

Sonja Teschemacher & Wolfgang Rieger

# Ereignisabhängige Optimierung dezentraler Kleinrückhaltebecken unter Berücksichtigung von Standort, Retentionsvolumen und Drosselweite

**Event-dependent optimization of decentralized small retention basins in consideration of location, retention volume and throttled outflow**

Retentionsmaßnahmen in der Fläche, zu denen auch die Anordnung dezentraler Kleinrückhaltebecken mit einem Volumen von etwa 5.000 m<sup>3</sup> bis 50.000 m<sup>3</sup> zählt, sind fester Bestandteil moderner Hochwasserschutzstrategien. Die Wirksamkeit einer Beckenkombination auch in Verbindung mit weiteren Retentionsmaßnahmen in der Fläche kann grundsätzlich beispielsweise mithilfe des physikalisch-basierten hydrologischen Modells WaSiM bestimmt werden. Aufgrund der vergleichsweise langen Rechenzeiten ist allerdings die Ermittlung einer aus hydrologischer Sicht idealen Beckenkombination sehr zeitaufwendig. Deshalb wurde ein auf ein WaSiM-Modell aufbauendes Analysetool entwickelt, mit dessen Hilfe hydrologisch wirksame Beckenstandorte und -kombinationen bestimmt werden können. Zudem wurden aus einer Vielzahl an Kombinationen Abhängigkeiten zwischen den erzielten Wirksamkeiten und deren Einflussfaktoren wie beispielsweise der Anordnung, dem Ereignis, der Drosselweite und dem Beckenvolumen hergestellt.

**Schlagwörter:** Dezentraler Hochwasserschutz, Rückhaltebecken, Optimierung, Hydrologische Modellierung, WaSiM, MATLAB

Spatially distributed retention measures which include the arrangement of decentralized small retention basins with a volume of about 5.000 m<sup>3</sup> to 50 000 m<sup>3</sup> are a fundamental part of modern flood prevention strategies. Generally, the effectiveness of a basin combination, also in conjunction with further spatially distributed retention measures, can be determined, for example, using the physically based hydrological model WaSiM. However, due to relatively long computing times, the determination of an ideal basin combination from a hydrological point of view is very time-consuming. Therefore, an analysis tool based on the WaSiM model was developed in order to determine hydrologically effective retention basin locations and their combinations. Furthermore, dependencies between obtained efficiencies and their influencing factors such as, for example, the arrangement, the event, the throttle opening diameter and the basin volume were produced from a large variety of combinations.

**Keywords:** Decentralized flood protection, retention basin, optimization, hydrological modeling, WaSiM, MATLAB

## 1. Einleitung

Infolge der gehäuft aufgetretenen Hochwasserereignisse mit seltenen Jährlichkeiten in den letzten Jahrzehnten fand insgesamt ein Umdenken vom rein technischen Hochwasserschutz zu integralen Strategien statt. Moderne Hochwasserschutzprogramme wie beispielsweise das im Jahr 2002 in Bayern eingeführte Aktionsprogramm 2020 (StMUV, 2002), das 2014 zum Aktionsprogramm 2020plus erweitert wurde (StMUV, 2014), beinhalten sowohl den technischen Hochwasserschutz als auch den natürlichen Rückhalt in der Fläche und zusätzlich, basierend auf dem Kreislauf des Hochwasserrisikomanagements, die Nachsorge von Hochwasserereignissen und eine Hochwasservorsorge mit dem Ziel der Vermeidung von Schäden durch eine entsprechende Flächennutzung und bauliche Vorkehrungen. Die Handlungsfelder greifen ineinander und bilden so die Basis für erweiterte Rückhaltekonzepte in denen die Hochwassergefahr regional und überregional durch Maßnahmen des natürlichen und technischen Rückhalts verringert werden soll.

Die in diesem Beitrag untersuchten dezentralen Rückhaltebecken fungieren in diesem Zusammenhang als wichtiger Bestandteil, da sie direkt vor dem zu schützenden Objekt, aber auch dezentral im Einzugsgebiet verteilt angeordnet werden können. Bei dezentraler Anordnung in einem Einzugsgebiet werden üblicherweise Becken mit Volumen von ca. 5.000 bis 50.000 m<sup>3</sup> und einer maximalen Kronenhöhe des Absperrbauwerks von 4 m berücksichtigt (DWA, 2015a; RIEGER, 2012; REINHARDT, 2011b; KREITER

2006; MARENBACH, 2002). Sie fallen damit gemäß DIN 19700-12 (2004), welche Gesamtstauraum und Höhe des Absperrbauwerks für die Einteilung nutzt, unter die sehr kleinen Becken. Die dezentralen Rückhaltebecken bilden insofern eine Verbindung aus natürlichem und technischem Hochwasserschutz, da sie zwar bauliche Maßnahmen benötigen, die allerdings durch die Nutzung bestehender topografischer Beckenstrukturen, Hochwasserentlastung durch Überströmen und eine ungesteuerte Betriebsform möglichst gering gehalten werden (DWA, 2015b). Dezentrale Rückhaltebecken werden wie mittlere und große Becken nach DIN 19200-12 (2004) für den Hochwasserbemessungsfall 1 (Hochwasserentlastungsanlage) und den Hochwasserbemessungsfall 2 (Stauanlagensicherheit) bemessen, jedoch darf bei Becken mit einem Gesamtstauraum < 50.000 m<sup>3</sup> auf die Berechnung des notwendigen Freibords verzichtet werden, welche durch eine minimale Höhe von 0,5 m ersetzt werden kann.

### 1.1 Wirkungsweise und Wirksamkeit

Die durch die ungesteuerten Becken erzeugte Wellenverformung entspricht der stehenden Retention, was bedeutet, dass die Dimensionierung des Drosselorgans und die Beckengeometrie maßgebend für die Retention sind.

Die Geometrie eines Hochwasserrückhaltebeckens beeinflusst den Verlauf der Beckeninhaltskurve. Diese kann mithilfe eines digitalen Geländemodells bestimmt werden oder über  $S = a \cdot H^m$  ( $H$  = Wasserstand im Becken;  $a, m$  = Konstante) angenähert werden (VISCHER et al, 1992). Dabei liegt  $m$  nach PATT & GONSOWSKI

(2011) im Bereich zwischen 1,3 (flache Talböden und steile Flanken) und 4,4 (schluchtartige Täler).

Das *Auslassbauwerk* eines dezentralen Kleinrückhaltebeckens kann als offenes Durchlassbauwerk oder Durchlassbauwerk mit Stauwand ausgeführt werden (DWA, 2015a). Bei der hydraulischen Bemessung wird zwischen Druckabfluss im Rohr, dem Abfluss unter einer Planschütze bzw. einer Stauwand und dem Wehrüberfall bei Hochwasserentlastungsanlagen differenziert.

Die *Drosselöffnung* bestimmt den Speicherlauslass. Eine Optimierung ist notwendig, die bei einer Kombination aus mehreren Becken nacheinander ausgeführt werden muss, um das gesamte potentiell verfügbare Volumen nutzen zu können. Um den ökologischen Zustand des Gewässers zu erhalten, sollte die Mindestdrosselweite so gewählt werden, dass der jährliche Höchstabfluss oder der fünffache Mittelwasserabfluss (MQ) (KREITER, 2006) ohne Einstau abfließen kann. Aus technischer Sicht sollte ein Mindestdurchmesser des Grundablasses von 300 mm DIN 19700-11 (2004) nicht unterschritten werden und eine Revisionsmöglichkeit vorhanden sein (DWA, 2015a). Um vor Verklausung zu schützen ist zudem auf eine entsprechende bauliche Gestaltung wie die Anordnung von Treibgut- bzw. Geschiebesperren sowie von Rechen oder Retentionsblenden zum direkten Schutz des Grundablasses zu achten. Die obere Grenze der Öffnungsgröße ist durch das Maximalvolumen und die maximale Einstauhöhe sehr kleiner Rückhaltebecken sowie die damit einhergehende Wirksamkeit gesetzt.

Als Bewertungskriterien für die Wirksamkeit eines Beckens können verschiedene Kennwerte herangezogen werden, in die unter anderem die Abflusscharakteristika des Gebiets und die Beckeneigenschaften mit eingehen. Es wird dabei zwischen der lokalen, der regionalen und der überregionalen Wirksamkeit eines Beckens bzw. einer Beckenkombination unterschieden.

Die *Scheitelabminderung* ist die am häufigsten genutzte Maßzahl zur Bewertung der Wirksamkeit von Hochwasserrückhaltebecken und gibt die Reduzierung des maximalen Abflusses an. In bisherigen Studien zur Wirksamkeit dezentraler Beckenkombinationen wurden in Abhängigkeit von Gebietsgröße, spezifischem Volumen, Beckenzahl, Beckenvolumen, Hochwasserjährlichkeit und Abflusscharakteristik Scheitelabminderungen im Bereich von 0,5 % bis 55 % - beim HQ<sub>100</sub> von ca. 10 % bis 20 % - erreicht (DWA, 2015b).

Das *spezifische Volumen* ist ein Maß für die potentielle Wirksamkeit eines Beckens bzw. einer Beckenkombination. Es berechnet sich aus dem Volumen aller Rückhaltebecken in einem Einzugsgebiet und der entsprechenden Gebietsfläche ( $sV [mm] = V_{Becken} [m^3]/A_{EZG} [km^2] \cdot 1e3$ ), wodurch eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Gebiete und Retentionsvolumina möglich wird (KREITER, 2006). Je größer das spezifische Volumen ist, desto größer ist die zu erwartende Wirksamkeit durch die Rückhaltebecken im Einzugsgebiet. In Untersuchungen von KREITER (2006) in Gebieten mit Flächen < 20 km<sup>2</sup> konnte ab  $sV = 3$  mm eine erkennbare Wirkung festgestellt werden, wobei ab ca. 9 mm bis 13 mm keine Steigerung mehr festzustellen war.

Nicht zuletzt ist die *Charakteristik des Hochwasserereignisses*, bei der sowohl Scheitel als auch Volumen berücksichtigt werden müssen, ein entscheidender Faktor. Da ein durch Drosselweite

und Beckengröße fest definiertes Retentionsvolumen vorliegt, können bei steilen, kurzen Hochwasserwellen (konvektive Ereignisse) größere Scheitelabminderungen beobachtet werden als bei langen, flachen Wellen (advektive Ereignisse). Beispielsweise konnte in RIEGER (2012) bei einem konvektiven HQ<sub>60</sub>-Ereignis mit 22,2 % ( $VQ = 2,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ) eine deutlich größere Scheitelabminderung erreicht werden als bei einem advektiven HQ<sub>10</sub>-Ereignis (13,8 %,  $VQ = 3,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ).

## 1.2 Beckenstandorte und Anordnung im Gebiet

Grundsätzlich sollte ein einzelnes Becken in einem aus einem Gewässerabschnitt bestehenden Einzugsgebiet einen möglichst großen Flächenanteil des Einzugsgebiets kontrollieren, um eine maximale regionale Wirksamkeit zu erzielen (VISCHER et al., 1992). Durch die Überlagerung der zeitlich verschobenen Abflussganglinie des Beckens mit der im Zwischeneinzugsgebiet generierten Abflussganglinie kann sich eine Anordnung des Beckens weiter oberstrom vorteilhaft auf die regionale Wirksamkeit auswirken (TSCHOPP, 1980). Die ideale Beckenposition hängt somit zusätzlich von den Prozessen der Abflussbildung und -konzentration im Teilgebiet zwischen Becken und zu schützendem Standort ab. Bei Gebieten mit mehreren Zuflüssen müssen bei der Positionierung eines Beckens die Überlagerungseffekte der einzelnen Zuflussganglinien beachtet werden (VISCHER et al., 1992).

Bei Beckensystemen wird die Standortoptimierung durch die Vielzahl der zu beachtenden Überlagerungseffekte erschwert, weshalb Erkenntnisse in Bezug auf eine Verzögerung oder Beschleunigung der Hochwasserwelle nicht ohne weiteres auf andere Gebiete übertragen werden können (VISCHER et al., 1992). Die Gebietsstruktur und die daraus resultierende Wellenüberlagerung beeinflussen dabei maßgeblich die regionale und überregionale Wirkung von dezentralen Rückhalteräumen (MARENBACH, 2002). Die Bedeutung von Anzahl, Anordnung und Volumen von Kleinrückhalten wurde in KREITER (2006) mithilfe von zwei realen Gebieten und mehreren Fiktivsystemen untersucht, wobei kein wesentlicher Einfluss von Anzahl und Anordnung der Becken im Gebiet auf die Scheitelabminderung festgestellt werden konnte. In anderen Untersuchungen wie beispielsweise MARENBACH (2002) oder RIEGER (2012) werden zwar Zahlen zur möglichen Wirksamkeit bestimmter Beckenkombinationen genannt, auf den Einfluss verschiedener Anordnungen wurde dabei allerdings nicht eingegangen. In früheren Untersuchungen zur Wirksamkeit von Beckenkombinationen wurde aufgrund beschränkter Rechenkapazitäten die Kombination aus wenigen Becken bzw. vereinfachte Einzugsgebietssysteme betrachtet (BENK, 1970; TSCHOPP, 1980; VISCHER et al., 1992). Sie bieten somit verallgemeinerte Aussagen zu Überlagerungseffekten in vereinfachten Flusssystemen.

Die Wahl der jeweiligen Beckenstandorte wurde in bisherigen Studien nahezu ausschließlich anhand von topographischen Randbedingungen in den jeweiligen Untersuchungsgebieten getroffen (RIEGER, 2012; KREITER, 2006; MARENBACH, 2002; ASSMANN, 1999). Mithilfe der Analyse von Geographischen Informationssystemen (GIS) wurden Standorte bestimmt, an denen aufgrund von bestehenden Senken, einer günstigen Reliefform, Dämmen und Wegekreuzungen für die Gewässer mit vergleichsweise geringen Veränderungen ein möglichst großes Retentionspotential geschaffen werden kann. Aus diesen möglichen Standorten wurden verschiedene Beckenkombinationen zusammengestellt und deren Wirksamkeit bei verschiedenen

Hochwasserereignissen untersucht. Zusätzlich zu den aus topographischer Sicht möglichen Beckenkombinationen hat KREITER (2006) mithilfe eines flächendetaillierten, konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modells Fiktivsysteme simuliert, um die Einflussfaktoren auf die Scheitelabminderung detaillierter beschreiben zu können.

### 1.3 Forschungsfragen und Zielsetzung

In bisherigen Untersuchungen wurde der Fokus vor allem auf die Ermittlung der Wirksamkeit einer bzw. weniger potentiell möglicher Beckenkombinationen bei verschiedenen Hochwassereignissen gelegt. Durch die Abhängigkeit der Hochwasserwellen und deren Überlagerung von der Gebietsstruktur sind allgemeingültige Aussagen zur idealen Anordnung dezentraler Hochwasserrückhaltebecken damit nur eingeschränkt möglich. Auch bleibt die Frage offen, in wie weit sich durch eine optimale Beckenanordnung unter Ausnutzung der gebietsabhängigen sowie zeitlichen Verzögerungen ein größeres Potential vor allem für die regionale Wirksamkeit ergibt. In diesem Beitrag wird daher eine Methode zur Bestimmung der Wirkung dezentraler Kleinrückhalte in mesoskaligen Einzugsgebieten vorgestellt mit dessen Hilfe eine Vielzahl an Beckenkombinationen analysiert und damit eine aus hydrologischer Sicht möglichst wirksame Beckenkombination bestimmt werden kann. Zudem können Einflussfaktoren auf die lokale, regionale und überregionale Wirksamkeit verschiedener Beckenkombinationen ermittelt und analysiert werden, um daraus wiederum Empfehlungen für eine effektive Bemessung und Anordnung dezentraler Becken ableiten zu können. Um hierbei die Modellunsicherheiten zu minimieren basieren die nachfolgenden Untersuchungen auf einem weitgehend physikalisch basierten hydrologischen Modellansatz.

## 2. Gebietsbeschreibung und Datengrundlage

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Als Beispielgebiet wurde das süd-westliche Teileinzugsgebiet der Mangfall bis zum Pegel in Valley gewählt. Mit einer Fläche von 387 km<sup>2</sup> (HND, 2015) umfasst es ca. 35 % des gesamten Einzugsgebiets der Mangfall bis zu ihrer Mündung in den Inn in Rosenheim. Das Gebiet liegt im Landkreis Miesbach (Bayern, Deutschland) und erstreckt sich vom Gebietsauslass in Valley ca. 30 km südlich von München bis an die bayrisch-österreichische Grenze.

Die Abflusscharakteristik ist von der Lage im voralpinen Raum und dem großen Höhenbereich von 578,4 m bis 1.875 m geprägt. Das Einzugsgebiet wird durch die beiden Seen Tegernsee und Schliersee unterteilt. Die Zuflüsse im südlichen Teil haben durch ihre Lage im Mangfallgebirge eine ausgeprägte Wildbachcharakteristik, wohingegen die Abflusscharakteristik von Mangfall und Schlierach im nördlichen Teil durch die Retentionswirkung der beiden Seen stark beeinflusst wird. Zudem werden die Abflussmengen in Mangfall und Schlierach im Bereich der Ausleitungen zu den Leitzachwerken stark reduziert. In den letzten Jahren traten gehäuft Hochwasserereignisse mit seltenen Jährlichkeiten auf. Je nach Pegel wurden in den Jahren 1999, 2005, 2010 sowie 2013 zum Teil 50- bzw. 100-jährliche Abflüsse aufgezeichnet. Aufgrund der Größe des Gebiets und der räumlichen Heterogenität von Niederschlagsereignissen können sich die Jährlichkeiten eines Ereignisses über das Gebiet verteilt stark unterscheiden. Die Jahresniederschläge im Untersuchungsgebiet weisen eine deutliche Heterogenität auf. Beispielsweise betrug die mittlere Jahresniederschlagshöhe in Rosenheim (444 m + NN) ca. 1.100 mm

(1961 bis 2014). Auf der Firstalm (1.369 m + NN) südlich des Schliersees wurden im selben Zeitraum ca. 2.100 mm gemessen.

Die auftretenden Bodentypen und ihre Verteilung beeinflussen durch ihre bodenhydraulischen Eigenschaften die Prozesse der Abflussbildung und -konzentration. Vorherrschende Bodentypen im Untersuchungsgebiet sind Braunerde (28 %), Rendzina und Braunerde-Rendzina (18 %), Braunerde und Parabraunerde (11 %), Braunerde-Pseudogley (8 %) und (Haft-)Pseudogley (5 %). Die Beschreibung der Böden erfolgt auf Basis der Übersichtsbockenkarte (ÜBK) für Bayern (LfU, 2015a).

Die Landnutzung im Untersuchungsgebiet besteht vor allem aus Wald (62 %), Grünlandnutzung (27 %) und Siedlungsflächen (5 %). Der vergleichsweise geringe Anteil an Ackerland (2 %) liegt im nördlichen Teil des Gebiets. Eine deutliche Veränderung der Landnutzung kann von Norden (vorwiegend Grünland) nach Süden (Nadel- und Mischwald) beobachtet werden. Die Flächen und Prozentanteile der einzelnen Landnutzungsformen basieren auf der CORINE Land Cover (CLC) Landnutzungskarte (EEA, 2006).

### 2.2 Datenbasis

Als Grundlage für den Modellaufbau des modularen Abfluss- und Wasserhaushaltsmodells WaSiM werden räumliche Gebietseigenschaften, Zeitreihen meteorologischer Daten und Zeitreihen von Pegeln benötigt. Zu den räumlich verteilten Daten gehören das digitale Geländemodell (DGM), Boden- und Landnutzungsinformationen. Meteorologische Daten werden als Punktmessungen mit Angabe von Koordinaten und geodätischer Höhe eingebunden und anschließend modellintern interpoliert. Die Abflussmessungen an den Pegeln dienen der Modellkalibrierung. Zusätzlich werden Daten zur Berücksichtigung anthropogener Veränderungen benötigt. Diese beinhalten beispielsweise die Bemessungsgrößen von Hochwasserrückhaltebecken oder Ausleitungsmengen für die Wasserkraftnutzung.

Die ursprüngliche räumliche Auflösung der Rasterdaten beträgt 25 m. Um die Rechenzeiten in Anbetracht der Vielzahl an Simulationsläufe während der Modellkalibrierung in einem akzeptablen Bereich zu halten, wurde die Rasterlänge auf 100 m aggregiert, was allerdings Einschränkungen bei der prozessnahen Berechnung von kleinen Hochwasserrückhaltebecken mit sich bringt. Aus dem digitalen Geländemodell werden mithilfe des Tools TANALYS (SCHULLA, 2015) von der Topographie abhängige räumliche Daten abgeleitet. Die Bodenverteilung und -parametrisierung basiert auf der Übersichtsbodenkarte im Maßstab 1 : 25.000 (ÜBK25). Um die Gesamtzahl der Böden zu reduzieren wurden ähnliche Bodentypen mit geringen Flächenanteilen zusammengefasst und gemeinsam parametrisiert. Der Einfluss der Landnutzung auf die Horizontfolge und -mächtigkeiten wurde durch eine Verschneidung der natürlichen Hauptlandnutzungsformen (Landwirtschaft, Grünland, Wald) mit den Bodentypen berücksichtigt. Zur Berechnung des Wasserflusses in der ungesättigten Bodenzone wird in der verwendeten WaSiM-Version die Richards-Gleichung angewendet. Die benötigten *van Genuchten-Parameter* wurden mithilfe der Pedotransferfunktion nach WESOLEK et al. (2009) ermittelt. Makroporenkapazität und -tiefe werden von der überdeckenden Landnutzung beeinflusst und wurden gemäß RIEGER (2012) definiert. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit der einzelnen Bodenarten kann in Abhängigkeit der jeweiligen Trockenrohdichtestufe aus Tabellen herausgelesen werden (BGR, 2005). Als Datenbasis für die Land-

nutzungsparametrisierung im Modell dient die CORINE Land Cover Landnutzungskarte. Die Parametrisierung der einzelnen darin enthaltenen Vegetationsformen wurde an RIEGER (2012) angelehnt.

Als meteorologische Input-Daten werden stündliche Messwerte von Niederschlag, Temperatur, relativer Luftfeuchte, Solarstrahlung und Windgeschwindigkeit benötigt. Diese Datenreihen stehen auf der Internetseite des Gewässerkundlichen Diensts Bayern (LfU, 2015b) zu Verfügung und beinhalten ausgewählte Messstationen des Bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU), der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), des Deutschen Wetterdiensts (DWD), des Lawinenwarndiensts Bayern und der Wasserwirtschaftsämter. Die unterschiedlichen Parameter und Messzeiträume führen zu einer maximalen Anzahl von vier Strahlungs-, sechs Temperatur-, fünf Windgeschwindigkeits- und zehn Niederschlags-Messstationen sowie acht Stationen zur Messung der relativen Luftfeuchte.

Im Untersuchungsgebiet befinden sich neun Pegel, wovon fünf an Zuflüssen zum Tegernsee und vier im Teilgebiet nördlich der beiden Seen angeordnet sind. Die Pegel verfügen über einen Messzeitraum von 23 bis 87 Jahren. Die Modellkalibrierung wurde mithilfe von sieben im Gebiet liegenden Pegeln durchgeführt (Pegel 1 bis 7 in Abb. 1, links). Pegel 8 wurde aufgrund des für die

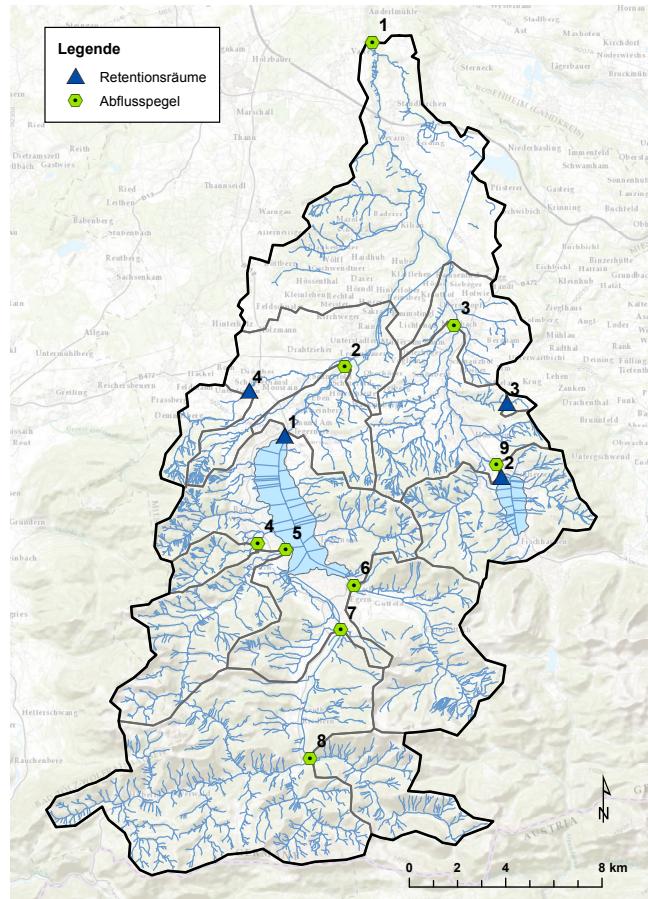


Abbildung 1

Einzugsgebiet der Mangfall (Valley); links: Fließgewässernetz mit Teilgebieten, rechts: Hydrogeologische Karte mit horizontalen Leitfähigkeiten des oberen Grundwasserleiters.

Mangfall (Valley) catchment area; left: river network with sub-catchments, right: hydrogeological map with horizontal conductivities of the upper groundwater aquifer.

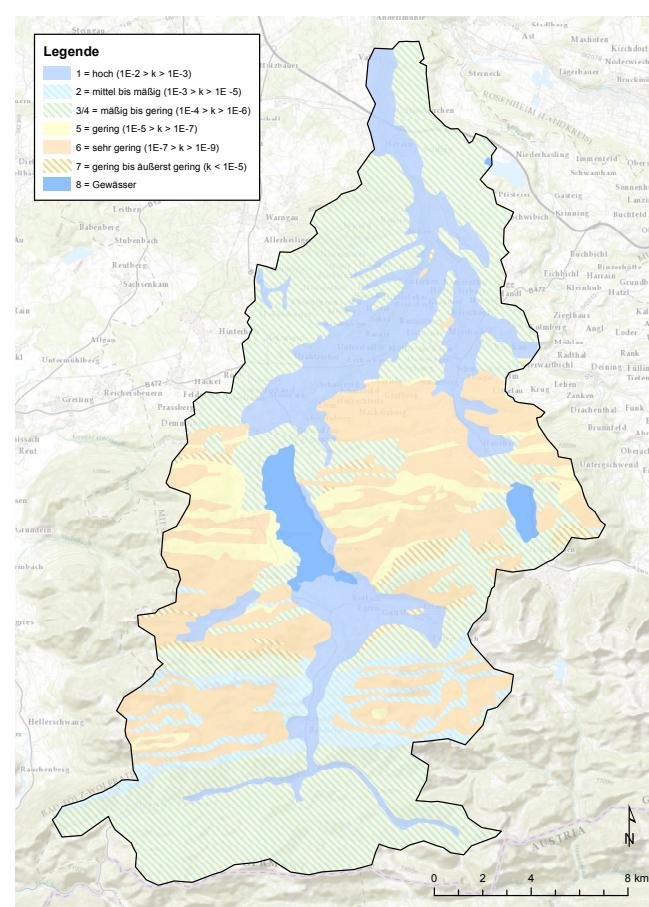
Region uncharakteristischen Abflussverhaltens aus der Kalibrierung ausgeschlossen. Für Pegel 9 liegen nur tägliche Messwerte außerhalb des Simulationszeitraums vor. Informationen zu den Eigenschaften des oberen Grundwasserleiters, wie beispielsweise der Durchlässigkeit, wurden aus der hydrogeologischen Übersichtskarte (BGR, 2011; 1 : 200.000) abgeleitet (Abb. 1, rechts).

### 3. Methodik

Die in dieser Arbeit angewandte Methodik sieht eine Verbindung der Simulationsergebnisse des WaSiM-Modells mit dem entwickelten Analysetool zur Berechnung von Beckenwirksamkeiten vor. Dieses Vorgehen bietet somit die Prozessnähe eines physikalisch-basierten Modells bei gleichzeitiger Verkürzung der für die Analysen notwendigen Rechenzeiten.

#### 3.1 Das hydrologische Modell WaSiM und Modellkalibrierung

Das deterministische, physikalisch-basierte **Wasserhaushaltssimulations-Modell WaSiM** hat einen modularen Aufbau und basiert auf meteorologischen Zeitreihen und Rasterdaten von Topographie, Boden und Landnutzung. Eine detaillierte Beschreibung des Modells und der einzelnen darin berücksichtigten hydrologischen Prozesse liefert die Dokumentation von SCHULLA (2015).



Die Wahl von WaSiM für die Simulation des Einzugsgebiets ist durch den modularen Aufbau und die flächendifferenzierten Berechnungen des Modells begründet. Die physikalisch-basierte Abbildung der Prozesse und die große Anzahl verschiedener Teilmodelle wie beispielsweise das Grundwasser- oder Seenmodell ermöglichen eine gute Beschreibung der Komplexität des Gebiets. Zudem können durch die rasterbasierte Simulation beliebig Standorte für Rückhaltebecken definiert und einzelne Teilgebiete untersucht werden. In WaSiM können einzelne Teilmodelle ausgewählt und deren Parameter in Abhängigkeit der jeweiligen Gebietseigenschaften und vorhandenen Messgrößen parametrisiert bzw. als Kalibrierungsparameter verwendet werden.

Die Kalibrierung erfolgte in drei Schritten: Zunächst wurden die Parameter des Schneemodells so angepasst, dass der Zeitpunkt der Schneeschmelze mit den gemessenen Daten übereinstimmt. Darauf folgte die Parametrisierung der Eingangs raster des Grundwassermodells, mit denen der simulierte Basisabfluss beeinflusst werden kann. Zuletzt wurden die Spitzenabflüsse mithilfe des Bodenmodells kalibriert.

Der gesamte Simulationszeitraum liegt bedingt durch die verfügbaren meteorologischen Daten zwischen 11.04.2005 und 31.11.2014 (Abb. 2). Aus diesem Zeitraum wurden Abschnitte für die Kalibrierung (01.11.2012 bis 31.10.2013) und die Validierung (01.11.2009 bis 31.10.2010) gewählt. Die Wahl der Zeiträume ergibt sich aus der Priorisierung größerer Hochwasserereignisse, welche für die Bemessung und die Beurteilung der Wirksamkeit von Hochwasserrückhaltebecken und Beckenkombinationen maßgeblich sind. Bezogen auf den Pegel in Valley wurde im Juni 2010 etwa ein  $HQ_{10}$  und im Juni 2013 ein  $HQ_{100}$  gemessen. Eine weitere Validierung der Modellgüte wurde durch die Betrach-

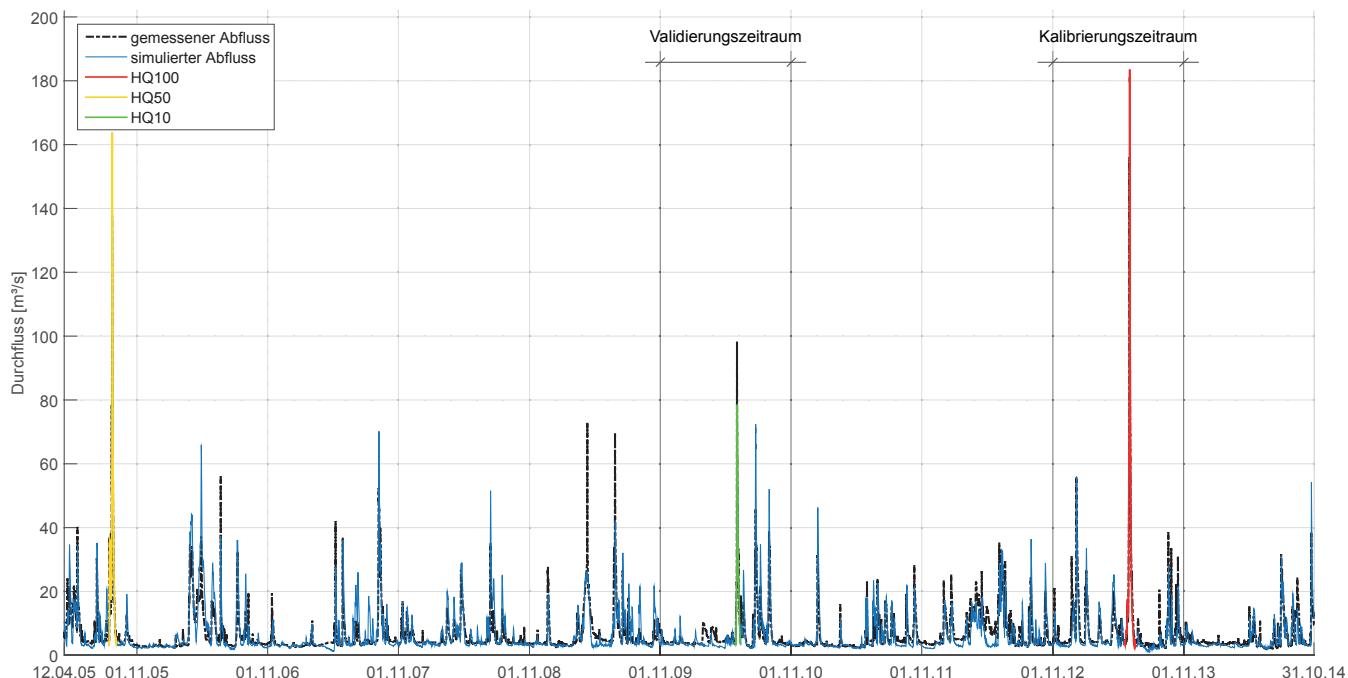
tung einzelner Hochwasserereignisse ( $HQ_{100}$ ,  $HQ_{50}$  und  $HQ_{10}$  am Pegel Valley) durchgeführt. Bei den verwendeten Gütekriterien wurde bei der Kalibrierung insbesondere auf das Nash-Sutcliffe Gütekriterium (NSE) geachtet, welches eine Aussage über die Abbildung von Spitzenabflüssen zulässt, die für die Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken maßgeblich sind. Zudem ist das Volumen der Hochwasserwelle von Bedeutung, dessen Übereinstimmung mit den Messwerten durch den prozentualen Volumenfehler (PBIAS) beschrieben wird. Die Gütekriterien sind für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum, sowie für die einzelnen Hochwasserereignisse in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Modellgüte im Kalibrierungs- und Validierungszeitraum liegt in einem vergleichbaren Bereich, wobei die Ergebnisse der Kalibrierung etwas besser sind. Auch bei der gesonderten Betrachtung der ausgewählten Hochwasserereignisse kann eine weitgehend gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen festgestellt werden.

### 3.2 Entwickelte Tools zur Beckenanalyse

Die Programme zur Implementierung zusätzlicher Pegelpositionen in WaSiM (SeGaT) sowie für die Berücksichtigung von Rückhaltebecken im Abfluss-Routing und die Analyse der berechneten Ganglinien (TOBas) wurden in MATLAB, Version R2014b, (MathWorks, 2015) entwickelt.

#### 3.2.1 SeGaT (Set Gages Tool)

Die gewählte Methodik zur Wirksamkeitsberechnung von Becken erfordert an jedem zu untersuchenden potentiellen Beckenstandort eine mit WaSiM erzeugte Abflussganglinie, weshalb in das kalibrierte WaSiM-Modell zusätzliche Pegelpunkte in das Gewässernetz eingefügt werden. Dies erfolgt – definiert für das jeweilige Teileinzugsgebiet und den gewünschten Pegelab-



**Abbildung 2**

Simulationszeitraum unter Berücksichtigung von Kalibrierungs- und Validierungszeiträumen sowie der drei für die Beckenanalyse verwendeten Hochwasserereignisse (Gesamtgebiet, Pegel Valley).

Simulation period under consideration of calibration and validation periods as well as the three flood events used for retention basin analysis (total catchment area, gauge valley).

stand – mithilfe des Tools *SeGaT*. Um die Überlagerung der Wellen bei den Zusammenflüssen zu optimieren, wird am Beginn und am Ende jedes Flussabschnitts ein Pegelpunkt gesetzt, dazwischen werden die Pegel in den zuvor spezifizierten Abständen angeordnet, woraus sich anschließend die dazugehörigen Teileinzugsgebiete ableiten lassen. Anschließend können mittels Simulation die benötigten Daten zur Berechnung von Beckenretention und Wellenfortpflanzung generiert werden. Die Anwendung von *SeGaT* auf das beschriebene WaSiM-Modell der Mangfall bis Valley mit einem Abstand von 500 m zwischen den neu definierten Pegelpunkten führt zu einer neuen Gebietsstruktur mit exakt 1.000 Pegelpunkten.

### 3.2.2 TOBas (Tool for the Optimization of Basins)

Mithilfe von *TOBas* werden die lokale, regionale und überregionale Wirksamkeit dezentraler Hochwasserrückhaltebecken und deren Interaktion untereinander auf Basis der Simulationsergebnisse eines WaSiM-Modells ermittelt. Dabei ist sowohl eine Optimierung der Drosselweiten für ein bestimmtes Hochwassereignis, als auch die Wirksamkeitsberechnung mit vorgegebenen Drosselweiten möglich. Schnittstellen ermöglichen neben fiktiven Beckengeometrien oder Ausflussbedingungen auch die Berücksichtigung gemessener Daten. Das Tool *TOBas* basiert auf einem objektorientierten Ansatz zur Abbildung der Pegelpunkte. Durch die Speicherung von Nachfolger und Vorgänger jedes Pegelpunkts kann die Gebietsstruktur ermittelt und eine Reihenfolge für den Routing-Algorithmus basierend auf dem importierten WaSiM-Gewässernetz bestimmt werden.

Neben den räumlichen Daten werden simulierte Abflusszeitreihen der WaSiM-Simulationen – der geroutete Abfluss des Pegels, der im jeweiligen Teilgebiet in Form von Basisabfluss, Zwischenabfluss und Direktabfluss generierte Gesamtabfluss und die Infiltration von Flüssen ins Grundwasser – für jeden Pegelpunkt und das zu betrachtende Ereignis importiert. Die möglichen Beckenpositionen bestimmen sich aus der Lage des gewählten Teilgebiets, aus manuell ausgeschlossenen Standorten (z. B. aufgrund von bestehenden Becken) und durch für Kleinrückhalte geeignete Abflussmengen. Einerseits muss der mittlere Abfluss die Öffnung bei maximaler Drosselweite ohne Einstau passieren können, andererseits muss beim maximal simulierten Zufluss ein Einstau ermöglicht sein. Zur Bestimmung der für die Berechnung benötigten Volumen-Abfluss-Beziehung werden die folgenden Eigenschaften benötigt:

- Die *Beckengeometrie* wird bei fiktiven Becken über  $S = a \cdot H^m$  beschrieben. Alternativ kann die daraus berechnete Volumen-Wasserstands-Beziehung eingelesen werden.
- Der *Betriebsauslass* kann unter Angabe eines minimalen und maximalen Durchmessers ( $D_{min} = 0,3 \text{ m}$ ,  $D_{max} = 2 \text{ m}$ ) optimiert werden. Der Ausfluss aus dem Becken kann einerseits als Aus-

**Tabelle 1**  
Modellgüte der einzelnen Teilgebiete unter Berücksichtigung der Gütekriterien NSE und PBIAS.  
*Model accuracy of each sub-catchment considering the quality criteria NSE and PBIAS.*

		Teilgebiete						
		1	2	3	4	5	6	7
<b>Kalibrierung</b>	NSE	0,83	0,91	0,47	0,69	0,79	0,90	0,82
	PBIAS	2	11	-15	-28	1	5	0
<b>Validierung</b>	NSE	0,76	0,81	0,51	0,74	0,76	0,84	0,82
	PBIAS	-2	-21	-27	20	-7	-34	-20
<b>HQ100</b>	NSE	0,83	0,96	0,16	0,94	0,87	0,93	0,87
	PBIAS	-15	8	-34	13	19	4	-1
<b>HQ50</b>	NSE	0,67	0,90	0,57	0,81	0,75	0,86	0,69
	PBIAS	-23	-11	-28	-10	-18	-9	27
<b>HQ10</b>	NSE	0,84	0,95	0,61	0,83	0,73	0,89	0,79
	PBIAS	-5	5	-21	13	25	2	12

fluss unter einem Schütz berücksichtigt werden, wobei als Überdeckungshöhe die Summe aus Wasserstand im Becken und Öffnungshöhe angenommen wird. Andererseits kann eine vereinfachte Ausflussberechnung durch eine kreisrunde Öffnung mit einer Entsprechung von Einstau- und Überdeckungshöhe durchgeführt werden, die in bisherigen Studien zur Wirksamkeitsanalyse dezentraler Kleinrückhalte angewandt wurde (KREITER, 2006; RIEGER, 2012).

- Die *Hochwasserentlastung* ist als festes rundkroniges Wehr ausgebildet, wodurch der Abfluss in diesem Fall der Summe aus Druckabfluss und dem Wehrüberfall entspricht.

Die *Beckenretention* wird mithilfe der auf der Kontinuitätsbedingung basierenden Speichergleichung berechnet. Als Eingangsdaten werden die Zuflussganglinie und die Volumen-Abfluss-Beziehung benötigt. Da die Berechnung der Beckenretention in WaSiM ebenfalls auf der Speichergleichung und einer tabellarischen Volumen-Abfluss-Beziehung beruht, sind hier vergleichbare Ergebnisse zu erwarten.

Die Größe der *Drosselöffnung* beeinflusst maßgeblich, ob ein bestimmtes Becken bei einem Hochwassereignis ideal ausgenutzt werden kann. Durch die Verformung der Hochwasserwelle infolge von oberstrom liegenden Rückhaltebecken wird die ursprüngliche Hochwasserwelle entsprechend verändert, weshalb keine zentrale Optimierung vor Beginn des Abflussroutings möglich ist. Die Ermittlung der idealen Ausflussgröße erfolgt daher an der entsprechenden Stelle im Routing-Algorithmus im Bereich der zuvor definierten Grenzwerte.

Zur Berechnung des *Abflussroutings* wurde aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten, die simulierte Ganglinien an allen Pegelpunkten beinhalten, und der Anzahl der benötigten Rechenschritte das Muskingum-Verfahren in das Tool integriert. Die Parameter des Muskingum-Verfahrens werden mithilfe der aus WaSiM importierten Ganglinien zweier aufeinander folgender Pegel bestimmt. Durch die Vereinfachungen im Vergleich des in WaSiM berücksichtigten Ansatzes der kinematischen Welle muss jedoch mit Abweichungen gerechnet werden. Der Routing-Algorithmus ist so aufgebaut, dass nur die Ganglinien der Pegelpunkte berechnet werden, die durch zusätzliche oberstrom liegende Rückhaltebecken eine Veränderung erfahren. Die Berechnung startet an einem beliebigen Startpunkt, der die Eigenschaft be-

sitzt, dass am Standort ein Becken vorhanden ist. Die Zuflussganglinie dieses Pegelpunkts entspricht damit der aus WaSiM importierten Ganglinie, wohingegen die Ausflussganglinie durch die Beckenretention verändert wird. Nach der Berechnung der Abflussganglinie eines Punkts wird der Nachfolger-Pegelpunkt aufgerufen.

### 3.3 Wirksamkeitsanalyse

Die Wirksamkeit einer Beckenkombination wird anhand der Scheitelabminderung an bestimmten Punkten beurteilt. Durch die Wahl geeigneter Beobachtungspunkte kann der Zusammenhang zwischen lokaler, regionaler und überregionaler Wirksamkeit untersucht werden. Als Haupteinflussfaktoren auf die Scheitelabminderungen gehen aus bisherigen Untersuchungen die Einzugsgebietsgröße, das Retentionspotential eines Beckens, das spezifische Volumen und die Drosselweite hervor (RIEGER, 2012; KREITER, 2006). Zudem spielen die Anzahl der Becken sowie deren Anordnung und die Abflusscharakteristik bei der Wirkung von dezentralen Rückhaltebecken eine Rolle.

Zur Einordnung einer zufällig gewählten Beckenkombination in die Kategorien der kaskadenartigen, parallelen und unregelmäßig verteilten Anordnung wird die dimensionslose Kennzahl  $gR$  eingeführt. Sie gibt den Grad der Reihung der Becken in einer Beckenkombination an, wobei bei  $gR = 0$  eine parallele und bei  $gR = 1$  eine kaskadenartige Anordnung vorliegt.

$$gR = \frac{\sum_{i=1}^n B_{vor}(P_i)}{n - 1}$$

Der Grad der Reihung  $gR$  ist von der Anzahl  $n$  der Becken in der Kombination und der Kennzahl  $B_{vor}$  abhängig. Diese gibt für jede Beckenposition  $P_i$  an, ob sich ein Beckenstandort oberstrom befindet. Bei einem oder mehreren Becken oberstrom ist  $B_{vor} = 1$ , andernfalls 0.

## 4. Ergebnisse

Die nachfolgenden Analysen wurden für einzelne Teileinzugsgebiete des Mangfallgebiets durchgeführt, deren Nummerierung Abbildung 3 zu entnehmen ist.

### 4.1 Validierung von TOBas

Die Funktionalität von TOBas wurde durch einen Vergleich der damit berechneten Ganglinien mit den Simulationsergebnissen aus WaSiM untersucht. Für die Validierung wurden im Untersuchungsgebiet neben den bestehenden Becken 19 zusätzliche Beckenstandorte gewählt (Abb. 3). Diese wurden in drei Teilgebieten mit unterschiedlicher Größe und Form in verschiedenen geologischen Bereichen angeordnet um die Übereinstimmung möglichst allgemeingültig nachzuweisen (Teilgebiete 6, 931 und 88). Als Bewertungskriterien wurden die Differenz der in beiden Methoden bewirkten Scheitelabminderung und die Gütekriterien NSE und PBIAS für den Vergleich von Form und Volumen der verminderten Hochwasserwellen gewählt.

Grundsätzlich kann eine gute Übereinstimmung der Abflussganglinien und der Scheitelabminderungen an den einzelnen Pegelpunkten zwischen WaSiM und TOBas beobachtet werden. Die mittleren Unterschiede der Scheitelabminderung der einzelnen Beckenstandorte und Gebietsauslässe liegt bei Betrachtung der drei für die Analyse berücksichtigten Hochwasserereignisse bei ca. 0,3 % (Tab. 3). Auch die prozentuale Volumenabweichung

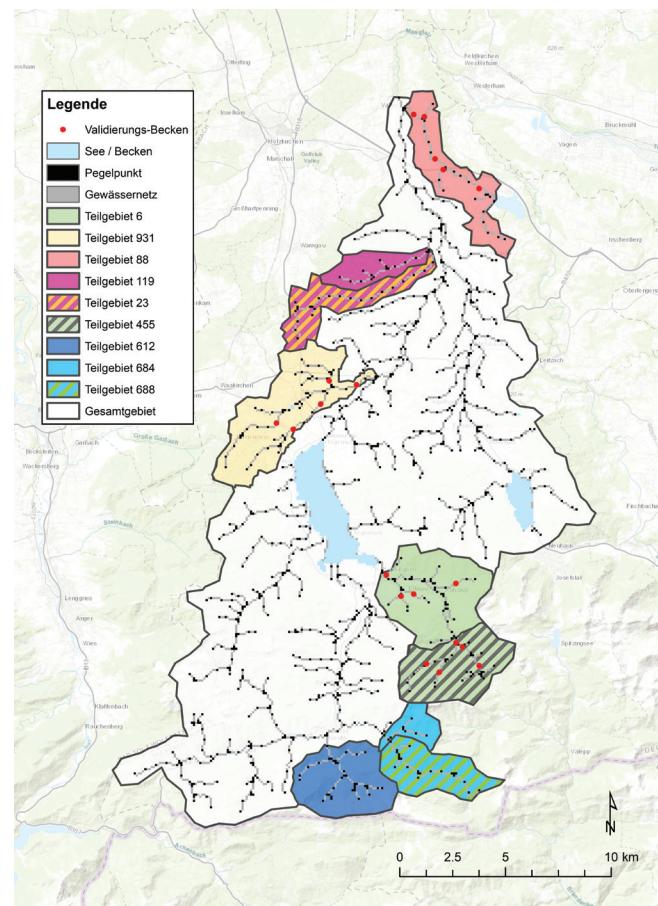


Abbildung 3

Untersuchungsgebiet mit Gewässerstruktur, Pegelpunkten und den für die Analysen verwendeten Teileinzugsgebieten (die Gebietsnummern entsprechen den jeweiligen Pegelnummern am Gebietsauslass).

*Investigated area with river network, gauges and sub-catchments used for analyses (sub-catchment numbers correspond with respective numbers of water gauges of each sub-catchment).*

der Ganglinien liegt in einem sehr guten Bereich nahe an 0 %. Folglich kann angenommen werden, dass eine mithilfe von TOBas auf die Scheitelabminderung an einem bestimmten Punkt optimierte Beckenkombinationen auch in WaSiM die größte Scheitelabminderung bewirkt.

### 4.2 Wirksamkeitsanalysen zu einem und zwei Becken

Die Wirksamkeitsanalysen zu einem und zwei Becken wurden in den Teilgebieten 6 und 88 durchgeführt (Abb. 3). Es wurden dabei in beiden Gebieten alle möglichen Beckenkombinationen aus einem und zwei Becken für fünf verschiedene Gesamtbeckenvolumina (spezifisches Volumen) und drei Hochwasserereignisse berechnet.

#### 4.2.1 Abhängigkeit vom spezifischen Volumen

Die fünf betrachteten spezifischen Volumina der Beckenkombinationen ergeben sich aus einer Veränderung des Gesamtvolumens, das auf beide Becken gleich aufgeteilt wurde. In beiden Teilgebieten nimmt mit der Zunahme des spezifischen Volumens auch die mittlere Scheitelabminderung zu, wobei mit größer werdendem Volumen die Steigung der Scheitelabminderungszunahme geringer wird (Abb. 4). Die Ursache für diese Abnahme ist die geringere Anzahl an Beckenstandorten, an denen das ge-

**Tabelle 2**

Vergleich zwischen WaSiM und TOBAs: Gütekriterien der Ganglinien am Auslass der gewählten Teilgebiete und des Untersuchungsgebiets.  
*Comparison between WaSiM and TOBAs: quality criteria of the hydrographs at the outlet of selected sub-catchments and the investigated area.*

Pegel	2013			2005			2010		
	ΔSA [%]	NSE [-]	PBIAS [%]	ΔSA [%]	NSE [-]	PBIAS [%]	ΔSA [%]	NSE [-]	PBIAS [%]
1	0,12	0,999	0,21	-0,34	0,999	0,38	-0,52	0,999	0,56
88	-0,06	0,998	0,96	0,10	0,998	0,27	1,10	0,991	-0,32
931	0,19	0,999	0,28	-0,45	0,998	0,40	0,22	0,998	0,31
6	-0,08	0,999	0,24	-0,29	0,998	0,58	-0,27	0,998	0,35

samte zur Verfügung stehende Beckenvolumen bei vorgegebener minimaler Drosselöffnung ausgenutzt werden kann. Grundsätzlich kann in Teilgebiet 88 aufgrund der kleineren Fläche und des daraus resultierenden größeren spezifischen Volumens der Becken trotz der flacheren Wellenform eine größere Scheitelabminderung beobachtet werden als in Teilgebiet 6.

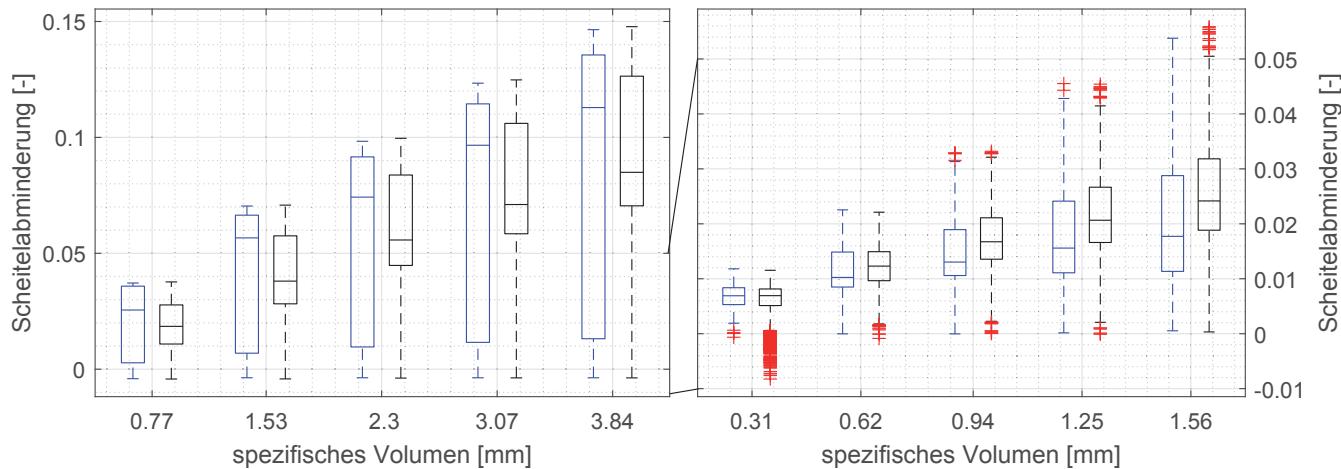
Der Vergleich der Ergebnisse für ein und zwei Becken zeigt nur geringfügige Unterschiede der maximal möglichen Scheitelabminderung. Bei beiden betrachteten Teilgebieten ist die Zunahme der maximalen Scheitelabminderung mit dem spezifischen Volumen unabhängig von der Beckenzahl ähnlich. Damit kann für dieses Ereignis festgestellt werden, dass bei günstiger Anordnung zweier Becken keine Erhöhung des gesamten Speichervolumens notwendig ist, um dieselbe Scheitelabminderung zu erreichen wie mit einem Becken. Deutliche Unterschiede können bei der Streuung der Scheitelabminderung für die betrachteten Fälle festgestellt werden. Die Abstände zwischen den Quartilen sind für beide betrachteten Gebiete bei zwei Becken durchweg geringer als bei einem Becken, da im Vergleich zur Gesamtanzahl der Kombinationen weniger Extremwerte auftreten. Beim Median der Scheitelabminderung zeigt sich, dass beim länglichen Einzugsgebiet ein Becken eher wirksamer ist, beim runden Einzugsgebiet dagegen zwei Becken. Während in runden

Gebieten Beckenpositionen mit ähnlichen Eigenschaften wie beispielsweise der kontrollierten Gebietsgröße vermehrt auftreten, tritt bei länglichen Gebieten keine entsprechende Häufung auf. Folglich sind die Quartilen der mittleren Scheitelabminderungen bei Teilgebiet 88 weiter gestreckt (Abb. 4). Durch Überlagerungseffekte mit verschobenen Wellenmaxima oder generierten

Abflüssen aus Zwischengebieten treten bei Anordnung zweier Becken in Teilgebiet 6 vermehrt negative Scheitelabminderungen auf. Die richtige Positionierung eines Beckens verändert sich in Abhängigkeit des für ein Becken verfügbaren Retentionsvolumens. Der Bereich, in dem der Betriebsraum eines Beckens ideal genutzt werden kann ist zudem von der Drosselweite abhängig. Somit können gute Beckenpositionen für kleine Volumina weiter oberstrom gefunden werden, da dort das Hochwasservolumen und der Hochwasserscheitel geringer sind. In Teilgebiet 88 kann mit einem Gesamtvolume von 30.000 m<sup>3</sup> bzw. einem spezifischen Volumen von 2,3 mm bereits eine deutliche Scheitelabminderung von 10 % erreicht werden.

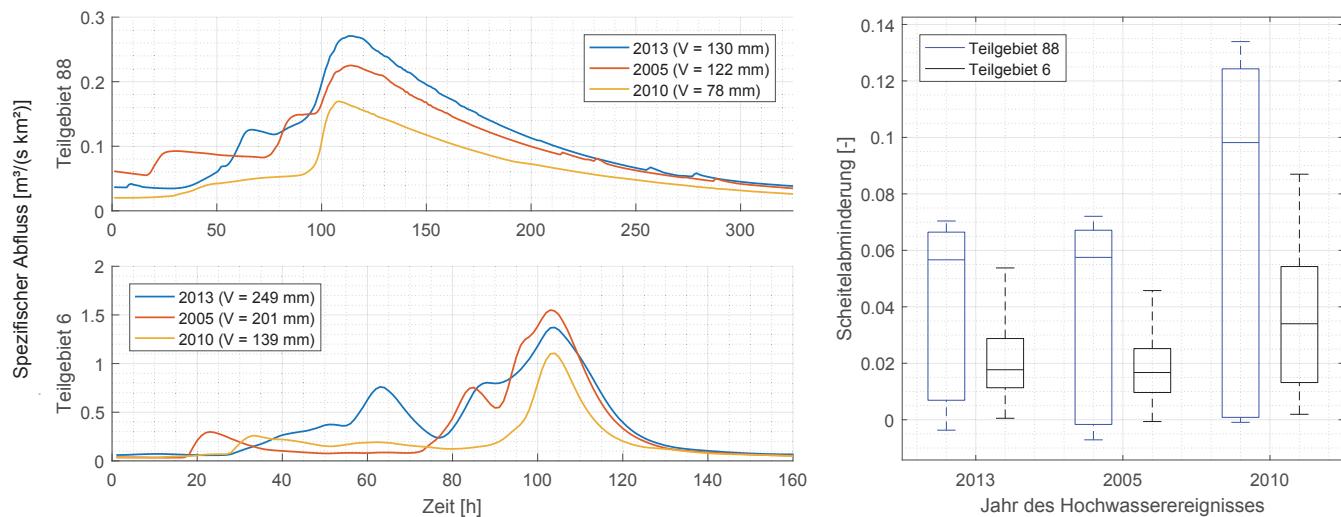
#### 4.2.2 Abhängigkeit vom Ereignis

Die Ereignisabhängigkeit wurde anhand der Hochwasserereignisse der Jahre 2013, 2005 und 2010 mit optimierter Drosselweite angepasst auf das jeweilige Ereignis untersucht. Durch die Optimierung der Drosselweite sind bei geringeren Jährlichkeiten durch das niedrigere Hochwasservolumen höhere Scheitelabminderungen zu erwarten. Das kann grundsätzlich bei Vergleich der maximal möglichen Scheitelabminderung des Ereignisses von 2013 mit dem von 2010 beispielweise für ein Becken festgestellt werden (Abb. 5, rechts; Hinweis: Zur besseren Vergleichbarkeit der Teilgebiete wurde in den nachfolgenden Ganglini-

**Abbildung 4**

Abhängigkeit der regionalen Scheitelabminderung vom spezifischen Volumen am Beispiel des Hochwasserereignisses 2013; Betrachtung der Teilgebiete 88 (links) und 6 (rechts) unter Berücksichtigung aller Kombinationen (K) für ein Becken (blau; TG 88: 27 K, TG 6: 94 K) und zwei Becken (schwarz; TG 88: 351 K, TG 6: 4371 K).

*Dependence of the regional peak reduction on the specific volume using the flood event of 2013 as an example; examination of sub-catchment 88 (on the left) and 6 (on the right) considering all combinations (c for one retention basin (blue; sub-catchment 88: 27 c, sub-catchment 6: 94 c) and two retention basins (black; sub-catchment 88: 351 c, sub-catchment 6: 4371 c).*

**Abbildung 5**

Abhängigkeit der Scheitelabminderung vom Hochwasserereignis für  $sV=1,53$  mm (TG88) und  $sV = 1,56$  mm (TG6); links: Abflussganglinien der drei Ereignisse in Teilgebiet 88 und 6; rechts: Scheitelabminderung unter Berücksichtigung aller möglichen Positionen für ein Becken.

*Dependency of peak reduction on the flood event for  $sV = 1,53$  mm (sub-catchment 88) and  $sV = 1,56$  mm (sub-catchment 6); on the left: hydrographs of those three events in sub-catchment 88 and 6; on the right: peak reduction considering all possible positions for one retention basin.*

endarstellungen die Einheit Spezifischer Abfluss [ $\text{m}^3/(\text{s km}^2)$ ] verwendet).

In beiden Teilgebieten ist sowohl der Hochwasserscheitel, als auch das Hochwasservolumen in 2010 deutlich geringer als in 2013. Es tritt weiterhin eine starke Abhängigkeit der bewirkten Scheitelabminderung von der Positionierung der Becken auf, die sich im weiten Wertebereich der resultierenden Scheitelabminderungen zeigt. Derselbe Zusammenhang tritt bei der Anordnung von zwei Becken auf, jedoch mit geringerer Standardabweichung.

Der Vergleich der Hochwasserereignisse von 2013 und 2005 zeigt geringe Unterschiede oder sogar entgegengesetzte Zusammenhänge. In Teilgebiet 88 entsprechen sich die maximal möglichen Scheitelabminderungen beider Ereignisse (Abb. 5, rechts), obwohl der maximale Abfluss im Jahr 2005 deutlich geringer ist als in 2013.

Eine Begründung kann im ähnlichen Volumen der Hochwasserwelle gefunden werden sowie in der längeren Dauer des Ereignisses im August 2005. In Teilgebiet 6 wurde im Jahr 2005 eine geringere maximale Scheitelabminderung erreicht als in 2013. Diese Abnahme kann mithilfe der größeren Jährlichkeit in 2005 für dieses Teilgebiet erklärt werden (Abb. 5, links). Allerdings würden das aufgrund der kürzeren Dauer um 20 % geringere Abflussvolumen und die kürzere, steilere Wellenform für eine größere Scheitelabminderung sprechen. Aus einer reinen Analyse von Hochwasserscheitel und -volumen verschiedener Ereignisse kann folglich nicht immer auf eine Zu- oder Abnahme der möglichen maximalen Scheitelabminderung geschlossen werden.

#### 4.2.3 Lokale, regionale und überregionale Wirksamkeit

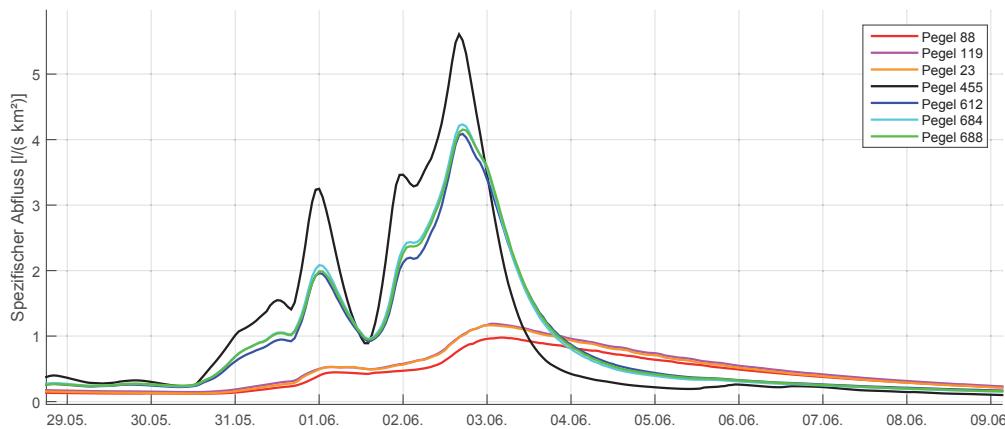
Bei der Erstellung von Hochwasserschutzkonzepten für einen bestimmten Standort sollte idealerweise neben der Scheitelabminderung an diesem Standort auch die Wirkung auf regional oder überregional wichtige Punkte beachtet werden. Deshalb wurde eine mögliche Vereinbarkeit von lokaler, regionaler und überre-

gionaler Wirksamkeit durch den Vergleich der Scheitelabminderungen an verschiedenen Standorten untersucht.

Zwischen der lokalen Wirksamkeit am jeweiligen Beckenstandort und der regionalen Wirksamkeit am Gebietsauslass des betrachteten Teilgebiets kann bei Vernachlässigung der Grenzwerte für die Drosselweiten eine indirekte Proportionalität festgestellt werden. Becken mit großer lokaler Wirksamkeit liegen in Bereichen mit kleinen Abflussvolumina, in denen folglich kein maßgeblicher Anteil des Abflusses am Gebietsauslass zurückgehalten werden kann. Große regionale Wirksamkeiten werden dagegen durch Becken nahe dem Gebietsauslass erzeugt, da diese nahezu das gesamte Teilgebiet kontrollieren. Bei Berücksichtigung einer minimalen und einer maximalen Drosselweite relativiert sich der Zusammenhang. Durch die Vorgabe einer minimalen Drosselweite kann das maximale Beckenvolumen in Bereichen nahe den Quellen nicht vollständig genutzt werden, wodurch die resultierende lokale Scheitelabminderung geringer ausfällt. Die regionale Wirksamkeit von Beckenstandorten nahe dem Gebietsauslass wird durch die Angabe einer maximalen Drosselweite verringert, da durch die großen Abflüsse der Speicher schneller gefüllt ist und die Hochwasserentlastungsanlage früher in Kraft tritt. Durch die Einschränkung der Drosselweite verschlechtert sich folglich die Bewertung der jeweils optimalen Standorte für die lokale und die regionale Wirksamkeit.

#### 4.3 Wirksamkeitsanalysen zu mehreren Rückhaltebecken

Bei der Analyse von Kombinationen aus einer Vielzahl an Becken wurden Stichproben aus 300 bzw. 500 verschiedenen Kombinationen für die Untersuchungen herangezogen, wodurch eine exakte Ermittlung der optimalen Beckenkombination nicht möglich war. Um Aussagen über den Einfluss von Lage und Form des betrachteten Teilgebiets treffen zu können, wurden sieben Gebiete mit Flächen von  $9,65 \text{ km}^2$  bis  $15,41 \text{ km}^2$  in unterschiedlichen Bereichen des Untersuchungsgebiets gewählt (Abb. 3). Tendenziell sind durch die Topographie des Untersuchungsgebiets im nördlichen Teil überwiegend lang gestreckte Teilgebiete zu finden, wohingegen im südlichen Teil runde Gebiete vorherr-

**Abbildung 6**

Spezifischer Abfluss in den sieben betrachteten Teilgebieten (Abb. 3) für das Hochwasserereignis 2013.  
Specific runoff of the seven examined sub-catchments (fig. 3) for the flood event of 2013.

schend sind. Die Abflusscharakteristik und das Volumen des für die folgenden Analysen verwendeten Hochwasserereignisses im Juni 2013 zeigen deutliche Unterschiede in Abhängigkeit der Lage im Untersuchungsgebiet (Abb. 6).

Während die Teilgebiete im Norden flache und lange Abflussganglinien mit einem geringen Abflussvolumen haben, sind die Ganglinien im Süden kurz und steil und besitzen ein größeres Hochwasservolumen. Die Unterschiede können einerseits durch die Niederschlagsverteilung im Gebiet, die zu größeren Niederschlagshöhen im alpinen Raum führt, begründet werden. Andererseits wird die Größe und Form der Abflussganglinien durch die Prozesse der Abflussbildung und -konzentration geprägt, die beispielsweise von der Bodenverteilung und der Topographie beeinflusst werden.

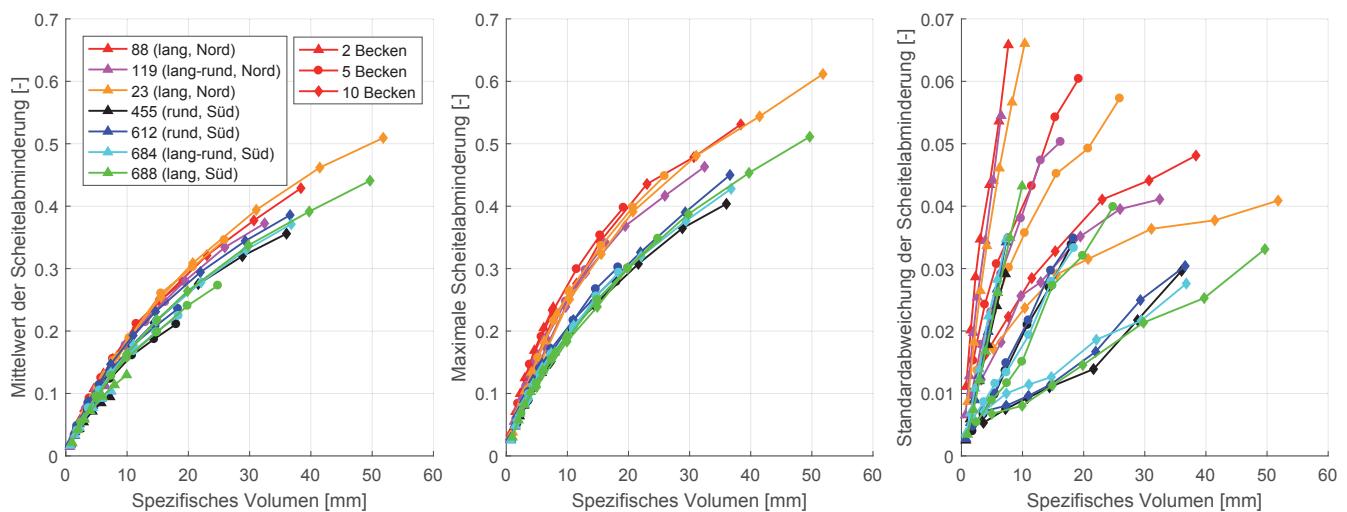
#### 4.3.1 Abhängigkeit vom spezifischen Volumen

Zur Bestimmung der Abhängigkeit vom spezifischen Volumen wurden für das Junihochwasser 2013 die Parameter „Anzahl

der Becken“ (Anzahl = [2, 5, 10]) sowie das „Volumen der Einzelbecken“ ( $V = [5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 30.000, 40.000, 50.000]$ ) variiert. Für jede Kombination aus Teilgebiet, Beckenzahl und Beckenvolumen wurden 300 zufällig gewählte Beckenanordnungen berechnet. Die Analyse stützt sich demnach auf 44.100 verschiedene Beckenkombinationen.

Die mittlere Scheitelabminderung am jeweiligen Gebietsauslass nimmt grundlegend mit steigendem spezifischem Volumen zu, wobei der Grad der Zunahme ebenso wie in Abschnitt 4.2 bei größeren spezifischen Volumina geringer wird (Abb. 7).

Zwischen den einzelnen Teilgebieten können dabei Unterschiede festgestellt werden: Die mittlere Scheitelabminderung im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets ist durchwegs größer als die in den südlichen Teilgebieten. Die deutlichen Unterschiede zwischen den Teilgebieten in Abhängigkeit der Lage können durch das unterschiedliche Hochwasservolumen begründet werden. Mit zunehmender Anzahl der Becken nimmt auch die mittlere Scheitelabminderung bei gleichem spezifischem Volumen zu. Bei Betrachtung der Standardabweichung der Scheitelabminderung ist sowohl eine Beziehung zur Anzahl der Becken, als auch zur Lage des Teilgebiets im Untersuchungsgebiet zu erkennen. Die Standardabweichung nimmt mit zunehmendem spezifischen Volumen zu, jedoch – analog zu Abschnitt 4.2 – ausgeprägter bei einer geringeren Anzahl an Becken. Die maximale Scheitelabminderung aller Stichproben ergibt sich aus der optimalen Kombination aus Beckenzahl und Beckenvolumen. Bei einem

**Abbildung 7**

Abhängigkeit der regionalen Scheitelabminderung verschiedener Teilgebietsauslässe vom spezifischen Volumen des Retentionsraums für drei verschiedene Beckenzahlen (Juni-Hochwasser 2013).  
Dependency of regional peak reduction of different sub-catchment outlets on the specific volume of the retention area for three different number of basins (June – flood event 2013).

spezifischen Volumen von 10 mm ist die maximale Scheitelabminderung in den nördlichen Teilgebieten mit ca. 25 % deutlich größer als die der südlichen Teilgebiete mit ca. 19 %.

#### 4.3.2 Abhängigkeit von der Anordnung

Bei dieser Analyse liegt die Anzahl der Einzelbecken zwischen einem Becken und 20 Becken (Anzahl = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20]). Das Gesamtvolumen der Becken  $V_{ges}$  wurde dabei so gewählt, dass sich für jeden Gebietsauslass durchgehend ein spezifisches Volumen  $sV = 15,6$  mm ergibt. Die Volumina der Einzelbecken liegen folglich nicht durchgehend im üblichen Bereich dezentraler Kleinrückhalte. Für jede Kombination aus Teilgebiet und Beckenanzahl wurden jeweils maximal 500 zufällig gewählte Beckenanordnungen berechnet, wodurch in der Summe 42.420 verschiedene Anordnungen berücksichtigt wurden.

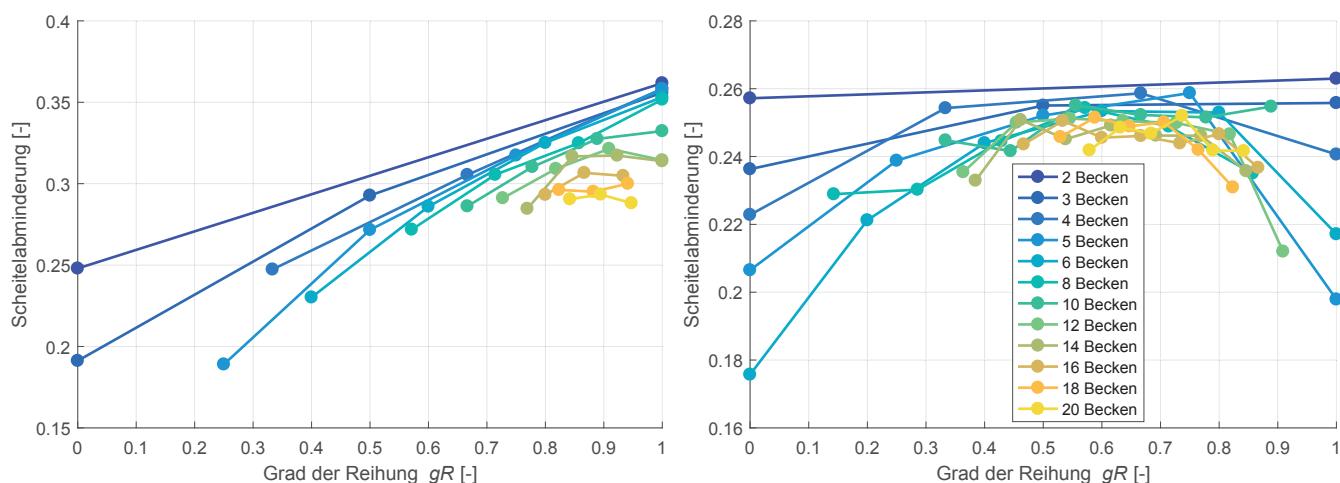
Um einen Zusammenhang zwischen der Anordnung im Gebiet und der möglichen regionalen Scheitelabminderung herstellen zu können, wurden die einzelnen Beckenkombinationen nach der Maßzahl  $gR$  kategorisiert und statistisch ausgewertet. Auffällig sind dabei die Gemeinsamkeiten in Bezug auf die Gebietsform der Teilgebiete, welche in lange Gebiete, Übergangsgebiete und runde Gebiete gruppiert wurden (beispielhaft für 2 Kategorien in Abb. 8 dargestellt). In den länglichen Teilgebieten nimmt die maximale regionale Scheitelabminderung mit zunehmendem  $gR$  bis hin zur kaskadenartigen Anordnung ( $gR = 1$ ) stark zu. Die Tendenz nimmt mit zunehmender Anzahl der Becken zwar ab, kann jedoch weiterhin beobachtet werden. Im Gegensatz dazu ist die regionale Scheitelabminderung in runden Gebieten bei  $gR = 0,50$  bis  $0,7$  maximal. Bei dieser Gebietsform ist demnach eine unregelmäßig verteilte Anordnung einer kaskadenartigen oder parallelen Anordnung vorzuziehen. Gebietsformen zwischen den beiden beschriebenen Fällen stellen auch bei der Abhängigkeit von Scheitelabminderung und  $gR$  eine Übergangsform dar. Eine maximale Scheitelabminderung kann in dieser Kategorie bei  $gR = 0,7$  bis  $0,8$  erwartet werden.

Eine Begründung für dieses Verhalten kann in den Überlagerungseffekten gefunden werden. In lang gestreckten Gebieten

sind seitliche Zuflüsse kurz und tragen demnach nur mit einem geringen Anteil zum Gesamtabflussvolumen am Gebietsauslass bei. Ein Becken würde dort somit nur einen geringen Flächenanteil des Gebiets kontrollieren und damit keinen maßgeblichen Beitrag zur Wirksamkeit liefern. Dieser Effekt nimmt allerdings mit zunehmender Anzahl der Becken ab. Bei runden Gebieten fließen dagegen nahe dem Gebietsauslass mehrere Flüsse zusammen. Um in diesem Fall einen großen Anteil der Gebietsfläche kontrollieren zu können, müssen an mehreren Zuflüssen Becken angeordnet werden.

#### 4.3.3 Abhängigkeit von der Anzahl

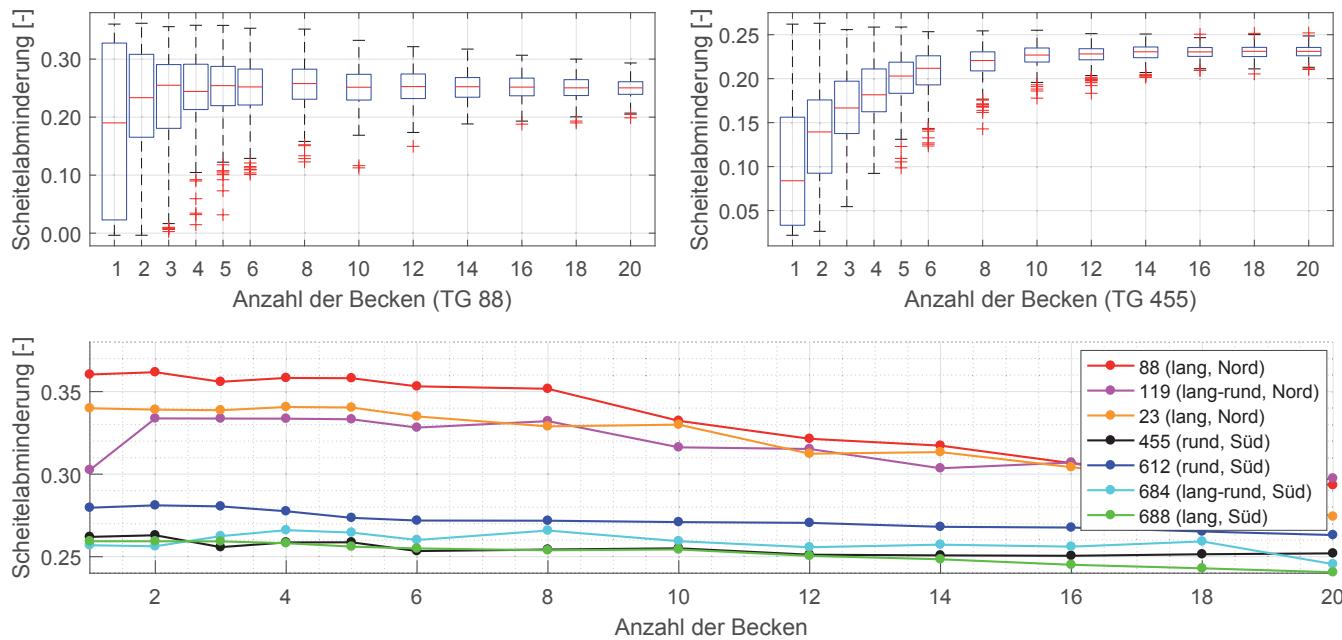
Die Simulationsläufe des vorhergehenden Abschnitts ( $n = 42.420$ ) bildeten die Grundlage für die Analyse der Beziehung zwischen regionaler Scheitelabminderung am Gebietsauslass und Anzahl der Becken im Teilgebiet. Der Mittelwert und der Median der Scheitelabminderung für eine bestimmte Beckenzahl nimmt mit zunehmender Anzahl der Becken zu. Es sind sowohl Abhängigkeiten von der Gebietsform, als auch von der Lage im Untersuchungsgebiet zu erkennen. In lang gestreckten Gebietsformen nimmt der Mittelwert der Scheitelabminderung mit steigender Beckenzahl nur geringfügig zu und ist bereits bei einer geringen Anzahl auf einem nahezu konstanten Niveau (Abb. 9, oben links). Im Gegensatz dazu ist der Gradient der Zunahme bei runden Gebieten kleiner und erreicht erst bei großen Beckenzahlen konstante Werte (Abb. 9, oben rechts). Dieser Effekt tritt aufgrund der großen Zahl an möglichen Überlagerungseffekten bei runden Einzugsgebieten und der vergleichsweise großen Anzahl an für die regionale Scheitelabminderung ungünstigen Beckensstandorten in den Quellgebieten auf. Neben der Gebietsform hat zudem die Anzahl der möglichen Beckenpositionen in einem Gebiet einen Einfluss darauf, ab wann keine Änderung der mittleren Scheitelabminderung mehr zu erwarten ist. Bei großen Gebieten mit einer Vielzahl an potentiellen Beckenpunkten tritt dieser Punkt deutlich später auf. Die Streuung der ermittelten Scheitelabminderungen nimmt unabhängig von Lage und Gebietsform mit zunehmender Anzahl der Becken im Gebiet ab. Die durchwegs größere Streuung der ermittelten Scheitelabminderungen in Abbildung 9 (oben links) im Vergleich zu Abbildung 9 (oben



**Abbildung 8**

Abhängigkeit der maximalen regionalen Scheitelabminderung vom Grad der Reihung (Kennzahl  $gR$ ) für verschiedene Gebietsformen; links: lange Gebietsform (Teilgebiet 88), rechts: runde Gebietsform (Teilgebiet 455).

Dependency of maximum regional peak reduction on the cascade configuration parameter (index  $gR$ ) for different catchment shapes; on the left: elongated shape (sub-catchment 88), on the right: round shape (sub-catchment 455).

**Abbildung 9**

Einfluss der Anzahl der Becken in einem Teilgebiet auf die zu erwartende regionale Scheitelabminderung am Gebietsauslass; oben: lange Gebietsform (links) und runde Gebietsform (rechts); unten: Vergleich der maximalen Scheitelabminderung.

*Impact of the number of basins in a sub-catchment on the expected regional peak reduction at the area outlet; above: elongated shape (on the left) and round shape (on the right); below: comparison of the maximum peak reduction.*

rechts) kann überwiegend auf die Lage der Teilgebiete im Untersuchungsgebiet zurückgeführt werden. Wie bereits beschrieben wurde, unterscheidet sich die Abflusscharakteristik zwischen den einzelnen Teilgebieten stark. Allerdings entsprechen die flachen, lang gestreckten Abflussganglinien in den nördlichen Teilgebieten grundsätzlich der Abflusscharakteristik länglicher Einzugsgebiete, wodurch die beschriebenen Abhängigkeiten zwischen Scheitelabminderung und Anzahl der Becken verstärkt werden. Die maßgebliche Größe zur Beurteilung der Abhängigkeit zwischen Beckenzahl und regionaler Wirksamkeit ist die maximale Scheitelabminderung.

Im Allgemeinen kann im Bereich weniger Becken keine deutliche Abnahme der maximalen Scheitelabminderung mit zunehmender Anzahl der Becken festgestellt werden (Abb. 9, unten). Durch die Zunahme der Beckenzahl können positive Überlagerungseffekte auftreten, die zu einer zum Teil deutlichen Erhöhung der regionalen Wirksamkeit führen. Während die maximale Scheitelabminderung in den nördlichen Teilgebieten ab Beckenkombination mit acht Becken merklich abnimmt, bleibt sie in den südlichen Teilgebieten nahezu konstant.

Aus den Untersuchungen kann abgeleitet werden, dass für eine maximale Scheitelabminderung Kombinationen aus wenigen Becken zu bevorzugen sind. Diese optimale Anzahl an Becken, ab der die maximale Wirksamkeit abnimmt, ist von unterschiedlichen Gebietscharakteristika wie beispielsweise Topographie, Gewässerstruktur, Abflusscharakteristik und Gebietsform abhängig und kann nur bedingt vorhergesagt werden. Allerdings hat bei einer geringen Anzahl an Becken die Anordnung im Gebiet einen großen Einfluss auf die Scheitelabminderung.

## 5. Diskussion

### 5.1. Modellansatz

Zur Erstellung des Analysetools *TOBas* wurde ein detailliertes und gut kalibriertes WaSiM-Modell benötigt. Das gewählte Teilzugsgebiet der Mangfall bis Valley eignet sich hierfür insbesondere durch seine Heterogenität und Komplexität, da so geeignete Schnittstellen geschaffen werden konnten. Zudem ermöglichen die unterschiedliche Abflusscharakteristik im Süden und im Norden des Gebiets, dessen Einflüsse auf die Analyseergebnisse zu untersuchen. Trotz des aufgrund der Zielstellung der Untersuchung vergleichsweise geringen Aufwands für den Aufbau des WaSiM-Modells konnten für die meisten Teilgebiete gute Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse erzielt werden. Jedoch konnte aufgrund der Datenlage nur anhand von Abflusspegeln kalibriert werden, wodurch Skaleneffekte möglicherweise keine ausreichende Berücksichtigung finden.

Die Retentionswirkung von Hochwasserrückhaltebecken kann mit dem hydrologischen Modell WaSiM bestimmt werden. Aufgrund des hohen Datenbedarfs von WaSiM und dem aufwendigen Modellaufbau wird jedoch für derartige Berechnungen üblicherweise auf einfachere hydrologische Modelle zurückgegriffen. Insbesondere in komplexen, heterogenen Einzugsgebieten kann die Anwendung von WaSiM dennoch sinnvoll sein, wenn die Abflüsse mit einfacheren Modellen nicht korrekt abgebildet werden können. In Studien zur Quantifizierung der Wirksamkeiten verschiedener dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen ist die Verwendung eines für alle zu untersuchten Maßnahmen anwendbaren Modells sinnvoll, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. In diesem Zusammenhang hat sich

WaSiM beispielsweise nach RIEGER (2012) sehr gut bewährt. Das in dieser Arbeit entwickelte Modellkonzept aus einer mit WaSiM durchgeführten hydrologischen Simulation ist daher primär auf Forschungsfragen ausgerichtet. Für Zielstellungen in der Praxis wäre eine Schnittstelle von *TOBas* mit einem konzeptionellen Modell, beispielsweise zu HEC-HMS, zweckmäßiger.

Aufgrund der erfolgreichen Validierung des Tools *TOBas* kann angenommen werden, dass sich Standorte idealer Beckenkombinationen in WaSiM und *TOBas* entsprechen. Durch die Einbindung der hydrologischen Daten aus dem physikalisch-basierten Modell in die konzeptionelle Berechnung von Beckenretention und Abflussrouting ist so eine zeiteffiziente Analyse verschiedener Beckenkombinationen ohne Verringerung der Qualität der Prozessabbildung möglich. Durch die zur Optimierung benötigte wiederholte Berechnung der Beckenretention ist der Rechenaufwand bei längeren Zeiträumen für detaillierte Analysen jedoch immer noch zu hoch. Da bislang kein Optimierungsalgorithmus zur automatisierten Bestimmung einer idealen Beckenkombination in das Tool implementiert wurde, kann insbesondere bei großen Gebieten mit einer Vielzahl an möglichen Pegelpunkten und bei Kombinationen aus vielen Becken die beste Beckenkombination nicht bestimmt werden.

## 5.2 Wirksamkeitsanalysen

Ungesteuerte dezentrale Rückhaltebecken führen nur bei idealer Positionierung und auf das entsprechende Ereignis optimierter Drosselweite zur maximal möglichen Scheitelabminderung. Da sich zwei Hochwasserereignisse in der Realität nie vollkommen entsprechen, wird bei einer auf das Bemessungereignis optimierten Beckenkombination ohne Anpassung der Drosselweiten an Hochwasservorhersagen das Retentionsvolumen im Normalfall nicht ideal ausgenutzt. Die in diesem Beitrag für den Bemessungsfall ermittelten Scheitelabminderungen werden demzufolge meist nicht erreicht. Um eine Aussage über die Abnahme der Wirksamkeit bzw. die Einhaltung eines bestimmten Schutzzieles in einem nicht-optimierten System machen zu können, wären zusätzliche Analysen der Beckenkombinationen mit einem sich unterscheidenden Bemessungereignis nötig.

Eine allgemeingültige Aussage über die zu erwartende Wirksamkeit einer Beckenkombination sowie die Priorisierung der einzelnen Einflussfaktoren ist aufgrund von Überlagerungseffekten zwischen der Wirkung der verschiedenen Faktoren nicht immer möglich. Mit zunehmendem spezifischem Volumen ist eine größere Scheitelabminderung zu erwarten, allerdings nimmt der Grad der Zunahme mit wachsendem spezifischen Volumen ab. Eine Grenze des spezifischen Volumens, ab der wie in KREITER (2006) keine Steigerung mehr zu erkennen ist, konnte im untersuchten Bereich bis  $sV \approx 50$  mm nicht festgestellt werden. Ab einem spezifischen Volumen von 2 mm bis 4 mm konnte in den analysierten Teilgebieten für das Hochwasserereignis im Juni 2013 eine deutliche Scheitelabminderung von 10 % erreicht werden. Diese Größenordnung stimmt mit den Ergebnissen aus Rieger (2012) überein. Die deutlichen Unterschiede zwischen den nördlichen und südlichen Teilgebieten deuten jedoch darauf hin, dass für eine Abschätzung der Scheitelabminderung bei einer bestimmten Jährlichkeit neben dem spezifischen Volumen auch die Abflusscharakteristik, also insbesondere Abfluss scheitel -volumen und Wellenform berücksichtigt werden sollten.

Der Einfluss der Anordnung auf die Scheitelabminderung ist stark von der Anzahl der Becken einer Kombination abhängig. Bei einer geringen Beckenzahl sind zwar maximale Scheitelabminderungen möglich, allerdings können bei ungünstiger Anordnung der Becken auch negative Wirksamkeiten auftreten. Bei einer Vielzahl an Becken ist dagegen die maximal erreichbare Scheitelabminderung etwas geringer, gleichzeitig steigt jedoch die minimale und die mittlere Scheitelabminderung deutlich an. Folglich kann in Abhängigkeit der Gegebenheiten vor Ort eine Kombination aus vielen Becken aus hydrologischer Sicht sinnvoller sein. In den untersuchten Teilgebieten liegt der beste Kompromiss aus maximaler und mittlerer Scheitelabminderung bei etwa 6 bis 8 Becken. Aufgrund der Auswahl der untersuchten Teilgebiete mit ähnlicher Größe und Pegelzahl kann dieses Ergebnis jedoch nicht zweifelsfrei auf andere Gebiete übertragen werden, da die zu vermutende Abhängigkeit von der Gebietsgröße bzw. der Gesamtzahl der Pegelpunkte anhand der durchgeführten Analysen nicht untersucht werden konnte. Eine maximale Scheitelabminderung durch Anordnung eines Einzelbeckens, wie sie beispielsweise in TSCHOPP (1980) angenommen wird, konnte nicht bestätigt werden.

## 5.3 Unsicherheiten der Studie

Bei der Untersuchung von Beckenkombinationen aus einer Vielzahl an Becken musste bedingt durch die sehr große Anzahl an möglichen Anordnungen auf eine Stichprobe von 300 bzw. 500 unterschiedlichen Positionierungen zurückgegriffen werden. Aus dieser können zwar belastbare Abhängigkeiten abgeleitet werden, eine definitive Aussage über die maximal mögliche Scheitelabminderung und die optimale Anordnung im Gebiet kann allerdings nicht getroffen werden.

Die Auswahl der untersuchten Ereignisse beschränkt sich auf die drei während des Simulationszeitraums aufgetretenen Hochwasserereignisse. Die Berücksichtigung von realen Ereignissen ermöglicht die Analyse von für das Untersuchungsgebiet charakteristischen Abflussereignissen und führt folglich zu repräsentativen Ergebnissen für das untersuchte Gebiet. Allerdings bleibt die Interpretation der Wirksamkeiten durch diese sehr heterogene räumliche Niederschlagserteilung unsicher. Zudem können Überlagerungseffekte zwischen den unterschiedlichen Einflussfaktoren auftreten, die in diesen Ereignissen nicht genau abgegrenzt werden können. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebiete wird somit durch dieses Vorgehen erschwert. Ebenso wie bei den Ereignissen können durch die Verwendung realer Teilgebiete, die keine idealisierten Gebietsformen besitzen, allgemeingültige Abhängigkeiten nur bedingt hergestellt werden. Durch das komplexe Zusammenspiel verschiedener Einflussfaktoren kann die Ursache einer bestimmten Beobachtung oft nicht zweifelsfrei bestimmt werden. Infolge dieser Unsicherheiten sind Empfehlungen für optimierte Beckenkombinationen nur eingeschränkt möglich. Allgemeine Abhängigkeiten, wie beispielsweise der ideale Grad der Reihung für eine bestimmte Gebietsform, lassen sich jedoch gut auf andere Gebiete anwenden. Anzustrebende spezifische Volumina zur Erreichung einer bestimmten Scheitelabminderung oder der mögliche Schutzgrad bei auf andere Ereignisse bemessene Beckenkombinationen sind dagegen stark von der Charakteristik des Gebiets und der betrachteten Hochwasserereignisse abhängig und daher nicht direkt übertragbar.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Untersuchung war die Entwicklung eines Konzepts zur Ermittlung von aus hydrologischer Sicht sinnvollen Beckenkombinationen sowie zur Wirksamkeitsanalyse von Anzahl und Anordnung dezentraler Rückhaltebecken. Es wurde dazu ein Analysetool entwickelt, mit dem eine große Anzahl an Kombinationen berechnet und verglichen und die lokale, regionale und überregionale Wirksamkeit einer Beckenkombination für ein vorgegebenes Hochwasserereignis bestimmt werden konnte.

Zur Erstellung des MATLAB-Tools *TOBas* wurde das Teileinzugsgebiet der Mangfall bis Valley gewählt. Die Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse des WaSiM-Modells liegen in den meisten Teilgebieten im guten bis sehr guten Bereich. Mithilfe von *TOBas* können die lokalen, regionalen und überregionalen Wirksamkeiten einer durch den Nutzer definierten oder zufällig gewählten Beckenkombination bestimmt werden. Die Berechnung der Beckenretention erfolgt über die Speicherung, das Abfluss-routing mithilfe des Muskingum-Verfahrens. Die Validierung von *TOBas* wurde durch einen Vergleich mit den Berechnungen mit WaSiM durchgeführt und lieferte sehr gute Ergebnisse.

Aus den durchgeführten Analysen konnten zum Teil deutliche Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Einflussfaktoren und der resultierenden Scheitelabminderung abgeleitet werden. Mit zunehmendem spezifischem Volumen nahm dabei auch die Wirksamkeit zu, war jedoch stark von Volumen und Form der Abflusswelle abhängig.

Für das Hochwasserereignis 2013 konnte ab einem spezifischen Volumen von 2 mm bis 4 mm eine Scheitelabminderung von 10 % erreicht werden. Die ideale Anordnung von dezentralen Rückhaltebecken wurde neben den Beckeneigenschaften auch von der Gebietsform beeinflusst. Während in lang gestreckten Gebieten eine nahezu kaskadenartige Anordnung zu maximalen Scheitelabminderungen führte, war in runden Gebieten eine unregelmäßige Anordnung mit einem Reihungsgrad  $gR = 0,5 - 0,7$  zu bevorzugen. Zur Anzahl der Becken in einem Gebiet bei gleichem Gesamtvolume konnte keine eindeutige Abhängigkeit hergestellt werden. In keinem der untersuchten Teilgebiete konnte mit einem Einzelbecken die maximale Scheitelabminderung erzeugt werden, jedoch war insbesondere bei großen Beckenzahlen mit steigender Beckenzahl eine zum Teil deutliche Abnahme der Scheitelabminderung zu erkennen. Aufgrund der großen Unterschiede zwischen den untersuchten Teilgebieten konnte eine Allgemeingültigkeit der Aussagen und folglich eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Einzugsgebiete nicht angenommen werden.

Das in diesem Beitrag erstellte Tool *TOBas* bietet neben den bereits durchgeführten Analysen zu Anordnung und Wirksamkeit von Beckenkombinationen weitere Möglichkeiten der Anwendung und Weiterentwicklung. Einerseits können Analysen zum tieferen Verständnis des Einflusses verschiedener Faktoren auf die Wirksamkeit von Beckenkombinationen durchgeführt werden. Andererseits ist eine praktische Anwendung zur Bestimmung verschiedener Beckenszenarien möglich. In Kombination mit einer geeigneten GIS-Analyse zur Analyse der Topographie und Landnutzung kann das Tool zur schnellen und zielgerichteten Identifikation realisierbarer und wirksamer Beckenstandorte dienen. Hoch aufgelöste Geländeinformationen sollten dabei in

die Ermittlung realer Beckengeometrien und Volumen-Abfluss-Beziehungen sowie in die Bestimmung zusätzlicher Fließwege in der Fläche, welche unter anderem im Zuge von Verkehrswegen auftreten können, mit einfließen.

## Conclusions

The aim of the study was to develop a concept for the determination of hydrological sensible basin combinations and to analyze the effectiveness of the number and arrangement of decentralized retention basins. For this purpose, an analysis tool was developed, which enables the calculation of large numbers of combinations. Furthermore, the local, regional and supra-regional effectiveness of different basin combinations can be determined for a given flood event.

To create the *TOBas* MATLAB tool, the sub-catchment Mangfall to Valley was chosen. The calibration and validation results of the WaSiM model are quite good in most of the sub-catchments. *TOBas* can be used to determine the local, regional and supra-regional effectiveness of a user-defined or randomly chosen basin combination. The basin retention is calculated using the storage equation, flood routing using the Muskingum method. The validation of *TOBas* was done by comparison with the modelling results of WaSiM showing very good results.

In some cases, significant dependencies between individual influencing factors and the resulting peak reduction could be derived from the analyses. The effectiveness also increases with increasing specific volume, but is highly dependent on the volume and shape of the discharge wave. For the flood event 2013, a peak reduction of 10 % could be achieved from a specific volume of 2 mm to 4 mm. The ideal arrangement of decentralized retention basins is influenced not only by the basin properties but also by the catchment shape. While in elongated areas a nearly cascade-like arrangement leads to maximum peak reductions, an irregular arrangement with a cascade configuration parameter  $gR = 0.5 - 0.7$  is to be preferred for round areas. There is no clear dependency on the number of basins in an area with the same total volume. In none of the investigated sub-catchments could the maximum peak reduction be achieved with a single basin. However, especially with larger number of basins, a partially significant decrease of the peak reduction could be observed with an increasing number of basins. Due to the large differences between the examined sub-catchments, a generality of the statements and consequently a transferability of the results to other river basins cannot be assumed.

The *TOBas* tool created in this article offers, in addition to the analyses already carried out regarding arrangement and effectiveness of basin combinations, further possibilities of application and further development. On the one hand, analyses can be carried out to gain a deeper understanding of the influence of various factors on the effectiveness of basin combinations. On the other hand, a practical application for the determination of different basin scenarios is possible. Combined with a suitable GIS-analysis to analyze topography and land use, the tool can be used for a quick and focused identification of viable and effective basin sites. In this context, a digital, high-resolution elevation model can help calculate basin geometries and volume-discharge relations as well as additional flow paths in the catchment area, which could occur in the context of traffic roads.

## Danksagung

Die Untersuchungen erfolgten innerhalb des ProNaHo-Forschungsvorhabens, das im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt durchgeführt wurde.

## Anschriften der Verfasser

Sonja Teschemacher

Technische Universität München

Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement

Arcisstraße 21

80333 München

sonja.teschemacher@tum.de

Wolfgang Rieger

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Referat 86 - Hochwassernachrichtendienst, Hochwasser-  
vorhersage Donau und Inn, Gebietshydrologie

Bürgermeister-Ulrich-Str. 160

86179 Augsburg

wolfgang.rieger@lfu.bayern.de

## Literaturverzeichnis

ASSMANN, A. (1999): Die Planung dezentraler, integrierter Hochwasserschutzmaßnahmen mit dem Schwerpunkt der Standortausweisung von Retentionsarealen an der Oberen Elsenz, Kraichgau. Hg. v. Landesamt für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg. Kornwestheim (Schriftenreihe des Landesamts für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg, 11).

BENK, D. (1970): Ein Beitrag zum Betrieb und zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart.

BGR (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung der Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden: Mit 41 Abbildungen, 103 Tabellen und 31 Listen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 5. Aufl.

BGR (2011): Hydrogeologische Übersichtskarte 1:200000 von Deutschland (HÜK200): Oberer Grundwasserleiter - CC 8734. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Rosenheim. URL [http://download.bgr.de/bgr/Grundwasser/HUEK200-D/8734/shp/huek200\\_8734.zip](http://download.bgr.de/bgr/Grundwasser/HUEK200-D/8734/shp/huek200_8734.zip).

DIN 19700-11 (2004): Stauanlagen - Teil 11: Talsperren.

DIN 19700-12 (2004): Stauanlagen - Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken.

DWA (2015a): DWA-M522 - Kleine Talsperren und kleine Hochwasserrückhaltebecken. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.

DWA (2015b): DWA-M550 - Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminde rung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.

EEA (2006): CORINE Land Cover (CLC). Europäische Umweltagentur, Kopenhagen.

HND (2015): Hochwassernachrichtendienst Bayern. URL <http://www.hnd.bayern.de/>.

KREITER, T. (2006): Dezentrale und naturnahe Retentionsmaßnahmen als Beitrag zum Hochwasserschutz in mesoskaligen Einzugsgebieten der Mittelgebirge. Dissertation, Universität Trier, Trier.

LfU (2015a): Digitale Übersichtsbodenkarte von Bayern im Maßstab 1:25000 (ÜBK25). Landesamt für Umwelt Bayern, Augsburg.

LfU (2015b): Klimakarten. Landesamt für Umwelt Bayern, Augsburg. URL <http://www.lfu.bayern.de/wasser/klimakarten/index.htm>.

MARENBACH, B. (2002): Der Beitrag naturnaher Retentionsmaßnahmen in den Talauen zur Hochwasserdämpfung: Dissertation, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.

MathWorks (2015): MATLAB Documentation. URL <http://de.mathworks.com/help/matlab/index.html>.

PATT, H. & GONSOWSKI, P. (2011): Wasserbau: Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

REINHARDT, C., BÖLSCHER, J., SCHULTE, A. & WENZEL, R. (2011): De-centralised water retention along the river channels in a mesoscale catchment in south-eastern Germany. In: Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 36 (7-8), S. 309–318.

RIEGER, W. (2012): Prozessorientierte Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, München.

SCHULLA, J. (2015): Model Description WaSiM: Water balance Simulation Model. Zürich.

StMUV (2002): Daten+Fakten+Ziele: Hochwasserschutz in Bayern: Aktionsprogramm 2020. Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz Bayern, München.

StMUV (2014): Hochwasserschutz: Aktionsprogramm 2020plus: Bayerns Schutzstrategie: Ausweiten, Intensivieren, Beschleunigen. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, München.

TSCHOPP, J.W. (1980): Die lokale und überörtliche Wirksamkeit von Hochwasserrückhaltespeichern mit verschiedenen Betriebskonzepten. Dissertation, Eidestehnische Hochschule Zürich, Zürich.

VISCHER, D. (1993): Versiegelung der Landschaft - größere Hochwasser? Gas Wasser Abwasser 73 (4), S. 280–283.

VISCHER, D., HAGER, W.H. & NAEF, F. (1992): Hochwasserrückhaltebecken. Verl. der Fachvereine, Zürich.