

Maria Kaiser, Florian Winter, Wolfgang Rieger

# Prozessbasierte Modellierung der Oberflächenabflussbildung und -konzentration in einem kleinen voralpinen Einzugsgebiet

Process-based modelling of surface runoff generation and concentration in a small pre-alpine catchment

Wie aus Starkniederschlägen großflächig auftretender Oberflächenabfluss entstehen kann, haben die jüngsten Hochwasserereignisse in Südostdeutschland gezeigt. Entwickelt sich der Oberflächenabfluss zu einer Sturzflut, wie beispielsweise im niederbayerischen Simbach geschehen, kann er große Schäden anrichten. Es ist daher von großem Interesse, die oberflächenabflussbeitragenden Flächen eines Einzugsgebiets zu identifizieren. Die Oberflächenabflussbildung und -konzentration kann mithilfe eines physikalisch basierten Modellansatzes simuliert werden. Im vorliegenden Beitrag wurde ein erweitertes WaSiM-Modell auf das voralpine Einzugsgebiet des Sachenbachs (2,2 km<sup>2</sup>) angewendet. Im Fokus stand die ereignisbasierte und flächendifferenzierte Simulation der Entstehung und Konzentration von Oberflächenabfluss. Die Simulationsergebnisse des WaSiM-Modells wurden mit den Ergebnissen einer GIS-gestützten Methode zur Identifizierung von oberflächenabflussbeitragenden Flächen verglichen. Außerdem erfolgte eine Verifizierung der Simulationsergebnisse anhand von Luft- und Thermalbildern, sowie einer Feldbegehung. Es zeigte sich, dass das erweiterte WaSiM-Modell die Oberflächenabflüsse im Sachenbach-Einzugsgebiet gut abbildet. Besonders der zeitliche Verlauf der Oberflächenabflussbildung und -konzentration war in den Simulationsergebnissen nachvollziehbar. Für verschiedene Niederschlagsereignisse (advektiv/konvektiv) konnten außerdem unterschiedliche oberflächenabflussbeitragende Flächen identifiziert werden. Eine prozessbasierte Modellierung bietet vielversprechende Perspektiven für die Identifizierung und Abbildung der zeitlichen Entstehung von oberflächenabflussbeitragenden Flächen. Da die vorherrschenden Bedingungen im Einzugsgebiet in der Simulation berücksichtigt werden, eignet sich der prozessbasierte Modellansatz für ereignisbezogene und räumlich differenzierte Aussagen zur Oberflächenabflussbildung eines Gebiets.

**Schlagwörter:** Hydrologische Modellierung, WaSiM-Modell, Oberflächenabfluss, kleines Einzugsgebiet, Voralpen

The very recent flood events in south-eastern Germany have shown how heavy precipitation can trigger surface runoff on extensive areas. When surface runoff turns into a flash flood, as was the case in the Lower Bavarian City of Simbach, it can cause extensive damage. Thus, it is of great interest to identify the surface runoff contributing areas of a catchment. The surface runoff formation and concentration can be simulated using a physically based model approach. In the present article, an extended WaSiM model was applied to the pre-alpine Sachenbach catchment (2.2 km<sup>2</sup>). The focus was on the event-based and spatially distributed simulation of the formation and concentration of surface runoff. The simulation results of the WaSiM model were compared with the results of a GIS-based method for the identification of surface runoff contributing areas. In addition, the simulation results were verified using aerial and thermal images as well as a field survey. It was concluded that the extended WaSiM model reproduces the surface runoffs of the Sachenbach catchment well. In particular, the temporal progression of the surface runoff formation and concentration was traceable in the simulation results. For different precipitation events (advective/convective), different surface runoff contributing areas could be identified. The process-based modeling provides promising perspectives for the identification and mapping of the temporal development of surface runoff contributing areas. Since the prevailing conditions in the catchment are taken into account in the simulation, the process-based model approach is suitable for event-related and spatially differentiated statements on the surface runoff formation of an area.

**Keywords:** Hydrologic Modeling, WaSiM-Model, surface runoff, small catchment, Pre-Alps

## 1 Problemstellung

In kleinen Einzugsgebieten können durch lokale Starkniederschläge plötzliche und heftige Hochwasserereignisse – auch Sturzfluten genannt – auftreten. Eine besondere Rolle spielen in diesem Zusammenhang durch Infiltrationsüberschuss auftretende Oberflächenabflüsse, deren Entstehung durch flachgründige Böden und steile Hänge begünstigt wird (MAURER, 1997). Voralpine Einzugsgebiete sind besonders von Sturzflutereignissen betroffen, da gerade dort Niederschläge mit hohen Intensitäten sowie zusätzlich Schmelzwasserabflüsse auftreten können. Großflächig auftretender Oberflächenabfluss kann je nach vorliegender Bodenbedeckung und Nutzungsintensität außerdem zu Boden-erosion führen (ALEWELL et al., 2015).

Die Entwicklung einer Methodik zur Lokalisierung und Quantifizierung auftretender Oberflächenabflüsse und ihrer Fließwege kann daher nicht nur Grundlage für ein Hochwassermanagement, sondern auch für ein Erosionsmanagement wie beispielsweise eine zielgerichtete Schutzwaldplanung sein. Für die Ableitung der oberflächenabflussbeitragenden Flächen ist eine möglichst hohe räumliche Auflösung anzustreben (5 bis 20 m), um kleinräumige Heterogenitäten beispielsweise in der Topographie zu erfassen (HÜMANN & MÜLLER, 2013). Darüber hinaus ist eine ereignisbasierte und prozessbezogene Betrachtung sinnvoll, da neben Infiltrationsüberschuss auch Sättigungsüberschuss und Return Flow als Ursache für auftretende Oberflächenabflüsse in Frage kommen (MERZ, 1996).

Als Werkzeug zur Identifizierung von oberflächenabflussbeitragenden Flächen können geeignete hydrologische Modelle dienen. Das hydrologische Modell sollte die Prozesse, die die Bildung und Konzentration von Oberflächenabflüssen maßgeblich bestimmen, weitgehend physikalisch basiert abbilden und die beeinflussenden Gebietsparameter hinreichend genau berücksichtigen können. In diesem Zusammenhang sind Simulationsergebnisse von konzeptionellen Modellen als unzureichend zu bewerten. Das rasterbasierte hydrologische Modell WaSiM (SCHULLA, 1997) wurde im Rahmen verschiedener Untersuchungen hinsichtlich der physikalisch basierten Separation der einzelnen Abflusskomponenten validiert (RIEGER, 2012; WINTER, 2013). Zur dynamischen und gleichzeitig ereignisbezogenen Identifizierung der oberflächenabflussbeitragenden Flächen musste WaSiM (Version 9.06), um ein Modul zur Berechnung der Oberflächenabflusskonzentration nach dem Ansatz der kinematischen Welle erweitert werden. Das sogenannte Surface Routing Modul ermöglicht die räumlich differenzierte Modellierung der Fließrichtung und Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses in einem Einzugsgebiet und ersetzt den konzeptionellen Ansatz eines Einzellinearspeichers für den Direktabfluss. Hierdurch werden die physikalischen Grundlagen des WaSiM Modells und die Simulation der Abflussbildung und -konzentration in der Einzugsgebietskala weiter verbessert.

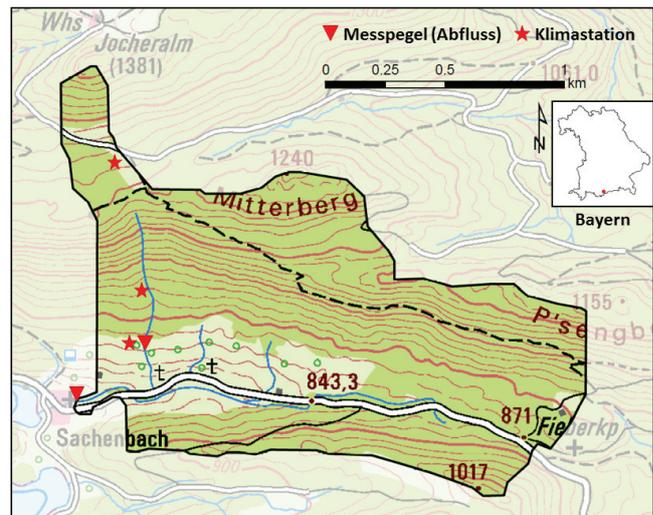
Um das Surface Routing Modul für ein Einzugsgebiet evaluieren zu können, ist eine Identifizierung der oberflächenabflussbeitragenden Flächen anhand einer Gebietsanalyse erforderlich. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung werden Luft- und Thermalbilder des Einzugsgebiets sowie die Ergebnisse einer Feldbegehung herangezogen. Zusätzlich werden die Modellergebnisse mit einem GIS-basierten Ansatz zur Lokalisierung oberflächenabflussbeitragender Flächen verglichen.

## 2 Gebietsbeschreibung und Datengrundlage

### 2.1 Das Einzugsgebiet des Sachenbachs

Aufgrund der Gebietscharakteristik und der Datenlage wurde für die Evaluierung der Modellerweiterung das kleine voralpine Einzugsgebiet des Sachenbachs (2,2 km<sup>2</sup>) gewählt, das etwa 75 km südlich von München liegt. Das Einzugsgebiet hat eine Ost-West-Ausrichtung und ist durch einen Südhang im Norden und einen Nordhang im Süden begrenzt (Abb. 1). Die maximale Höhe des Einzugsgebiets im Norden liegt bei 1.409 m ü. NN und bei 1.017 m ü. NN im Süden. Das Tal befindet sich auf 804 m ü. NN. Mit einem durchschnittlichen Gefälle von 44 Prozent ist das Einzugsgebiet als steil zu bewerten.

Der nach Westen fließende Sachenbach mündet nach 1,8 km in den Walchensee. Der Sachenbach führt im Durchschnitt 0,055 m<sup>3</sup>/s Abfluss (MQ bezogen auf den Messzeitraum 1977 bis 2012, hnd.bayern.de, Zugriff 11/2016), wobei der mittlere Hochwasserabfluss (MHQ = 1,75 m<sup>3</sup>/s) mehr als das 30-fache dieses Wertes beträgt. Die höchsten gemessenen Abflüsse des Sachenbachs liegen zwischen 4 und 6 m<sup>3</sup>/s und traten meist im Sommerhalbjahr auf (hnd.bayern.de, Zugriff 11/2016). Das vergleichsweise große Verhältnis zwischen HQ bzw. MHQ und MQ deutet auf eine hohe Abflussbildung im Sachenbachgebiet hin. Zusätzlich lassen die Saisonalität der Ereignisse sowie die Analysen von PERKUHN (2013), der für das Einzugsgebiet Konzentrationszeiten von weniger als 6 Stunden ermittelte, auf sommerliche Starkniederschläge in Verbindung mit schnell abfließenden Oberflächen-



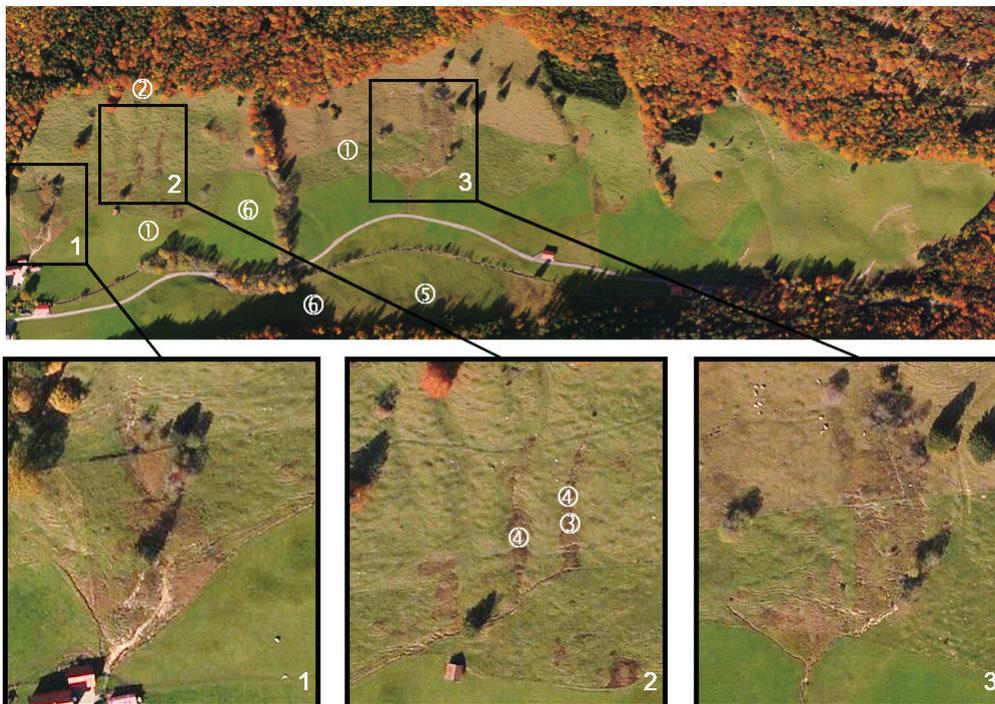
**Abbildung 1**

Übersicht über das voralpine Sachenbach-Einzugsgebiet und die Messstationen (Kartendaten: d-maps und geodatenonline.de).  
*Overview of the pre-alpine Sachenbach catchment and the measuring stations (map data: d-maps and geodatenonline.de).*

abflüssen schließen. Im Frühjahr führen drei Seitenarme dem Sachenbach vom nördlichen Hang Schmelzwasser zu. Aufgrund der Alpennähe liegt die jährliche Niederschlagsmenge zwischen 1.500 und 2.000 mm. Insgesamt sind 84 % der Einzugsgebietsfläche bewaldet, 15 % werden als Grün- und Weideland genutzt und 1 % ist versiegelt. Die oberen, steileren Hänge des Untersuchungsgebiets werden forstwirtschaftlich genutzt. Abgesehen von einer Straße entlang des Bachs und dem Ort Sachenbach, der aus zwei Bauernhöfen am Ostufer des Walchensees besteht, ist das Einzugsgebiet unbebaut. Entlang des Bachlaufs und im Bereich der Weideflächen finden sich Bodentypen der Pseudogleye und Gleye mit eher geringen Durchlässigkeiten. Die Waldstandorte weisen – gemäß einer Messkampagne im Gebiet im Bereich zwischen 830 m ü. NN und 1.225 m ü. NN – flachgründige Braunerde-Rendzina-Böden mit Mächtigkeiten zwischen 55 und 33 cm auf und besitzen damit ein begrenztes Speichervermögen, wodurch das Auftreten von Oberflächenabfluss begünstigt wird.

Im Rahmen einer Geländebegehung wurde das beschriebene Abflussverhalten des Sachenbach-Einzugsgebiets verifiziert. Im Fokus der Felduntersuchung standen Abflussprozessspuren und Zeigerpflanzen im Grünlandbereich sowie am Waldrand des Südhangs. Der Geländebegehung ging ein advektives Niederschlagsereignis voraus (Höhe: 100 mm, Dauer: 9 Tage, Jährlichkeit T < 1a gem. KOSTRA), so dass Sättigungsflächen identifiziert werden konnten. Durch Beweidung und Befahren beschädigter Oberböden, wie er im Grünland feststellbar war (© in Abb. 2), kann die Bildung von Oberflächenabflüssen bei Starkregen begünstigen (MARKART et al., 2004). Aus der Ferne erkennbare Abtragsflächen auf den Weidehängen (Bildausschnitte 1 bis 3 in Abb. 2), wiesen auf starke oberflächliche Abflussprozesse hin. Zusätzlich konnten kürzlich aufgetretene Oberflächenabflüsse, welche auf Infiltrationsüberschuss oder flachgründige Böden zurückzuführen sind, anhand entsprechender Spuren im Gelände nachgewiesen werden. In einer Geländesenke im Wald waren temporäre Oberflächenabflusswege zu finden (© in Abb. 2). Spuren im Laub und umgelegtes Gras belegten Oberflächenabfluss aus dem Wald

ins Grünland. Die Hänge des Grünlands waren aufgrund von Staunässe, bedingt durch das vorangegangene Niederschlagsereignis, stellenweise nicht betretbar. An einem natürlichen Bodenaufschluss wurde gesättigter Oberflächenabfluss beobachtet (③ in Abb. 2). Nass- sowie Trockenstellen waren im Weideland häufig zu finden. Die im Gelände identifizierten Zeigerpflanzen ließen Rückschlüsse auf die Feuchte- und Abflussverhältnisse des Sachenbach-Einzugsgebiets zu. Die Feuchtezahl F beschreibt die mittlere Bodenfeuchte während der Vegetationsperiode, wobei Pflanzen mit einer Feuchtezahl größer oder gleich sechs auf einen Wasserüberschuss im Boden hindeuten (SCHERRER, 2006; HEMUND et al., 2011). Große Ansammlungen von Binsen (*Juncus sp.*) wurden in der Nähe von Rinnsalen und Nassstellen gefunden (④ in Abb. 2). Mit einer Feuchtezahl von 7 sind sie Nässezeiger und treten auf feuchten bis nassen Wiesen auf (SCHERRER, 2006). Vereinzelt wuchsen Sumpfkatzdisteln (*Cirsium palustre*) zwischen den Binsen. MARKART et al. (2004) ordnen Flächen mit diesen beiden Pflanzenarten je nach Auftretenshäufigkeit den Abflussklassen 4 oder 5 zu, wonach 51 bis 75 % (Klasse 4) bzw. > 75 % (Klasse 5) des Niederschlags auf diesen Flächen oberflächenabflusswirksam werden. Als weiterer Feuchtezeiger wurde der Große Wiesenknopf (*Sanguisorba officinalis*, F 7) entdeckt (SCHERRER 2006, ⑤ in Abb. 2). Gleichzeitig traten weniger feuchteliebende Pflanzen wie Schafgarbe (F 4), sowie Wiesen-Pippau und Wiesen-Flockenblume (jeweils F 3) auf (MARKART et al., 2004; HEMUND et al., 2011, ⑥ in Abb. 2).



**Abbildung 2**

Spuren von Oberflächenabflussprozessen im Grünland des Sachenbach-Einzugsgebiets: (1) Beschädigung des Oberbodens durch Beweidung, (2) temporäre Oberflächenabflusswege, (3) gesättigter Oberflächenabfluss, (4) Nässezeiger Binsen, (5) Feuchtezeiger Großer Wiesenknopf, (6) Trockeniszeiger Schafgarbe, Wiesen-Pippau und Wiesen-Flockenblume (Quelle: Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung 2014).

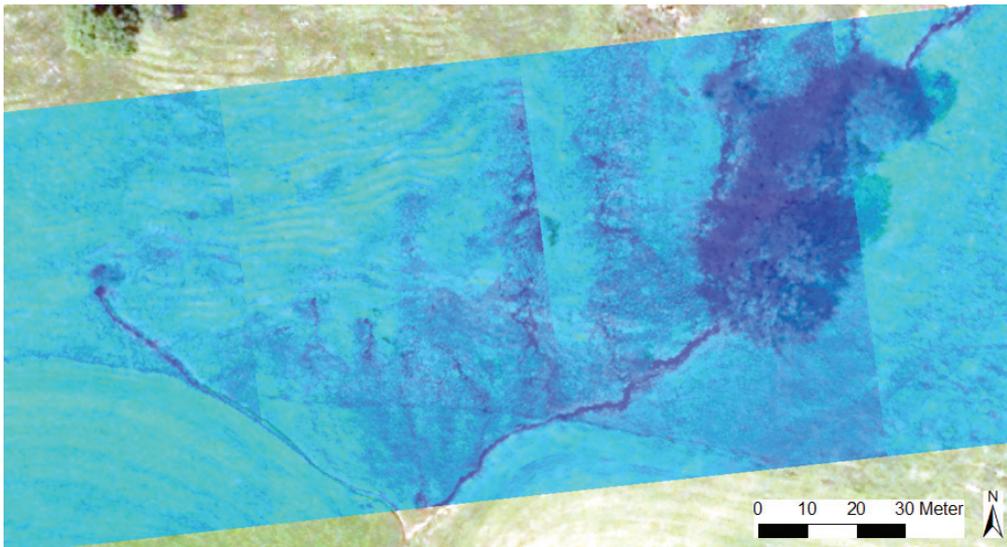
*Traces of surface runoff processes in the grassland of the Sachenbach catchment: (1) Damaged surface by grazing, (2) temporary surface runoff paths, (3) saturated overland flow, (4) wetness indicators rushes, (5) moisture indicator great burnet, (6) dryness indicators yarrow, rough hawkbeard and brown knapweed (Source: Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung [Bavarian measuring administration] 2014).*

Nach den Erkenntnissen der Feldbegehung variiert der Bodenwassergehalt des Grünlands stark. Im Grünland treten neben stauwasserbeeinflussten Böden und Rinnsalen auch Trockenstellen auf. Zudem deuten Wasseraustritte aus dem Hang auf laterale Fließwege hin. Damit liegen im Untersuchungsgebiet Anzeichen für Oberflächenabfluss bedingt durch Infiltrations- als auch Sättigungsüberschuss vor.

## 2.2 Auswertung von Luft- und Thermalbildern

Die Identifizierung von Flächen, die im Sachenbach-Einzugsgebiet zum Oberflächenabfluss beitragen, erfolgte ferner anhand von Luft- und Thermalbildern, da Prozessspuren aus großer Distanz leichter zu erkennen sind. Ein Luftbild des Untersuchungsgebiets zeigt Struktur- und Farbunterschiede im Grünlandbereich, die auf heterogene Flächen hinweisen (Abb. 2). Weiterhin sind mehrere stark erodierte Grasflächen erkennbar, welche auf massiven Oberflächenabfluss (Infiltrations- oder Sättigungsüberschuss) und Return Flow zurückzuführen sind (SCHERRER, 2006). Dieser Erosionsprozess wird durch die landwirtschaftliche Nutzung des Grünlandes zusätzlich verstärkt. Dort, wo die Fließwege des Oberflächenabflusses zusammentreffen, ist ein deltaförmiges Erosionsgebiet entstanden (Bildausschnitt 3 in Abb. 2).

Während der Feldbegehung wurden Thermalaufnahmen des Sachenbach-Einzugsgebiets mit Hilfe eines Octocopters und darauf installierter Thermalkamera von der Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München aufgenommen. Die Thermalfernerkundung bietet die Möglichkeit, die von Materialien ausgehende Strahlung im thermalen Bereich des elektromagnetischen Spektrums aufzuzeichnen (ALBERTZ & WIGGENHAGEN, 2009). Jeder Farbton des Thermalbilds entspricht einer Temperaturstufe. Die Farben reichen von blau (kalt) bis rot (warm). Anhand der Strahlungstemperatur können auf Thermalbildern fließendes Wasser, gesättigter Boden und Quellaustritte sichtbar gemacht werden. Fließstrukturen und oberflächenabflussbeitragende Flächen, die sonst schwer oder gar nicht im Feld oder auf Luftbildern erfasst werden können, sind auf diese Weise identifizierbar. Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Zusammenfluss zweier Rinnsale des Sachenbachs im Grünlandbereich. Das Thermalbild deckt dabei die Entstehung des Erosionsdeltas auf. Nach den Dauerniederschlägen der vorangegangenen Tage



**Abbildung 3**

Überlagerung eines Luftbildes mit einem Thermalbild (aufgenommen nach einem advektivem Niederschlagsereignis) zur Identifizierung von oberflächenabflussbeitragenden Flächen für Bildausschnitt 3 vgl. Abbildung 2. Wasseraustritte aus dem Hang und fließendes Wasser weisen niedrigere Temperaturen auf und haben daher eine dunklere Färbung. (Thermalbilder: Professur für Photogrammetrie und Fernerkundung der TUM, Luftbild: Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung 2014).

*Overlay of an aerial and a thermal image (taken after an advective precipitation event) for the identification of areas with increased surface runoff generation and concentration for section 3 of figure 2. Water outlets and running water show lower temperatures and are thus recognizable as a darker hue. (Thermal images: Chair of Photogrammetry and Remote Sensing, TUM. Aerial image: Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung 2014).*

sind noch Wasseraustritte aus dem Hang und diffuse Fließwege zwischen den Rinnsalen zu erkennen. Die zuvor in der Feldbegehung identifizierten oberflächenabflussbeitragenden Flächen wurden mithilfe der Thermalphotographie bestätigt.

### 2.3 Datenlage

Das Messnetz im Sachenbach-Einzugsgebiet setzt sich aus drei meteorologischen Stationen und zwei Pegelstationen zusammen. Die meteorologischen Stationen decken verschiedene Höhenlagen des Untersuchungsgebiets ab und befinden sich auf Lichtungen. Die am höchsten gelegene meteorologische Station ist mit Schneehöhensensor und Pluviometer ausgestattet. Alle 10 Minuten werden automatisch Globalstrahlung, relative Luftfeuchte, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Niederschlag gemessen. Eine Pegelstation des Wasserwirtschaftsamtes Weilheim in der Nähe der Bauernhöfe markiert den Auslass des Einzugsgebiets. Zusätzlich misst ein H-Flume den Zufluss aus dem größten der drei Seitenarme. Die Inbetriebnahme der meteorologischen Messstationen und des H-Flumes erfolgte im Frühjahr 2013. Dem hydrologischen Modell liegt ein digitales Geländemodell (DGM) mit einer Rasterweite von 25 m zu Grunde. Die Bodentypen wurden der Bodenübersichtskarte Bayern (1 : 25.000, Bayerisches Landesamt für Umwelt) entnommen. Angaben über die Landnutzung entstammen dem ATKIS-Datensatz der Bayerischen Vermessungsverwaltung und wurden anhand von Orthophotos verfeinert.

## 3 Methodik

### 3.1 Das hydrologische Modell WaSiM

WaSiM ist ein physikalisch-basiertes deterministisches hydrologisches Modellsystem mit konzeptionellen Ansätzen, das zur

Modellierung in alpinen Gebieten entwickelt wurde (SCHULLA, 1997). Das Modell arbeitet flächendetailliert und wird in einer Vielzahl von räumlichen und zeitlichen Skalen eingesetzt. Die zeitliche Auflösung reicht von Tages- bis Minutenschritten und erlaubt eine Modellanwendung für unterschiedliche Zielstellungen und Ereignischarakteristika. Die variable Diskretisierung des modular aufgebauten Modells ermöglicht, abhängig von der Rasterweite, den Einsatz in Einzugsgebieten mit einer Fläche von wenigen Quadratkilometern bis zu einer Fläche von über 10.000 km<sup>2</sup>.

Die Berechnungen der vertikalen Flüsse werden in den aktivierten Teilmodellen für jede Gitterzelle einzeln durchgeführt. Dabei wird zur Modellierung der Abflussbildung auf jeder Rasterzelle die

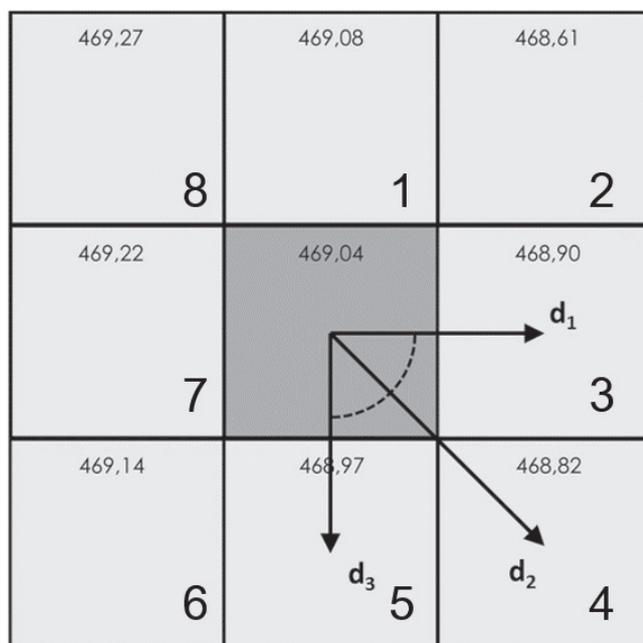
eindimensionale RICHARDS-Gleichung diskretisiert und für eine vertikale Bodensäule (bestehend aus einem oder mehreren Horizonten) iterativ für jeden Simulationszeitschritt gelöst. Die Iteration wird mit dem Finite-Differenzen-Verfahren gelöst und ist ausführlich in SCHULLA (2012) beschrieben. Dieser Ansatz erlaubt die dynamische Modellierung der Oberflächenabflussbildung aus Infiltrations- und Sättigungsüberschuss und kann damit als sehr geeignet für die vorliegende Studie bewertet werden.

Die Abflusskomponenten Oberflächenabfluss und Interflow wurden bisher mittels des Kaskadenansatzes nach DOOGE (1973) direkt von der Zelle der Abflussbildung zum Teileinzugsgebietsauslass geroutet. Die Translation der Teilflüsse wird aus den Fließzeiten abgeleitet, die bei der Datenaufbereitung aus dem digitalen Höhenmodell und der Fließgeschwindigkeit nach MANNING-STRICKLER bestimmt werden. Zunächst werden die Fließgeschwindigkeiten im Flussnetz für jedes Teileinzugsgebiet iterativ bestimmt. Anschließend werden die Geschwindigkeiten in Fließzeiten umgerechnet und auf die einzelnen Zellen des Flussnetzes aufgeteilt. Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Fließzeiten für den Oberflächenabfluss unabhängig von der vorliegenden Landnutzung ermittelt werden. Gerade bei der Modellierung von verschieden bewirtschafteten Flächen oder unterschiedlichen Vegetationsformen ist eine dynamische Betrachtung der Oberflächenabflusskonzentration unter Berücksichtigung der variierenden Oberflächenrauheit notwendig. Weiterhin wurde im bisherigen WaSiM-Modell die Abflusskonzentration über die Tiefe hinweg als gleich angenommen, wodurch der langsamere Interflow hinsichtlich der Konzentrationszeiten nicht vom Oberflächenabfluss abgetrennt wurde und damit die Komponenten des Direktabflusses nur unzureichend dargestellt werden konnten (RIEGER, 2012). Dieser Nachteil zeigt

sich besonders in kleinskaligen Gebieten mit hoher Abflussdynamik sowie bei Gebieten mit einer variierenden Landnutzung oder Bewirtschaftung.

### 3.2 Das Surface Routing Modul in WaSiM

Auf Grund der genannten Defizite der bisherigen Modellkonzeption wurde WaSiM um ein Modul zur hydrodynamischen Berechnung des gebildeten Oberflächenabflusses erweitert (WINTER, 2013). In diesem Modul wird die Abflusskonzentration des Oberflächenabflusses nach dem Ansatz der kinematischen Welle berechnet. Als Ergebnis werden das Volumen, die Fließgeschwindigkeit und die räumliche Verteilung des Oberflächenabflusses ausgegeben. Das Surface Routing (SR)-Modul wurde zur Anwendung auf kleinen Skalen (Mikroskala und untere Mesoskala) sowie für landwirtschaftliche Flächen entwickelt. Die Fließgeschwindigkeit wird nach MANNING-STRICKLER unter Berücksichtigung der Neigung, Oberflächenrauigkeit und Fließtiefe bestimmt. Oberflächenabfluss wird im Modell aus Sättigungsüberschuss oder Infiltrationsüberschuss gebildet und sammelt sich in Mulden. Ist der Muldenspeicher gesättigt, fließt freies Wasser an der Oberfläche in Richtung des steilsten Gradienten. Der Oberflächenabfluss durchfließt das Modell Zelle für Zelle, bis eine Flusszelle erreicht wird und wird dann an das Routing im Gewässersystem übergeben. Auf der Oberfläche verbleibendes Wasser, das nicht in die angrenzende Zelle fließt oder nicht vom Boden aufgenommen werden kann, wird im nächsten Zeitschritt wieder der Abflussbildung zugeführt. Das ermöglicht die Simulation einer Re-Infiltration. Die Fließrichtungen werden in jedem Zeitschritt dynamisch unter Berücksichtigung der Hangneigung und der Fließtiefe berechnet, wobei mehrere Fließrichtungen über die Krümmung benachbarter Zellen einbezogen werden (Abb. 4).



**Abbildung 4**

Die Fließrichtungen ( $d_n$ ) des Oberflächenabflusses werden im hydrologischen Modell WaSiM dynamisch für jeden Zeitschritt über die Krümmung der Zellen bestimmt.

*The flow directions ( $d_n$ ) of the surface runoff are determined dynamically in the hydrological model WaSiM for each time step based on the curvature of the cells.*

Das SR-Modul wurde für zwei relativ flache Einzugsgebiete (3,5 und 6,3 km<sup>2</sup>) mit überwiegend landwirtschaftlich genutzten Flächen validiert (WINTER, 2013). Die dort gewonnenen Erfahrungen wurden auf die Anwendung des SR-Moduls auf das Sachenbach-Einzugsgebiet übertragen.

### 3.3 Parametrisierung des WaSiM-Modells

Basierend auf der Auflösung des digitalen Geländemodells sowie der vorliegenden Bodenkarte wurde die Rasterweite des WaSiM-Modells mit 25 m gewählt. Im Preprocessing wurden aus dem Höhenmodell Informationen wie Gefälle oder Exposition abgeleitet. Die Landnutzung des Sachenbach-Einzugsgebiets wurde im hydrologischen Modell in Grünland, Weideland, Lichtung, Laubwald, Nadelwald, Mischwald und versiegelte Flächen unterschieden. Die landnutzungsabhängige Parametrisierung des Bodenmoduls wurde von TESCHEMACHER (2014) in Anlehnung an RIEGER (2012) und durch Verschneidung des Landnutzungsgrids mit dem Bodengrid durchgeführt. Die für die Lösung der RICHARDS-Gleichung notwendigen VAN GENUCHTEN-Parameter wurden hierbei nach WESSOLEK et al. (2009) festgelegt. Die Parametrisierung des SR-Moduls erfolgte über die Oberflächenrauigkeit nach Strickler für den jeweiligen Landnutzungstyp. Die Waldtypen des Sachenbach-Einzugsgebiets erhielten Rauheitswerte zwischen 10 und 15 m<sup>1/3</sup>/s, Weide- und Grünland wurden mit 20 bzw. 25 m<sup>1/3</sup>/s parametrisiert und versiegelte Flächen wurden zu 75 m<sup>1/3</sup>/s angenommen. Für eine möglichst realitätsnahe Simulation wurde die Möglichkeit mehrerer Fließwege bei gleichem Gradienten der umliegenden Zellen im SR-Modul aktiviert.

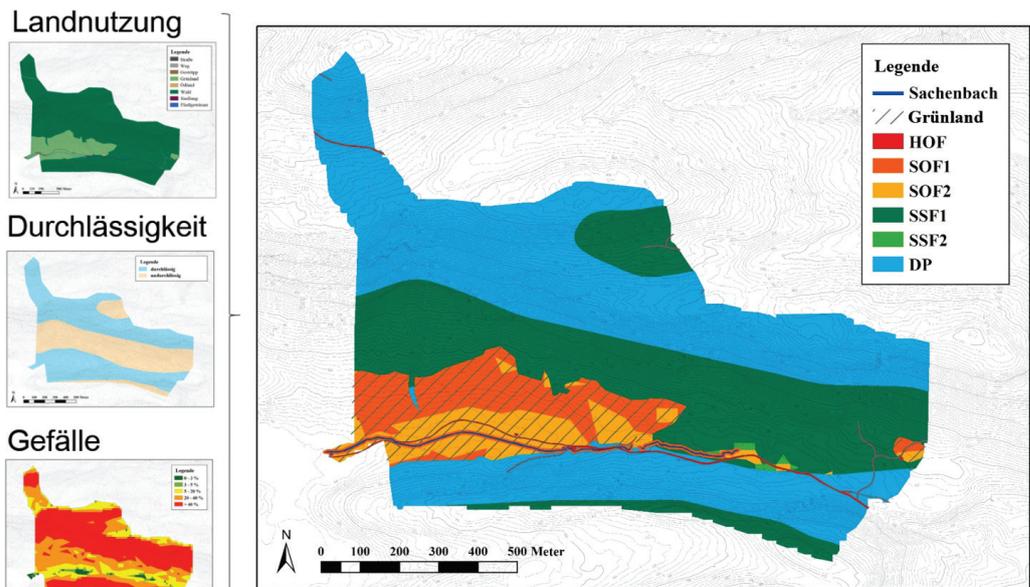
### 3.4 Validierung durch GIS-gestützten Ansatz

Die mittels SR-Modul simulierten oberflächenabflussbeitragenden Flächen werden sowohl mit den Ergebnissen der Feldbegehung als auch unter Nutzung einer GIS-basierten Methodik verglichen. Letztere ist für die Ermittlung von oberflächenabflussbeitragenden Flächen weit verbreitet. Anhand von Entscheidungsbäumen, die in einem GIS implementiert sind, wird die Ausprägung von Gebietsparametern wie beispielsweise Topographie, Bodenverteilung und Landnutzung abgefragt, um daraus Einzugsgebietsflächen gleicher dominanter Abflussprozesse zu identifizieren. Die verfügbaren GIS-gestützten Ansätze unterscheiden sich in Ergebnisdarstellung, Aufwand, Datenanforderungen sowie vorausgesetzten Anwenderkenntnissen. Aufgrund der Datenlage im Sachenbach-Einzugsgebiet sowie seiner Aktualität wurde dem Ansatz nach HÜMANN & MÜLLER (2013) gegenüber den Ansätzen nach SCHERRER & NAEF (2003), MARKART et al. (2004), SCHERRER (2006) und MÜLLER et al. (2009) der Vorzug gegeben. Für den gewählten Ansatz werden Informationen über die Landnutzung (Ackerfläche, Grünland, Wald), das Gefälle (0 bis 3 %, 3 bis 5 %, 5 bis 20 %, 20 bis 40 %, > 40 %) und die hydraulische Leitfähigkeit des Einzugsgebiets benötigt.

Das Sachenbach-Einzugsgebiet ist größtenteils bewaldet, wobei ein kleiner Teil als Weide- und Grünland genutzt wird. Für die Ableitung der dominanten Abflussprozesse nach dem Ansatz von HÜMANN & MÜLLER (2013) werden die Flächen des Einzugsgebiets gemäß der Klassifizierung nach HÖLTING & COLDEWEY (2009) in Flächen mit mittlerer bis mäßiger Durchlässigkeit (durchlässig) und Flächen mit sehr geringer Durchlässigkeit (undurchlässig) eingeteilt. Das Sachenbach-Einzugsgebiet ist somit von Streifen durchlässiger und undurchlässiger Geologie mit wechselnder Landnutzung aus Wald und Weideland durchzogen. Die Hangneigung, welche für einen Großteil der Gebiets-

fläche bei über 40 % liegt, wurde aus einem DGM der Auflösung 25 x 25 m abgeleitet und entsprechend der Entscheidungstabellen von HÜMANN & MÜLLER (2013) klassifiziert.

Die Verschneidung der Datensätze resultiert in einer Abflussprozesskarte des Sachenbach-Einzugsgebiets für ein extremes Niederschlagsereignis (Abb. 5). Neben der Unterscheidung in die Abflussprozesse Hortonscher Oberflächenabfluss (HOF), Sättigungsflächenabfluss (SOF), Fließprozesse im Boden (SSF) und Tiefenversickerung (DP) erfolgt eine Klassifizierung der Geschwindigkeit des Abflussprozesses. Diese wird von den Nummern nach der Abkürzung angegeben, wobei eins einen schnellen, zwei einen mäßigen und drei einen verzögerten Abflussprozess beschreibt.



**Abbildung 5**

Karte der dominanten Abflussprozesse des Sachenbach-Einzugsgebiets für extreme Niederschlagsereignisse nach dem Ansatz von HÜMANN & MÜLLER (2013). Angabe des dominanten Abflussprozesses als Hortonscher Oberflächenabfluss (HOF), schneller bzw. gemäßigter Sättigungsflächenabfluss (SOF1/2), schnelle bzw. gemäßigter Fließprozesse im Boden (SSF1/2) und Tiefenversickerung (DP) (Quellen: HÜK200 © BGR & SGD 2011, Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung 2014).

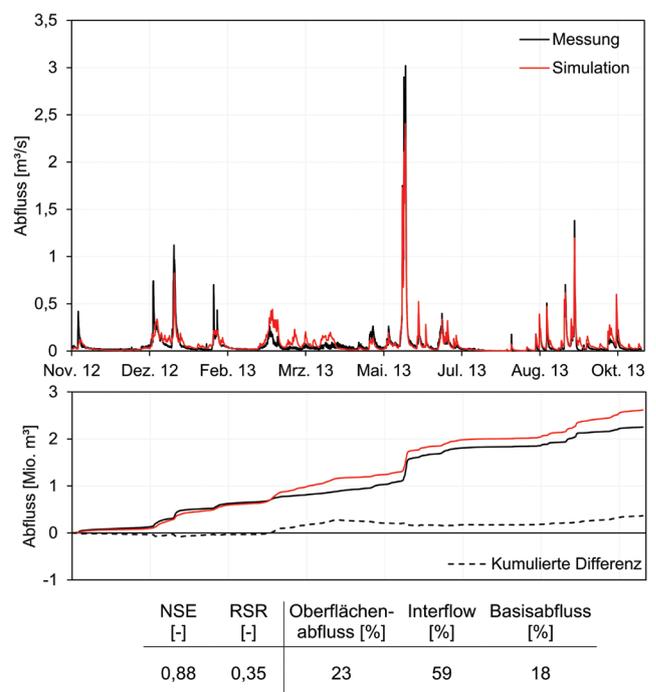
Map of dominant runoff processes of the Sachenbach basin for extreme weather events according to HÜMANN & MÜLLER'S (2013) approach. Indication of the dominant runoff process as Hortonian Overland Flow (HOF), fast or moderate Saturation Overland Flow (SOF1/2), fast or moderate Subsurface Flow (SSF1/2) and Deep Percolation (DP) (Sources: HÜK200 © BGR & SGD 2011, Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung 2014).

Die Straßen und Siedlungsflächen werden nach HÜMANN & MÜLLER (2013) dem HOF und die Uferzonen des Sachenbachs dem SOF als dominantem Abflussprozess zugeordnet. Auf den bewaldeten Flächen des Sachenbach-Einzugsgebiets treten Tiefenversickerung und schnelle Abflussprozesse im Boden auf. Für den Grünlandbereich wird Sättigungsflächenabfluss vorhergesagt. Weideflächen, mit einem Gefälle größer als 20 %, werden dabei dem schnellen Sättigungsflächenabfluss zugerechnet. Nach der ermittelten Abflussprozesskarte sind der Grünlandbereich und die versiegelten Flächen oberflächenabflussbeitragend. Der Wald dient als möglicher Retentionsraum oder Abflusssenke und begünstigt den schnellen Wassertransport im Boden. Insgesamt wird für 17 % der Einzugsgebietsfläche des Sachenbachs Oberflächenabfluss (HOF und SOF) vorhergesagt.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Kalibrierung des WaSiM-Modells

Die Kalibrierung des WaSiM-Modells erfolgte durch Anpassung der nach SCHULLA (2012) empfohlenen Kalibrierungsparameter des Teilmoduls der ungesättigten Bodenzone und des Schneemoduls. Da der Simulationszeitraum das Junihochwasser 2013 enthielt, wurde ein besonderes Augenmerk auf die Erfassung dieses Hochwasserscheitels (Jährlichkeit  $T = ca. 10a$ ) gelegt. Außerdem lag der Fokus der Modellkalibrierung auf der realitätsgetreuen Abbildung des Niedrigwasserabflusses und der niedrigeren Abflussspitzen. Neben den Gütekriterien nach Nash-Sutcliffe (NSE) und dem RMSE-observations standard deviation ratio (RSR) (MORIASI et al., 2007) wurden die Abflussdifferenz zwischen Messung und Modellierung, sowie die Verteilung der modellierten



**Abbildung 6**

Simulierter Gesamtabfluss (mit aktiviertem Surface Routing-Modul) am Pegel Sachenbach mit Gütekriterien, kumulierter Abflussdifferenz und Anteilen der simulierten Abflusskomponenten. Simulated total runoff (with activated Surface Routing module) at the Sachenbach gauge with quality criteria, cumulative difference in runoff, and proportions of the simulated runoff components.

Abflusskomponenten kontrolliert (Abb. 6). Auf diesen Ergebnissen aufbauend kann das Simulationsergebnis als sehr gut bewertet werden. Im Zuge der nachfolgenden ereignisbasierten Evaluierung des SR-Moduls erfolgte gleichzeitig eine Validierung des kalibrierten WaSiM-Modells.

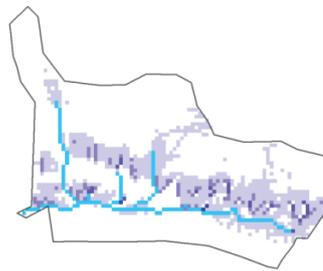
#### 4.2 Ereignisbasierte Anwendung des SR-Moduls

Einzelne Niederschlagsereignisse wurden ausgewählt, um die Performance des SR-Moduls im Detail zu untersuchen. Die simulierten Oberflächenabflüsse wurden für je zwei charakteristische konvektive und advective Niederschlagsereignisse, sowie für das Hochwasserereignis im Juni 2013 untersucht. Die Bewertung der simulierten Oberflächenabflüsse erfolgte dabei ausschließlich qualitativ, da Abflussmessungen nur für den Gesamtabfluss und nicht für einzelne Abflusskomponenten vorlagen. Das räumliche Auftreten der modellierten Oberflächenabflüsse wurde anhand der entsprechenden Rasterdaten (Grids) evaluiert, die WaSiM für jeden Simulationszeit-schritt ausgibt.

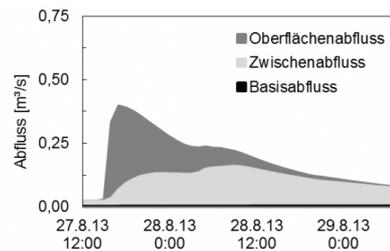
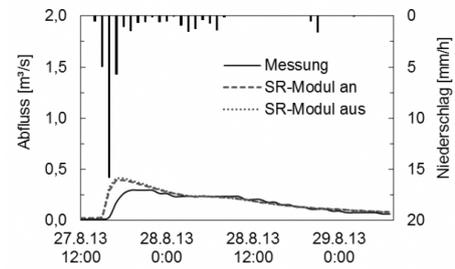
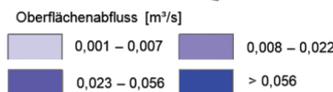
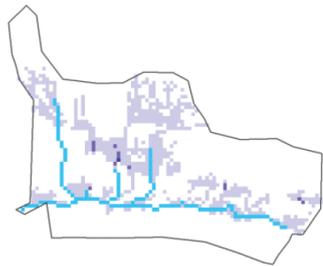
Für ein konvektives Niederschlagsereignis werden die Oberflächenabfluss-Grids für den Zeitpunkt des höchsten Niederschlags (16 mm) und die darauf folgende Stunde dargestellt (Abb. 7). Zum Zeitpunkt des höchsten Niederschlags entstehen primär an den steileren Hängen des Gebiets unregelmäßig verteilte Flächen des gebildeten Oberflächenabflusses. Vereinzelt bilden sich temporäre Fließwege in der Fläche aus, die nicht unbedingt mit dem Sachenbach und seinen Seitenarmen verbunden sind. Eine Stunde später, nach einem starken Rückgang der Niederschlagsintensität, ist

### Konvektives Niederschlagsereignis

27.08.2013 16:00



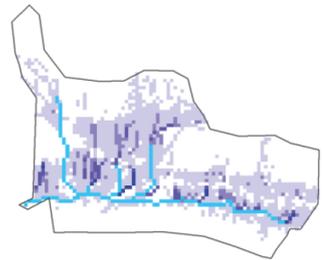
27.08.2013 17:00



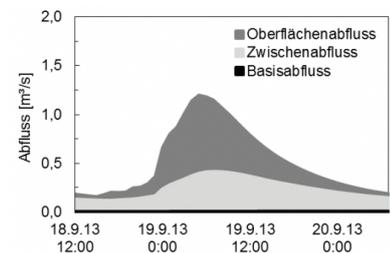
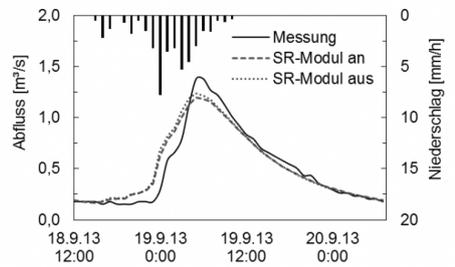
NSE [-]	RSR [-]	Oberflächen-abfluss [%]	Interflow [%]	Basisabfluss [%]
0,79	0,46	33	63	4

### Advectives Niederschlagsereignis

19.09.2013 00:00



19.09.2013 05:00



NSE [-]	RSR [-]	Oberflächen-abfluss [%]	Interflow [%]	Basisabfluss [%]
0,93	0,27	52	46	2

**Abbildung 7**

Simulation des Oberflächenabflusses im Sachenbach-Einzugsgebiet für ein konvektives und ein advectives Niederschlagsereignis. Die räumliche Darstellung zeigt die oberflächenabflussbeitragenden Flächen (lila) als Zufluss zum Sachenbach (hellblau) zu verschiedenen Zeitpunkten.

*Simulation of surface runoff in the Sachenbach catchment for a convective and advective precipitation event. The spatial distribution of surface runoff contributing areas (purple) are shown as inflow to the Sachenbach (light blue) at different times.*

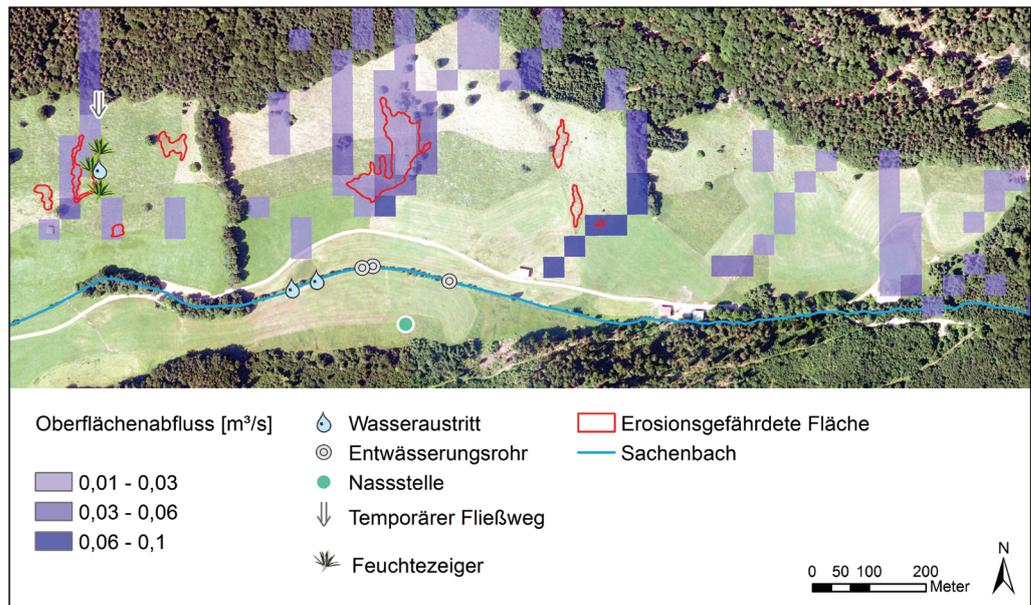
auch ein merklicher Rückgang des Oberflächenabflusses zu verzeichnen. Die Simulationsgüte des Ereignisses wird durch das SR-Modul geringfügig verbessert. Eine Umverteilung der Abflusskomponenten findet statt, ist grafisch jedoch kaum zu erkennen. Erst die statistische Auswertung zeigt eine Reduzierung des Oberflächenabflusses um 3 % und eine Erhöhung des Interflows und des Basisabflusses um 2 bzw. 1 %.

Die Simulation eines advektiven Niederschlagsereignisses ergibt, dass sich nach einigen Stunden Niederschlag im Gegensatz zum konvektiven Ereignis die Oberflächenabflüsse zusätzlich in Gewässernähe auf den flacheren Wald- und Wiesenhängen bilden und sich zu Fließpfaden akkumulieren. Hierbei werden die Seitenarme des Sachenbachs verlängert sowie neue gebildet. Zum Zeitpunkt des höchsten gemessenen Abflusses (5:00 Uhr) beginnen diese temporären Fließwege sich aufzulösen und der Oberflächenabfluss nimmt ab. Wie bereits beim konvektiven Niederschlagsereignis wird der Anteil des Oberflächenabflusses am Gesamtabfluss mit aktiviertem SR-Modul auf Grund der ermöglichten Re-Infiltration leicht reduziert und die Simulationsgüte geringfügig verbessert.

Insgesamt verdeutlichen die Simulationsergebnisse die Ereignisabhängigkeit des modifizierten Modells, da bei heftigem Schauer der Oberflächenabfluss vor allem auf den steilen Hängen entsteht, während er sich bei langanhaltenden Niederschlägen zusätzlich auf den Sättigungsflächen im Talbereich bildet. Vergleichsweise wenig Flächen südlich des Sachenbachs trugen in der Simulation zu Oberflächenabfluss bei. Es zeigten sich keine ausgeprägten Fließwege wie auf dem Südhang.

### 4.3 Validierung der Simulationsergebnisse

Auf allen Flächen des Untersuchungsgebietes, für die im Rahmen der Feldbegehung Oberflächenabfluss nachgewiesen wurde (Kapitel 2.1), simulierte WaSiM für das Hochwasserereignis vom Juni 2013 ( $T = \text{ca. } 10\text{a}$ ) Oberflächenabfluss. Ausdehnung und Form der zwei größten Erosionsstellen (Abb. 2, Ausschnitt 2 und 3) werden in ähnlicher Weise durch die Simulationen abgebildet. Die Fließwege, welche auf Luft- und Thermalbildern sowie bei der Gebietsbegehung identifiziert wurden, werden im Modell als temporäre Fließwege für Oberflächenabfluss wiedergegeben (Abb. 8). Die Bewertung der oberflächenabflussbeitragenden Flächen außerhalb des Weidelandes ist schwierig, da eine Felduntersuchung und Thermalbilder fehlen. Daher kann für die bewaldeten Flächen weder die Richtigkeit der Simulation noch der GIS-gestützten Abflussprozesskarte belegt werden. Geringer



**Abbildung 8**

Simulation des Oberflächenabflusses kombiniert mit den Ergebnissen der Felduntersuchung. Der Grünlandbereich wird zum Zeitpunkt des höchsten simulierten Oberflächenabflusses während der extremen Niederschlagsereignisse im Juni 2013 gezeigt (02.06.2013 12:00) (Quelle: Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung 2014). *Simulation of surface runoff combined with the results of the field study. The grassland area is shown at the time of the highest simulated surface runoff peak during the extreme precipitation events in June 2013 (06/02/2013 12:00) (Source: Geobasisdaten © Bayerische Vermessungsverwaltung 2014).*

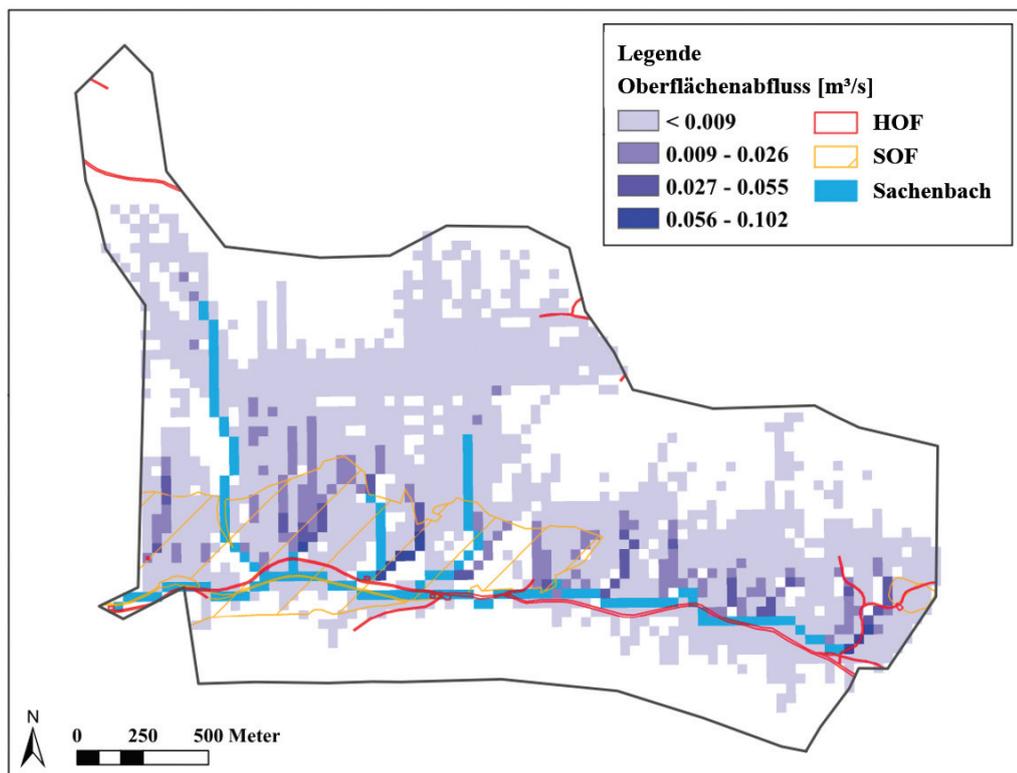
Oberflächenabfluss im Wald wie er vom SR-Modul berechnet wurde, scheint nicht unwahrscheinlich, berücksichtigt man die Spuren des Oberflächenabflusses, die im Randbereich des Waldes gefunden wurden.

Für den Vergleich des erweiterten WaSiM-Modells mit der erstellten GIS-gestützten Abflussprozesskarte für extreme Niederschlagsereignisse wurde ebenfalls das Junihochwasser 2013 angezogen. Dabei wurde das Simulationsergebnis des Zeitschritts mit dem höchsten simulierten Oberflächenabfluss als „Worst-Case-Szenario“ verwendet und das Oberflächenabflussgrid mit oberflächenabflussbeitragenden Flächen (SOF- und HOF-Flächen) der Abflussprozesskarte für den Vergleich überlagert (Abb. 9).

Der Flächenanteil des Sachenbach-Einzugsgebiets, auf dem WaSiM Oberflächenabfluss simuliert, ist größer als der des GIS-Ansatzes. Während WaSiM 28 % der Einzugsgebietsfläche als oberflächenabflussbeitragend angibt, sind es nach der GIS-Analyse lediglich 17 % der Flächen. Das WaSiM-Modell simuliert – im Gegensatz zum GIS-basierten Ansatz – Oberflächenabfluss nicht nur im Grünland, sondern auch im Wald. Oberflächenabfluss wird hierbei auf Waldflächen simuliert, die nach der Abflussprozesskarte durch Abfluss im Boden (SSF) oder Tiefenversickerung (DP) charakterisiert sind (Abb. 5). Weiterhin liefert WaSiM ein differenzierteres Bild des Grünlands, da im hydrologischen Modell nicht alle Grünlandflächen oberflächenabflussbeitragend sind.

## 5 Diskussion und Ausblick

Die Abfluss(bildungs)prozesse im Untersuchungsgebiet konnten mithilfe des weiterentwickelten WaSiM-Modells räumlich und zeitlich differenziert dargestellt werden. Einerseits konnte der Prozess der Aufsättigung des Bodens, die Ausbildung der Sättigungs-



**Abbildung 9**

Vergleich der oberflächenabflussbeitragenden Flächen des GIS-gestützten Ansatzes (rot und gelb) und des modellbasierten Ansatzes (lila). Der GIS-gestützte Ansatz weist Verkehrswege als HOF-Flächen aus (linienhafte Darstellung) und den gesamten Grünlandbereich als SOF-Fläche. Simulationsergebnis des 02.06.2013 um 12:00 Uhr (Worst-Case-Szenario).

*Comparison of surface runoff contributing areas of the GIS-based approach (red and yellow) and the model-based approach (purple). The GIS-based approach identifies traffic routes as HOF areas and the entire grassland area as an SOF area. Simulation results of 06/02/2013 at 12 a.m. (worst case scenario).*

flächen sowie der daraus resultierende Sättigungsflächenabfluss durch das Modell simuliert werden. Andererseits war das Modell auch in der Lage, das konvektive Ereignis und den daraus resultierenden infiltrationsüberschussbedingten Oberflächenabfluss gut abzubilden. Zusätzlich konnte durch die Weiterentwicklung von WaSiM der Grad seiner Physikalität insofern weiter verbessert werden, da durch die Möglichkeit der Re-Infiltration Oberflächenabfluss, der auf gesättigten Flächen entsteht, an anderer Stelle, an der die Infiltrationskapazität noch nicht erreicht ist, wieder infiltriert (WINTER, 2013). Die simulierten temporären Fließwege im Sachenbachgebiet konnten durch verschiedene Methoden der Validierung bestätigt werden, wodurch eine qualitative Verifizierung des prozessorientierten Ansatzes für das Untersuchungsgebiet erfolgt ist. Er zeigt dabei deutliche Vorteile gegenüber dem GIS-gestützten Ansatz, welcher die vorherrschenden Abflussbildungsprozesse nur zeitinvariant und mittels einer starken Vereinfachung der Zusammenhänge identifizieren kann.

Anzumerken ist hierbei, dass der prozessbasierte Ansatz ursprünglich für landwirtschaftlich geprägte Gebiete der unteren Mesoskala entwickelt wurde, um den Einfluss der fehlenden Bodenbedeckung auf den Oberflächenabfluss zu beurteilen. Für das in dieser Untersuchung betrachtete Sachenbachgebiet trifft die Skalenempfehlung zu, es besteht jedoch zum großen Teil aus dauerhaft bedeckten Böden (Wald, Grünland). Auch mit Hinblick auf größere Einzugsgebiete kann damit die gebietsun-

abhängige Anwendbarkeit des dynamischen Ansatzes nicht abschließend beurteilt werden. Der Methodenvergleich sollte daher in einem nächsten Schritt beispielsweise in größeren Einzugsgebieten mit einer differenzierten Niederschlags- und Abflusscharakteristik sowie auf weiteren landwirtschaftlichen Flächen mit unterschiedlicher Bewirtschaftung erfolgen.

Eine flächendifferenzierte quantitative Bewertung der Simulationsergebnisse wurde in der vorliegenden Studie nicht durchgeführt, da eine Bilanzierung der Abflussprozesse ausschließlich über den Gesamtabfluss am Gebietsauslass möglich war. Jedoch birgt die qualitative Beurteilung und Validierung der Verteilung der Oberflächenabflüsse im Einzugsgebiet einen deutlich höheren Informationsgehalt als eine ausschließliche Betrachtung des Gesamtabflusses am Gebietsauslass. Um eine quantitative Bewertung der Simulationsergebnisse des

SR-Moduls zu realisieren, wäre die messtechnische Erfassung der Abflusskomponenten bzw. der Oberflächenabflüsse auf den in dieser Studie identifizierten oberflächenabflussbeitragenden Teilflächen erforderlich. Weiterhin könnten durch eine messtechnische Erfassung der Infiltrationsprozesse im Gebiet die Prozesse der Re-Infiltration erfasst werden. Zusätzlich wäre für eine flächendifferenzierte Quantifizierung der simulierten Oberflächenabflüsse eine höhere Informationsdichte zu den vorliegenden Gebietsparametern wie beispielsweise die Verteilung von Böden und Geologie erforderlich.

Durch diesen hohen Datenbedarf und den damit verbundenen erhöhten Zeitaufwand für Preprocessing, Modellparametrisierung und -kalibrierung ergeben sich für den prozessbasierten Ansatz auch Nachteile und Einschränkungen gegenüber dem präsentierten GIS-Ansatz. Zusätzlich birgt der prozessbasierte Ansatz, trotz seiner genaueren Abbildung der Abflussprozesse, Unsicherheiten, da die Validierung der simulierten Teilprozesse aufgrund fehlender Daten meist nicht in vollem Umfang möglich ist. Darüber hinaus sind einzelne Prozesse im Modell konzeptionell implementiert, wie beispielsweise die Konzentration des Zwischenabflusses mittels Linearspeicher, und manche Prozesse wie beispielsweise der Return Flow fehlen gänzlich.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Oberflächenabflussrouting für WaSiM eine wichtige Modellerweiterung dar-

stellt und für bestimmte Gebiete den Informationsgehalt zum modellierten Oberflächenabfluss erhöhen kann. Dieser dynamisch simulierte Oberflächenabfluss (Fließgeschwindigkeit und -richtung) könnte sich beispielsweise als Eingangsgröße für eine anschließende Erosionsmodellierung bei einer entsprechenden Modellerweiterung von WaSiM eignen.

## Discussion and Outlook

The runoff (formation) processes in the study area could be represented spatially and temporally differentiated using the enhanced WaSiM model. On the one hand, the process of soil saturation, the formation of saturation areas and the resulting saturation overland flow could be simulated using the model. On the other hand, the model was also able to well display the convective event and the resulting surface runoff caused by infiltration excess. In addition, due to the further development of WaSiM, the degree of its physicality could be further improved due to the possibility of re-infiltration of surface runoff, which occurs on saturated surfaces, re-infiltrating elsewhere where the infiltration capacity has not yet been reached (WINTER, 2013). The simulated, temporary flow paths in the Sachenbach area could be confirmed by various methods of validation, whereby a qualitative verification of the process-oriented approach for the study area has been carried out. It presents significant advantages over the GIS-based approach, which identifies the predominant runoff formation processes only in a time-invariant manner and by means of a strong simplification of the interrelations.

It must be pointed out that the process-based approach was originally developed for agricultural areas of the lower mesoscale in order to assess the influence of the lack of soil coverage on the surface runoff. For the Sachenbach area considered in this study, the recommended scale applies, though, the majority of the area consists of permanently covered soils (forest, grassland). Also with regard to larger catchments, the area independent applicability of the dynamic approach cannot be assessed conclusively. In a next step, the method comparison should therefore take place, as an example, in larger catchments with a differentiated rainfall and discharge characteristic as well as on agricultural areas with different cultivation.

A differentiated quantitative assessment of the simulation results was not carried out in the present study, since a balancing of the runoff processes was only possible via the total runoff at the catchment outlet. However, the qualitative assessment and validation of the distribution of the surface runoffs in the catchment has a much higher information content than an exclusive consideration of the total runoff at the catchment outlet. In order to achieve a quantitative evaluation of the simulation results of the SR module, the metrological recording of the runoff components and the surface runoffs of the surface runoff contributing areas identified in this study would be necessary. Furthermore, the re-infiltration process could be recorded by measuring these processes in the area. In addition, more information on the present area parameters, such as the distribution of soils and geology, would be required in order to carry out a spatially differentiated quantification of the simulated surface runoffs.

Due to the high data requirement and the associated increased time requirement for preprocessing, model parameterization

and calibration, the process-based approach also has disadvantages and limitations compared to the presented GIS-approach. Additionally, the process-based approach, despite its more accurate depiction of the runoff processes, contains uncertainties, since the validation of the simulated sub-processes is mostly not fully possible due to missing data. Furthermore, individual processes in the model are conceptually implemented, such as the concentration of the interflow by means of linear storage, and some processes, such as return flow, are completely missing.

In conclusion, it can be stated that the surface runoff routing for WaSiM is an important model extension and that it can increase the information content of the modeled surface runoff for specific areas. The dynamically simulated surface runoff (flow velocity and direction) is suitable, for example, as an input variable for a subsequent erosion modeling with a model extension of WaSiM.

## Anschriften der Verfasser

Maria Kaiser, M.Sc.  
Dr.-Ing. Wolfgang Rieger  
Technische Universität München  
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt  
Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement  
Arcisstraße 21  
80333 München  
maria.kaiser@tum.de  
wolfgang.rieger@tum.de

Dr.-Ing. Florian Winter  
Barthauer Software GmbH  
Rosenheimer Str. 143  
81671 München  
f.winter@barthauer.de

## Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J. & M. WIGGENHAGEN (2009). Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. Wichmann.
- ALEWELL, C., EGLI, M. & K. MEUSBURGER (2015): An attempt to estimate tolerable soil erosion rates by matching soil formation with denudation in Alpine grasslands. – *Journal of Soils and Sediments* 15 (6), 1383–1399
- DOOGE, J. (1973): *Linear theory of hydrologic systems*. Washington, DC (Technical Bulletin, 1468).
- HEMUND, C., MARKART, C., KOHL, B., DOBMANN, J. & R. WEINGARTNER (2011): Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten bei konvektiven Starkregen - Evaluation der Geländeanleitung von Markart et al. (2004) für Schweizerische Einzugsgebiete – BFW-Dokumentation, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, 12, 103 S.
- HÖLTING, B. & W. G. COLDEWEY (2013): *Hydrogeologie: Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie*. – Springer-Verlag
- HÜMMANN, M. & C. MÜLLER (2013): Improving the GIS-DRP Approach by Means of Delineating Runoff Characteristics with New Discharge Relevant Parameters – *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2 (1), 27–49
- MARKART, G.; KOHL, B.; SOTIER, B.; SCHAUER, T.; BUNZA, G. & R. STERN (2004): Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). – BFW-Dokumentation, Schriftenreihe des Bundesamtes und Forschungszentrums für Wald, Wien, 3, 88 S.

- MAURER, T. (1997): Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. – Inst. f. Hydrologie und Wasserwirtschaft Univ. Karlsruhe (TH), Dissertation
- MERZ, B. (1996): Modellierung des Niederschlag-Abfluß-Vorgangs in kleinen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität. Diss. Univ. Karlsruhe, Inst. f. Hydrologie u. Wasserwirtschaft, H. 56
- MORIASI, D., ARNOLD, M., VAN LIEW, M. W. & BINGNER, R. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*. 50(3), 885 - 900.
- MÜLLER, C.; HELLEBRAND, H.; SEEGER, M. & S. SCHOBEL (2009): Identification and regionalization of dominant runoff processes – a GIS-based and a statistical approach. – *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 779-792
- PERKUHN, P. (2013): Erstellung eines wissenschaftlichen Messkonzeptes inklusive Installation von hydrometeorologischer Sensorik für das Einzugsgebiet Sachenbach am Walchensee. – München, Universität der Bundeswehr, Masterarbeit
- RIEGER, W. (2012): Prozessorientierte Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. – München, Universität der Bundeswehr, Dissertation
- SCHERRER, S. & F. NAEF (2003): A decision scheme to identify dominant flow processes at the plot-scale for the evaluation of contributing areas at the catchments-scale. – *Hydrological Processes*, 17 (2), 391–401
- SCHERRER, S. (2006): Bestimmungsschlüssel zur Identifikation von hochwasserrelevanten Flächen: Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz.
- SCHMOCKER-FACKEL, P.; NAEF, F. & S. SCHERRER (2007): Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. – *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (2), 891–906
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. – Zürich, ETH Zürich, Dissertation
- SCHULLA, J. (2012): Model Description WaSiM. Water Balance Simulation Model.
- TESCHEMACHER, S. (2014). Application and evaluation of different approaches for modeling snow accumulation and ablation with WaSiM. – München, Technische Universität München, Study Project
- WESSOLEK, G., KAUPENJOHANN, M. & RENGER, M. (2009): Bodenökologie und Bodengeneese: Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Vol. 40, Berlin.
- WINTER, F. (2013): Prozessorientierte Modellierung der Abflussbildung und -konzentration auf verschlammungsgefährdeten landwirtschaftlichen Nutzflächen. – München, Universität der Bundeswehr, Dissertation