**Alexander Strom & Stephan Hannappel** 

# Sensitivitätsanalyse zum Einfluss landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsformen auf die Abflussbildung von Agrarflächen bei Sturzflutereignissen

Sensitivity analysis of cultivation practices influencing runoff generation of agricultural land during flash flood events

In einem Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes mit dem Titel "Veränderungen der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse" (FKZ 3717 48 242 0) wurde eine modellhafte Sensitivitätsanalyse zum Einfluss der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf das Wasseraufnahmevermögen landwirtschaftlicher Böden und den Oberflächenabfluss im Hinblick auf Extremwetterereignisse wie Stark- und Dauerregen von BEISECKER et al. (2020) durchgeführt.

Es wurden vier gut dokumentierte bedeutsame Überflutungsereignisse der jüngeren Vergangenheit in Süd- und Westdeutschland mit erheblichen Schäden nach Stark- oder Dauerregen als regionale Fallbeispiele exemplarisch hinsichtlich ihrer Ursachen ausgewertet. Die Zielstellung lag in der Identifikation besonders abflussfördernder Flächen und deren bodenhydrologischer Charakteristika, die maßgeblich von der Nutzungsart (z. B. Ackerland, Grünland) und der Bewirtschaftungsform (Bodenbearbeitung, Bedeckungsgrad, Fruchtfolge etc.) abhängig sind. Die Analyse erfolgte durch die Modellierung der Abflussbildung als ereignisspezifische Direktabflusshöhen auf Schlag- bzw. Flurstücksebene mit Hilfe eines modifizierten Curve-Number-Verfahrens nach KLEEBERG & OVERLAND (1989). Anhand der Modellergebnisse wurde überprüft, ob bedeutsame Unterschiede bezüglich der Abflusshöhen auf Schlagebene zwischen den Landnutzungsformen vorliegen. Eine differenzierte Analyse der Agrarflächen im Hinblick auf ihre Nutzung und Bewirtschaftung wurde durch die Bereitstellung von InVeKoS-Daten (Hauptkulturen) ermöglicht. Im Ergebnis wurden Ackerflächen, insbesondere Reihenkulturen (z. B. Maisflächen), als besonders abflussfördernde Flächen identifiziert. Ihre Volumenanteile am Gebietsabfluss gehen weit über ihren Anteil an der Einzugsgebietsfläche hinaus.

Auf die Ursachenanalyse folgten Variantenrechnungen mit alternativen Bewirtschaftungsformen (Mulchsaat mit und ohne Saatbettbereitung, langjährige Direktsaat), um Lösungsansätze zur Verringerung der Direktabflüsse und der Stärkung des Wasserrückhalts auf Schlag- und Einzugsgebietsebene zu entwickeln. Dabei wurde herausgearbeitet, dass die Mulchsaat mit Saatbettbereitung sowohl auf Einzelflächen als auch auf Gebietsebene eine sehr geringe abflussmindernde Wirkung aufweist. Das Mulchsaatverfahren ohne Saatbettbereitung sowie die langjährige Direktsaat besitzen hingegen in Abhängigkeit der untersuchten Ereignisse in den Fallbeispielen besonders hohe Abflussminderungspotenziale von 15 % respektive 40 % auf Einzelschlägen der Reihenkulturen bzw. 5 % respektive 10 % auf Gebietsebene

Durch die sich anschließende Variation der Niederschlagsszenarien wurde das Wirkungspotenzial der Mulch- und Direktsaat in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität abgeschätzt. Mit steigender Niederschlagsintensität nehmen die Minderungspotenziale der untersuchten Flächenmaßnahmen stark ab. Bei sehr extremen Ereignissen mit Niederschlagsintensitäten in der Größenordnung 100 mm/h liegen die maximalen Wirkungen auf Einzelflächen mit Reihenkulturen der Mulchsaat ohne Saatbettbereitung bei maximal 10 % und der langjährigen Direktsaat bei 30 %. Auf Gebietsebene sinken die Wirkungen den Maßnahmen entsprechend auf 2 bis 3 % bzw. rund 5 %

Durch den Beitrag soll die Diskussion über die Rolle der Flächenbewirtschaftung auf Agrarflächen in Einzugsgebieten im Hinblick auf extreme Niederschlagsereignisse sowie landwirtschaftliche Datenbestände (z. B. InVeKoS) und ihre Zugänglichkeit angeregt werden. Die Ergebnisse liefern zudem wichtige Grundlagen für das Starkregenmanagement auf kommunaler Ebene, die Ausgestaltung des landwirtschaftlichen Förderinstrumentariums und möglicher Anpassungen des Ordnungsrechts sowie möglichen Ergänzungen der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft (z. B. Mindestbedeckungsgrad für Mulchsaat).

**Schlagwörter:** Abflussbildung, Curve-Number, InVeKoS Daten, Sturzflutereignis, Bodenwasserrückhalt, Landnutzung, Bewirtschaftungsform, Ackerflächen, Mulchsaat, Direktsaat

In a research project funded by the German Environment Agency (Umweltbundesamt) titled "Transformation of water absorption and retention capacity of agricultural soils and its effects on flooding risk from rising severe precipitation and continuous rain events", BEISECKER et al. (2020) investigated the influence of land use and cultivation practices on the water retention capacity of agricultural soils and surface runoff with regard to extreme weather events such as heavy and continuous rainfall.

This project evaluated four significant well-documented flooding events in southern and western Germany with severe damages after heavy or continuous rainfall as case studies. The objective was to identify areas that strongly enhance runoff generation and their soil hydrologic characteristics, which are largely dependent on the type of use (e.g. arable land, grassland) and the cultivation practices (tillage, soil cover, crop rotation, etc.).

The analysis was carried out by modelling the runoff generation as direct runoff depths specific to the selected events at the field and catchment scale using a modified curve-number method according to KLEEBERG & OVERLAND (1989). On the basis of the model results, significant differences in direct runoff depths between the land use forms were examined on the field scale as well as their effect on total

runoff volume on the catchment scale. A differentiated analysis of the agricultural areas with regard to land use and management was only possible on the basis of the main crops provided by IACS data (Integrated Administration and Control System).

In the results, fields of arable land, especially row crops (e.g. maize), were found to enhance the generation of direct runoff. Their contributions to total runoff volume were far beyond their share in catchment area.

The cause analysis was followed by model scenarios by varying the cultivation practices (mulching with and without seedbed preparation, long-term no till) in order to develop solutions for reducing direct runoff and increasing soil water retention at the field and catchment scale. It was found that mulching with seedbed preparation has a very low effect of direct runoff reduction both on the field and the catchment scale. Mulching without seedbed preparation and long-term no till agriculture, on the other hand, showed high direct runoff reduction potentials of 15 % to 40 % respectively on fields with row crops and 5 % to 10 % respectively at the catchment scale, depending on the events examined in the case studies.

The variation of the cultivation practices was followed by precipitation scenarios in order to assess the potential impact of mulching and long-term no till agriculture with regard to the intensity of the precipitation event. As rainfall intensity increases, the potential reduction of direct runoff of the above measures examined decreases sharply. In the case of extreme events with rainfall intensities of 100 mm/h, the maximum effects of mulching without seedbed preparation reach 10 % direct runoff reduction, while long-term no till cultivation reduces runoff by 30 % on fields with row crops. At the catchment scale, the effects decrease to 2 to 3 % and around 5 %, respectively for the measures.

The article aims at encouraging the discussion about the role of land management on agricultural fields in catchments with regard to extreme rainfall events as well as agricultural data (e.g. IACS) and their accessibility. The results also provide important foundations for the management of extreme rainfall events for municipalities, the design of policy instruments in agriculture and possible adjustments to regulatory law as well as possible formal additions to good agricultural practice (e.g. minimum soil cover for mulching).

**Keywords:** runoff generation, curve-number, IACS data, flash flood, soil water retention, land use, cultivation practices, farmland, mulching, no till

### 1 Einleitung

Der Klimawandel führt neben einem Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur und der jährlichen Niederschlagshöhe wahrscheinlich auch zu einer Zunahme von Starkregenereignissen, zu langanhaltenden Trockenperioden im Sommer sowie einer verstärkten Intensität der jeweiligen Ereignisse (LAWA, 2017). Für die Entstehung von Sturzfluten und Überschwemmungen spielt in ländlichen Regionen vor allem die Wasserinfiltration landwirtschaftlicher Flächen eine entscheidende Rolle. Deutschlandweit liegt der Anteil von Agrarflächen bei über 50 % (BMEL, 2017). Um durch Extremereignisse verursachte negative Folgen für Mensch, Infrastruktur und die Umwelt entgegenzusteuern, sind vielfältige Anpassungsmaßnahmen an Klimaveränderungen notwendig.

Im Jahr 2008 wurde die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel mit dem Ziel formuliert, die Vulnerabilität gegenüber dem Klimawandel in Deutschland zu verringern und natürliche, gesellschaftliche und ökonomische Systeme zu erhalten. Darin werden hinsichtlich der potenziellen Auswirkungen auf die Landwirtschaft u. a. erhebliche Ertragsausfälle durch Wetterextreme genannt. Daher wird die Weiterentwicklung und Förderung landwirtschaftlicher Maßnahmen, z. B. zur Optimierung der Bodenfruchtbarkeit und Bodenstruktur sowie natürlicher Regelmechanismen als Notwendigkeit angesehen (BUNDESREGIERUNG, 2008).

Die Wasserinfiltrationskapazität landwirtschaftlicher Böden ist nach BEISECKER et al. (2020) abhängig von nicht oder kaum beeinflussbaren Standortfaktoren (Relief, Boden, Klima) und beeinflussbarer Agrarstruktur (Nutzungsform, Bewirtschaftung). In zahlreichen wissenschaftlichen Studien wurden die Einflussfaktoren im Rahmen von Feldmessungen oder Modellierungen untersucht. So stellten z. B. ABU-HASHIM (2011) und ALHASSOUN (2009) bei Messungen mit Haubeninfiltrometern fest, dass Infiltrationsraten auf Ackerland, gefolgt von Grünland bzw. Sukzessionsflächen wesentlich geringer sind als auf Waldstandorten. Die Ergebnisse hydrologischer Modellierungen,

z. B. von SEIDEL (2008) mit dem Abfluss- und Erosionsmodell EROSION 3D (VON WERNER, 1995), bestätigen die Messungen.

Die Hauptnutzung (Acker, Grünland, Wald etc.) ist jedoch nicht der einzige Einflussfaktor auf die Infiltrationskapazität landwirtschaftlich genutzter Böden. In BEISECKER et al. (2020) wurden die Wirkungszusammenhänge zwischen den Einflussparametern der Agrarstruktur und Abflussprozessen aus der Literatur zusammengetragen. Demnach sind die wesentlichen landwirtschaftlichen Einflussparameter nach bodenhydrologischer Relevanz:

- landwirtschaftliche Nutzung (Acker, Grünland),
- Bodenbedeckung und Oberflächenverschlämmung,
- Bodenbearbeitung bzw. Bodenbearbeitungssysteme,
- · Anbauverfahren (konventionell, ökologisch),
- · Makro- und Bioporen,
- · Bodenverdichtung,
- · Humusgehalt des Bodens und
- Hydrophobie des Bodens.

Insbesondere bei Sturzfluten in ländlichen Regionen ist die Wasseraufnahmefähigkeit der landwirtschaftlichen Böden für ein effektives Risikomanagement von großer Bedeutung. Das Ziel der Untersuchungen bestand daher darin, den Beitrag landwirtschaftlicher Nutzflächen zum Oberflächen- bzw. Direktabfluss zu quantifizieren und die Bedeutung landwirtschaftlicher Bodennutzung für die Wasserinfiltration bei Starkregenereignissen besser beurteilen zu können, um eine fachliche Grundlage zur Stärkung des landwirtschaftlichen Förderinstrumentariums und des rechtlichen Rahmens zu schaffen.

Für vier ausgewählte Stark- bzw. Dauerregenereignisse, die zu markanten Schäden geführt haben, wurde anhand modellgestützter Sensitivitätsanalysen herausgearbeitet, welche Zusammenhänge mit der landwirtschaftlichen Flächennutzung und den Überflutungen bestehen. Es stand die Identifikation abflussfördernder Flächen und deren bodenhydrologischer Merkmale im Vordergrund. Zudem wurden Szenarienbetrachtungen durchgeführt, um einerseits die potenziell abflussmindernde Wirkung

alternativer Flächenbewirtschaftungen (Mulch- und Direktsaat) sowie die Abhängigkeit dieser Wirkung von der Niederschlagsintensität zu untersuchen.

Eine Modellierung der Abflussbildung auf Schlag- bzw. Flurstücksebene mittels SCS-Curve-Number-Verfahren (USDA NRCS, 2004a), das die oben genannten Einflussfaktoren auf landwirtschaftlichen Flächen implizit berücksichtigt, wurde dabei als zweckmäßig erachtet. Bereits in vorangegangenen Studien, z. B. zur bundesweiten Berechnung von Wasserhaushaltsgrößen (BGR, 2004) oder zur Untersuchung des Einflusses der Landnutzung bzw. Landnutzungsänderung auf die Abflussbildung (AUERSWALD et al., 2019; BRANDHUBER et al., 2017), wurde ebenfalls das SCS-Curve-Number-Verfahren angewendet. Zudem bildet das Verfahren einen zentralen Baustein anerkannter hydrologischer Modellsoftware, z. B. SWAT 2012 – Soil and Water Assessment Tool (ARNOLD et al., 2012) oder STOFFBILANZ (GEBEL et al., 2018).

#### 2 Material und Methoden

## 2.1 Modifiziertes Curve-Number-Verfahren nach KLEEBERG & OVERLAND (1989) und Modellumsetzung

Das SCS-Curve-Number-Verfahren (USDA NRCS, 2004a) ist eine Methode zur empirischen Beschreibung der Abflussbildung. Dabei erfolgt eine Belastungsaufteilung des Niederschlags zur Transformation in eine abflusswirksame Komponente, die als Direktabflusshöhe bestimmt wird.

Der Direktabfluss ist die Summe der Abflusskomponenten, die sich durch eine kurze Antwortzeit im Vorfluter auszeichnen. Er setzt sich gemäß DWA (2018) aus drei Komponenten zusammen: dem Horton'schen Oberflächenabfluss, dem Sättigungsoberflächenabfluss und dem schnellen Zwischenabfluss.

In DVWK (2003) wird die Ermittlung der Abflussbildung nach KLEEBERG & OVERLAND (1989), einer Modifikation des SCS-Curve-Number-Verfahrens, empfohlen. Einige Vorteile gegenüber dem klassischen Verfahren sind:

die Anpassung des Anfangsverlusts (Benetzung, Interzeption, Muldenrückhalt) an mitteleuropäische Verhältnisse,

- die Berücksichtigung der Hangneigung in der Abflussbildung und
- eine kontinuierliche Variabilität der Vorfeuchte statt drei diskreter Vorfeuchtestufen.

Der Algorithmus zur Bestimmung ereignisspezifischer Direktabflusshöhen wurde gemäß DVWK (2003) in PyQGIS umgesetzt. Der Modellaufbau wurde an das Ziel, schlagbezogene Ergebnisse zu erzielen, und an die Struktur der Eingangsdaten (Vektor) angepasst. Die hydrologischen Grundeinheiten, sogenannte HRU (hydrologic response unit) wurden daher aus Polygonen mit homogenem hydrologischen Verhalten durch den Verschnitt der Landnutzungsdaten mit den Bodendaten aufgebaut. Dabei ergaben sich je nach Größe des Untersuchungsgebietes und räumlicher Komplexität der Daten zwischen ca. 5.400 und 22.600 HRU. Die durchschnittlichen Flächengrößen der Polygone betrugen in den vier Fallstudien 0,55 bis 0,84 ha.

## 2.2 Datengrundlagen

Zur Parametrisierung der Abflussbildungsmodelle waren Niederschlags-, Höhen-, Boden- und Landnutzungsdaten notwendig. Die verwendeten Datensätze sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Im Fall 1 lag das Untersuchungsgebiet in zwei Bundesländern, weshalb die Daten der entsprechenden Landesämter vereint und an den Grenzen angepasst werden mussten.

Die Höhendaten dienten der Berechnung der Hangneigungsraster. Für jede HRU wurde der Mittelwert der Hangneigung in seiner Ausdehnung berechnet. Analog wurde mit dem Versiegelungsgrad verfahren. Die Verarbeitung der übrigen Parameter (Niederschlag, Landnutzung, Boden) wird nachfolgend gesondert beschrieben.

### 2.2.1 Ereignisbezogener Niederschlag

Zur räumlich und zeitlich möglichst detaillierten Erfassung der Niederschlagsverteilungen und -intensitäten zu den Zeitpunkten der Ereignisse wurde das Produkt RADOLAN RW des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Dabei handelt es sich um flächendeckende Niederschlagsdaten für das Gebiet Deutschlands, die in der räumlichen Auflösung 1 km x 1 km im Intervall von einer Stunde verfügbar sind. Es handelt sich um Regenradardaten, die im Aneichverfahren mit Stationsdaten abgeglichen werden

Tabelle 1 Zusammenfassung der Datengrundlagen.							
Summary of used data sets.							
Parameter	Fall 1		Fall 2	Fall 3	Fall 4		
	Ahr/Swistbach/Arz	Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach		Simbach	Wolfsbach/Aichbach		
Bundesland	RP	NW	BW	BY	ВҮ		
Niederschlag	DWD RADOLAN RW 1 km, 1 h (DWD, 2017)						
Höhendaten	Copernicus EU-DEM v1.1 25 m (EEA, 2017)						
Versiegelungsgrad	Copernicus High Resolution Layer "Imperviousness" 20 m (EEA, 2018)						
Allgemeine Landnutzung	Basis-DLM (BKG, 2016)						
Landwirtsch. Nutzung	InVeKoS	InVeKoS	Basis-DLM	InVeKoS	InVeKoS		
	(MWVLW, 2018)	(LWK NW, 2018)		(LFL BY, 2018)	(LFL BY, 2018)		
Bodenparameter	Bodenflächendaten RP	Bodenkarte NW	Bodenkarte BW	Übersichtsbodenkarte	Übersichtsbodenkarte		
	1:50.000	1:50.000	1:50.000	BY 1:25.000	BY 1:25.000		
	(LGB RP, 2018)	(GD NRW, 2017)	(LGRB BW, 2015)	(LFU BY, 2017)	(LFU BY, 2017)		

(BARTELS et al., 2004). Die stündlichen Niederschlagsraster mit 1 km x 1 km Kacheln bildeten den Dateneingang für die flächendifferenzierte Modellierung der Direktabflüsse. Die resultierenden stündlichen Direktabflüsse wurden im Ergebnis für jede HRU aufsummiert.

Des Weiteren wurden die RADOLAN-RW-Daten verwendet, um Tageswerte zur Bestimmung der Vorregenindizes nach KLEEBERG & OVERLAND (1989) als Indikator für die Vorfeuchteverhältnisse zu generieren. Dabei sind die 30 Tage vor dem Ereignis als Bezugszeitraum relevant, wobei die Tage exponentiell gewichtet werden. Der Tag vor dem Ereignis hat den größten und der dreißigste Tag vor dem Ereignis den geringsten Einfluss auf den Vorregenindex. Die genaue Vorgehensweise zur Berechnung findet sich in DVWK (2003). In der vorliegenden Studie wurden die Vorregenindizes VN<sub>mit</sub> und VN<sub>akt</sub> flächendifferenziert ermittelt. Dazu wurden die stündlichen Daten des RADOLAN-RW-Produktes (DWD, 2017) in Tagessummen umgerechnet. Als jahreszeitlicher Rahmen zur Charakterisierung des langjährigen mittleren Vorregenindex VN<sub>mit</sub> wurden die Vorregenindizes der vorangegangenen 30 Tage (VN<sub>akt</sub>) als Mittelwert vor dem Tag des Ereignisses verwendet. Vollständige RADOLAN-RW-Daten standen ab dem Jahr 2006 zur Verfügung. Für ein Ereignis, das z. B. am 31. Mai 2016 stattfand, wurden also die täglichen Vorregenindizes VN<sub>akt</sub> vom 1. bis zum 30. Mai der Jahre 2006 bis 2015 berechnet und deren Mittelwert als VN<sub>mit</sub> bestimmt.

## 2.2.2 Blockregen

Neben den Niederschlagsdaten des DWD wurden künstliche Blockregen mit konstanter Niederschlagsintensität innerhalb eines Ereignisses verwendet. In Niederschlagsszenarien mit variierenden Intensitäten von 10 bis 150 mm/h und Dauern von einer Stunde wurde das Wirksamkeitspotenzial alternativer Bewirtschaftungsvarianten abgeschätzt. Mit den KOSTRA-Daten des DWD (JUNGHÄNEL et al. 2017) konnten den Niederschlagsszenarien ausgewählte Wiederkehrintervalle (HN20, HN50 und HN100) ergänzend zugeordnet werden.

#### 2.2.3 Landnutzung

Die Landnutzung beeinflusst u. a. maßgeblich das Wasserinfiltrations- und -rückhaltevermögen eines Einzugsgebietes (EZG). Von Relevanz ist einerseits der allgemeine Typ der Landnutzung (z. B. Acker, Grünland, Wald, Siedlung etc.), andererseits sind Detailinformationen notwendig (z. B. Fruchtfolge auf Ackerflächen), um eine genaue hydrologische Flächencharakterisierung vornehmen zu können.

Mit dem Basis-DLM (Digitales Basislandschaftsmodell) können landwirtschaftliche Flächen lediglich in Ackerland, Obst- und Beerenbestände, Weingärten sowie Grünland differenziert werden. Für eine hinreichende Beschreibung des hydrologischen Verhaltens von landwirtschaftlichen Flächen auf Flurstücksbzw. Schlagebene werden daher zusätzliche Informationen benötigt. Dafür bietet sich die Verarbeitung von InVeKoS-Daten (Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem, engl. IACS – Integrated Administration and Control System) an. Um Agrarzahlungen in der EU kontrollieren zu können, werden über das InVeKoS u. a. Daten zur Hauptfrucht erhoben. So können z. B. Mais- von Weizenflächen unterschieden werden, was ein enormer Zugewinn für den Detailgrad der Modellparameter ist, da der Bedeckungsgrad sowie sein zeitlicher Verlauf bei diesen Kulturen naturgemäß sehr unterschiedlich ist und sich

auf den Wert der Curve-Number niederschlägt (USDA NRCS, 2004b).

Die InVeKoS-Daten wurden aus Datenschutzgründen nicht für alle Gebiete seitens der Länder bereitgestellt, sondern nur für die Falluntersuchungen Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach (Fall 1), Simbach (Fall 3) und Wolfsbach/Aichbach (Fall 4). Die Daten wurden anonymisiert übergeben, mit großer Sorgfalt behandelt und die Informationen zur Hauptfrucht im Jahr des Starkregenereignisses (2015 bzw. 2016) verarbeitet. Sie dienten der Ergänzung des zugrundeliegenden Basis-DLM. Für das Gebiet Engebach/Hod (Fall 2) konnte ausschließlich das Basis-DLM verwendet werden.

#### 2.2.4 Bodenparameter

Neben den Landnutzungsdaten wurden auch Bodendaten zur Verwendung im Abflussbildungsmodell aufbereitet. Hydrologische Bodenklassen (HSG - hydrologic soil group) dienen der Aggregierung von Böden mit ähnlichen hydraulischen Eigenschaften. Im NEH-630 (USDA NRCS, 2009) werden vier Gruppen mit unterschiedlichen Abflussbildungspotenzialen unterschieden:

- HSG A: gering (z. B. Sande, Kiese, Tonanteil < 10 % und Sandanteil > 90 %)
- HSG B: gering bis mäßig (z. B. lehmige Sande, sandige Lehme)
- HSG C: mäßig bis hoch (z. B. Lehme, tonige Schluffe, lehmige Tone)
- HSG D: hoch (z. B. quellende Tone, Böden mit Tonanteil > 40 % und Sandanteil < 50 %, Standorte mit geringem Grundwasserflurabstand)</li>

Die Zuweisung hydrologischer Bodenklassen erfolgte in den Gebieten Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach (Fall 1) und Engebach/Hod (Fall 2) nach der Methodik der BGR (2004) mittels nutzbarer Feldkapazität und Luftkapazität. In den Untersuchungsgebieten Simbach (Fall 3) und Wolfsbach/Aichbach (Fall 4) erfolgte die Zuweisung der HSG semi-quantitativ anhand der Bodenarten aus der Übersichtsbodenkarte 1:25.000 Bayern und der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 (AD-HOC-AG BODEN, 2005).

### 2.3 Zuweisung von Curve-Numbers zu landwirtschaftlichen Nutzflächen

Der maßgebliche hydrologische Flächenparameter ist beim Curve-Number-Verfahren nach KLEEBERG & OVERLAND (1989) die Curve-Number (CN). Je größer der CN-Wert, desto höher fällt der Direktabfluss aus. Die Curve-Number ist abhängig von der hydrologischen Bodenklasse, der Landnutzung, der landwirtschaftlichen Nutzungs- und Bewirtschaftungsform sowie dem hydrologischen Zustand. Mit letzterem wird pauschal der Summeneffekt folgender infiltrationsbegünstigender oder -hemmender Faktoren zusammengefasst:

- · Vegetationsdichte,
- Bodenbedeckungsgrad im Jahresverlauf,
- · Anteil der Zwischensaat,
- · Anteil des Ernterückstands und
- Bodenbearbeitung.

Zur möglichst realitätsnahen Parametrisierung sind nicht nur detaillierte Boden- und Landnutzungsdaten erforderlich, sondern es müssen auch entsprechende CN-Werte verfügbar sein. Die umfangreichste Primärquelle für CN-Werte bildet das "National Engineering Handbook Part 630, Hydrology", im Folgenden kurz: NEH-630 (USDA NRCS, 2004b). Die dort enthaltenen Daten ba-

sieren auf Messungen im nordamerikanischen Raum. Das exakte methodische Vorgehen und der Messaufbau zur Bestimmung der Curve-Numbers sind darin jedoch nicht im Detail dokumentiert.

Auf Basis des NEH-630 schätzte VOGES (1999) CN-Werte für Ackerland mit unspezifischer Nutzung. Es handelt sich dabei also nicht um eigene Messungen. Die Werte entsprechen etwa dem Mittel zwischen Reihenkulturen und geschlossenen Beständen, daher eignen sie sich für die Parametrisierung von unspezifischem Ackerland als grobe Näherung für Fälle, in denen keine näheren Informationen zur Hauptfrucht vorliegen.

Grundsätzlich erlaubt das NEH-630 jedoch eine relativ detaillierte hydrologische Unterscheidung landwirtschaftlicher Nutzflächen, z. B. in Brache, Wiesen, Weiden, Reihenkulturen (row crops) – z. B. Mais, geschlossenen Beständen (small grain) – z. B. Winterweizen. Tabelle 2 enthält eine Auswahl der relevantesten CN-Werte.

Zwischen den hydrologischen Bodenklassen bestehen große Unterschiede im Abflussverhalten mit kleinen CN-Werten bei HSG A (geringes Abflussbildungspotenzial) bis hohen CN-Werten bei der HSG D (hohes Abflussbildungspotenzial), was im Hinblick auf ihre hydrologischen Eigenschaften plausibel ist.

Unabhängig von der hydrologischen Bodenklasse und konkreten Berechnungen zeichnet sich daher bereits in den CN-Werten qualitativ ab, dass für Wälder und Wiesen höhere Direktabflüsse zu erwarten sind als für Ackerflächen, was im Einklang mit den Feld- (ABU-HASHIM, 2011; ALHASSOUN, 2009) und Modelluntersuchungen (SEIDEL, 2008) steht. Die Relationen der Abfluss-

mengen sind jedoch standortabhängig und ereignisspezifisch, was anhand der regionalen Analysen zumindest modellgestützt detaillierter untersucht werden kann.

Neben den Daten zu Hauptkulturen sind in Tabelle 2 auch Angaben zum hydrologischen Zustand (rot und grün hervorgehoben) und zur Bodenbedeckung mit Ernterückständen bzw. Mulch (strohfarben hervorgehoben) enthalten. Bei der Zuweisung des hydrologischen Zustands wurde vor allem das Vegetationsstadium der Frucht zum Zeitpunkt des Ereignisses berücksichtigt. In Hinblick auf die hier untersuchten Ereignisse, die ausnahmslos zwischen Ende Mai und Anfang Juni lagen, wurden die Zuordnungen kulturabhängig auf diese Jahreszeit ausgerichtet. Flächenmäßig sind dabei vor allem die Flächen mit Winterweizen und Mais von Relevanz, die sich aufgrund des Vegetationsstadiums in diesen Zeiträumen jeweils im sogenannten "guten" und "schlechten" hydrologischen Zustand befinden.

Tabelle 1 enthält außerdem Angaben zur Bodenbedeckung mit Pflanzenmaterial für Reihenkulturen und geschlossene Bestände, die bei einer Mulchsaat auf Ackerflächen herangezogen werden können. Beim Mulchsaatverfahren wird das Pflanzenmaterial der Zwischen- oder Vorfrucht auf dem Acker belassen und darin die Hauptfrucht eingesät. Die Aussaat kann dabei ohne oder mit Saatbettbereitung erfolgen, die unterschiedlich intensive Eingriffe in den Boden darstellen. Da die Saatbettbereitung die Bodenbedeckung reduziert, kann dabei von einem geringen Bedeckungsgrad von < 20 % ausgegangen werden. Erfolgt hingegen keine Saatbettbereitung, so kann von einem Bedeckungsgrad von > 20 % ausgegangen werden. Die CN-Werte für Äcker

CN-spezifische Landnutzung	CN nach hydrologischer Bodenklasse			Quelle	
	Α	В	С	D	
Forstflächen und Grünland					
Wald	36	60	73	79	USDA NRCS (2004b)
Wiesen- und Buschlandschaft*	30	48	65	73	USDA NRCS (2004b)
Wiese ohne Weideaktivität	30	58	71	78	USDA NRCS (2004b)
Ackerflächen unspezifisch					
Acker (konventionell/Pflugeinsatz)	67	78	86	89	VOGES (1999)
Geschlossene Bestände					
kein Mulch, hydrologisch ungünstig**	65	76	84	88	USDA NRCS (2004b)
kein Mulch, hydrologisch günstig**	63	75	83	87	USDA NRCS (2004b)
5 – 20 % Bedeckung mit Mulch	64	75	83	86	USDA NRCS (2004b)
> 20 % Bedeckung mit Mulch	60	72	80	84	USDA NRCS (2004b)
Reihenkulturen					
Reihenkulturen allgemein, kein Mulch, hydrologisch ungünstig**	72	81	88	91	USDA NRCS (2004b)
Reihenkulturen allgemein, kein Mulch, hydrologisch günstig**	67	78	85	89	USDA NRCS (2004b)
Reihenkulturen allgemein, 5 – 20 % Bedeckung mit Mulch	71	80	87	90	USDA NRCS (2004b)
Reihenkulturen allgemein, > 20 % Bedeckung mit Mulch	64	75	82	85	USDA NRCS (2004b)
Mais, Direktsaat	50***	60***	66.3	69***	BONTA & SHIPITALO (201

<sup>\*</sup> Bedeckungsgrad > 75 %

<sup>\*\*</sup> hydrologisch günstig: infiltrationsfördernd bzw. fortgeschrittenes Wachstumsstadium, hydrologisch ungünstig: infiltrationshemmend bzw. beginnendes Wachstumsstadium

<sup>\*\*\*</sup> Abschätzung, da keine Messwerte für HSG A, B, und D (Erläuterung s. Text)

mit Mulchbedeckung sind generell kleiner als für die ohne Bedeckung, d. h. die Flächen produzieren erwartungsgemäß weniger Direktabfluss.

Bei einer Direktsaat wird vollständig auf die Bodenbearbeitung verzichtet und dadurch der Eingriff in den Boden minimiert. Bei den Feldversuchen von BONTA & SHIPITALO (2013) zur Direktsaat auf Maisflächen über einen langen Zeitraum von etwa 50 Jahren auf einem Boden der hydrologischen Bodenklasse C wurde eine verbesserte Bodenstruktur sowie intakte Bodenfauna (Makroporen) beobachtet, die für eine enorme Erhöhung der Wasserretention verantwortlich gemacht wurde. Die Ergebnisse schlagen sich in einer Curve-Number von 66,3 nieder, die dem hydrologischen Verhalten einer Wiesen- und Buschlandschaft gleicht. Da keine Daten zu Böden mit den HSG A, B und D vorlagen, wurden CN-Werte aus der Verteilung der Curve-Numbers aus dem NEH-630 (USDA NRCS, 2004b) geschätzt. Dazu wurden die Mittelwerte der Abweichungen zwischen den Curve-Numbers von Reihenkulturen der HSG C zu A (-24 %), HSG C zu B (-9 %) und HSG C zu D (+4%) berechnet.

Durch die Verfügbarkeit von Curve-Numbers für die Mulch- und Direktsaat wurden Szenarienbetrachtungen mit alternativen Flächenbewirtschaftungen ermöglicht. Dabei kann prinzipiell quantifiziert werden, in welchem Maß die Mulch- bzw. Direktsaat zu einer Abflussminderung auf Einzelflächen sowie im Einzugsgebiet beitragen kann. Folgende Szenarien wurden dafür betrachtet:

- **Variante 1:** Mulchsaat mit Saatbettbereitung (Bodenbedeckung < 20 %),
- Variante 2: Mulchsaat ohne Saatbettbereitung (Bodenbedeckung > 20 %),
- Variante 3: Variante 2 zzgl. 50 Jahre Direktsaat ohne Bodenbearbeitung.

Es wurde bei den Bewirtschaftungsszenarien 1 und 2 davon ausgegangen, dass eine Mulchauflage grundsätzlich auf Flächen mit geschlossenen Beständen sowie Reihenkulturen vorliegt, also nahezu die gesamte Ackerfläche ohne Grünland. Der Schwellenwert von 20 % ist methodisch bedingt und auf die Datengrundlage zurückzuführen (USDA NRCS, 2004b). Für Rebflächen herrschen jedoch praktische Einschränkungen hinsichtlich der Realisierbarkeit des Mulchsaatverfahrens. Hier wurde als Maßnahme mit äquivalenter Wirkung eine Zwischenbegrünung

angenommen, die in ihrer abflussmindernden Wirkung der Mulchsaat mit Saatbettbereitung (Variante 1) als Annäherung gleichgesetzt wurde. Bei Flächen mit unspezifischer Ackernutzung wurde keine Mulchsaat berücksichtigt, da die Datenlage für die Variantenrechnung als unzureichend erachtet wurde.

In der Bewirtschaftungsvariante 3 wurden die Flächen grundlegend mit den Daten aus Variante 2 (Mulchsaat ohne Saatbettbereitung bzw. Direktsaat) parametrisiert. Allerdings wurde bei Maiskulturen zusätzlich eine langjährig praktizierte Direktsaat ohne Bodenbearbeitung nach BONTA & SHIPITALO (2013) angenommen. Da Rübenäcker hydrologische Ähnlichkeiten zu Maisäckern aufweisen, wurden die CN-Werte bei dieser Variante auch auf Futter- und Zuckerrübenflächen angewandt. Insgesamt stellt diese Betrachtung ein Best-Case-Szenario dar.

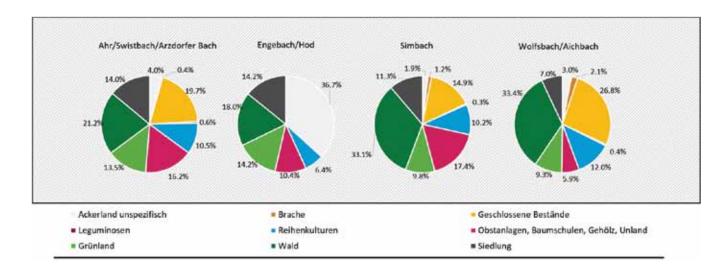
## 3 Gebietsauswahl und Charakterisierung der Untersuchungsgebiete

Im Hinblick auf die Zielstellung der Studie wurden Einzugsgebiete mit hohen Anteilen an Agrarflächen ausgewählt, die in den letzten Jahren erheblich von Sturzfluten betroffen waren:

- Fall 1: Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen,
- Fall 2: Engebach/Hod in Baden-Württemberg,
- Fall 3: Simbach in Bayern und
- Fall 4: Wolfsbach/Aichbach in Bayern.

Tabelle 3 enthält als Übersicht charakteristische Angaben zu den Gebieten. Ausführliche Darstellungen mit den räumlichen Verteilungen der Bodenparameter und der Landnutzung sowie der Flächenparametrisierung sind in BEISECKER et al. (2020) zu finden. Die Flächen der Untersuchungsgebiete reichen von 33 bis 123 km² und die durchschnittlichen Gebietsgefälle von 6 bis 12 %. Im Hinblick auf die Verteilung der hydrologischen Bodenklassen lässt sich feststellen, dass die Böden mit Flächenanteilen von 49 bis 74 % meist von der HSG C (mäßiges bis hohes Abflussbildungspotenzial) dominiert werden. Ebenfalls ist die hydrologische Bodenklasse B mit relativ hohen Anteilen von 18 bis 50 % vertreten. Die HSG A spielt nur für die Fallbeispiele in Bayern und mit Anteilen von 15 bis 16 % eine Rolle, jedoch eher auf lokaler Ebene. Die HSG D besitzt aufgrund der geringen Flächenanteile praktisch keine Bedeutung.

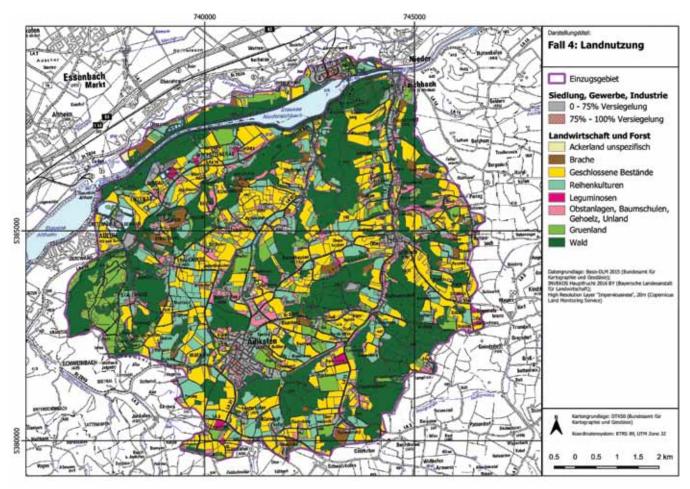
Tabelle 3         Übersicht zu grundlegenden Gebietscharakteristika.         Overview of basic characteristics in the study areas.							
Parameter	Fall 1 Ahr/Swistbach/	Fall 2 Engebach/Hod	Fall 3 Simbach	Fall 4 Wolfsbach/Aichbach			
	Arzdorfer Bach	Eligebacii/Hou	Sillibacii	Wollsbach/Alchbach			
Bundesland	RP, NW	BW	ВҮ	BY			
Fläche (km²)	122,9	45,5	33,3	64,4			
Gebietsgefälle (%)	6,3	10,4	12,0	8,7			
HSG A (%)	0,4	0	14,9	15,8			
HSG B (%)	50,0	25,8	24,9	18,3			
HSG C (%)	49,5	74,2	60,2	63,3			
HSG D (%)	0,1	0	0	2,6			
Besonderheiten	Extreme Vorfeuchte und	Keine InVeKoS-Daten	Höchster Gebietsnieder-	Größter Anteil Ackerland			
	größte Heterogenität in		schlag aufgrund von				
	Niederschlagsverteilung		Dauer- und Starkregen				



Datengrundlagen: InVeKoS für Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach, Simbach und Wolfsbach/Aichbach und STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (2018) für Engebach/Hod

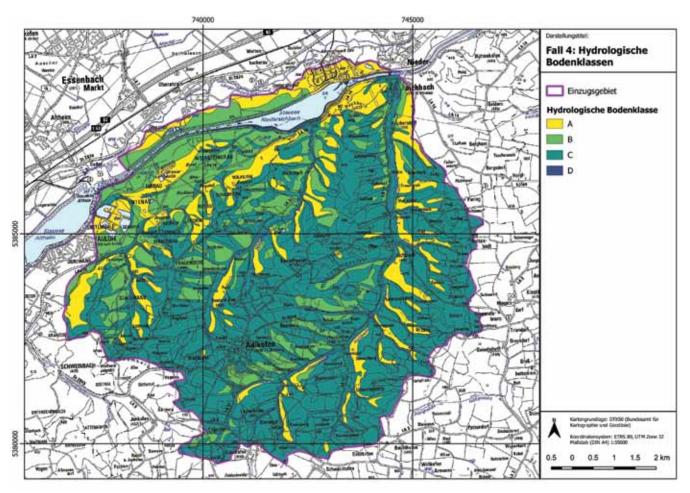
## Abbildung 1

Verteilung der Landnutzung je Einzugsgebiet. Der Anteil der Leguminosen liegt im Diagramm zwischen geschlossenen Beständen und Reihenkulturen. Distribution of land use per catchment. Note that the percentage of legumes in the diagram is located between the categories small grain and row crops.



**Abbildung 2**Räumliche Verteilung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet Wolfsbach/Aichbach.

Spatial distribution of land use in the study area Wolfsbach/Aichbach.



**Abbildung 3**Verteilung der hydrologischen Bodenklassen im Untersuchungsgebiet Wolfsbach/Aichbach. *Distribution of hydrologic soil groups in the study area Wolfsbach/Aichbach.* 

Die Fallbeispiele zeichnen sich zudem durch gebiets- oder ereignisspezifische Besonderheiten aus, z. B. Heterogenität der Niederschlagsverteilung, extreme Vorfeuchte und/oder Niederschlagsmenge, Datengrundlage etc., die ebenfalls in Tabelle 3 aufgeführt sind.

Die Landnutzungsverteilung in Abbildung 1 zeigt für die vier ausgewählten Gebiete in Bezug auf landwirtschafte Nutzflächen Anteile von rund 40 bis 60 %. Die Ackerflächenanteile ohne Obstanlagen und Grünland liegen bei ca. 28 bis 44 %. Von zentraler Bedeutung für die Wasserspeicherkapazität landwirtschaftlicher Böden und ihres Abflussverhaltens ist die weitere Unterteilung der Ackerflächen in Hauptkulturen. Aufgrund der Bereitstellung von InVeKoS-Daten konnte die Bewirtschaftung der Ackerflächen mit Ausnahme von Fallbeispiel 2 sehr gut ausdifferenziert werden. Der Anteil unspezifischer landwirtschaftlicher Flächen liegt in der Regel bei nur 2 bis 4 %. Lediglich im zweiten Fall (Engebach/Hod), wo keine InVeKoS-Daten bereitgestellt wurden, beläuft sich deren Anteil auf 37 %. Als unspezifische Ackerflächen gelten diejenigen, die im Datensatz des Basis-DLM das Attribut "Ackerland (Feld- und Beerenfrüchte)" enthalten und mit keinen weiteren spezifischen Informationen aus dem InVeKoS-Datensatz belegt sind.

Eines der vier Untersuchungsgebiete wird nachfolgend näher vorgestellt. Ausgewählt wurde dafür das Fallbeispiel Wolfsbach/

Aichbach in der Nähe von Landshut in Bayern, da es im Vergleich zu den übrigen Gebieten bis auf das Starkregenereignis selbst und dem höchsten Anteil an Ackerland (Summe Flächenanteile geschlossener Bestände und von Reihenkulturen) keine relevanten Besonderheiten aufweist.

In Abbildung 2 ist die räumliche Verteilung der Landnutzung aufgeführt. Es handelt sich um zwei zusammengefasste Einzugsgebiete, deren Hauptvorfluter, Wolfsbach und Aichbach, nach Nordosten in die Isar entwässern. Auffällig ist die weite Verbreitung geschlossener Bestände, die gemäß Abbildung 1 nahezu 27 % der Flächen einnehmen. Es handelt sich hier vorwiegend um Winterweizen und Wintergerste. Damit bilden die geschlossenen Bestände nach den Waldflächen (33 %) den zweitgrößten Flächenanteil. Obstanlagen und Grünland machen etwa 15 % der Flächen aus. Reihenkulturen haben im Vergleich zu den restlichen Fallstudien ebenfalls einen hohen Anteil von insgesamt 12 %, wobei es sich fast ausschließlich um Körner- und Silomais handelt.

Das Gebiet weist eine mittlere Geländeneigung von rund 9 % auf und ist durch Ablagerungen des voralpinen Molassebeckens geprägt. Es zeichnet sich durch Sedimente unterschiedlicher Korngrößen aus, die teilweise von quartärem Löss- oder Decklehm überlagert werden. Mit Ausnahme des Isartals sind vor-

wiegend Braunerden verbreitet, die größtenteils aus Lehmen, Schlufftonen und Tonschluffen aufgebaut sind. Dementsprechend erhalten sie aufgrund der relativ geringen Luftkapazitäten und mäßigen bis hohen nutzbaren Feldkapazitäten die hydrologische Bodenklasse C (s. Abbildung 3). Lokal können sich die Bodenartenspektren der Braunerden zu Gunsten des Grobkorns verschieben. Den Sandlehmen und Lehmsanden wurde dort die HSG B zugeordnet. Zudem kann die Ausbildung podsolig sein, vor allem dort, wo die Böden aus Kiessanden (HSG A) bestehen.

## 4 Zeitliche und räumliche Beschreibung der Sturzflutereignisse

Die regional analysierten Niederschlagsereignisse fanden in den Jahren 2015 und 2016 im späten Frühjahr in einer engen Zeitspanne zwischen Ende Mai bis Anfang Juni statt. Infolge der Ereignisse wurden schwere Sachschäden dokumentiert. In Tabelle 4 sind die relevanten Daten der Niederschlagsereignisse sowie Angaben zu mittleren jahreszeitlichen (VN<sub>mit</sub>) und ereignisbezogenen Vorregenindizes (VN<sub>akt</sub>) zusammengestellt. Daraus geht hervor, dass die Extremereignisse mit Gebietsniederschlägen von 17 bis 165 mm, maximalen Niederschlagshöhen von 36 bis 188 mm und Dauern von weniger als einer Stunde bis etwa 36 h sehr unterschiedlich ausgeprägt waren. Gemäß KOSTRA-Daten Version 2010R (JUNGHÄNEL et al., 2017) übersteigen alle Ereignisse hinsichtlich der Intensität unter Berücksichtigung der Niederschlagsdauer die Jährlichkeit eines HN100 (Niederschlagshöhe eines hundertjährlichen Niederschlagsereignisses).

Im Untersuchungsgebiet Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach fielen in einem Zeitraum von acht Tagen vor dem Ereignis etwa 90 mm Niederschlag, sodass von einem wassergesättigten Zustand des gesamten Gebietes ausgegangen werden kann, was durch die Differenzen zwischen aktuellen (52 bis 76 mm) und mittleren Vorregenindizes (18 bis 22 mm) von +35 mm bis +55 mm in Tabelle 4 abgebildet wird. Darauf folgte das Extremereignis am 4. Juni 2016. Es wurden vom DWD mittels Bodenradar maximal etwa 117 mm in 2 Stunden im Kern der Niederschlagszelle aufgezeichnet (DWD, 2017). Es handelte sich um ein sehr lokales Ereignis. An den Rändern der ca. 10 x 20 km großen Niederschlagszelle

betrugen die Werte ca. 10 bis 20 mm. Aufgrund der heterogenen Niederschlagsverteilung lag der durchschnittliche Gebietsniederschlag bei nur ca. 28 mm.

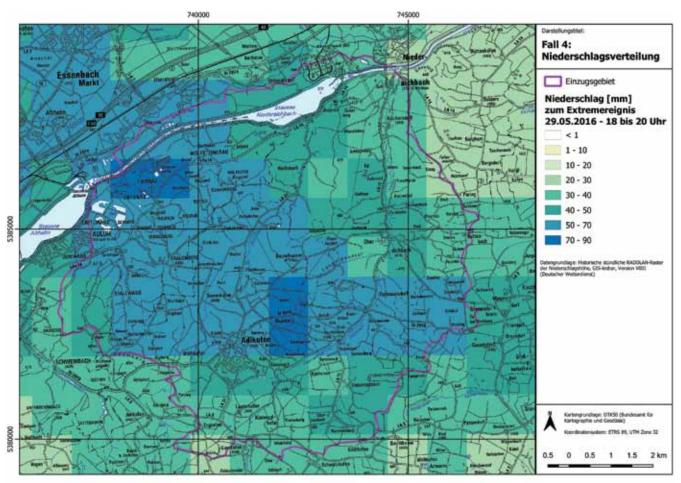
Im Gebiet Engebach/Hod herrschten zum Zeitpunkt des Ereignisses zwischen aktuellen und mittleren Vorregenindizes Differenzen von ca. -15 mm. Die Monate Mai und Juni 2015 waren daher geringfügig trockener als das langjährige Mittel. Das Extremereignis vom 7. Juni 2015 zeichnete sich durch eine extrem hohe Intensität aus, was durch die RADOLAN-RW-Daten mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde nur hinreichend abgebildet wird. In PRO AQUA (2016) ist nach Beobachtungen der Feuerwehr eine Niederschlagsdauer von nur etwa 15 Minuten angegeben. Das Ereignis erstreckte sich räumlich in Nord-Süd Richtung, was der Geometrie des Untersuchungsgebietes entspricht.

Im Einzugsgebiet Simbach herrschten zu Ende Mai bzw. Anfang Juni 2016 etwa mittlere Vorfeuchteverhältnisse. Vom 31. Mai bis zum 1. Juni 2016 ereignete sich ein flächenhafter Dauerregen, der von einem zeitlich begrenzten Starkregen begleitet wurde. Der durchschnittliche Gebietsniederschlag als Summe des gesamten Ereignisses von 36 Stunden betrug ca. 165 mm und weicht nur geringfügig von der maximalen Niederschlagssumme je Rasterzelle von 184 mm ab. Die räumliche Verteilung war damit relativ homogen. Der inmitten des Dauerregens am 1. Juni von ca. 10 bis 13 Uhr einsetzende Starkregen lieferte ca. 56 mm in 3 Stunden Dauer und war ebenfalls flächendeckend ausgeprägt.

Im Untersuchungsgebiet Wolfsbach/Aichbach wurden vor dem Extremereignis Differenzen zwischen VN<sub>akt</sub> und VN<sub>mit</sub> zwischen -1 mm bis +15 mm ermittelt, wobei die höheren Vorfeuchten im Tal der Isar vorherrschten. In den höher gelegenen Gebieten waren die Vorfeuchteverhältnisse durchschnittlich. Es folgte am 29. Mai 2016 ein Extremereignis mit etwa 48 mm Gebietsniederschlag, das flächendeckend ausgeprägt war und beide Einzugsgebiete vollständig ausfüllte (s. Abbildung 4). Dennoch gab es lokale Unterschiede hinsichtlich der Intensitäten. In der Nähe der Isar bei der Ortschaft Dirnau fielen ca. 76 mm. Ein weiteres lokales Niederschlagsmaximum befand sich in der Ortschaft Adlkofen und der Umgebung, wo ca. 74 mm fielen.

Tabelle 4         Übersicht zu Kenngrößen bezüglich der Niederschlagsereignisse.         Overview of characteristics for analysed rainfall events.						
	Ahr/Swistbach/	Engebach/Hod	Simbach	Wolfsbach/Aichbach		
	Arzdorfer Bach					
Datum	04.06.16	07.06.15	31.05.16, 6 Uhr –	29.05.16		
Datum	12 – 14 Uhr	20 – 21 Uhr	01.06.16, 17 Uhr	18 – 20 Uhr		
Dauer*	< 2 h	< 1 h	ca. 36 h (3 h)	< 2 h		
N <sub>mit</sub> * (Gebiet) [mm/dt]	28	17	165 (56**)	48		
N <sub>max</sub> * (Zelle) [mm/dt]	117	36	184	76		
Wiederkehrintervall*** [a]	> 100	> 100	> 100	> 100		
Spanne mittlerer Vorregenindex VN <sub>mit</sub> [mm]	18 bis 22	24 bis 28	19 bis 28	21 bis 25		
Spanne aktueller Vorregenindex VN <sub>akt</sub> [mm]	52 bis 76	9 bis 10	22 bis 31	23 bis 38		

- \* gemäß RADOLAN RW, zeitl. Auflösung 1 h (DWD, 2017)
- \*\* Wert bezieht sich auf 3 h Starkniederschlag innerhalb des Dauerregenereignisses
- \*\*\* gemäß KOSTRA Version 2010R (DWD, 2018)



**Abbildung 4**Verteilung der Niederschlagshöhe für das Sturzflutereignis am 29. Mai 2016 in Wolfsbach/Aichbach. Distribution of rainfall depth for the flash flood event on 29 May 2016 in Wolfsbach/Aichbach.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Abflussbildung und Sensitivität gegenüber der Landnutzung werden nachfolgend exemplarisch für das Fallbeispiel Wolfsbach/Aichbach aufgeführt, um danach die gebietsübergreifenden Ergebnisse vorzustellen. Im Anschluss werden potenzielle Abflussminderungseffekte von Bewirtschaftungsvarianten auf Schlag- und Einzugsgebietsebene modellhaft quantifiziert sowie ihr niederschlagsabhängiges Wirksamkeitspotenzial abgeschätzt.

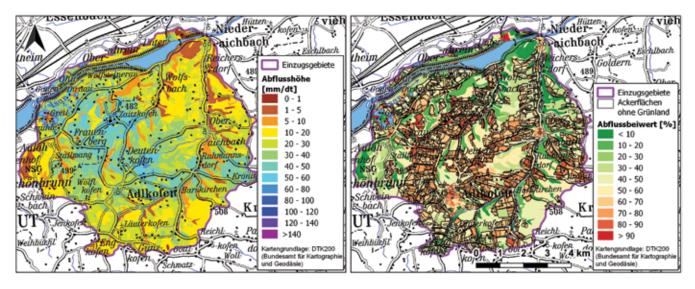
# 5.1 Modellierte Abflussbildung im Untersuchungsgebiet Wolfsbach/Aichbach (Fall 4)

In Abbildung 5 sind die Modellergebnisse des Starkregenereignisses vom 29. Mai 2016 für das Fallbeispiel Wolfsbach/Aichbach dargestellt. In den Direktabflusshöhen (Abbildung 5, links) zeichnet sich das Muster der Niederschlagsverteilung ab, das einen ausgeprägten lokalen Charakter hatte (s. Abbildung 4). Dabei wurden im niederschlagsreichen Kerngebiet, das sich in Richtung Ost-West bzw. SO-NW erstreckt, absolute Abflusshöhen von ca. 20 mm bis über 60 mm berechnet, die über die Hauptvorfluter Aichbach und Wolfsbach in Richtung Nordosten in die Isar abgeführt werden. Außerhalb des niederschlagsreichen Kerngebietes

wurden Abflusshöhen bis etwa 20 mm ermittelt (Abbildung 5, links).

Die Abflussbeiwerte (Abbildung 5, rechts und Abbildung 6, unten) kommen in ihrer gesamten möglichen Bandbreite zwischen 0 und 100 % vor. Grundsätzlich sind die Modellergebnisse damit als plausibel einzuschätzen. Lokal übersteigen die Abflussbeiwerte 90 %, d. h. auf diesen Flächen wird nahezu der gesamte Niederschlag abflusswirksam. Die räumliche Niederschlagsverteilung ist in den Abflussbeiwerten zwar im Ansatz erkennbar, jedoch nicht so deutlich ausgeprägt wie bei der Verteilung der absoluten Direktabflusshöhen. Die Ackerflächen sind in Abbildung 5 (rechts) durch eine schwarze Umrandung akzentuiert. In der räumlichen Verteilung der Abflussbeiwerte zeigt sich deutlich, dass sie im gesamten Untersuchungsgebiet eine erhöhte Tendenz zur Abflussbildung aufweisen.

Die Beobachtung bestätigt sich in den statistischen Verteilungen der Abflussbeiwerte, die in Abbildung 6 (unten) nach Flächennutzungstypen aufgeschlüsselt sind. Die Abflussbeiwerte der Reihenkulturen und der geschlossenen Bestände liegen bei Betrachtung der Mediane und Mittelwerte zwischen ca. 60 und 75 % und damit wesentlich höher als die von Grünland, Wald und Obstanlagen (ca. 40 %).



5.2

**Abbildung 5**Abflusshöhen (links) und Abflussbeiwerte (rechts) für das Untersuchungsgebiet Wolfsbach/Aichbach. *Direct runoff depth (left) and runoff coefficients (right) for the study area Wolfsbach/Aichbach.* 

Es lassen sich für jede Landnutzung enorme Spannweiten hinsichtlich der Abflussbeiwerte beobachten. Diese sind einerseits auf bodenhydrologische und andererseits auf niederschlagsbedingte Heterogenitäten zurückzuführen. Trotz der Dominanz der hydrologischen Bodenklasse C mit 63 % Flächenanteil, sind auch die HSG A (16 %) und HSG B (18 %) im Untersuchungsgebiet Wolfsbach/Aichbach mit nicht unerheblichen Anteilen vertreten und erzeugen damit vor allem die statistischen Ausreißer nach unten

Die Anteile am Gesamtabfluss in Abbildung 6 (oben) summieren sich dementsprechend für Reihenkulturen, geschlossene Bestände und unspezifische Ackernutzung auf 55 % bei einem Flächenanteil von lediglich 44 %. Dem stehen 35 % des Gesamtabflusses der Flächentypen Grünland, Obstanlagen und Wald mit einem summarischen Flächenanteil von 50 % gegenüber. Die für das Fallbeispiel Wolfsbach/Aichbach exemplarisch und modellhaft

flussbeiwerte und Abflussanteile
Die Analysen der landnutzungsspezifischen Verteilung der Abflussbeiwerte und der Anteile am Gesamtabfluss zeigen, dass gewisse Landnutzungs- bzw. Bewirtschaftungsformen mit charakteristischen Abflussgrößen identifiziert werden können. Grundsätzlich beeinflussen Gebietscharakteristika, z. B. Einzugsgebietsgröße und Anteile der Landnutzungen, die Anfälligkeit

untersuchte Abflussbildung deutet auf eine allgemeine landnutzungs- bzw. bewirtschaftungsbedingte Sensitivität der Direk-

tabflüsse sowohl auf Schlag- als auch auf Einzugsgebietsebene

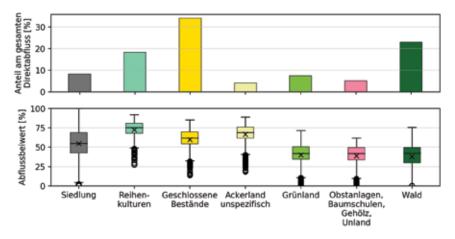
Gebietsübergreifende landnutzungsspezifische Ab-

charakteristischen Abflussgrößen identifiziert werden können. Grundsätzlich beeinflussen Gebietscharakteristika, z. B. Einzugsgebietsgröße und Anteile der Landnutzungen, die Anfälligkeit für Parameterheterogenität, jedoch sind diese kaum von den weiteren Einflüssen (Niederschlagsintensität und -verteilung, Verteilung der hydrologischen Bodenklasse, Vorfeuchte etc.) zu trennen. Trotz dieser Umstände gehen aus der gebietsübergrei-

fenden Gegenüberstellung zwei Gruppen hervor, die sich in abflussfördernde und abflussarme Flächen gliedern lassen (s. Abbildung 7).

Abflussarme Flächen zeichnen sich durch relativ geringe Abflussbeiwerte aus und dadurch, dass ihr Beitrag zum Gesamtabfluss deutlich unter ihrem Flächenanteil liegt. In der vorliegenden Studie handelt es sich dabei um Wald, Grünland und Obstanlagen.

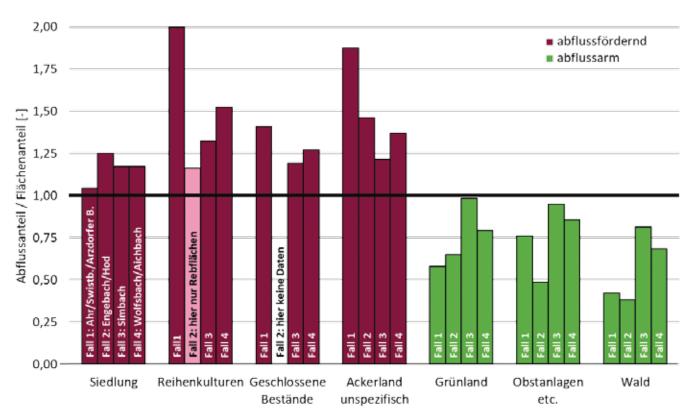
Abflussfördernde Flächen besitzen hingegen gegenteilige Eigenschaften, d. h. hohe Abflussbeiwerte und Anteile am Gesamtabfluss, die deutlich über dem Maß ihres Flächenanteils liegen. In den hier untersuchten Fallbeispielen sind dies siedlungsgeprägte Flächen und Ackerland (Reihenkulturen, geschlossene Bestände und unspezifischer Ackerbau). Innerhalb der Gruppe abflussfördernder Flächen sind bezüglich der Abflussbeiwerte



#### **Abbildung 6**

Anteiliger Direktabfluss am Gesamtabflussvolumen (oben) und statistische Verteilung der Abflussbeiwerte als Boxplots (unten) nach Landnutzung für das Gebiet Wolfsbach/Aichbach.

Portion of direct runoff on total runoff (top) and distribution of runoff coefficients as boxplots (bottom) based on land use for the study area Wolfsbach/Aichbach.



**Abbildung 7**Gesamtabflussanteile bezogen auf den Flächenanteil verschiedener Landnutzungen für die vier untersuchten Fallbeispiele. Die schwarze Linie trennt als Gleichgewicht zwischen Abflussanteil und Flächenanteil abflussfördernder von abflussarmen Flächen.

Portions of total runoff of different land use categories in relation to their portion of total area for the four study areas. The black line marks the equilibrium between runoff fraction and portion of total area allowing a separation of areas promoting runoff and areas with low runoff depths.

ebenfalls deutliche Unterschiede ersichtlich. Siedlungsgeprägte Flächen erreichen ausnahmslos Maxima von > 90 % und streuen stets nahezu über den gesamten Wertebereich der Abflussbeiwerte von 0 bis 100 %. Da hier der Versiegelungsgrad als Parameter eingeht und auf Flurstücksebene extrem variabel ist (z. B. Dach- vs. Grünfläche), fällt auch die Abflussbildung in Siedlungen entsprechend heterogen aus. Darüber hinaus spielt auch die hydrologische Bodenklasse und die Niederschlagsintensität eine Rolle, wie bereits oben ausgeführt wurde.

Bei Ackerland konnten die Unterschiede lediglich durch die Bereitstellung der InVeKoS-Daten zur Hauptfrucht im Jahr des Ereignisses adäquat abgebildet werden. So lagen die Differenzen der Abflussbeiwerte (Mediane) zwischen Reihenkulturen, vorwiegend Mais, und geschlossenen Beständen, hauptsächlich vertreten durch Wintergetreide, in den Fällen 3 (Simbach) und 4 (Wolfsbach/Aichbach) bei 8 bis 15 %, im Fallbeispiel 1 (Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach) hingegen bei ca. 25 %. Die Unterschiede in den Abflussbeiwerten innerhalb der Gruppe der Ackerflächen auf Schlagebene sind bedeutsam und je nach Flächenanteilen auch für das gesamte Einzugsgebiet. In Fall 2 sind die Abflussbeiwerte für Ackerland hingegen nicht differenzierbar und unter "unspezifisches Ackerland" zusammengefasst. Die hohe Differenz von 25 % zwischen Reihenkulturen und geschlossenen Beständen in Fall 1 ist durch die flächendeckende extreme Vorfeuchte zu erklären, die den abflussfördernden Effekt zusätzlich verstärkt und damit eine höhere Diskrepanz zwischen abflussfördernden und abflussarmen Flächen erzeugt. Eine ausschließliche Erklärung der erhöhten Differenzen durch die Heterogenität der Niederschlagsverteilung wurde nach Vergleich der räumlichen Verteilung von Landnutzung mit Niederschlag ausgeschlossen.

Auffällig sind in Abbildung 7 außerdem die geringen Unterschiede zwischen abflussfördernden und abflussarmen Flächen im Fallbeispiel 3 (Simbach). Das Fallbeispiel zeichnet sich durch extreme Niederschlagsmengen bzw. -intensitäten von 165 mm in 36 Stunden aus. BRANDHUBER et al. (2017) untersuchten Sturzflutereignisse in Bayern aus dem Jahr 2016, darunter auch das hier untersuchte Ereignis im Einzugsgebiet Simbach. Die Modellergebnisse von BRANDHUBER et al. (2017) zeigen, dass die abflussmindernde Wirkung der Bodenbedeckung mit zunehmender Niederschlagsbelastung abnimmt und ab gewissen Niederschlagsintensitäten bzw. -dauern praktisch bedeutungslos wird, da alle Landnutzungsgruppen, darunter auch relativ abflussarme Flächen wie Grünland oder Wald, entsprechend ihrem Flächenanteil Abfluss liefern. Dieser Effekt kann auch in Abbildung 7 für das Fallbeispiel Simbach beobachtet werden. Damit ist zu erwarten, dass sich bei quasi unendlicher Niederschlagsmenge die Abflussanteile an die Flächenanteile bei dem Wert 1 angleichen würden und somit abflussfördernde von abflussarmen Flächen nicht mehr unterscheidbar wären.

## 5.3 Variation der Bewirtschaftungsform: Mulch- und Direktsaat bei Reihenkulturen

Um die Auswirkungen alternativer Flächenbewirtschaftungsvarianten zu untersuchen, wurde eine flächendeckende Realisierung

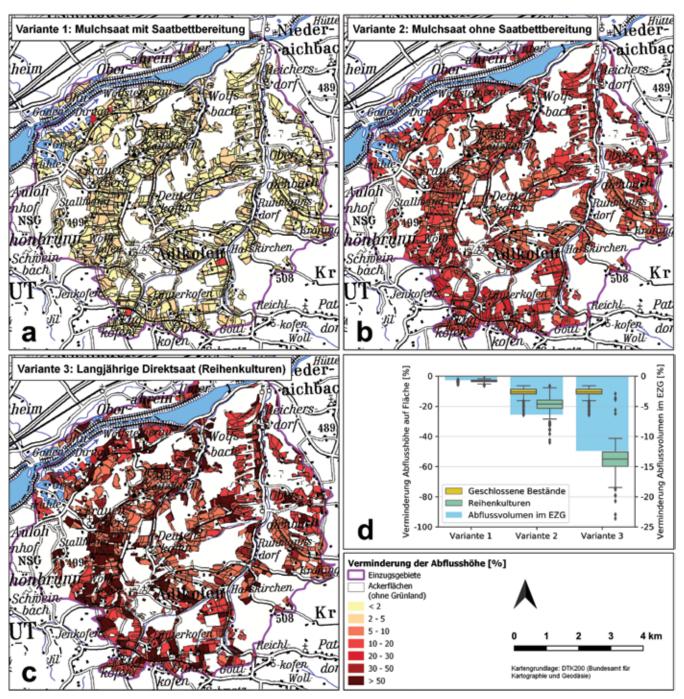
des Mulchsaatverfahrens (Bedeckung mit Ernterückständen) bzw. einer langjährigen Direktsaat betrachtet, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben.

## 5.3.1 Fallspezifische Auswertung für das Untersuchungsgebiet Wolfsbach/Aichbach

Für das Fallbeispiel Wolfsbach/Aichbach konnten auf den meisten Ackerflächen (ca. 30 % der Gesamtfläche) die Flächenbewirtschaftungsformen variiert werden. Die flächendifferenzierten Ergebnisse sind in Abbildung 8 dargestellt.

Bei der Mulchsaat mit Saatbettbereitung (Variante 1, Abbildung 8a) wird eine sehr geringe Abflussminderung für das Extremereignis am 29. Mai 2016 Wolfsbach/Aichbach festgestellt. Die räumliche Verteilung zeigt einen hohen Grad an Homogenität. Die Abflussminderungen liegen hier bei lediglich 2 bis 5 %. Der Gesamtabfluss wird lediglich um ca. 1 % verringert (Abbildung 8d).

Beim Mulchsaatverfahren mit Verzicht auf die Saatbettbereitung (Variante 2) kann die Abflussminderung um 5 bis 10 % bzw. 10 bis



#### **Abbildung 8**

Abflussminderung in Wolfsbach/Aichbach und die Varianten 1 (a), 2 (b) und 3 (c) sowie statistische Auswertung (d) der Auswirkung auf Flächen (Boxplots, Primärachse) und auf Einzugsgebietsebene (Balken, Sekundärachse).

Reduction of runoff in Wolfsbach/Aichbach with model scenario 1 (a), 2 (b) and 3 (c) as well as statistical evaluation (d) of the effect on single areas (see boxplots, primary axis) and on the catchment scale (bars, secondary axis).

20 % verstärkt werden, wobei tendenziell die stärkere Verminderung auf Flächen erreicht wird, wo weniger Niederschlag fällt. Die Mediane der Flächengruppen der geschlossenen Bestände und Reihenkulturen liegen bei etwa 10 und 20 %. Die entsprechende Minderung auf Einzugsgebietsebene beläuft sich hier auf ca. 6 %.

Darüber hinaus zeigt in diesem Fallbeispiel Variante 3 (langjährige Direktsaat) bei Reihenkulturen (ca. 12 % Flächenanteil, vorwiegend Maisflächen) eine zusätzliche Verminderung der Abflusshöhe von 20 % auf ca. 55 %. Es ist bemerkenswert, dass durch einen dauerhaften Verzicht auf die Bodenbearbeitung auf 12 % der Einzugsgebietsfläche das Gesamtabflussvolumen des Sturzflutereignisses vom 31. Mai 2016 potenziell ca. um weitere 6 % (insgesamt 12 bis 13 %) hätte reduziert werden können (Abbildung 8d, Variante 3). Die stark erhöhte Infiltrationsleistung auf Ackerflächen mit Direktsaat wird von BONTA & SHIPITALO (2013) auf eine intakte Bodenfauna und die daraus resultierenden Makroporen zurückgeführt.

#### 5.3.2 Fallübergreifende Auswertung

In Abbildung 9 sind die Auswertungen aller Fallbeispiele zusammengefasst. Zur Berechnung der Abflussminderungen wurden für jede Variante die Abflussvolumina der HRU (a: nur Reihenkulturen und b: gesamtes EZG) integriert und in Beziehung zu den entsprechenden Referenzvolumina ohne alternative Bewirtschaftung gesetzt. Auf Schlag- bzw. Feldebene wurden die Abflussminderungen der Reihenkulturen betrachtet, da für diese Flächengruppe alle Varianten vollumfänglich untersucht werden konnten. Die Ergebnisse des Fallbeispiels 2 wurden aufgrund der Datenlage und der daraus resultierenden undifferenzierten Parametrisierung von Ackerflächen nicht miteinbezogen.

Die Mulchsaat mit Saatbettbereitung auf Ackerflächen (Variante 1) zeigt für alle untersuchten Ereignisse ein extrem geringes Abflussminderungspotenzial, während bei der Mulchsaat ohne Saatbettbereitung (Variante 2) auf Schlagebene der Abfluss um 10 bis 20 % vermindert werden kann, was sich auf Einzugsgebietsebene mit etwa 7 % verringertem Abflussvolumen auswirkt. Bei der langjährigen Direktsaat werden auf Einzelschlägen über 50 %

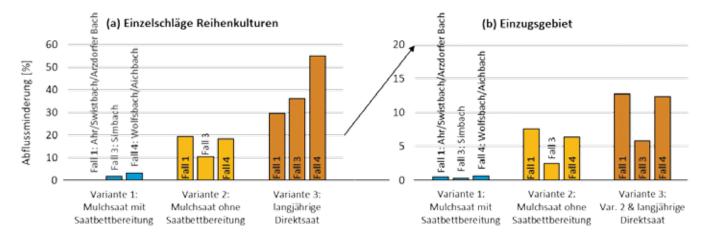
Abflussminderung erreicht. Zusammen mit den Abflussminderungen auf Schlägen mit geschlossenen Beständen (ca. 20 %) führen diese zu maximal 13 % weniger Abfluss im Einzugsgebiet in den Fallbeispielen 1 und 4. Nicht nur die schlagspezifische Abflussminderung, sondern auch die Flächenanteile der maßnahmenrelevanten Flächen (Reihenkulturen und geschlossene Bestände) spielen dann eine maßgebliche Rolle. Bei den Fallbeispielen 1 und 4 lagen diese bei 30 % (10 % Reihenkulturen, 20 % geschl. Bestände) bzw. bei 39 % (12 % Reihenkulturen, 27 % geschl. Bestände).

In Beregnungsversuchen von DEUMELANDT (2014) wurde ebenfalls eine deutliche abflussmindernde Wirkung der Direktsaat aufgrund erhöhter Bodenbedeckung und Makroporen beobachtet. Nach acht Jahren mit unterschiedlichen Bodenbearbeitungssystemen bei der Direktsaat mit einem Bedeckungsgrad von 70 % zeigte sich eine deutlich höhere Infiltrationsleistung im Vergleich zu konventioneller Bodenbearbeitung. Auch von ALHASSOUN (2009) wurde der Zusammenhang zwischen verringerter Bodenbearbeitung und der Anzahl der Regenwürmer bzw. Makroporen, die zu einer Erhöhung der Infiltrationskapazität führten, bestätigt.

Auffällig ist in Abbildung 9 das geringe Minderungspotenzial für das Fallbeispiel 3 (Simbach). Dieses ist womöglich auf den außerordentlich hohen Gebietsniederschlag von 165 mm zurückzuführen. Die Niederschlagshöhen der anderen Fallbeispiele waren weitaus geringer. Dies deutet darauf hin, dass der abflussmindernden Wirkung der Flächenmaßnahmen in Abhängigkeit der Intensität der Ereignisse natürliche Grenzen gesetzt sind.

## 5.4 Variation der Niederschlagsintensität

Die Verringerung der Abflusshöhe wird nicht nur von den Maßnahmen der Flächenbewirtschaftung beeinflusst, sondern auch von der Niederschlagsintensität. In Hinblick auf die flächenhafte Risikoerfassung von Sturzflutereignissen auf landwirtschaftlichen Flächen ist dies von großer Bedeutung und führt zur Frage, ab welchen Niederschlagsintensitäten die Landnutzung bzw. Bewirtschaftungsform oder Flächenmaßnahme zur Abflussminderung nur noch eine untergeordnete Rolle spielt.

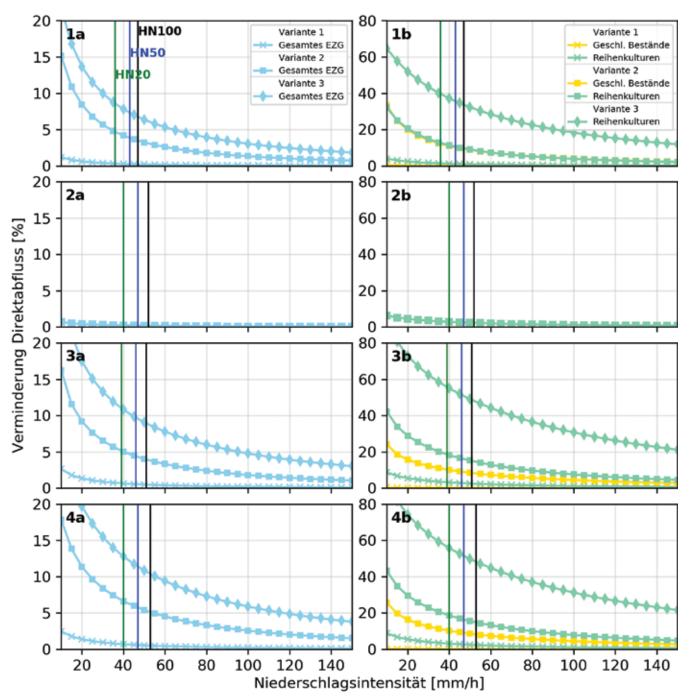


## Abbildung 9

Mittlere Abflussminderung auf (a) Einzelschlägen der Reihenkulturen (exemplarisch) und (b) für das gesamte Einzugsgebiet für die Fallbeispiele 1, 3 und 4. Für die Abflussminderung auf Einzugsgebietsebene spielen nicht nur die Reihenkulturen, sondern auch die geschlossenen Bestände eine Rolle. Mean runoff reduction for (a) single fields with row crops and for (b) the catchment scale for case studies 1, 3 and 4. Note that not only row crops affect the runoff reduction on the catchment scale, but also small grain fields.

In Abbildung 10 ist die Verminderung der Direktabflüsse unter Blockregen mit variierenden Intensitäten und den Bewirtschaftungsvarianten der vier Fallbeispiele in den entsprechenden Zeilen 1 bis 4 dargestellt. Die Vorfeuchte zum Zeitpunkt des Ereignisses sowie die hydrologische Bodenklasse blieben dabei erhalten. Die Verminderung der Abflussmenge wurde für die relevanten Flächengruppen sowie unter Einbeziehung des Flächenanteils im gesamten Untersuchungsgebiet für jede Bewirtschaftungsvariante ermittelt.

In der linken Spalte (a) jeder Zeile ist die Abflussminderung auf Gebietsebene dargestellt, während in der rechten Spalte (b) die abflussmindernde Wirkung auf maßnahmenrelevanten Flächengruppen aufgeführt ist. Zudem werden die Ergebnisse der Niederschlagsvariation mit Regenintensitäten charakteristischer Wiederkehrintervalle aus dem Datensatz KOSTRA Version 2010R (JUNGHÄNEL et al., 2017) verglichen. Demnach liegen für die vier Fallbeispiele bei einer Niederschlagsdauer von einer Stunde die Spannweite eines HN20 bei 36 bis 40 mm/h, eines HN50 bei



**Abbildung 10** 

Verminderung des Direktabflusses verschiedener Bewirtschaftungsvarianten (Variante 1 bzw. 2: Mulchsaat mit bzw. ohne Saatbettbereitung, Variante 3: Direktsaat) unter Variation der Niederschlagsintensität für die Fallbeispiele 1 bis 4 entsprechend der Nummerierung (a) bezogen auf das Untersuchungsgebiet und (b) auf die maßnahmenrelevante Flächengruppe.

Runoff reduction for different agricultural pracices (scenario 1 and 2: mulching with and without seedbed preparation, scenario 3: no till) under varying precipitation intensity for case studies 1 to 4 according to row number (a) in relation to catchment the scale and (b) crop types.

43 bis 47 mm/h und eines HN100 bei 47 bis 53 mm/h. Die Werte der charakteristischen Ereignisse sind in Abbildung 10 als vertikale Linien dargestellt.

#### 5.4.1 Wirksamkeit bei Ereignissen bis HN100

Durch die Mulchsaat mit anschließender Saatbettbereitung (Variante 1, Kreuzsymbole) können für die Fallbeispiele 1, 3 und 4 bei relativ geringen Niederschlagsintensitäten von 20 mm/h maximale Abflussminderungen von 2 % auf Einzugsgebiets- bzw. ca. 5 % auf Schlagebene (geschlossene Bestände oder Reihenkulturen) erreicht werden. Bei höheren Intensitäten > 40 mm/h versagt die abflussmindernde Wirkung der Variante 1 vollständig. Folglich können die Abflüsse bei Niederschlagsereignissen vom Ausmaß HN20 und stärker durch die Mulchsaat mit Saatbettbereitung laut Modellergebnissen nicht in relevantem Maß beeinflusst werden.

Die Mulchsaat ohne Saatbettbereitung (Variante 2, Quadratsymbole) liegt in ihrer Retentionswirkung wesentlich höher. Die Gebietsabflüsse eines HN20 können bei den Fallbeispielen um 5 bis 7 % vermindert werden, während das Minderungspotenzial bei einem HN100 bei 4 bis 5 % liegt. Bei den Schlägen mit Reihenkulturen liegen die Minderungen entsprechend der Intensitäten meist bei 10 bis 20 % (HN20) bzw. 8 bis 15 % (HN100) und die der geschlossenen Bestände bei ca. 10 % (HN20) bzw. etwa 8 % (HN100).

Die maximalen Abflussminderungen werden durch die dauerhafte Direktsaat ohne Bodenbearbeitung (Variante 3, Rautensymbole) erzielt, die das Best-Case-Szenario darstellt. Allerdings erlaubt die Datenlage nur eine Untersuchung auf Flächen mit Reihenkulturen, insbesondere Mais und Futter- bzw. Zuckerrüben. Die Verminderungen belaufen sich auf Gebietsebene für ein HN20 auf 8 bis 13 % und für ein HN100 auf 7 bis 10 %. Bezüglich der Reihenkulturen werden auf den Einzelschlägen bei diesen Intensitäten noch enorme Steigerungen der Wasserretention von 35 % (Fall 1) bzw. 50 % (Fallbeispiele 3 und 4) erreicht.

Die Ergebnisse für das Fallbeispiel Engebach/Hod in Abbildung 10 (2a) und (2b) veranschaulichen, dass eine adäquate Untersuchung des Abflussminderungspotenzials ohne geeignete Datengrundlage (z. B. InVeKoS) nicht möglich ist. Es konnte lediglich die potenzielle Wirkung einer Zwischenbegrünung untersucht werden. Das geringere Abflussminderungspotenzial zeigt sich in der Einzelgrafik 2b der Abbildung 10. Durch den Rebflächenanteil von nur etwa 6 % hat die Maßnahme auf Einzugsgebietsebene praktisch keine Auswirkungen.

## 5.4.2 Wirksamkeitspotenzial unter Extrembedingungen und darüber hinaus

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden in Abbildung 10 fiktive Ereignisse betrachtet, deren Wiederkehrintervall teils weit über 100 Jahren liegt. Bezogen auf Niederschlagsdauern von einer Stunde handelt es sich dabei um Intensitäten > 60 mm/h. Bei dieser Intensität liegen die Abflussminderungspotenziale von Variante 2 (Direktsaat) zwischen 3 und 5 % auf Gebietsebene und bei 5 bis 15 % für geschlossene Bestände bzw. Reihenkulturen, was bereits eine Erschöpfung der Maßnahmenwirksamkeit andeutet. Bei noch extremeren Ereignissen von 100 mm/h nähern sich die Kurven einem Grenzwert an, der einige Prozent nur selten übersteigt.

Die langjährige Direktsaat (Variante 3) zeigt bei Extremereignissen von 60 mm/h eine geringere Erschöpfung bezüglich der abflussmindernden Wirkung. Die Verringerungen liegen hier bei 5 bis 10 % bezogen auf das Untersuchungsgebiet, wobei diese auf 3 bis 6 % bei 100 mm/h sinken. Dieser Sachverhalt impliziert, dass auch einem Best-Case-Szenario gewisse natürliche Grenzen gesetzt sind. Auf den Flächen der Reihenkulturen wurden die Abflussmengen bei 60 mm/h noch um 30 bis 45 % verringert. Bei außerordentlich extremen Verhältnissen von 100 mm/h sinken die Minderungen hier auf 20 bis 30 %.

Die Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Bewirtschaftungsvarianten bei extremen Niederschlagsintensitäten weitestgehend einer Erschöpfung des natürlichen Abflussminderungspotenzials unterworfen sind. Dieser Erschöpfungseffekt, wie er auch von BRANDHUBER et al. (2017) für das Gebiet Simbach untersucht wurde, tritt für die untersuchten Fallbeispiele unter Extrembedingungen, d. h. HN100 und darüber, auf. Auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse kann der Erschöpfungseffekt, der von BRANDHUBER et al. (2017) für relativ abflussarme Flächen (Wald, Grünland) beobachtet wurde, auch auf abflussmindernde Flächenbewirtschaftungen auf Ackerflächen, z. B. Mulchsaat, übertragen werden.

Eine Ausnahme bilden hier jedoch die Ergebnisse des Best-Case-Szenarios auf Schlagebene, wo auch bei Intensitäten von 100 mm/h noch relevante Abflussvolumina zurückgehalten werden. Da es sich um Modellergebnisse mit Parametern handelt, die zwar über lange Zeiträume erhoben wurden, jedoch aus dem nordamerikanischen Raum stammen (BONTA & SHIPITA-LO, 2013), wären sie auch für den mittel- und nordeuropäischen Raum messtechnisch zu verifizieren.

#### 5.5 Curve-Number-Verfahren und Validierung

Mit dem Curve-Number-Verfahren nach KLEEBERG & OVERLAND (1989) kann mit relativ geringem Daten- und Rechenaufwand die Abflussbildung auf Schlag- und Einzugsgebietsebene abgeschätzt werden. Die damit verbundenen wesentlichen Unsicherheiten werden nachfolgend diskutiert.

Die verwendeten CN-Werte aus dem NEH-630 (USDA NRCS, 2009) wurden im nordamerikanischen Raum und etwa Mitte des 20. Jahrhunderts erhoben. Aufgrund klimatischer Unterschiede zu Mitteleuropa und der Veränderung von Bodenbearbeitungstechniken können daraus resultierende Abweichungen bei den Curve-Numbers nicht ausgeschlossen werden.

In der vorliegenden Studie entstehen zudem Verzerrungen aufgrund der Skalierung der Curve-Number für Direktsaat auf Maisflächen mit der hydrologischen Bodenklasse C nach BONTA & SHIPITALO (2013) auf die HSG A, B und D, für die keine Messdaten vorliegen (s. Kap. 2.3). Aufgrund der meist relativ geringen Flächenanteile der hydrologischen Bodenklassen A, B und D sind diese Unschärfen in der Sensitivitätsstudie jedoch relativ klein und vernachlässigbar.

Eine wesentlichere Fehlerquelle stellt die Parametrisierung der Agrarflächen dar, die sich durch die hohe Diskrepanz zwischen Abflussbeiwerten von Reihenkulturen und geschlossenen Beständen bemerkbar macht und die Notwendigkeit von flächendifferenzierten Daten zur Hauptkultur auf landwirtschaftlichen Nutzflächen aus dem InVeKoS-Datensatz für die Abflussmodellie-

rung unterstreicht. Die Beschaffung solcher Datensätze gestaltet sich in der Praxis aus Datenschutzgründen als sehr schwierig.

Die Aufteilung in vier hydrologische Bodenklassen zur Abbildung des gesamten natürlichen Bodenartenspektrums ist zudem sehr grob, womit die detaillierte Abbildung von hydraulischen Bodeneigenschaften stark begrenzt wird. Folglich birgt die Parametrisierung große Fehlerspannen. Zusätzliche Unschärfen entstehen, wenn die Ermittlung der hydrologischen Bodenklassen nur auf Grundlage der Bodenarten geschieht (z. B. Fallbeispiele 3 und 4 auf Grundlage der ÜBK25 BY) anstatt mittels hydraulischer Eigenschaften, z. B. nach der Methodik der BGR (2004).

Ein weiteres Problem ist die Validierbarkeit von Modellergebnissen einer reinen Abflussbildungsberechnung. Diese ist bei extremen Niederschlagsereignissen nur schwer möglich, da keine Daten zu lokalen Überschwemmungshöhen vorliegen oder ggf. nur über Einsatzberichte der Feuerwehr eingesehen werden können. Außerdem ist eine Validierung mittels lokaler Überschemmungshöhen nur unter Einbeziehung der Abflusskonzentration möglich. Zur Validierung der Abflusshöhen wären daher kalibrierte und unter Hochwassersituationen validierte vollständige Niederschlags-Abfluss-Modelle notwendig.

Die Validierung anhand von Gerinneabflussdaten oder modellierten Gerinneabflüssen ist ebenfalls mit Komplikationen verbunden, da in kleineren nicht-beobachteten Einzugsgebieten keine Abflussdaten vorliegen und in beobachteten Einzugsgebieten der Vorfluter aufgrund der mit der Sturzflut einhergehenden Hochwassersituation bei Extremereignissen meist über die Ufer tritt und keine gültige Wasserstands-Abfluss-Beziehung hergestellt werden kann. Die Daten der Durchflusskurve reißen dabei ab, weshalb künstliche Anpassungen notwendig werden, die mit Unsicherheiten behaftet sind.

Trotz des Problems der Validierbarkeit sei an dieser Stelle angemerkt, dass es sich beim SCS-Curve-Number-Verfahren (USDA NRCS, 2004a) um ein anerkanntes und bewährtes Verfahren zur Modellierung der Abflussbildung handelt, das selbst zur Validierung später entwickelter Abfluss- und Erosionsmodelle, z. B. EROSION 3D (VON WERNER, 1995), von SEIDEL (2008) verwendet wurde.

### 6 Schlussfolgerungen

Mit dem modifizierten Curve-Number-Verfahren nach KLEE-BERG & OVERLAND (1989) wurden im Rahmen einer Sensitivitätsstudie flächendifferenzierte Direktabflusshöhen für vier reale Niederschlagsereignisse, die in den Jahren 2015 und 2016 jeweils im Frühsommer zwischen Ende Mai und Anfang Juni stattfanden, modelliert:

- Fall 1: Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen,
- Fall 2: Engebach/Hod in Baden-Württemberg,
- · Fall 3: Simbach in Bayern und
- Fall 4: Wolfsbach/Aichbach in Bayern.

Das Ziel war die Untersuchung der Rolle landwirtschaftlicher Nutzflächen bei Stark- bzw. Dauerregenereignissen und ihr Beitrag zum Oberflächen- bzw. Direktabfluss. Der Berechnung der Direktabflüsse lag eine umfassende Datenlage zugrunde, die für eine möglichst präzise Parametrisierung und geometrische Erfassung der Schläge und der daraus resultierenden Ausweisung abflussfördernder Flächen unabdingbar war. In drei von vier Fallbeispielen lagen durch die InVeKoS-Daten Informationen zur Hauptfrucht des Ereignisfalles vor. Im Fallbeispiel 2 (Engebach/Hod) konnten mangels dieser Daten keine aussagefähigen Analysen zu alternativen Flächenbewirtschaftungen und deren Maßnahmenwirksamkeitspotenzial durchgeführt werden. Allein der Zugang zu solchen Datensätzen ist aufgrund des Datenschutzes stark eingeschränkt. Die vorliegenden Untersuchungen unterstreichen die enorme Relevanz der schlagdifferenzierten Kenntnis zur Hauptfrucht für die hydrologische Modellierung, vor allem für Extremereignisse.

Anhand der Modellergebnisse wurden Ackerflächen eindeutig als primär abflussliefernde Flächengruppen identifiziert. Die Differenzen der Abflussbeiwerte zwischen Ackerland und abflussärmeren Flächen, z. B. Wald oder Grünland, lagen bei durchschnittlichen Vorfeuchten bei 20 bis 35 %. Bei starker Vorfeuchte erreichten die Differenzen der Mediane bis zu 70 %. Die Datengrundlage in Kombination mit dem angewandten Verfahren erlaubte eine weitere Unterscheidung der abflussfördernden Flächen in geschlossene Bestände und Reihenkulturen. Zwischen diesen Gruppen wurde hinsichtlich der Abflussbeiwerte eine Differenz von 8 bis 15 % festgestellt, wobei Reihenkulturen ausnahmslos die höchsten Direktabflüsse erzeugten.

Da der Ackerflächenanteil in den vier Untersuchungsgebieten mit 28 bis 44 % sehr hoch war, führten die hohen Abflussbeiwerte der Flächen zu entsprechend hohen Volumenanteilen am Gesamtabfluss. In drei von vier Fallbeispielen stellte das Ackerland die höchsten Abflussanteile von 55 bis 60 % bereit. Dies entspricht etwa dem 1,5-fachen ihres Flächenanteils.

Die vorliegenden Modellergebnisse lassen, bezogen auf die Abflussmengen und ungeachtet der Abflusskonzentration, den Schluss eines ursächlichen Zusammenhangs zwischen den durch Ackerflächen erzeugten Direktabflussmengen und der Intensität der Sturzflut- bzw. Hochwasserereignisse zu. Infolgedessen führen hohe Ackerflächenanteile im Allgemeinen, insbesondere Reihenkulturen mit später Aussaat, zu einer Verschärfung der Hochwasser- und Sturzflutproblematik in Einzugsgebieten.

Da der Abflussbildungsprozess auf landwirtschaftlichen Flächen maßgeblich von der Fruchtfolge und der Flächenbewirtschaftung sowie der Bodenbearbeitung abhängt, wurde modellhaft untersucht, wie die Beschaffenheit des Ackerlands verändert werden kann, um eine Minderung der Direktabflussmengen zu erreichen. Dazu wurden drei Bewirtschaftungsszenarien analysiert, um das ereignisspezifische Direktabflussminderungspotenzial auf Einzugsgebietsebene sowie für die abflussfördernden Flächengruppen zu untersuchen. Im Anschluss wurde die Maßnahmenwirksamkeit der Flächenbewirtschaftungsszenarien durch die Variation der Niederschlagsintensität erfasst.

Eine Mulchsaat mit Saatbettbereitung auf Ackerflächen (Variante 1) zeigt für alle Ereignisse ein extrem geringes Potenzial von nur wenigen Prozent Direktabflussminderung, sowohl auf Gebietsebene als auch für die Teilflächen der geschlossenen Bestände bzw. Reihenkulturen.

Wird hingegen auf eine Saatbettbereitung verzichtet (Variante 2), so erhöht sich die abflussmindernde Wirkung bei geschlossenen Beständen auf ca. 10 % und bei Reihenkulturen auf 20 %. Auf Gebietsebene wurde in zwei Fallbeispielen ein Minderungspotenzial von 7 % erreicht. Der Vergleich zeigt, dass eine ausreichende Bodenbedeckung eine effiziente Abflussminderung auf lokaler Ebene bewirkt, die sich auch auf Gebietsebene bemerkbar macht. Zur effizienten Abflussminderung darf der Bodenbedeckungsgrad der Flächen mit Mulchsaat 20 % nicht unterschreiten. Die Wirksamkeit der Mulchsaat ohne Saatbettbereitung ist bei Ereignissen, die über die Ausmaße eines HN100 (ca. 50 mm/h) hinausgehen, noch vorhanden. Bei wesentlich höheren Niederschlagsintensitäten erschöpft sich jedoch das Abflussminderungspotenzial. Allerdings ist zu erwarten, dass dem Abflussminderungspotenzial bei Starkregenereignissen weiter über den Ausmaßen eines HN100 hinaus natürliche Grenzen gesetzt sind.

Im Best-Case-Szenario (Variante 3) wurden – zusätzlich zur Mulchsaat ohne Saatbettbereitung auf Schlägen mit geschlossenen Beständen – Reihenkulturen mit der Bewirtschaftungsform einer langjährigen Direktsaat parametrisiert, die einen dauerhaften Charakter mit Bewirtschaftungszeiträumen von rund 50 Jahren ohne Bodenbearbeitung aufweist (BONTA & SHIPITA-LO, 2013). Die Modellergebnisse der Sensitivitätsanalyse für das Gebiet Wolfsbach/Aichbach deuten darauf hin, dass durch eine Veränderung der Bewirtschaftung auf rund 40 % der Einzugsgebietsfläche (Reihenkulturen und geschlossene Bestände) Verminderungen des Gebietsabflusses von bis zu 13 % ermöglicht werden. Dieses große Potenzial wird durch die Verringerung der Abflusshöhen auf einzelnen Schlägen erreicht, die mit einer Mulchsaat ohne Saatbettbereitung (möglich bei geschlossenen Beständen und Reihenkulturen, Abflussminderung bis ca. 20 %) oder langjährigen Direktsaat (möglich bei Reihenkulturen, Abflussminderung bis ca. 55 %) bewirtschaftet werden. Ein Jahrhundertereignis (HN100) mit einer Niederschlagsintensität von 47 bis 53 mm/h und -dauer von einer Stunde kann noch mit ca. 10 % Abflussminderung auf Einzugsgebietsebene gedämpft werden. Bei Niederschlagsintensitäten von 100 mm/h und einer Dauer von einer Stunde treten auch bei optimistischen Betrachtungen stagnierende Verhältnisse bezüglich der Abflussminderung von ca. 5 % ein, jedoch wird auf den Flächen der Reihenkulturen laut den Modellergebnissen selbst bei diesen Verhältnissen der Direktabfluss noch um 30 % verringert. Trotz des Eintretens eines Erschöpfungszustands im Best-Case-Szenario ist der lokale Effekt in Teilgebieten mit einem besonders hohen Anteil an Maisflächen nicht zu unterschätzen, denn neben der Schutzwirkung vor flussseitigem Hochwasser ist auch der Schutz vor Überflutungen durch Sturzfluten, die überall auftreten können, zu berücksichtigen. Lokal wirksame Abflussminderungen durch langjährige Direktsaat besitzen daher selbst bei Extremereignissen, die weit über ein HN100 hinausreichen, ein bedeutendes Schutzpotenzial für Unterlieger.

Das Curve-Number-Verfahren kann als sinnvoller Kompromiss zwischen Datenverfügbarkeit und Modellkomplexität gesehen werden. Bei lokaler, räumlich hochaufgelöster Anwendung muss jedoch der abschätzende Charakter des Verfahrens und die hohe Sensitivität gegenüber räumlich in der Natur variierender Bodenparameter berücksichtigt werden, um Fehleinschätzungen auf Schlagebene zu vermeiden. Eine messtechnische Verifizierung der Modellergebnisse aus der vorliegenden Sensitivitätsstudie

wäre daher sinnvoll und wünschenswert. Die Validierbarkeit der Abflussbildung ist grundsätzlich in Frage zu stellen, jedoch eignet sich das Verfahren für Sensitivitätsstudien, um potenzielle Abflussminderungen auf Schlag- und Einzugsgebietsebene zu berechnen.

#### **Conclusions**

The modified curve-number method according to KLEEBERG & OVERLAND (1989) was applied in the context of a sensitivity study to estimate direct runoff depths for four precipitation events, which took place in the early summers of 2015 and 2016 between late May and early June:

- Case study 1: Ahr/Swistbach/Arzdorfer Bach in Rhineland-Palatinate and North Rhine-Westphalia,
- · Case study 2: Engebach/Hod in Baden-Wuerttemberg,
- Case study 3: Simbach in Bavaria and
- Case study 4: Wolfsbach/Aichbach in Bavaria.

For the most part, the modelling of the direct runoffs was based on detailed and comprehensive datasets, which were indispensable for the precise parameterisation and the geometric definition of the fields as well as the resulting identification of areas that enhance the generation of direct runoff. The InVeKoS datasets provided information on the main crop during the extreme event. In the study area of Engebach/Hod (case study 2), it was not possible to carry out informative analyses of alternative cultivation practices and their potential effectiveness on direct runoff reduction due to the lack of the InVeKoS data on main crops. The access to the InVeKoS data is highly restricted because of data privacy reasons. Therefore, the study underlines the importance of information on the main crops at the field scale for hydrologic modelling.

On the basis of the model results, arable land was clearly identified as a primary contributor to direct runoff. The differences in runoff coefficients between arable land and areas with low runoff depths, e.g. forest or grassland, reached 20 to 35 % with average antecedent moisture conditions. In one case of high antecedent moisture, the differences between the medians reached up to 70 %. The datasets combined with the applied methodology allowed a further distinction of runoff-enhancing areas into small grain and row crop fields. A difference in runoff coefficients of 8 to 15 % was found between these groups, with row crops producing the highest direct runoff depths.

Since the proportion of arable land in the four study areas was very high (28 to 44 %), the high runoff coefficients of the areas correspondingly led to high shares on the total runoff volume. In three out of four case studies, arable land provided the highest runoff shares of 55 to 60 %. This corresponds to approximately 1.5 times their proportion of the area.

Regardless of the runoff concentration, the present model results allow the conclusion of a causal relationship between the direct runoffs generated by arable land and the intensity of the associated flood events. This means that large areas of arable land in general intensify the problems with river floods and flash floods in catchments, especially row crops with late sowing.

Since the runoff generation on agricultural land depends largely on crop rotation and management as well as cultivation practices, modelling of runoff generation was carried out to determine how cultivation practices can be changed in order to reduce direct runoff. For this purpose, three model scenarios with varying cultivation methods were analysed in the case studies in order to investigate their potential of direct runoff reduction at the catchment scale as well as the field scale. The effectiveness of the land management scenarios was then determined by varying the intensity of the precipitation events.

Mulching with seedbed preparation on arable land (scenario 1) showed an extremely low potential of only a few percent direct runoff reduction for all events, both at the catchment scale and for the single fields of small grain or row crops.

For mulching without seedbed preparation (scenario 2), on the other hand, the direct runoff reduction increases to approx. 10 % for small grain and to 20 % for row crops. At the catchment scale, a runoff reduction potential of 7 % was achieved in two case studies. The comparison showed that sufficient soil cover with plant material results in an efficient runoff reduction at the field scale, which also affects the catchment scale. For an effective reduction of direct runoff, the soil cover with plant material should not fall below 20 %. Mulching without seedbed preparation still shows effective runoff reduction for precipitation events with return periods of 100 years (approximately 50 mm/h), while rainfall events of significantly higher intensity cancel out this runoff reduction potential. However, in extreme cases with return periods far beyond 100 years, the potential for direct runoff reduction of mulching becomes insignificant.

In the best-case-scenario (3), additionally to mulching without seedbed preparation (small grain), long-term no till agriculture was assumed on fields with row crops. The applied parameters imply cultivation periods of around 50 years without tillage (BONTA & SHIPITALO, 2013). The model results of the sensitivity study indicate that a change in cultivation practice to around 40 % of the catchment area (row crops and small grain) allows reductions in total runoff volume of up to 13 % at the catchment scale. This great potential is achieved by reducing the direct runoff depths on single fields with mulching and no seedbed preparation (possible for small grain and row crows, runoff reduction up to around 20 %) or no till practice (possible for row crops, runoff reduction up to 55 %). Events with return periods of 100 years corresponding to rainfall intensities of 47 to 53 mm/h and durations of one hour can still be attenuated with approximately 10 % runoff reduction at the catchment scale. Under conditions with precipitation intensities of 100 mm/h and a duration of one hour, the runoff reduction decreases to approximately 5 %. However, according to the model results, the direct runoff on fields with row crops is still reduced by 30 %. The local effect on single fields and areas with particularly high proportions of maize fields should not be underestimated. Beside the attenuation of floods originating from rivers, protection against flash flood events, that might occur anywhere, must also be taken into account. Locally effective direct runoff reductions due to long-term no till agriculture therefore show a significant potential for the protection of properties located downhill, even in extreme cases that go far beyond events with return periods of 100 years.

The curve-number method can be seen as a compromise between data availability and model complexity. In case of local and spatially high-resolution application of the curve-number

method, however, its estimating character and the high sensitivity to soil parameters (hydrologic soil groups) must be taken into account in order to avoid incorrect assessments at the field scale. Therefore, an experimental verification of the model results would be reasonable and desirable. The validation of runoff generation processes is fundamentally questionable, but the method is suitable for sensitivity studies to calculate potential runoff reductions at the field and catchment scale.

#### Anschrift der Verfasser:

Alexander Strom Dr. Stephan Hannappel HYDOR Consult GmbH Am Borsigturm 40 13507 Berlin strom@hydor.de

#### Literaturverzeichnis

- ABU-HASHIM, M. S. D. (2011): Impact of land-use and land-management on the water infiltration capacity of soils on a catchment scale, Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina Braunschweig.
- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung KA5, 5. verbesserte und erweiterte Auflage, Hannover.
- ALHASSOUN, R. (2009): Studies on factors affecting the infiltration capacity of agricultural soils, Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina Braunschweig.
- ARNOLD, J. G., KINIRY, J. R., SRINIVASAN, R., WILLIAMS, J. R., HANEY, E. B. & S. L. NIETSCH (2012): Soil and Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012.-Texas Water Resources Institute
- AUERSWALD, K., MOYLE, P., SEIBERT, S. P. & J. GEIST (2019): HESS Opinions: Socio-economic and ecological trade-offs of flood management benefits of a transdisciplinary approach. Hydrol. Earth Syst. Sci. 23 (2): 1035–1044.
- BARTELS, H., WEIGL, E., REICH, T., LANG, P., WAGNER, A., KOHLER, O. & N. GERLACH (2004): Zusammenfassender Abschlussbericht: Projekt RADOLAN Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer).- Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie.
- BEISECKER, R., DIESSELBERG, F., HANNAPPEL, S., SEITH, T., SENONER, F., STROM, A. & E. ZETTL (2020): Veränderungen der Wasseraufnahme und –speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse.- UBA-Texte 63/2020, Umweltbundesamt [Hrsg.], Dessau-Roßlau.
- BGR (2004): Ableitung des Oberflächenabflusses für die Erstellung der Sickerwasserratenkarte im Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD).- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BKG (2016): Digitales Basis-Landschaftsmodell (AAA-Modellierung).-Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Stand: 01.04.2016.
- BMEL (2017): Daten und Fakten Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft mit Fischerei und Wein- und Gartenbau.- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft [Hrsg.], Stand: Dezember 2017, Berlin.
- BONTA, J. V. & M. J. SHIPITALO (2013): Curve-Numbers for long-term notill corn and agricultural practices with high watershed infiltration, In: Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 68, No. 6, 487-500.
- BRANDHUBER, R., TREISCH, M., FISCHER, F., KISTLER, M., MAIER, H. & K. AUERSWALD (2017): Starkregen, Bodenerosion, Sturzfluten Beobachtungen und Analysen im Mai/Juni 2016.- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising-Weihenstephan.

- BUNDESREGIERUNG (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen.
- DEUMELANDT, P.; KASIMIR, M.; STEININGER, M. & D. WURBS (2014): Beratungsleitfaden Bodenerosion und Sturzfluten Lokale Kooperation zwischen Landwirten und Gemeinden sowie weiteren Akteuren zur Vermeidung von Bodenerosion.- Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (Hrsg.), Halle (Saale).
- DVWK (2003): Ursache-Wirkungsbeziehungen zu Hochwasserereignissen.- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. [Hrsg.], ATV-DVWK-Arbeitsgruppe HW-3.2 "Hochwasser", Hennef.
- DWA (2018): Merkblatt DWA-M 922 Bodenhydrologische Kartierung und Modellierung (Entwurf).- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. [Hrsg.], Juni 2018. Hennef.
- DWD (2017): DWD Climate Data Center (CDC), Historische stündliche RADOLAN-Raster der Niederschlagshöhe (GIS-lesbar) Version V001.-Deutscher Wetterdienst, Stand: 29.05.2017.
- DWD (2018): DWD Climate Data Center (CDC), Raster der Wiederkehrintervalle für Starkregen für das Gebiet Deutschland Version 2010R.-Deutscher Wetterdienst, Stand: 08.03.2018.
- EEA (2017): Reference Data: EU-DEM v1.1, Copernicus Land Monitoring Service.- European Environment Agency, Stand: Mai 2017.
- EEA (2018): High Resolution Layer Imperviousness, Copernicus Land Monitoring Service.- European Environment Agency, Stand: 06.04.2018.
- GD NRW (2017): IS BK 50 Bodenkarte von NRW 1:50.000 (Datensatz).-Geologischer Dienst NRW, Stand: 11.08.2017.
- GEBEL, M., HALBFASS, S, BÜRGER, S. & M. UHLIG (2018): STOFFBILANZ Modellerläuterung (Stand: 30.01.2018).- Gesellschaft für Angewandte Landschaftsforschung bR.
- JUNGHÄNEL, T., ERTEL, H. & T. DEUTSCHLÄNDER (2017): KOSTRA-DWD-2010R - Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010.- Deutscher Wetterdienst, zuletzt geprüft am 29.05.2018.
- KLEEBERG, H.-B. & H. OVERLAND (1989): Zur Berechnung des effektiven oder abflusswirksamen Niederschlags, Institut für Wasserwesen, Mitteilung Heft 32/1990, Universität der Bundeswehr München.
- LAWA (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft - Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder.- Bund-/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [Hrsg.], Berlin.

- LFL BY (2018): Daten zur Hauptfrucht 2016 (InVeKoS) für die Einzugsgebiete Simbach, Wolfsbach, Aichbach.- Landesanstalt für Landwirtschaft Bayern.
- LFU BY (2017): Digitale Übersichts-Bodenkarte von Bayern im Maßstab 1:25.000.- Landesamt für Umwelt Bayern, Stand: Februar 2017.
- LGB RP (2018): BFD 50 Bodenflächendaten 1:50.000 Rheinland-Pfalz (vorläufig).- Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, Stand: September 2018.
- LGRB BW (2015): BK 50 Bodenkarte von Baden-Württemberg 1:50.000.-Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Stand: April 2015.
- LWK NW (2018): Daten zur Hauptfrucht 2016 (InVeKoS) für die Gebiete Swistbach und Arzdorfer Bach.- Landwirtschaftskammer NRW.
- MWVLW (2018): Daten zur Hauptfrucht 2016 (InVeKoS) für ein Gebiet in der Gemeinde Grafschaft, Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz.
- PRO AQUA (2016): Untersuchung von Starkregenereignissen in Bad Bellingen.- ProAqua Ingenieurgesellschaft für Wasser- und Umwelttechnik mbH, Aachen (unveröffentlicht).
- SEIDEL, N. (2008): Untersuchung der Wirkung verschiedener Landnutzungen auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion mit einem Simulationsmodell, Dissertation, Universität Freiberg.
- STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (2018): Landwirtschaftlich genutzte Fläche 2016 und Ackerland nach Fruchtarten 2016 für die Gemeinden Bad Bellingen, Kandern Stadt und Efringen-Kirchen, https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Bodennutzung/, aufgerufen am 13.12.2018.
- USDA NRCS (2004a): National Engineering Handbook Part 630 Hydrology, Chapter 10: Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall.- United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- USDA NRCS (2004b): National Engineering Handbook Part 630 Hydrology, Chapter 9: Hydrologic Soil-Cover Complexes.- United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- USDA NRCS (2009): National Engineering Handbook Part 630 Hydrology, Chapter 7: Hydrologic Soil Groups.- United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- VOGES, J. (1999): Empirisches Modell für die mittlere Maßstabsebene zur GIS-gestützten Bestimmung der Anbindung erosionsgefährdeter Ackerflächen an Fließgewässer, Dissertation, Universität Hannover.
- VON WERNER, M. (1995): GIS-orientierte Methoden der digitalen Reliefanalyse zur Modellierung von Bodenerosion in kleinen Einzugsgebieten, Dissertation, Freie Universität Berlin.