für den Niedrigwasserbereich maßgeblichen Eichparameter angepasst. Auch der Mittelwasserbereich wurde, insbesondere im Bereich der auslaufenden Äste betrachtet.

Die Hochwasserspitzen wurden hingegen nicht berücksichtigt, so dass die ermittelten Eichparameter nicht in das Modell zur Hochwasserfrühwarnung übernommen werden sollten.

Insgesamt konnten gute Kalibrierungsergebnisse erzielt werden. Bei der Kalibrierung wurde der Zeitraum 01.01.1997 bis 31.12.2011 berücksichtigt. Neben der Betrachtung der standardmäßig ausgegebenen Gütemaße wurde auch der MNQ der Simulation mit der der Messung verglichen. Hierbei wurde versucht eine möglichst gute Übereinstimmung zu erzielen. In allen Fällen konnte die Abweichung in einem Bereich von unter 10% gehalten werden. In den meisten Fällen zeigten sich Unterschiede von unter 5%.

Insgesamt gestaltete sich die Kalibrierung im Bereich der Rems deutlich aufwändiger. Hier ist auch der größere Einfluss durch Kläranlagenzuflüsse zu verzeichnen. Insbesondere die Abbildung der Dynamik zeigte sich dabei als tückisch, da sich diese jahresweise verändern kann. Insbesondere der NQ schwankt zwischen den einzelnen Jahren erheblich, wobei Tendenzen nur schwer auszumachen sind. An der Murr konnten die Dynamiken an den Pegelstandorten besser nachvollzogen werden.

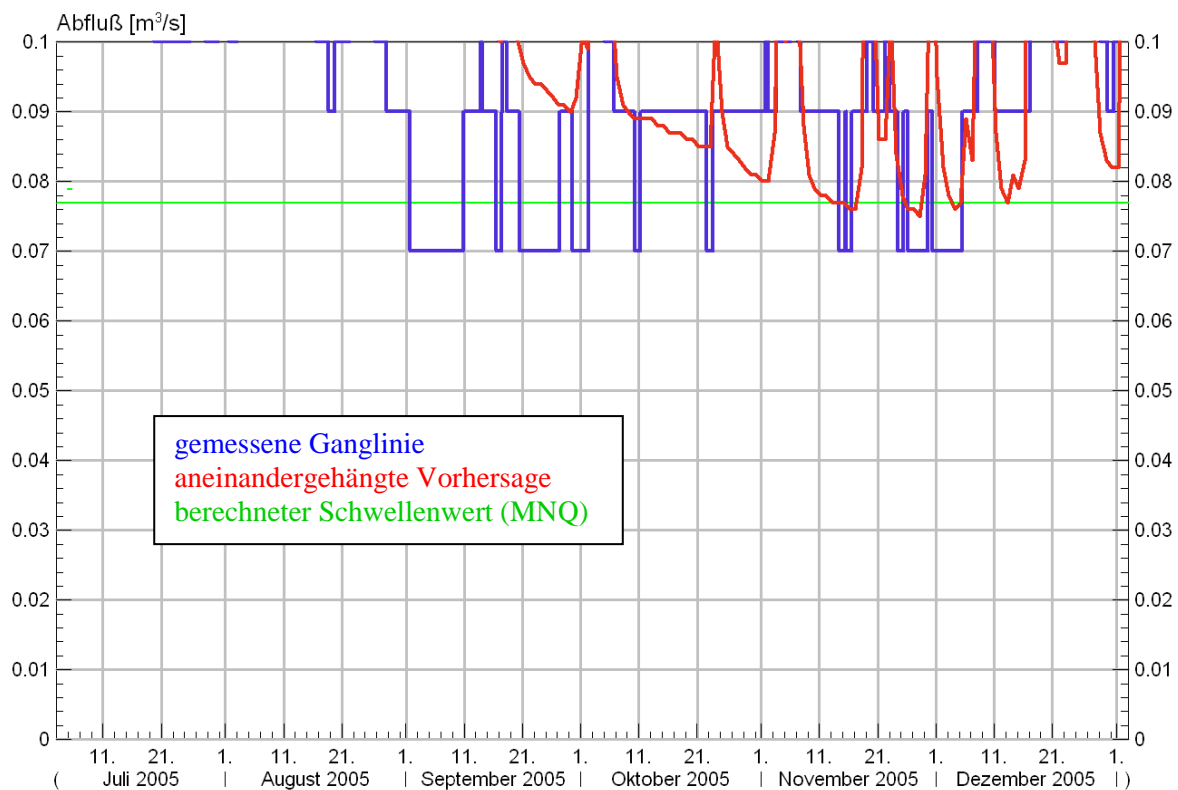
## **5.6 VORGEHENSWEISE BEI DURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG DER VORHERSAGETESTS**

Nach Abschluss der Kalibrierung wurden Vorhersagetests für den Zeitraum 01.01.1997 bis 31.12.2011 durchgeführt. Es wurde hierbei eine tägliche Vorhersage gerechnet, da bei Niedrigwasserereignissen, anders als im Hochwasserfall, nicht mit plötzlichen Veränderungen des Abflussgeschehens gerechnet werden muss. Bei diesen Tests wird ausgewertet, ob und in welchem Maße sich die Vorhersagequalität des neu aufgestellten Modells im Vergleich zum ursprünglich verwendeten operationellen Vorhersagemodell verändert. Im ursprünglichen Modell wurden dabei die neu eingefügten Pegel nicht mit in das Modell integriert, aber mit ausgegeben. Auf diese Weise wird das Setup hier beibehalten, es kann aber dennoch die Qualität am Pegelstandort betrachtet werden.

Für das neu aufgestellte Modell wurden entsprechend die als ungeeignet definierten Pegel aus dem Setup entfernt und die ARIMA-Korrektur, sowie die Nachführung an den neu hinzugenommenen Pegeln aktiviert.

Die Vorhersagetests werden mit Hilfe des Programms ProFoUnD ausgewertet. Es wurde speziell für die Auswertung von Vorhersagetests entwickelt und für den aktuellen Fall der Niedrigwasserfrühwarnung entsprechend angepasst (Haag & Aigner 2013, Haag et al. 2013). Die Auswertung erfolgte dabei in gleicher Weise wie für das Bodenseegebiet beschrieben (Abschnitt 4.5).

Hierbei ist zu beachten, dass zur Ermittlung der kategorischen Güte MNQ als Schwellenwert verwendet wurde. Um Fehlauswertungen zu vermeiden, wurde der vorzugebende Schwellenwert dabei an die Niedrigwasser-Messgenauigkeit am jeweiligen Pegel angepasst. Am Pegel Beutelsbach-Bad lässt sich dies besonders gut erläutern (Abbildung 5-8). In hellgrün ist der berechnete Schwellenwert von 0,077 zu erkennen. Die Messung (blaue Ganglinie) schwankt dabei über etwa 3 Monate hinweg zwischen den Werten 0,09 m<sup>3</sup>/s und 0,07 m<sup>3</sup>/s und weist somit nur eine Genauigkeit von 0,02 m<sup>3</sup>/s auf. Die Vorhersage zeigt zumeist eine sehr geringe Abweichung von der Messung. Durch das sprunghafte Verhalten der Messung ist die Qualität der Vorhersage jedoch schwer zu beurteilen. In diesem Fall wurde der Schwellenwert daher auf 0,09 m<sup>3</sup>/s nach oben korrigiert.



**Abbildung 5-8: Vorhersage und Messung am Pegel Beutelsbach-Bad**

In allen Ergebnisgrafiken wird jeweils das ursprüngliche (alte) Modell, welches vorrangig zur Vorhersage von Hochwasserereignissen verwendet wurde, mit dem neu erstellten Vorhersagemodell für die Niedrigwasserfrühwarnung verglichen. Hierbei wurden alle Pegel mit einbezogen und für das alte Modell in rot und für das neue Modell mit blau dargestellt. Darüber hinaus werden die Pegel untereinander durch abweichende Strichstärken und Symbole unterschieden.

## 5.7 ERGEBNISSE DER VORHERSAGETESTS

### 5.7.1 ERGEBNISSE DER VORHERSAGETESTS FÜR DIE REMS

Die Ergebnisse im Remsgebiet (Abbildung 5-9) zeigen, dass insbesondere der Threat Score für die beiden Kopfpegel Haubersbronn (gelbe Rauten) und Beutelsbach (türkise Kreuze) im alten Modell deutlich höher liegt, als im neuen Modell. Dies weist auf eine Verschlechterung in der korrekten Vorhersage von Niedrigwasserereignissen hin. Für die beiden Unterliegerpegel Schorndorf (rote Kreise) und Neustadt (durchgezogene Linie) zeigt sich hingegen nur eine minimale Veränderung in der Vorhersagegenauigkeit, welche allerdings in einem Bereich von 0,2 bis 0,35 als sehr gering zu bezeichnen ist.

Bei der Betrachtung der mittleren prozentualen Abweichung zeigt sich ein undeutliches Bild (Abbildung 5-10). Da die beiden Pegel Haubersbronn und Beutelsbach im alten Modell nicht enthalten waren, wurden hier entsprechend keinerlei Korrekturen durchgeführt. Sie zeigen konstante Abweichungen von etwa 34% für den Pegel Haubersbronn bzw. 28% für den Pegel Beutelsbach. In allen anderen Fällen lässt sich erkennen, wie die Vorhersagequalität mit steigender Vorhersagetiefe abnimmt.

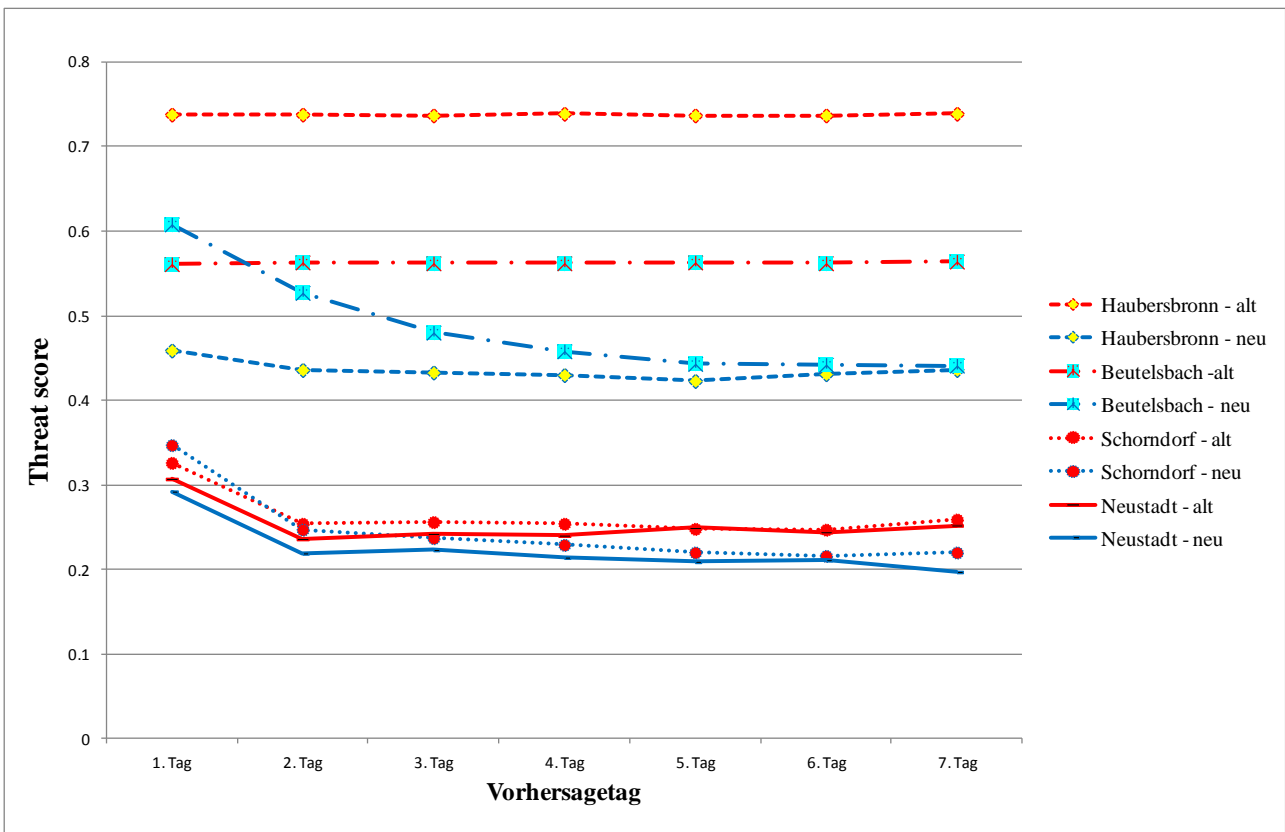


Abbildung 5-9: Threat Score für die ausgewählten Pegelstandorte im Remsgebiet.

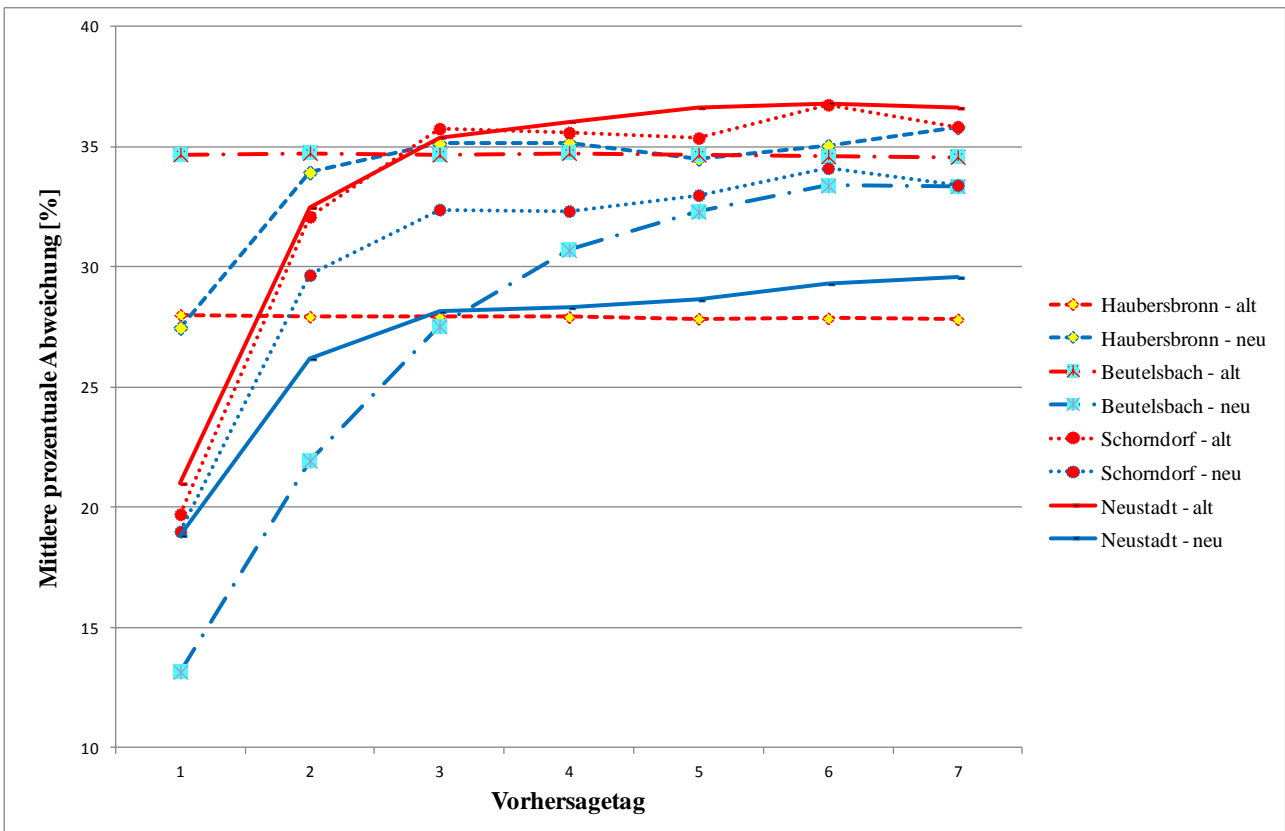


Abbildung 5-10: Mittlere prozentuale Abweichung für die ausgewählten Pegelstandorte im Remsgebiet.

Während der Threat Score für die beiden Pegel Neustadt und Schorndorf nur minimale Unterschiede zwischen altem und neuem Modell zeigt, lässt sich anhand der mittleren prozentualen Abweichungen deutlich erkennen, dass im neu aufgestellten Modell die grundsätzliche Modellqualität höher einzustufen ist. Auch am Pegel Beutelsbach zeigt sich im Gegensatz zum Threat Score eine deutlich geringere prozentuale Abweichung als im neuen Modell.

Der Unterschied zwischen den beiden gewählten Auswerteverfahren liegt in der Bedeutung des Schwellenwertes. Während bei der mittleren prozentualen Abweichung der gesamte Niedrigwasserbereich betrachtet wird, geht bei der Ermittlung des Threat Scores einzig die Unterschreitung des festgesetzten Schwellenwertes ein. Der Threat Score betrachtet somit ausschließlich das Eintreten eines Ereignisses anhand eines fixen Schwellenwerts. Insofern ist er eigentlich für die Bewertung der Niedrigwasser-Frühwarnung von größerer Bedeutung. Dennoch kann bei gleichzeitig sehr hohen Abweichungen zwischen Messung und Vorhersage von keiner guten Modellqualität gesprochen werden, da die Betrachtung der Vorhersage somit stets einer großen Unsicherheit unterliegt.

Außerdem ist zu beachten dass systematische Unterschätzungen bei der Vorhersage tendenziell zu einer besseren Bewertung mit dem Threat Score führen. Dies scheint an den Pegeln Haubersbronn und Beutelsbach die Ursache für die bessere Bewertung des alten Modells zu sein. In beiden Fällen liegt die Anzahl von falschen Alarmen im alten Modell deutlich höher als im neuen Modell. Folglich würde mit dem alten Modell deutlich zu häufig vor dem Eintreten des Niedrigwasserfalls gewarnt, was nicht wünschenswert ist, im Threat Score aber nur teilweise berücksichtigt wird.

Es zeigt sich somit klares Verbesserungspotential für das neue Modell im Hinblick auf die Genauigkeit bei der Unterschreitung des Schwellenwertes.

Am Pegel Haubersbronn zeigt sich in beiden Fällen eine deutliche Verschlechterung. Diese lässt sich nach optischer Betrachtung der Ganglinien nur bedingt nachvollziehen. In diesem Fall wäre es sinnvoll die Log-Dateien auszuwerten, um so zu prüfen, ob und wie häufig Nachführungen und ARIMA-Korrekturen durchgeführt wurden und ob sich dies ggf. häufig negativ auf die Vorhersage ausgewirkt hat.

Insgesamt konnte im Gebiet der Rems im ersten Schritt noch kein zufriedenstellendes Niedrigwasserfrühwarnmodell aufgestellt werden. Dies ist offenbar in erster Linie auf Probleme mit den operationellen Korrekturen innerhalb von LARSIM zurückzuführen (ARIMA und Nachführung). Nur so ist es zu erklären, dass mit der Berücksichtigung eines zusätzlichen Pegels die Vorhersagequalität an diesem Pegel schlechter wird. Im vorliegenden Fall führen die Korrekturen offenkundig dazu, dass die Niedrigwasserabflüsse in den Vorhersagen tendenziell überschätzt werden, was zu schlechten Bewertungen sowohl mit dem Threat Score als auch mit der mittleren prozentualen Abweichung führt.

Das Ergebnis verdeutlicht somit den Verbesserungsbedarf im Bereich der operationellen ARIMA-Korrektur und der Modellnachführung mit spezifischem Blick auf Niedrigwasser. Entsprechende Verbesserungen wurden bereits angedacht, können aber nicht im Rahmen des vorliegenden Projekts umgesetzt werden.

Mit Blick auf die Frühwarnung ist jedoch auch für die Rems zu beachten, dass die Niedrigwasserfrühwarnung anhand des Vergleichs von Niedrigwasserregionalisierung und LARSIM-Vorhersagen an Gewässerknoten innerhalb der Einzugsgebiete durchgeführt wird. Die Betrachtung an den Pegeln ist somit nicht hinreichend für die Bewertung hinsichtlich der Frühwarnung.

Durch ein konsistentes Pegel-Setup und durch die Berücksichtigung von Punktquellen in LARSIM und der Regionalisierung wird zweifellos eine realistischere Übertragung der Niedrigwasserabflüsse in die Einzugsgebiete erreicht. Insofern wurde auch für die Rems eine Verbesserung der Frühwarnung erzielt, wenngleich dies anhand der Auswertungen für die Pegel nicht gezeigt werden kann.

#### 5.7.2 ERGEBNISSE DER VORHERSAGETESTS FÜR DIE MURR

Die Ergebnisse an der Murr zeigen ein deutlich anderes Bild, als an der Rems (siehe Abbildung 5-11). Der Threat Score zeigt einzig für den Pegel Oppenweiler (gelbe Rauten) im Vergleich zwischen altem und neuem Modell fast identische Werte, während bei allen anderen Pegeln eine höhere Vorhersagequalität mit dem neuen Modell erzielt werden konnte. Insbesondere an den neu eingefügten Pegeln Leutenbach und Steinheim kann eine deutliche Steigerung der Qualität beobachtet werden.

Im Hinblick auf die Höhe des Threat Scores besteht allerdings noch Verbesserungspotential, da keiner der Pegel annähernd an der optimalen Wert von 1,0 heranreicht. Wie auch bei den Auswertungen an der Rems erläutert wurde, kann dies jedoch auch an einer minimalen Überschätzung liegen, die durch ein Unsicherheitsband im Bereich des Schwellwertes eliminiert werden könnte.

Die mittleren prozentualen Abweichungen zeigen ebenfalls ein sehr deutliches Bild (Abbildung 5-12). Im alten Modell erreicht der Pegel Steinheim (rote Kreise) eine dauerhafte Abweichung von 100% im Niedrigwasserbereich. Hier liegt nach Sichtung der vorhergesagten Ganglinie eine massive Unterschätzung der gemessenen Ganglinie vor. Auch die mittleren prozentualen Abweichungen für den Pegel Leutenbach (hellblaue Quadrate) müssen im alten Modell mit fast 60% als sehr schlecht bezeichnet werden. Unter Verwendung des alten Modells wäre eine Niedrigwasserfrühwarnung in den kleineren Kopfbereichen nicht sinnvoll durchführbar.

Die prozentualen Abweichungen für den Pegel Oppenweiler sind wie auch beim Threat Score als fast identisch zu bezeichnen, wobei mit Abweichungen von meist über 20% von keinem optimalen Ergebnis gesprochen werden kann.

Für den Unterliegerpegel Murr (durchgezogene Linie) kann hingegen eine deutliche Steigerung der Vorhersagequalität erzielt werden, die zwar unterhalb von 20% liegt, aber noch immer verbesserungswürdig erscheint.

Insbesondere für die Vorhersagetiefe von 1-2 Tagen wäre ein besseres Ergebnis, sowohl im Hinblick auf den Threat Score, als auch bezüglich der mittleren prozentualen Abweichung wünschenswert. Hier gilt es weitere Untersuchungen durchzuführen, da auch hier möglicherweise Nachführung und ARIMA-Korrektur bei kleineren Ausreißern in der Messung zu ungünstigen Korrekturen der Vorhersage führen können. Dieser Punkt ist in der Niedrigwasserfrühwarnung deutlich stärker zu berücksichtigen als im Hochwasserfall, da hier seltener Ausreißer auftreten.

Insgesamt zeigt das Beispiel der Murr jedoch, dass durch die hier angewandte Vorgehensweise bereits eine merkliche Verbesserung der Niedrigwasservorhersagen und somit auch der Frühwarnung erreicht werden kann.

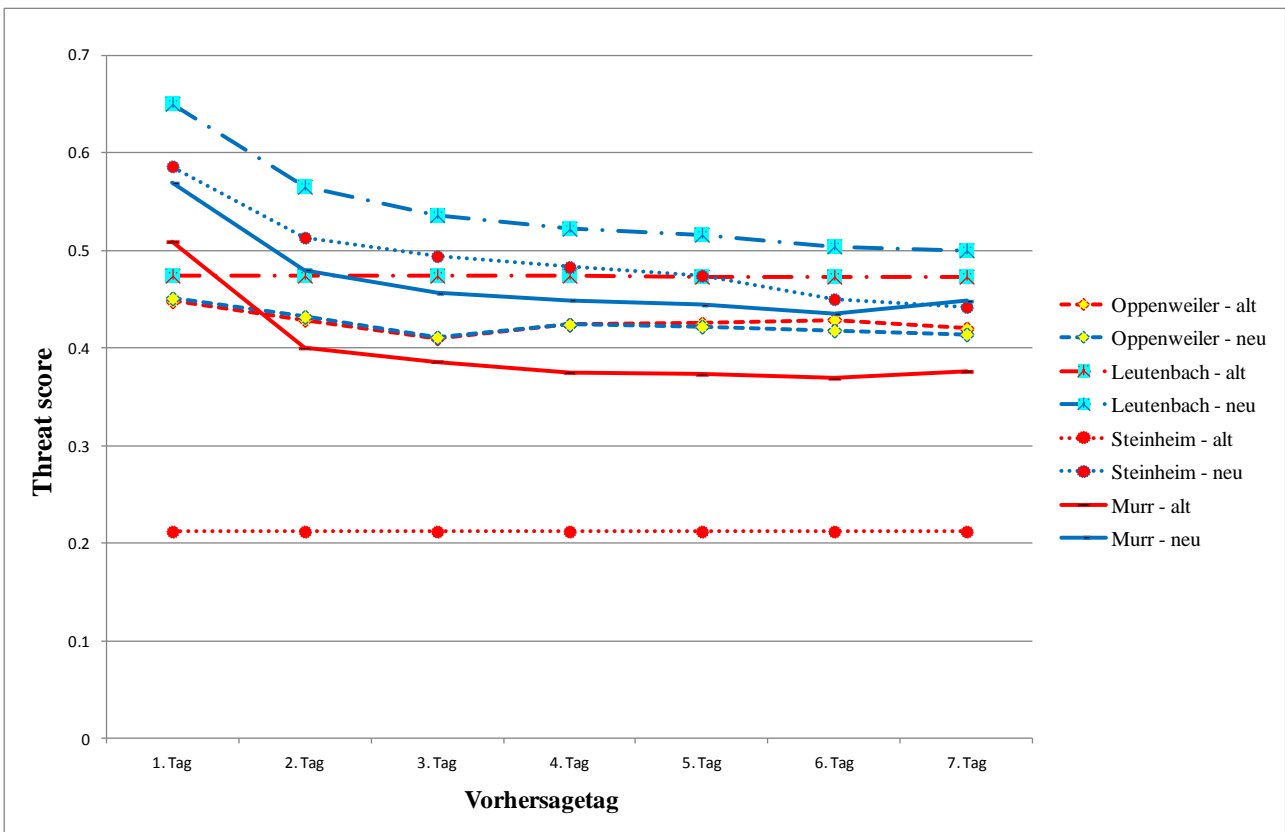


Abbildung 5-11: Threat score für die ausgewählten Pegelstandorte im Murrgebiet.

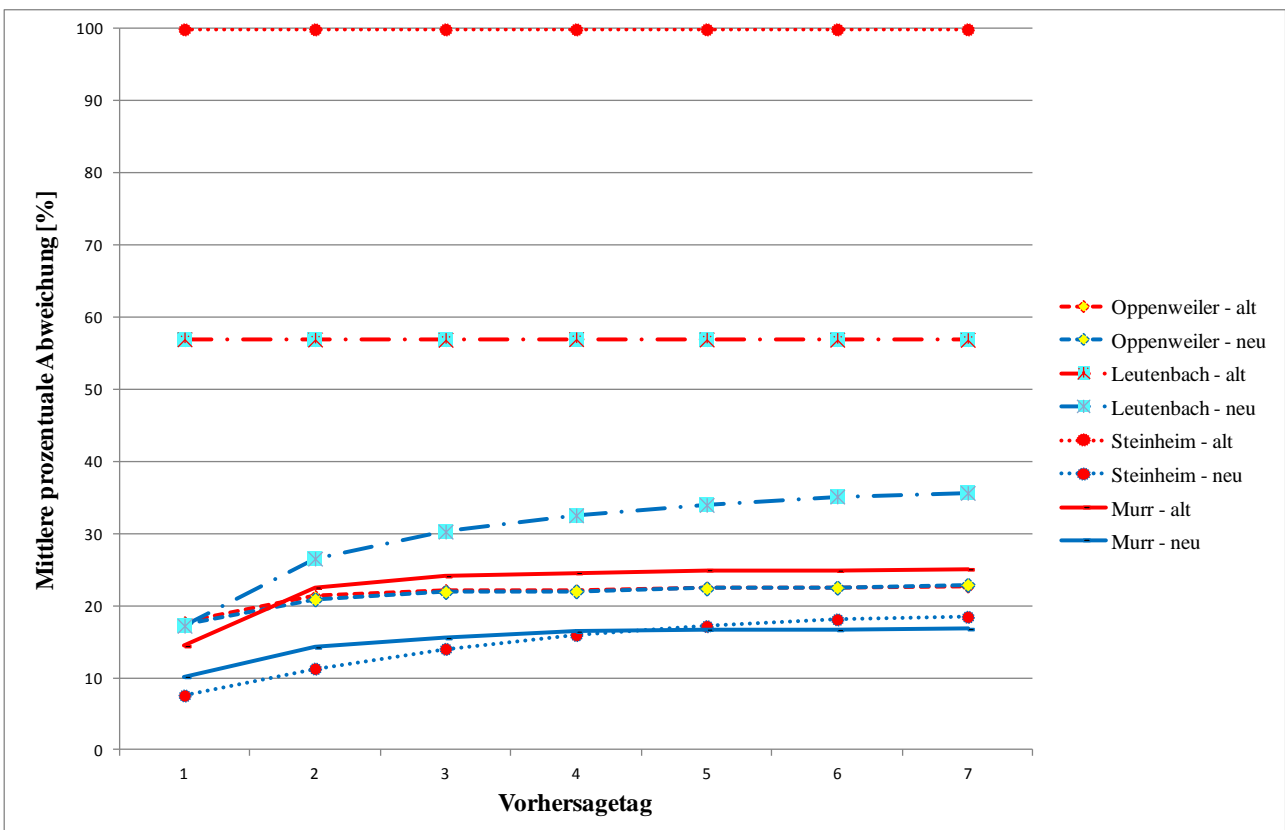


Abbildung 5-12: Mittlere prozentuale Abweichung für die ausgewählten Pegelstandorte im Murrgebiet.

## 5.8 ANPASSUNG DER REGIONALISIERUNG

Wie in Abschnitt 5.1 erläutert, erscheint es sinnvoll, punktuelle Kläranlageneinleitungen auch bei der Regionalisierung von Niedrigwasserkennwerten zu berücksichtigen. Hierdurch kann die räumliche Verteilung der Niedrigwasserkennwerte an den Gewässerknoten in den Einzugsgebieten realistischer abgebildet werden. Zudem werden durch die analoge Berücksichtigung der Kläranlagen Unterschiede zwischen der Regionalisierung und den LARSIM-Berechnungen verringert.

Daher wurde im Zuge der vorliegenden Forschungsarbeit in Zusammenarbeit mit Herr Dr. Ihringer und Herrn Liebert vom KIT überprüft, ob die Berücksichtigung der Kläranlagenabflüsse bei der Regionalisierung in der hier vorgestellten Weise prinzipiell machbar ist und ob die Konsistenz zwischen Regionalisierung und LARSIM-Simulationen dadurch erhöht werden kann.

Für die hier vorliegende Studie wurde eine vorläufige Anpassung der Regionalisierung des MNQ für das Rems-Murr-Gebiet durch das KIT (Dr. Ihringer) vorgenommen. Dabei ist zu betonen, dass die hier durch Dr. Ihringer abgeleiteten Regionalisierungsergebnisse als vorläufig zu werten sind. Die Vorläufigkeit ist vor allem dadurch bedingt, dass für die Kläranlagen nur vereinfachte Schätzungen auf der Basis des Jahres 2005 verwendet werden konnten und die komplette Anpassung des Regionalisierungsmodells an alle Pegel in Baden-Württemberg in der kurzen Zeit nur überschlägig vorgenommen werden konnte. Deshalb stellen die Ergebnisse für Rems und Murr einen Nachweis für die grundsätzliche Machbarkeit dar und erlauben erste Auswertungen.

Die Ergebnisse für das Rems-Murr-Gebiet basieren auf einer vorläufigen Anpassung des Regionalisierungsmodells für die gesamte Landesfläche von Baden-Württemberg, bei der die Trockenwetterabflüsse aller ca. 1 000 Kläranlagen überschlägig berücksichtigt sind.

Hierfür wurden durch HYDRON die Jahresganglinien der Trockenwetterabflüsse der Kläranlagen in Baden-Württemberg gemäß der Methodik in Abschnitt 5.2 für das Jahr 2005 ermittelt. Das Jahr 2005 wurde als repräsentatives mittleres Jahr gewählt, für das alle erforderlichen Daten für alle Kläranlagen im Land bereits bei HYDRON vorlagen.

Aus den Trockenwetterganglinien wurden die mittleren (korrigierten) Trockenwetterabflüsse des Jahres sowie die minimalen Trockenwetterabflüsse ermittelt. Diese Daten wurden zusammen mit den Lagekoordinaten der jeweiligen Kläranlagen an Dr. Ihringer vom KIT übermittelt.

Das KIT hat die MQ-Werte und MNQ-Werte an den Pegeln auf Grundlage dieser Daten in einen flächenbürtigen Anteil und einen kläranlagenbürtigen Anteil aufgeteilt. Es wurde davon ausgegangen, dass die kläranlagenbürtigen MQ durch die Summe der mittleren Trockenwetterabflüsse (des Jahres 2005) aller Kläranlagen im Einzugsgebiet eines Pegels repräsentiert werden. Der kläranlagenbürtige Anteil des MNQ ergibt sich durch die Summe der minimalen Trockenwetterabflüsse (des Jahres 2005) aller Kläranlagen im jeweiligen Einzugsgebiet.

Anschließend wurden die Verhältnisse zwischen flächenbürtigem MQ und flächenbürtigem MNQ an den Pegeln gebildet. Sowohl der flächenbürtige MQ als auch das Verhältnis MQ/MNQ wurden mithilfe des Regionalisierungsmodells auf die Fläche übertragen. Hieraus lässt sich wiederum der flächenbürtige MNQ für alle Regionalisierungsknoten ermitteln. Die Anknüpfung des MNQ an die MQ-Werte erscheint sehr sinnvoll,



da messtechnisch bedingt dieser Kennwert eine höhere Zuverlässigkeit aufweist als die Kennwerte des Niedrigwasserabflusses

Im letzten Schritt wurden die Kläranlagen-Trockenwetterabflüsse (mittlere bzw. minimale Werte des Jahres 2005) an den Einleitungsstellen als Punktquellen berücksichtigt. Somit ergeben sich für alle Regionalisierungsknoten Werte für den flächenbürtigen MNQ, den kläranlagenbürtigen MNQ und den Gesamt-MNQ.

Die so ermittelten (vorläufigen) Regionalisierungswerte wurden vom KIT an HYDRON zurückübermittelt. Die für die Knoten unter Berücksichtigung der Trockenwetterabflüsse regionalisierten (vorläufigen) MNQ-Werte stehen somit für eine Probeweise Niedrigwasser-Frühwarnung im Rems-Murr-Gebiet und für erste Auswertungen zur Verfügung.

Die Ergebnisse belegen, dass es grundsätzlich machbar und sinnvoll ist, Kläranlagen bei der Regionalisierung von Niedrigwasser-Kennwerten zu berücksichtigen. Für zukünftige Bearbeitungen sollten die Kläranlagen aber genauer berücksichtigt werden. Hierzu sollten durchgängige Trockenwetterabfluss-Ganglinien für alle Kläranlagen für den Zeitraum 1981 bis 2010 abgeleitet werden. Anstelle der vereinfachten, auf Grundlage des Jahres 2005 ermittelten Kennwerte, sind dann diese Ganglinien von den Pegelganglinien abzuziehen, um möglichst korrekt in flächenbürtige und kläranlagenbürtige Abflüsse differenzieren zu können. Darüber hinaus müsste selbstverständlich auch das Regionalisierungsmodell noch genauer angepasst werden.

#### **5.9 KORREKTURFAKTOREN ZWISCHEN NQ-REGIONALISIERUNG UND LARSIM-BERECHNUNG**

Auf Grundlage der Besprechungen mit dem LRA und dem KIT wurde als beste Vorgehensweise für die operationelle Niedrigwasserklassifikation die Angleichung der Regionalisierung und der LARSIM –Berechnung über Korrekturfaktoren ausgewählt.

Bei diesem Verfahren werden die regionalisierten NW-Werte im Prinzip als operationelle Kennwerte verwendet. Dabei wird jedoch berücksichtigt, dass Inkonsistenzen zwischen den regionalisierten Werten und den LARSIM-Berechnungen möglich sind. Diese Unterschiede müssen identifiziert und quantifiziert werden. Die Entwicklung eines Korrekturverfahrens zur Angleichung von Regionalisierung und LARSIM-Berechnung ist vor allem aus folgenden Gründen notwendig:

- Meteorologische Stundenwertdaten sind in ausreichender Qualität und Dichte erst ab 1996 verfügbar, so dass maximal 16 Jahre mit Stundenwertmodellen berechnet werden können
- Das Regionalisierungsmodell berücksichtigt längere Zeiträume, bzw. nutzt historische Daten von Pegeln, die mittlerweile nicht mehr zur Verfügung stehen
- Die Unterschiede zwischen einer reinen Simulation und den operationellen Berechnungen sind zu beachten
- Unterschiede in der Modellstruktur führen zu unterschiedlichen Eingangsparametern (bspw. Teileinzugsgebietsgröße, Modellvernetzung)

Um die Abweichung des Wasserhaushaltsmodells von der Regionalisierung zu quantifizieren, wurden Korrekturfaktoren auf Basis des mittleren Niedrigwasserabflusses (MNQ) ermittelt. Dazu wurde der MNQ aus der Regionalisierung mit dem MNQ verglichen, der auf Basis langjähriger Simulationen mit LARSIM errechnet werden kann.

Abbildung 5-13 zeigt den Zusammenhang der ermittelten mittleren Niedrigwasserabflüsse von Regionalisierung und Simulation für das Rems-Murr-Gebiet. Eingetragen zur besseren Orientierung sind die Bereiche der Korrekturfaktoren 0.5, 0.75, 1.00, 1.25 und 1.5 als rote Linien. Dabei gilt, wenn ein Punkt auf der rot gestrichelten Linie liegt, d.h. auf der Linie des Faktors 1.00, dann ist der MNQ aus Regionalisierung und Simulation identisch. Punkte die unterhalb der gestrichelten Linien liegen stellen Regionalisierungsknoten dar, bei denen die Simulation geringere Werte liefert als die Regionalisierung und die daher mit einem Korrekturfaktor  $< 1.00$  versehen werden. Bei Punkten, die oberhalb der gestrichelten Linie liegen, wird der Abfluss analog mit einem Faktor  $> 1.00$  korrigiert.

Treten größere Abweichungen auf, dann deutet dies auf systematische Fehler oder Ungenauigkeiten in der Modellstruktur hin. Beispielsweise können dabei Regionalisierungsknoten identifiziert werden, bei denen Regionalisierung und Wasserhaushaltsmodell verschiedene Einflussgrößen berücksichtigen.

Die dunkelblauen Symbole zeigen den Zusammenhang im Original-Setup, d.h. ohne Berücksichtigung der Kläranlagen. Auffällig dabei ist, dass der Korrekturfaktor mit zunehmenden Abfluss immer geringer wird (d.h.  $< 1.00$ ). Der MNQ-Wert der Regionalisierung liegt dabei höher als der MNQ-Wert der Simulation. Die Niedrigwasservorhersage des Wasserhaushaltsmodells unterschreitet somit den Kennwert aus der Regionalisierung früher bzw. bei zu hohen Abflüssen. Die Niedrigwasserwarnung wird ohne Korrekturfaktor zu früh erzeugt. Dies steht im Einklang mit den Erkenntnissen aus Abschnitt 5.7, wonach das alte LARSIM-Modell zur Unterschätzung der Niedrigwasserabflüsse tendiert.

Die hellblauen Symbole zeigen den Zusammenhang für das neu aufgestellte Modell mit Berücksichtigung der Kläranlagen. Diese zeigen eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen Wasserhaushaltsmodell und Regionalisierungsmodell. Für Regionalisierungsknoten mit einem MNQ  $> 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  muss fast keine Korrektur vorgenommen werden.

Abbildung 5-14 zeigt den gleichen Zusammenhang wie Abbildung 5-13, jedoch in logarithmischer Skalierung. Dabei wird der Fokus stärker auf die Regionalisierungsknoten, mit niedrigen Abflüssen gesetzt. Zum einen fällt bei dieser Darstellung eine größere Streuung auf. Teilweise werden Korrekturfaktoren von  $> 1.50$  bzw.  $< 0.5$  benötigt. Vor allem ohne Berücksichtigung von Kläranlagen sind sehr kleine Faktoren ( $< 0.5$ ) notwendig. Daraus folgt, dass in kleinen Einzugsgebieten mit niedrigen Abflüssen, der Fehler bei der Niedrigwasserfrühwarnung im alten Modell größer ist, als bei größeren Einzugsgebieten.

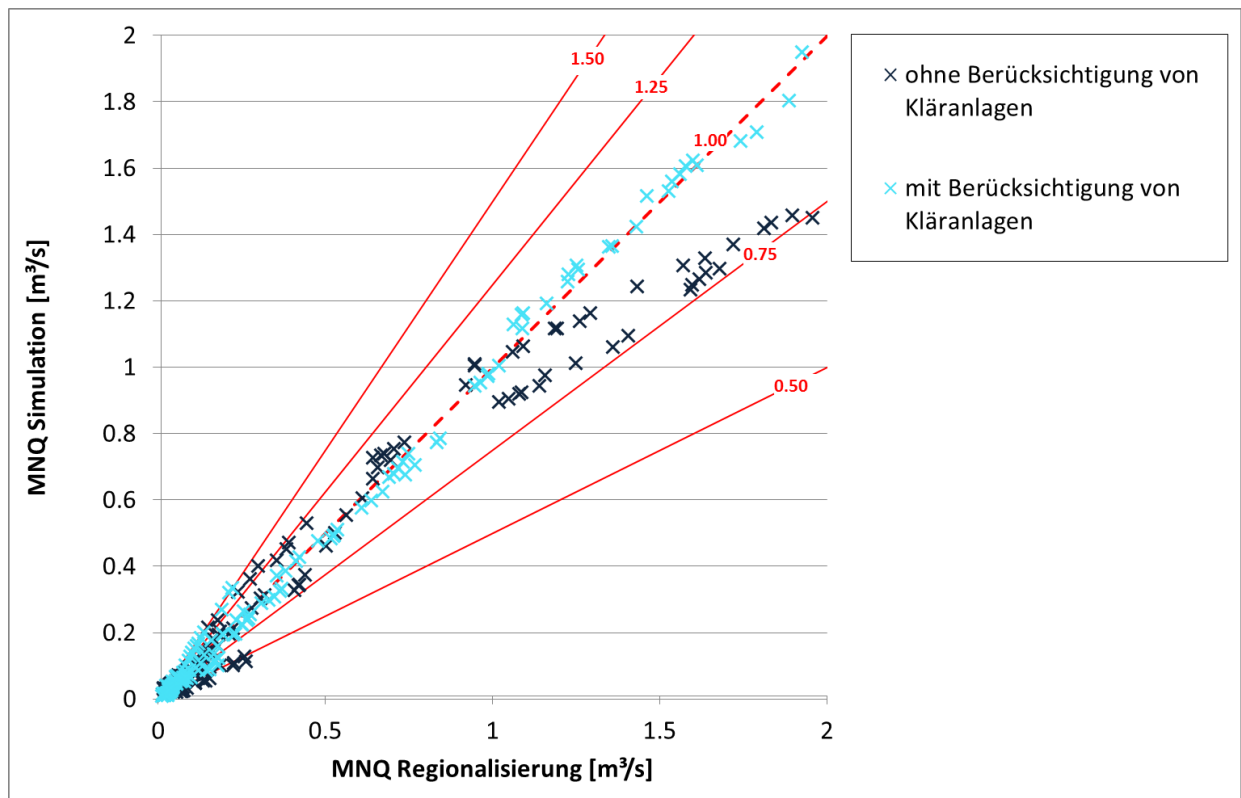


Abbildung 5-13: Zusammenhang zwischen MNQ Regionalisierung und MNQ Simulation (Wasserhaushaltsmodell) mit eingetragenen Bereichen der Korrekturfaktoren (0.5, 0.75, 1.00, 1.25 und 1.5), Rems-Murr-Gebiet mit und ohne Berücksichtigung der Kläranlagen

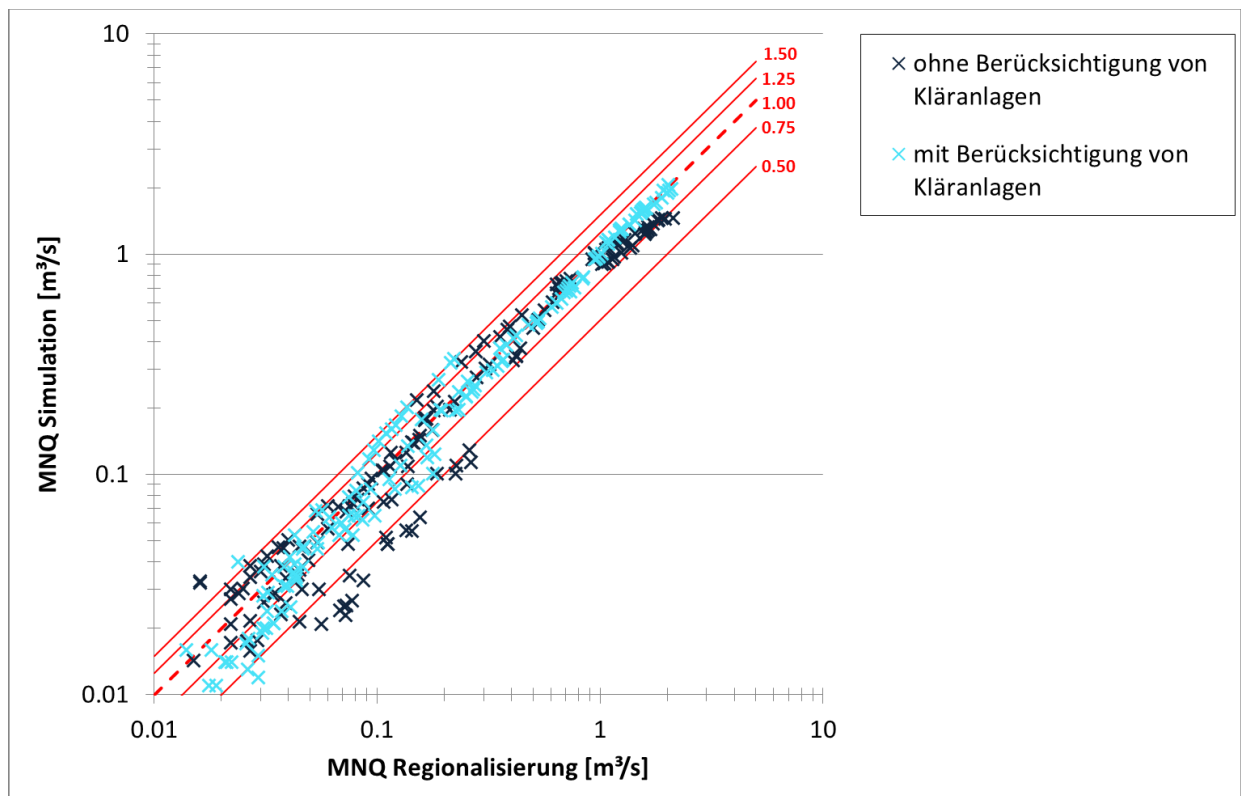
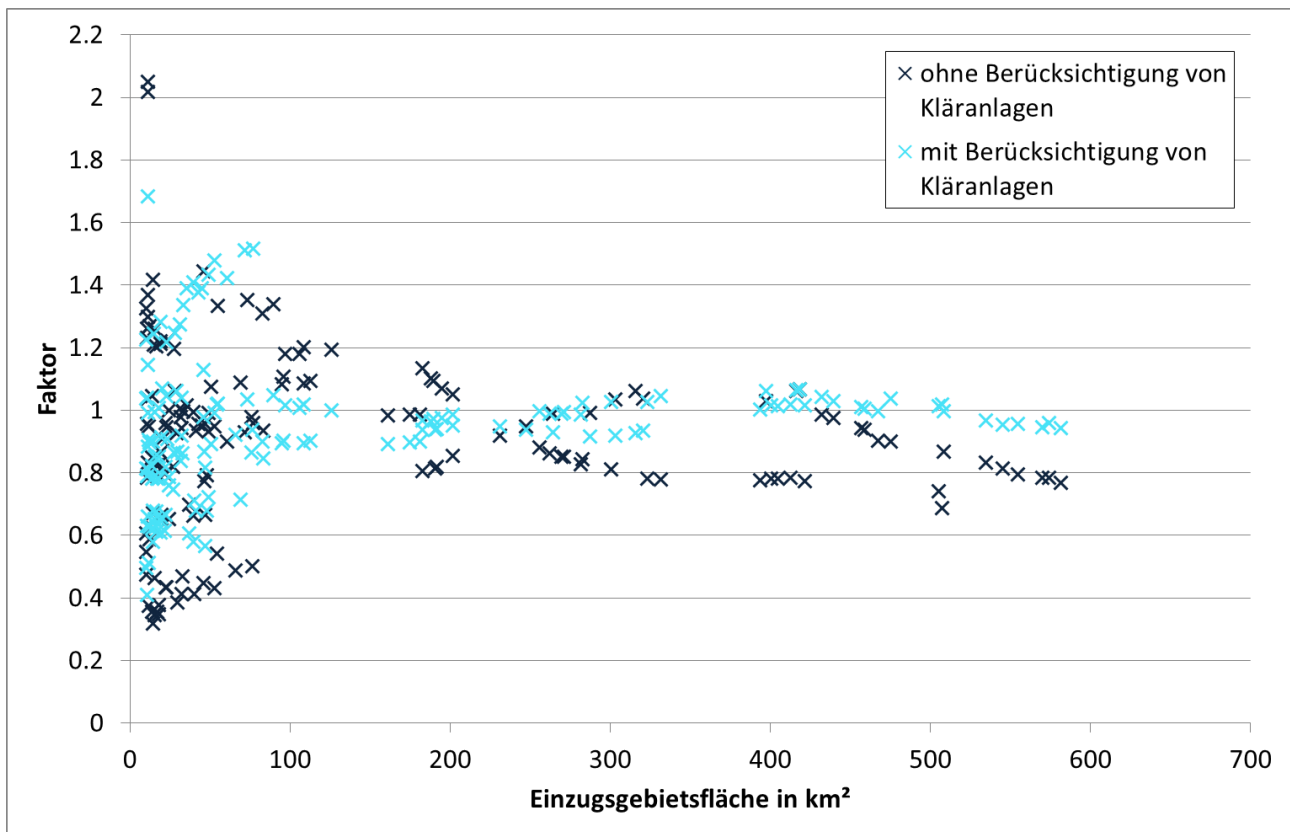


Abbildung 5-14: Zusammenhang zwischen MNQ Regionalisierung und MNQ Simulation (Wasserhaushaltsmodell) mit eingetragenen Bereichen der Korrekturfaktoren (0.5, 0.75, 1.00, 1.25 und 1.5), Rems-Murr-Gebiet mit und ohne Berücksichtigung der Kläranlagen – logarithmische Skalierung



**Abbildung 5-15: Zusammenhang zwischen Korrekturfaktor und Einzugsgebietsfläche eines Regionalisierungsknotens**

Die Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche verdeutlicht Abbildung 5-15 als Zusammenhang zwischen Korrekturfaktor und der zum Regionalisierungsknoten zugeordneten Fläche. Hellblau sind die Korrekturfaktoren mit Berücksichtigung der Kläranlagen, während die dunkelblauen Symbole den Zustand ohne Kläranlagen darstellen.

Ab einer Einzugsgebietsgröße von ca. 150 km<sup>2</sup> ist die Abweichung zwischen Regionalisierung und Wasserhaushaltsmodell mit einem Faktor zwischen 1.0 und 1.2 auszugleichen. Je kleiner die Fläche, die einem Regionalisierungsknoten zugeordnet wird, desto stärker streuen die Faktoren. Einzelne Knoten müssen mit einem Faktor von 0.4 korrigiert werden, während bei anderen ein Faktor 1.8 notwendig ist.

Auch bei dieser Darstellung fällt die größere Streuung der dunkelblauen Symbole (altes Modell) auf. Die Modellierung mit Berücksichtigung von Kläranlagen kommt mit geringeren Korrekturfaktoren aus und ist daher als stabiler einzustufen.

Eine systematische Abweichung zwischen den zwei Modellen kann allerdings nicht festgestellt werden und es kann kein allgemeingültiger Korrekturfaktor gefunden werden. Im operationellen Betrieb ist es daher notwendig für jeden Knoten den Korrekturfaktor anzugeben. Vereinfachend wurden die Kennwerte der Regionalisierung für alle Knoten mit den jeweiligen Faktor multipliziert, so dass die Ergebnisse des Wasserhaushaltsmodells direkt mit diesen neuen Schwellwerten verglichen werden können. Diese Schwellwerte werden in der Niedrigwasserklassifikation und in der anschließenden Visualisierung weiter verwendet.

#### 5.10 KONSEQUENZEN AUS DER ANALYSE DES NIEDRIGWASSERMODELLS FÜR REMS UND MURR

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die grundsätzliche Herangehensweise zur Erstellung eines Niedrigwassermodells stimmig ist. Deutliche Defizite zeigen sich allerdings noch bei den in LARSIM verwendeten Nachführungsroutinen bzw. der ARIMA-Korrektur. Diese Korrekturverfahren führen – zumindest an manchen Pegeln – offenbar zeitweise zur Verschlechterung der Niedrigwasservorhersage. Vor dem Hintergrund dieses Ergebnisses erscheint es wünschenswert, die ARIMA-Korrektur sowie die Modellnachführung mit Blick auf die Niedrigwasserfrühwarnung zukünftig weiter zu verbessern. Dies kann jedoch nicht im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts erfolgen.

Problematisch erscheint auch, dass die Niedrigwasser-Frühwarnung starr an die Unterschreitung fixer Schwellenwerte an den Gewässerknuten gebunden ist. Trotz recht guter Vorhersagen ist es möglich, dass diese Schwellenwerte in der Vorhersage flächendeckend knapp verfehlt werden und somit keine Frühwarnung ausgesprochen wird, wenngleich der Niedrigwasserfall eintritt. In diesem Zusammenhang wäre es z.B. hilfreich, die Ergebnisse durchgängiger Simulationen an den Knotenpunkten mit Vorhersagen zu vergleichen, um zu untersuchen, ob die operationelle Nachführung bzw. ARIMA-Korrektur zur systematischen Fehleinschätzung führt. Zudem erscheint es wünschenswert die starren Schwellenwerte durch unscharfe Übergänge zu ersetzen. Auch dies kann jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit sein.

Die positive Wirkung des konsistenten Modells und insbesondere der Berücksichtigung der Kläranlagen als Punktquellen wird durch den Vergleich der MNQ-Werte aus der Regionalisierung und der LARSIM-Simulation an den Gewässerknuten deutlich. Durch das neue Modell-Setup kann die mit dem alten Modell bei MNQ-Werten größer ca.  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  systematische auftretende Abweichung zwischen den Niedrigwasserkennwerten aus LARSIM und der Regionalisierung beseitigt werden. Zudem ist die Abweichung zwischen LARSIM und Regionalisierung auch bei kleineren MNQ-Werten mit dem neuen Setup geringer.

Dies unterstreicht, dass durch die Berücksichtigung der Punktquellen und das konsistente Modell-Setup eine stabilere Übertragung der Niedrigwasserabflüsse in die Einzugsgebiete hinein gegeben ist. Somit wird auch die Niedrigwasser-Frühwarnung mit dem neuen Modell deutlich belastbarer. Die Berücksichtigung von Punktquellen in der dargestellten Form scheint auf alle Fälle wünschenswert.

# 6 Technische Umsetzung und Einrichtung einer operationellen Modellumgebung

## 6.1 OPERATIONELLE NIEDRIGWASSERVORHERSAGE

Für die Regionalisierung und Klassifizierung von Abflussvorhersagen wurden die im Kapitel 2.2.3 formulierten Anforderungen in LARSIM programmtechnisch umgesetzt. Dazu wurde die Option NQ-REGIONALISIERUNG integriert, die eine Ausgabe des minimal vorhergesagten (bzw. simulierten) Abflusses für alle Modellelemente ermöglicht.

Im Gegensatz zur Hochwasserfrühwarnung, bei der Stundenwerte ausgewertet werden, werden bei der Niedrigwasser-Klassifizierung 24-Stunden-Mittelwerte der Abflüsse betrachtet. Es können mehrere verschiedene Zeiträume vor oder nach dem Vorhersagezeitpunkt analysiert und in Tabellenform ausgegeben werden. Die Auswerteziträume müssen jedoch immer ein Vielfaches von 24 Stunden betragen.

Die Jährlichkeit des minimal vorhergesagten (bzw. simulierten) Abflusses wird aus den Jährlichkeiten des dem Element zugeordneten Regionalisierungsknotens berechnet, wobei Zwischenwerte logarithmisch interpoliert werden.

Um die speziellen Ausgaben der Niedrigwasser-Klassifizierung zu ermöglichen, wurden in allen Wasserhaushaltsmodellen Modifikationen durchgeführt. Dazu gehört zum einen die Aktivierung der Option NQ-REGIONALISIERUNG, zum anderen die Vereinbarung der gewünschten Auswerteziträume. Darüber hinaus wurden Tabellen mit den Niedrigwasserkennwerten der gewählten Gewässerknoten erstellt, sowie eine Zuordnungstabelle der Regionalisierungsknoten zu den jeweiligen Modellelementen. Tabelle 6-1 zeigt beispielhaft einen Auszug aus der Zuordnung des Regionalisierungsknotens 247 mit den Kennwerten MNQ sowie NQT-Jährlichkeiten.

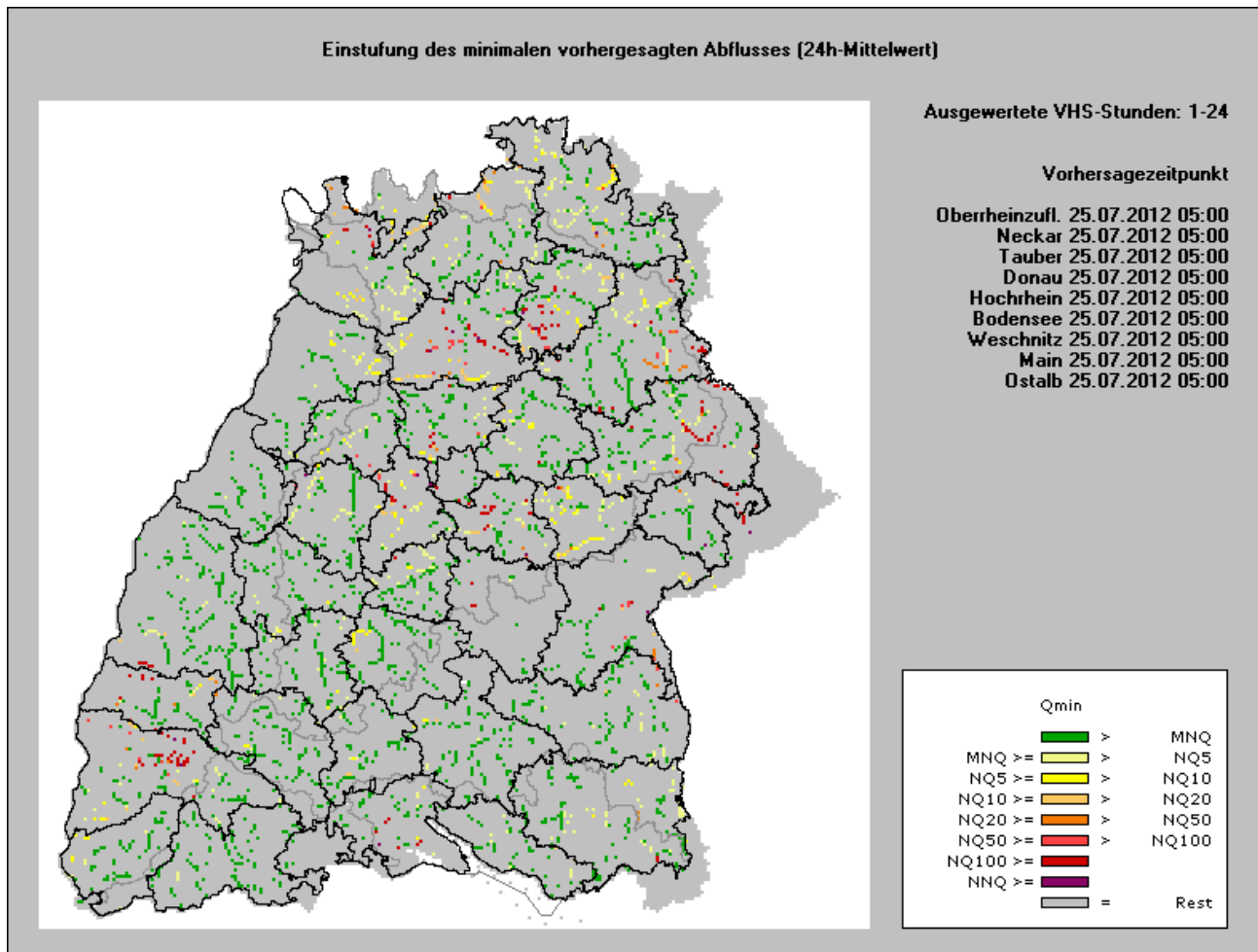
**Tabelle 6-1: Auszug aus der Zuordnungstabelle für die Klassifikation der Abflussvorhersagen**

247 [Knoten-ID]	8 [Anz. Wertepaare]
1 [MNQ]	5.5 [m <sup>3</sup> /s]
2 [NQ2]	4.0
5 [NQ5]	3.5
10 [NQ10]	2.5
20 [NQ20]	2.0
50 [NQ50]	1.4
100 [NQ100]	0.9
111 [NNQ, sofern vorh.]	0.8 [m <sup>3</sup> /s]

Die NQ-Klassifizierung wird automatisiert und operationell für alle festgelegten Gewässerknoten in Baden-Württemberg berechnet. Für die Berechnung der Niedrigwasservorhersagen wurden dafür auf einem Modellrechner der HVZ für alle Modellgebiete NQ-REGIO-Läufe eingebaut. Diese werden operationell einmal täglich um 7:50 Uhr (MEZ) ausgeführt und beziehen sich auf den Vorhersagezeitpunkt 5:00 (MEZ). Die Er-

gebnisse der Modellläufe werden in speziellen Dateien analog der Hochwasserfrühwarnung abgelegt und können bei der Visualisierung weiter verwendet werden.

Die Visualisierung der Unterschreitung der Niedrigwasser-Kennwerte an ausgewählten Gewässerknoten zeigt Abbildung 6-1. Die Erstellung der Karte ist durch die in Kapitel 2.2.3 formulierten Weiterentwicklungen von LARSIM ermöglicht worden.



**Abbildung 6-1: Einstufung der für den ersten VHS-Tag minimal vorhergesagten Abflüsse anhand der regionalisierten Niedrigwasser-Kennwerte (25.07.2012).**

## 6.2 OPTIMIERUNG DER AUSWERTUNGSKNOTEN

Um eine optimale Niedrigwasserklassifikation zu erhalten, muss die Auswahl der zu verwendenden Regionalisierungsknoten gegebenenfalls verändert werden. Zum einen können Unterschiede der Vernetzungsstrukturen der Modelle, aufgrund der verschiedenen Ausprägung der Teileinzugsgebietsausweisung auftreten. Während bei LARSIM ein 1x1 km Raster verwendet wird, liegt bei der Regionalisierung ein vektorielles Teilgebietsmodell mit Einzugsgebietsgrenzen vor. Daher können unterschiedliche Vernetzungen entstehen. In einer LARSIM-Zelle können mehrere Regionalisierungsknoten liegen und mehrere Einzugsgebiete zusammenfließen. Daher ist es notwendig eine Teilauswahl von Regionalisierungsknoten zu verwenden, die eine möglichst große Ähnlichkeit mit den LARSIM-Berechnungsknoten aufweisen.

Dafür wurde ein automatisiertes Verfahren verwendet, welches schon bei der Hochwasser-Regionalisierung zum Einsatz kam. Knoten, die nicht eindeutig zugeordnet werden konnten, oder bei denen sich die Einzugsgebietsfläche zu stark unterschieden hat, werden dabei aus der Gesamtliste entfernt. Knoten, die bei der Bestimmung der Korrekturfaktoren (siehe Kapitel 5.9), zu große Abweichungen aufwiesen, wurden nachträglich aus dieser Teilauswahl manuell entfernt.

Dieses Verfahren wurde für alle Regionalisierungsknoten in Baden-Württemberg durchgeführt. Sollte im operationellen Betrieb weitere Regionalisierungsknoten auffallen, die ein sonderbares Verhalten ausweisen, müssen diese nachträglich geprüft und gegebenenfalls entfernt werden.

### 6.3 REGIONALISIERUNG DER NIEDRIGWASSERKLASSIFIZIERUNG

Die punktuell an Regionalisierungsknoten vorhergesagten Jährlichkeiten werden anschließend zu flächenhaften Werten regionalisiert. Als Grundlage dafür kann das Programm WARNSIM dienen, welches schon in der Hochwasserfrühwarnung Anwendung findet. Dafür sind jedoch einige Modifikationen notwendig, da die Eingangsdateien, d.h. die Ergebnisse der Niedrigwasservorhersage, Unterschiede zu den Ergebnissen der Hochwasservorhersage aufweisen. Zum einen ist der Programmcode auf die neuen Dateinamen und den Dateiinhalt anzupassen, zum anderen muss die Anzahl der Vorhersagetage von zwei auf acht erhöht werden. Dabei werden die Vorhersagestunden 1 – 24, 25 – 48, 49 – 72, 73 – 96, 97 – 120, 121 – 144 und 145 – 168 behandelt (siehe Tabelle 6-2). Zusätzlich werden die letzten 24 Stunden ausgewertet (VH-Stunden: -23 - 0), um die aktuelle Situation in den jeweiligen Warnregionen zu verdeutlichen. Das Derivat WARNSIM-NQ wird in der Testphase verwendet. Eine spätere Zusammenführung der beiden WARNSIM-Varianten für Hoch- und für Niedrigwasser ist jedoch denkbar.

**Tabelle 6-2: Berechnete Zeiträume mit den dazugehörigen Vorhersagestunden**

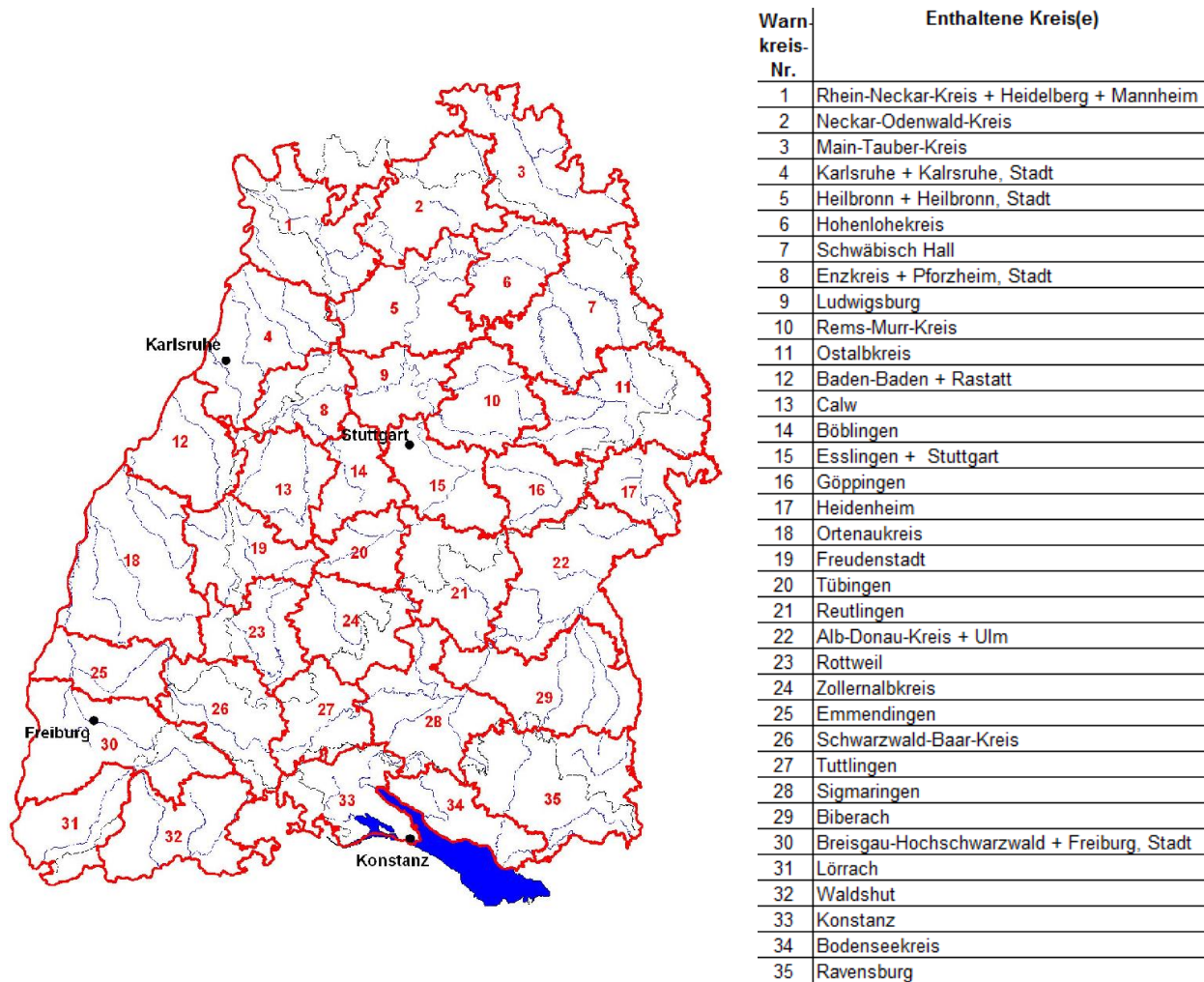
<b>Zeitraum</b>	<b>Vorhersagestunde</b>
Aktuelle Situation	-23 – 0
1. Vorhersagetag	1 – 24
2. Vorhersagetag	25 – 48
3. Vorhersagetag	49 – 72
4. Vorhersagetag	73 – 96
5. Vorhersagetag	97 – 120
6. Vorhersagetag	121 – 144
7. Vorhersagetag	145 – 168

WARNSIM-NQ regionalisiert die für ausgewiesene LARSIM-Elemente vorhergesagten Jährlichkeiten zu flächenhaften Werten. Die LARSIM-Elemente sind dabei gleichzusetzen mit den Regionalisierungsknoten aus der NQ-Regionalisierung. Je Warnregion werden die darin enthaltenen LARSIM-Elemente auf ihre Jährlichkeit ausgewertet. Die derzeitige Einstellung in der Steuerdatei ist so festgelegt, dass mindestens drei Punkte in einer Warnregion den Schwellenwert überschreiten müssen, damit der Region der entsprechende



Wert zugewiesen wird. Damit wird gewährleistet, dass einzelne Ausreißer keine Berücksichtigung bei der Frühwarnung finden. Sollten Warnkarten unrealistisch hohe Warnklassen enthalten, dann besteht die Möglichkeit durch eine Anpassung dieser Einstellungen, die Warnstufen nachträglich zu beeinflussen.

Für den ersten operationellen Testbetrieb werden gleiche Warnregionen verwendet, wie bei der Hochwasserfrühwarnung (vgl. Abbildung 6-2). Sofern Wünsche zu detaillierteren Aussagen auftreten sollten, kann durch eine weitere Unterteilung der Warnregionen, bspw. an Einzugsgebietsgrenzen oder Pegelkontrollbereichen, zum gegebenen Zeitpunkt reagiert werden. Allerdings muss vorher gewährleistet werden, dass in jeder Warnregion ausreichend plausible Regionalisierungsknoten vorhanden sind.



**Abbildung 6-2: Bei der Visualisierung der Niedrigwasserklassifizierung verwendete Warnregionen in Baden-Württemberg**

#### 6.4 VISUALISIERUNG DER NIEDRIGWASSERFRÜHWARNUNG

Die Erzeugung der Warnkarten aus den WARSIM-NQ-Ergebnissen erfolgt operationell für gesamt Baden-Württemberg. Es werden acht Karten erzeugt, die momentan nur für interne Zwecke weiter verwendet werden. Sobald die Erweiterung der Niedrigwasservorhersage auf ganz Baden-Württemberg durchgeführt worden ist, werden die Karten im Internetauftritt der Hochwasservorhersagezentrale Baden-Württemberg eingebunden.

Es werden die acht mit WARNSIM-NQ berechneten Zeiträume (siehe Tabelle 6-2) kartographisch dargestellt. Die Erstellung erfolgt vollautomatisch nach jedem vollständig durchgeführten Berechnungslauf. Sollte ein Fehler bei der Berechnung auftreten, dann ist ein automatischer E-Mail bzw. SMS-Versand mit der Fehlerbeschreibung eingerichtet.

Die Warnregionen auf den Karten werden gemäß der Niedrigwassergefährdung eingefärbt. Dabei bedeutet:

- grün – geringe Gefahr,
- gelb – mäßige Gefahr (über 2-jährliches Niedrigwasser)
- orange – mittlere Gefahr (über 15 Jährliches Niedrigwasser)
- rot – hohe Gefahr (über 20-jährliches Niedrigwasser)

Diese Klasseneinteilung ist eng an die Klassifizierung der Hochwasserfrühwarnung angelehnt, da sie landesweit umsetzbar war und ohne zusätzliche Eingriffe in die verwendeten Programme auskommt. Abbildung 6-3 zeigt beispielhaft die Niedrigwasserfrühwarnung zum Vorhersagezeitpunkt 26.07.2013 05:00 über alle sieben Vorhersagetage. In vielen Landesteilen in eine hohe Niedrigwassergefährdung bzw. eine große Wasserknappheit mit über 20-jährigem Niedrigwasser vorhergesagt. Aufgrund eines Niederschlagsereignisses im Laufe des dritten und vierten Vorhersagetages nimmt die Gefahr ab und erreicht am vierten VH-Tag sehr geringe Werte.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass landesweit noch keine konsistenten Vorhersagemodelle vorliegen, die Niedrigwasserkennwerte noch aktualisiert werden und die Korrekturfaktoren zur Vermittlung zwischen den Modellen daher nicht bestimmt werden können. Die hier gezeigte Darstellung der Visualisierung soll die prinzipielle Machbarkeit einer landesweiten Visualisierung der Niedrigwasserwarnung dokumentieren.

Für die endgültige Darstellung der Warnkarten können aber auch alternative Auswertungen in Frage kommen. So ist eine Einfärbung der Warnregionen entsprechend der Unterschreitungswahrscheinlichkeit des MNQs der Regionalisierungsknoten denkbar. Beispielsweise könnten die Perzentilwerte dafür genutzt werden um eine entsprechende Warnfarbe zu erzeugen. Eine folgende Klassifizierung wäre möglich:

- Grün – alle Regionalisierungsknoten > MNQ
- Gelb – 95 % der Regionalisierungsknoten > MNQ
- Orange – 90 % der Regionalisierungsknoten > MNQ
- Rot – < 90 % der Regionalisierungsknoten > MNQ

Es wird LUBW-intern auch über eine Änderung der Farbcodierung nachgedacht, um die Verwechslungsgefahr mit der Hochwasserfrühwarnung zu reduzieren. Diese Umsetzungen können bei Bedarf in den zukünftigen Testphasen mit wenig Aufwand implementiert werden.

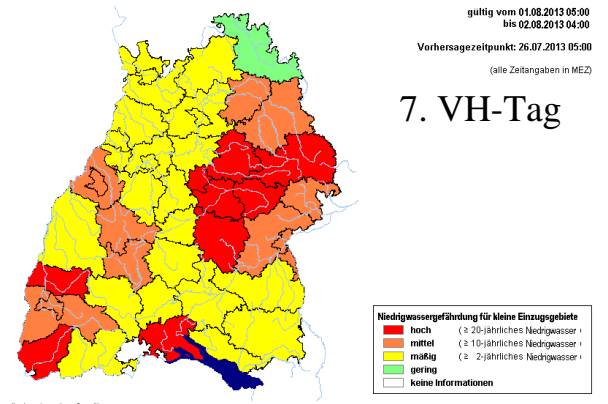
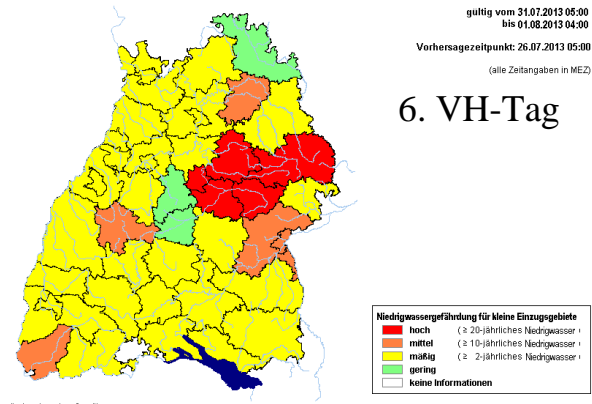
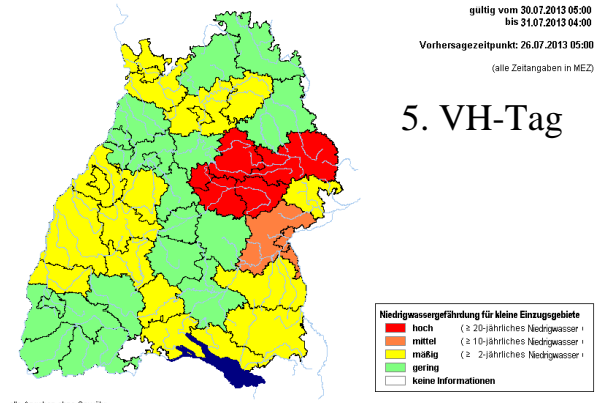
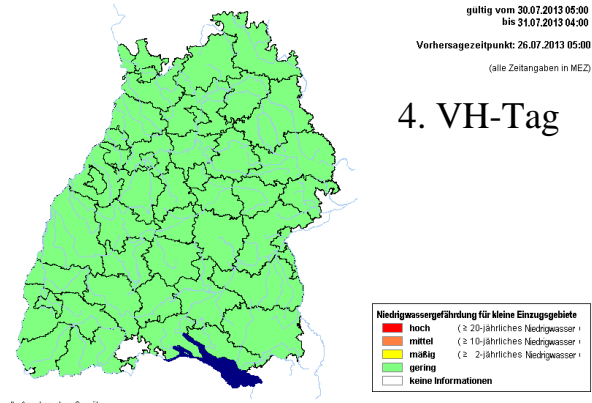
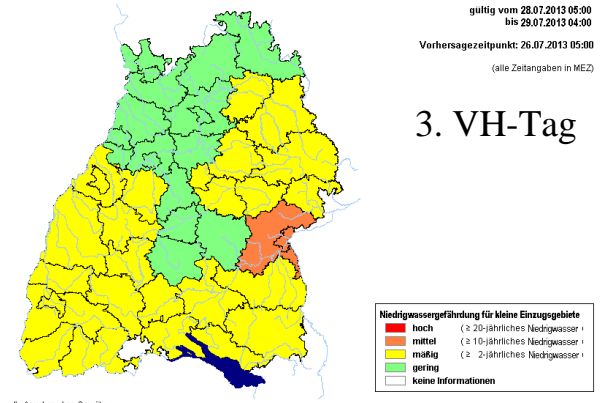
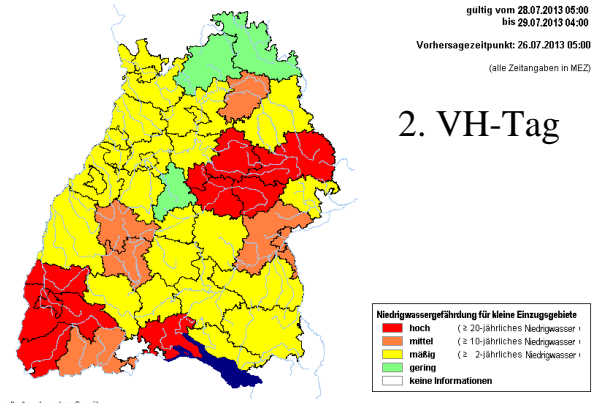
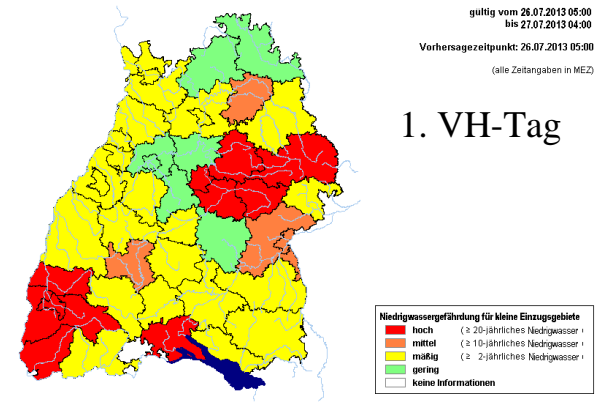
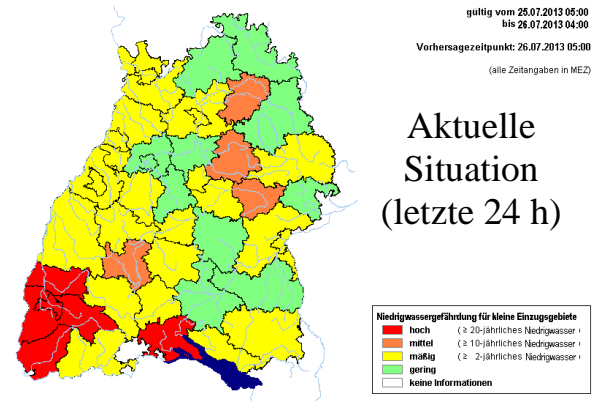


Abbildung 6-3: Niedrigwasser-Warnkarten der aktuellen Situation und der folgenden 7. Vorhersagetage bezogen auf den Vorhersagezeitpunkt 26.07.2013 5:00

## **6.5 GEPLANTE TECHNISCHE UMSETZUNGEN**

### **6.5.1 VERBESSERUNG DER ARIMA-KORREKTUR**

Auf Basis der in Kapitel 3.4.1 formulierten Empfehlungen werden in Wasserhaushaltsmodell LARSIM neue Optionen und Einzelparameter programmiert. Dies soll in enger Abstimmung der Landeshochwasserzentralen durchgeführt werden und betrifft alle Abflussbereiche.

Bei Vorliegen der neuen Algorithmen für die ARIMA-Korrektur werden die dafür notwendigen Optionen und Einzelparameter in den Steuerdateien der Niedrigwasservorhersagemodelle eingebaut. Es wird erwartet, dass die Niedrigwasservorhersage und somit auch die Niedrigwasserklassifikation in Zukunft stabiler sein wird.

Weitere Beobachtungen und Anpassungen der einzelnen Steuerparameter sollen im operationellen Betrieb durchgeführt werden. Die gewonnenen Informationen sollen dokumentiert werden und zwischen den Landeshochwasserzentralen ausgetauscht werden.

### **6.5.2 OPTIMIERUNG DER NACHFÜHRUNG**

Wie im Kapitel 3.4.1 formuliert sollte im Niedrigwasserbereich auf eine Nachführung der Gebietsspeicher und insbesondere des Grundwasserspeichers bei instationären Bedingungen verzichtet werden.

Bei vorliegendem Einzelparameter  $Q_{mit}/Q_{max}$  wird dieser in die jeweiligen Steuerdateien der Niedrigwasservorhersagemodelle eingebaut. Danach muss im operationellen Betrieb eine Justierung des Parameters vorgenommen werden, um eine plausible Größenordnung zu finden. Es wird erwartet, dass unplausible Nachführungen der Gebietsspeicher und eine damit verbundene unrealistische Erhöhung bzw. Verringerung des Basisabflusses im Vorhersagezeitraum unterbunden wird.

Diese Kalibrierung wird dokumentiert und die Information an die LARSIM-Entwickler und Landeshochwasserzentralen kommuniziert.

# 7 Vorgehensweise für die Erstellung eines konsistenten landesweiten Niedrigwasser-Vorhersagemodells

Im Rahmen des Projektes wurden schrittweise Methoden entwickelt, um ein konsistentes und einsatzfähiges Niedrigwasser-Vorhersagemodell zu erstellen. Im Vergleich zu Hochwassermodellen zeigen sich dabei zum größten Teil vollkommen andere Erfordernisse und es treten neue Schwierigkeiten, auch hinsichtlich des operationellen Systems auf.

An dieser Stelle wird ein Grundrezept zur Erstellung eines Niedrigwasser-Vorhersagemodells gegeben und auf die wichtigsten Erkenntnisse hingewiesen.

## 1. Pegelplausibilisierung und erste Konsistenzprüfung

Die Pegelplausibilisierung stellt den Grundpfeiler beim Aufbau eines Niedrigwassermodells dar. Es hat sich gezeigt, dass viele im Hochwasser als verlässlich geltende Pegel für ein Niedrigwassermodell nicht einsetzbar sind. Hingegen konnten Pegel verwendet werden, die im Hochwasserfall als umläufig gelten oder im staubeeinflussten Bereich liegen und daher nicht verwendet werden.

Im Vergleich zu Messungen im Mittel- oder Hochwasserbereich, weisen Messungen im Niedrigwasser häufig systematische kleine Sprünge auf, die in der Regel auf die Messgenauigkeit zurückzuführen sind. Die Behandlung solcher Sprünge muss insbesondere im Hinblick auf die operationellen Anforderungen weiter untersucht werden, sie stellen jedoch kein Ausschlusskriterium dar.

Eine Konsistenzprüfung kann parallel zur Plausibilisierung erfolgen. Hierbei wird geprüft ob Ober- und Unterliegerpegel bzw. benachbarte Pegel zueinander passen. In vielen Fällen zeigten sich hier Unstimmigkeiten, die weder auf Karsteinflüsse noch auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen sind. Häufig lassen sich durch einfache optische Vergleiche Auffälligkeiten herausstellen.

## 2. Berücksichtigung von Kläranlagen und Karstquellen

Die Bedeutung von punktuellen Quellen für die Niedrigwasserfrühwarnung konnte klar belegt werden. Berücksichtigt man solche Quellen nicht, kann dies zu massiven Fehleinschätzungen der Abflusssituation, insbesondere in kleineren Fließgewässern führen.

Die aktuellen Untersuchungen belegen, dass der Korrekturfaktor zwischen den regionalisierten MNQ-Werten und denen der LARSIM-Berechnungen, durch die Berücksichtigung der KLA deutlich reduziert werden können. Dies ist ein wichtiger Faktor bei der Regionalisierung von Vorhersageergebnissen.

### Kläranlagen:

Bei dem Pilotprojekt zur Einbindung der Kläranlagen in ein bestehendes WHM LARSIM zeigte sich der enorme Anteil der Kläranlagenzuflüsse im Bereich des Niedrigwassers (siehe LUBW 2012a). Durch die in den Kapiteln 5.2 und 5.3 erläuterte Vorgehensweise können Kläranlagen künftig im Modell berücksichtigt werden.

### Karstregionen:

Auch karstbeeinflusste Pegel bringen Schwierigkeiten mit sich, weil hier entweder Quellen vorhanden sind, die für einen nicht niederschlagsinduzierten Beitrag am Abflussgeschehen sorgen oder Versinkungen im Bereich von Gewässern vorhanden sind, durch die Wasser aus dem System verloren geht. Hierdurch erscheinen Kopfpegel und Unterliegerpegel nicht konsistent zueinander zu sein.

Neue Untersuchungen im Auftrag der HVZ Baden-Württemberg zeigen, dass es sinnvoll ist, bereits bei der Kalibrierung das Ausmaß der Verkarstung mit einzubeziehen. Hierdurch kann die Vorhersagequalität auch in hydrologisch komplexen Regionen gesteigert werden.

## **3. Abflussspenden**

Zur Abklärung der inneren Konsistenz in einem Gebiet sollte die Abflussspende bezogen auf den Pegelkontrollbereich in die Betrachtung mit einbezogen werden. Hierbei zeigen sich deutliche Unterschiede, wenn einzelne Pegel nicht konsistent zu den benachbarten Pegeln sind. Hierbei handelt es sich jedoch stets um einen iterativen Prozess, der mit Zunahme der Pegelanzahl schwieriger durchführbar wird. Auch sollten die zuvor erwähnten KLA bzw. Karstquellen mit berücksichtigt werden und in die Abflussspende mit eingehen.

Anhand der Abflussspendenbetrachtung lassen sich insbesondere Inkonsistenzen sehr viel besser beurteilen als durch die Betrachtung der Abflussganglinien.

Am Ende dieses Schrittes steht die Auswahl geeigneter Pegel, wobei stets berücksichtigt werden sollte, dass in einem späteren Schritt eine Regionalisierung stattfinden soll. Sind demnach nur Pegel am Hauptgewässer vorhanden, kann dies zu Unsicherheiten bei der Regionalisierung führen. Nicht konsistente Pegel verfälschen das Ergebnis jedoch noch stärker, so dass die Auswahl des Pegelsetups sehr wichtig ist.

## **4. Kalibrierung**

Nach Einbindung der Punktquellen und Auswahl der geeigneten Pegel, sollten diese kalibriert werden. Insbesondere durch das Einleiten von KLA-Abflüssen verändern sich die Anteile an Basisabfluss und Interflow. Neben Betrachtung der üblichen Gütemasse, sollten auch der simulierte und der gemessene MNQ verglichen werden, da es sich hierbei um den entscheidenden Schwellenwert handelt. Diese gesonderte Betrachtung verkompliziert die Kalibrierung zusätzlich, stellt aber eine wichtige Größe bei der Aufstellung des Niedrigwasserfrühwarnmodells dar.

Im Gegensatz zu der üblichen Kalibrierung von Pegeln (LUBW 2012b) kann der Hochwasserbereich außer Acht gelassen werden. Hingegen sollten die abfallenden Äste zwischen Mittelwasser und Niedrigwasser und das eigentliche Niedrigwasser im Fokus der Kalibrierung liegen.

## 5. Vorhersagetests

Nach Abschluss der Kalibrierung sollten die Ergebnisse anhand von Vorhersagetests überprüft werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass das Erreichen des Schwellwertes korrekt vorhergesagt wird und das Modell eine gute Vorhersagequalität aufweist. Außerdem zeigen sich hier Stärken und Schwächen von Nachführung und ARIMA-Korrektur, die Aufschluss über Verbesserungsmöglichkeiten geben können. Darüber hinaus sind häufig pegelspezifische Einstellungen zur Nachführung und ARIMA-Korrektur nötig.

Es empfiehlt sich Vorhersagetests über einen langen Zeitraum hinweg durchzuführen. Für Anpassungen an Pegeln eignen sich darüber hinaus Vorhersagetests über Jahre mit langen Niedrigwasserperioden. Zur Auswertung der Vorhersagetests sollte ein geeignetes Programm wie ProFoUnD verwendet werden, da hier sowohl kategorische als auch kontinuierliche Gütemaße mit betrachtet werden können. Eine optische Auswertung der Ergebnisse ist für längere Niedrigwasserperioden jedoch ebenfalls zu empfehlen.

Zusätzlich kann die Betrachtung der Log-Dateien sinnvoll sein, da hier Nachführung und ARIMA-Korrektur für jede Vorhersage hinterlegt sind. Auf diese Weise lassen sich Pegel identifizieren, die häufig oder sehr stark korrigiert werden. Durch die Auswahl konsistenter und plausibler Pegel, sollte sich jedoch die Häufigkeit der Nachführung reduzieren.

## 6. Regionalisierung

Die Aktualisierung der NQ-Regionalisierung unter Berücksichtigung höher aufgelöster bzw. plausibilisierter Eingangsdaten wird vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (Dr. Ihringer) bearbeitet. Dabei können die Kläranlagendaten wie im Kap. 5.8 beschrieben integriert werden.

## 7. Korrekturfaktoren

Für alle Regionalisierungsknoten müssen bei vorliegenden Niedrigwasserkennwerten und Simulationen der Wasserhaushaltsmodelle Korrekturfaktoren bestimmt werden. Sollte das im Kap. 6.1 beschriebene Verfahren auf andere Gebiete übertragen werden, dann ist die Überprüfung der Einflussgrößen notwendig.

Hierbei sollten z.B. folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Überleitungen (Fernwasserversorgungen)
- Punktuelle Quellen (Kläranlagen, Karstquellen)
- Punktuelle Senken (Verkarstung, Ausleitungen)

Die Korrekturfaktoren auf Basis des mittleren Niedrigwasserabflusses (MNQ) aus Regionalisierung und auf Basis langjähriger Simulationen können anschließend für alle Regionalisierungsknoten in Baden-Württemberg ermittelt werden.

## 8. Testbetrieb

Die Auswertungen der Vorhersagetests haben gezeigt, dass bei der Einrichtung eines Niedrigwasserfrühwarnmodells einige Besonderheiten berücksichtigt werden müssen. Im Testbetrieb empfiehlt es sich daher die aktuell neu überdachte ARIMA-Korrektur zu testen. Auch der Umgang mit im Niedrigwasser häufig auftretenden Ausreißern muss gesondert betrachtet werden. Hierfür gilt es Lösungen zu finden, erste Ansätze hierzu finden sich in Kapitel 6.

Die Verwendung eines festen Schwellwertes erscheint darüber hinaus ebenfalls nicht sinnvoll. Die Betrachtung der gemessenen Ganglinien zeigen, dass die Messgenauigkeit, insbesondere bei kleineren Kopfpegeln nicht immer ausreicht klare Schwellwerte zu definieren. Die Messung springt häufig zwischen Werten hin und her. Liegt ein Schwellwert genau dazwischen, kann dies zu fehlerhaften Warnmeldungen führen. Möglicherweise sollte ein Unsicherheitsband um den Schwellwert gelegt werden um diesen Messungenauigkeiten zu begegnen.



# 8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen der des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde die Konzeption für eine konsistente landesweite Niedrigwasser-Frühwarnung erarbeitet. Diese Konzeption wurde für zwei Beispielregionen in Form eines Offline-Modells umgesetzt, getestet, analysiert und optimiert.

Das bislang vorliegende Instrumentarium – welches insbesondere die operationellen LARSIM Wasserhaushaltsmodelle und die Niedrigwasserregionalisierung beinhaltet – wurde hinsichtlich seiner Eignung analysiert. Diese Analyse basiert auf der Auswertung bisheriger operationeller Ergebnisse und der Auswertung der beiden neu erstellten Testgebiete. Mit dem vorhandenen Instrumentarium ist es grundsätzlich möglich, ein landesweites Niedrigwasser-Frühwarnsystem zu betreiben.

Die Analyse zeigte, dass es im Rahmen des vorgegebenen Instrumentariums noch deutliches Potential zur weiteren Verbesserung der Niedrigwasser-Frühwarnung gibt. Hierzu zählen vor allem folgende Punkte:

- Spezifische Weiterentwicklungen an LARSIM
- Intensive Analyse der verwendeten Pegel mit dem Ziel eines konsistenten Niedrigwasser-Vorhersagesystems
- Berücksichtigung relevanter räumlich verteilter Punktquellen (Kläranlagen, Karstquellen) in den LARSIM Modellen und der Regionalisierung
- Fortentwicklung der Niedrigwasser-Regionalisierung unter Berücksichtigung der genannten Punktquellen und unter Verwendung des Verhältnisses MQ/MNQ
- Landesweite Angleichung zwischen Niedrigwasserregionalisierung und LARSIM-Simulationen

Weiterentwicklungen von LARSIM zur spezifischen Verbesserung der Niedrigwassersimulation und -frühwarnung wurden bereits im Rahmen dieser Studie umgesetzt und erfolgreich angewandt. Darüber hinaus erscheint es wünschenswert, die operationelle Modellnachführung und die ARIMA-Korrektur von LARSIM speziell im Niedrigwasserbereich weiter zu verbessern. Dies ist jedoch keine zwingende Voraussetzung für eine erfolgreiche Niedrigwasser-Frühwarnung und kommt zudem auch anderen Aspekten der operationellen Vorhersage zugute.

Neue Algorithmen zur Nachführung und der Einbau neuer Optionen zur ARIMA-Korrektur (siehe Kap. 3.4.1) können ggf. zukünftig in die bereits laufenden Modelle integriert werden. Die Weiterentwicklung der Modellnachführung und der ARIMA-Korrektur im Niedrigwasserbereich kann mit den Wasserhaushaltsmodellen mit konsistenten Pegelmessungen und Parameterwerten anhand von Niedrigwasservorhersage-tests überprüft werden. Dabei können Niedrigwasserklassifikationen anhand der regionalisierten Niedrigwasser-Kennwerte vorgenommen werden. Anhand dieser Testrechnungen können auch die Steuerdateien der Modelle hinsichtlich der für Niedrigwasser relevanten Steuerparameter für die Nachführung und ARIMA-Korrektur nochmals optimiert werden. Dabei wird eine Stabilisierung der Niedrigwasservorhersage erwartet.

Der Nutzen eines konsistenten Niedrigwasser-Vorhersagesystems, bei dem vor allem die verwendeten Niedrigwassermessungen konsistent zusammenpassen müssen, konnte im Rahmen des vorliegenden Projekts anhand der Bodenseezuflüsse und des Rems-Murr-Gebiets beispielhaft verdeutlicht werden. Mithilfe dieser optimierten Systeme konnte die Niedrigwasservorhersage an den Pegeln verbessert werden. Vor allem aber

wird die Vorhersage der Abflüsse für Gewässerknoten in den Einzugsgebieten hierdurch wesentlich plausibler. Sprunghafte Veränderungen der vorhergesagten Abflüsse an den Grenzen zwischen Pegelkontrollbereichen werden weitgehend unterbunden. Dies ist eine elementare Voraussetzung für eine stabile und belastbare Niedrigwasser-Frühwarnung.

Die räumliche Verteilung der Niedrigwasserabflüsse in den Einzugsgebieten wird zudem maßgeblich durch Punktquellen wie Karstquellen und insbesondere die rund 1 000 Kläranlagen im Land beeinflusst. Daher ist es für eine korrekte Abbildung von Niedrigwasserkennwerten an den Gewässerknoten empfehlenswert, diese Punktquellen bei der Niedrigwasserregionalisierung zu berücksichtigen. In gleicher Weise sollten diese Punktquellen in der dynamischen Simulation und Vorhersage von Niedrigwasserabflüssen lagegetreu einbezogen werden.

Anhand des Rems-Murr-Gebiets wurde gezeigt, dass die örtlich korrekte Berücksichtigung dynamischer Kläranlagen-Trockenwetterabflüsse bei der Simulation und Vorhersage mit LARSIM praktikabel ist. Zudem wurde gezeigt, dass Kläranlagen-Trockenwetterabflüsse bei der landesweiten Regionalisierung von Niedrigwasserkennwerten korrekt einbezogen werden können. Durch die gleichzeitige Berücksichtigung der Kläranlagen-Trockenwetterabflüsse in Regionalisierung und LARSIM wurde die Konsistenz zwischen beiden Modellansätzen deutlich erhöht, die zum angleich erforderlichen Korrekturfaktoren werden wesentlich kleiner. Zudem wird durch die Einbeziehung der Punktquellen die tatsächliche räumliche Verteilung der Niedrigwasserabflüsse an den Gewässerknoten wesentlich realistischer abgebildet.

Es erscheint empfehlenswert, die Kläranlagen-Trockenwetterabflüsse in einem zukünftigen landesweiten Niedrigwasser-Vorhersage- und -Frühwarnsystem sowohl in der Niedrigwasserregionalisierung als auch in den LARSIM-Modellen zu berücksichtigen. Ähnliches gilt für signifikante Karstquellen wie z.B. die Aachquelle an der Radolfzeller Aach. Dabei sollten in Regionalisierung und LARSIM dieselben Punktquellen in gleicher Weise einbezogen werden, um eine möglichst hohe Konsistenz zwischen beiden Ansätzen zu gewährleisten.

Am Beispiel von Rems und Murr konnte auch gezeigt werden, dass die verbleibenden Unterschiede zwischen der Niedrigwasserregionalisierung und den LARSIM-Simulationen an den Gewässerknoten durch relativ moderate Korrekturfaktoren ausgeglichen werden können. Diese beispielhaft für das Rems-Murr-Gebiet ermittelten Faktoren können für ein zukünftiges landesweites Niedrigwasser-Frühwarnsystem relativ einfach für die relevanten Gewässerknoten der gesamten Landesfläche abgeleitet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit konnte Dr. Ihringer vom KIT zudem zeigen, dass eine Regionalisierung des MNQ unter Berücksichtigung des Verhältnisses MQ/MNQ (und der Kläranlagen-Punktquellen) machbar und zielführend ist. Für die Belange einer stabilen Niedrigwasser-Frühwarnung scheint es daher empfehlenswert, die Niedrigwasserregionalisierung wie hier mithilfe vorläufiger Daten dargestellt für die gesamte Landesfläche durchzuführen.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurden zudem alle technischen Voraussetzungen für die Umsetzung der landesweiten Niedrigwasser-Frühwarnung geschaffen. Darüber hinaus wurden klare Empfehlungen zur landesweiten Umsetzungen dieses Systems abgeleitet.

Nachdem sämtliche Aktualisierung durchgeführt worden sind, kann nach erfolgreicher Testphase, die Veröffentlichung der Warnkarten im Internet erfolgen. Gegebenenfalls lassen sich neue Warnregionen definieren, bzw. zusätzliche Visualisierungen verwirklichen, die der Information der zuständigen Behörde dienen.

# Literatur

- Box, G., Gwilym, M. Jenkins, G. (2008): Time Series Analysis: forecasting and control, 4. Auflage, John Wiley & Sons, Inc. – New Jersey
- Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele Freiburger Schriften zur Hydrologie, 2000; 11, Institute of Hydrology (Hrsg.)
- Bremicker, M., Brahmer, G., Demuth, N., Holle, F.-K. & Haag, I. (2013): Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle und deren Anwendung. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 2013(6) – Nr. 8. (im Druck).
- Flaig, H. (2009): Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die baden-württembergische Landwirtschaft, Landinfo 7/2009.
- Gujer, W. (2002): Siedlungswasserwirtschaft. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York.
- Gerlinger, K. & Meuser, A. (2013): Modellierung des Wasserhaushalts – methodisches Vorgehen und Ergebnisse. KLIWA-Heft 19, Fachvorträge des 5. KLIWA-Symposiums, S. 170 - 183.
- Haag, I. & Bremicker M. (2010): Wasserhaushaltsmodelle bei der LUBW: Ein Beispiel für den Nutzen von Geoinformationen und Umweltmessnetzen. Karlsruher Geowissenschaftliche Schriften, Reihe B, Band 5, Hochschule Karlsruhe, S. 31- 37.
- Haag, I. & Aigner, D. (2013): ProFoUnD – Programmbeschreibung und Anwendungshinweise. Revision 6, Stand 28.06.2013. HYDRON GmbH, Karlsruhe, im Auftrag von LfU Bayer, LUWG Rheinland-Pfalz und HLUG Hessen.
- Haag, I., Ehret, U., Demuth, N. & Moritz, K. (2013): ProFoUnD: Ein Werkzeug zur statistischen Analyse von Abfluss- und Wasserstandsvorhersagen und zur Ermittlung von Vorhersageunsicherheiten. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 33.13, S. 93 - 103.
- Hennegriff, W., Ihringer, J., Kolokotronis, V. (2008): Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 2008(1) – Nr. 6.
- LUBW (2007): Abfluss-Kennwerte in Baden-Württemberg, DVD, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg – Karlsruhe
- LUBW (2012a): Integration von Kläranlagen in das Wasserhaushaltsmodell LARSIM –Pilotprojekt Rems-Murr. HYDRON GmbH, Karlsruhe, im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (unveröffentlicht).

- LUBW (2012b): Vorgehensweise bei der Eichung eines LARSIM-Wasserhaushaltsmodells für den Einsatz bei der HVZ Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg – Karlsruhe, Stand 16.02.2012 (unveröffentlicht)
- LUBW (2013a): Hinweise zu den Wasserstands- und Abflussvorhersagen der Hochwasservorhersagezentrale der LUBW – URL: <http://hochwasser.lubw.bwl.de/public/hvz/pdf/Hinweise-WHM-Vorhersage.pdf>  
Stand 24.06.2013
- LUBW (2013b): LARSIM Online-Hilfe – Revision 101, Stand 29.07.2013 (unveröffentlicht).
- Luce, A.; Haag, I.; Bremicker, M. (2006): Einsatz von Wasserhaushaltsmodellen zur kontinuierlichen Abflussvorhersage in Baden-Württemberg. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50(2), S. 58-66.
- Ruf, J., Henning, K. (2008): Abwasser, urbane Flächen und Mischwasserentlastung. Internes Dokument des Referats 41 der LUBW (unveröffentlicht).
- Zebitsch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U., Cramer, W. (2005): Klimawandel in Deutschland, Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme, Umweltbundesamt (Hrsg.)





