

Einfluss der Vorfeuchte und Verschlämmung auf die Starkregenmodellierung in Baden-Württemberg

Rick Crocoll, Eva Gerke und Anne Jakobs

Zusammenfassung

Bei den in Baden-Württemberg im Mittel durch Überflutungsereignisse jährlich auftretenden Gesamtschäden wird davon ausgegangen, dass etwa 50% auf Starkniederschläge kurzer Dauer und hoher Intensität zurückzuführen sind (LUBW, 2020). Sogenannte Starkregengefahrenkarten unterschiedlicher Szenarien dienen als Instrument zur Visualisierung der Überflutungsflächen und Fließwege des Oberflächenwassers und somit als Grundlage für die Gefahrenabschätzung und -vermeidung. Die Erstellung der Starkregengefahrenkarten erfolgt mittels zweidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle (2D-HN-Modelle). Als Eingangsgrößen für die 2D-HN-Modelle werden die Ergebnisse eines hydrologischen Niederschlags-Abfluss-Modells (N-A-Modell) verwendet, welche den Direktabfluss eines Niederschlagsereignisses ausgeben. Diese Ergebnisse hängen unter anderem von meteorologischen und bodenspezifischen Annahmen, sowie von standortspezifischen Parametern, wie der Topografie und der Landnutzung, ab (Steinbrich et al, 2015). Zwar werden N-A-Modelle anhand gemessener Pegelstände und Abflüsse kalibriert, allerdings fehlen in kleinen Gebieten häufig Messdaten, sodass mit abnehmender Gebietsgröße die hydrologischen Unsicherheiten zunehmen. Aufgrund von Beobachtungen aus Feldversuchen werden insbesondere den Parametern Verschlämmung und Vorfeuchte eine hohe Sensitivität bezüglich der Entstehung von Oberflächenabfluss zugeordnet (Ries et al., 2020; Scherrer et al., 2007).

Um die Unsicherheiten bei Modellrechnungen besser einschätzen zu können, werden Sensitivitätsanalysen angewendet. In diesem Beitrag werden die Resultate verschiedener Modellrechnungen mit historischen Niederschlagsereignissen, sowie Modellrechnungen mit künstlichen Verschlammungs- bzw. Vorfeuchteszenarien aufgezeigt. Da die Fließwege des Oberflächenwassers zunächst unbekannt sind, müssen stets gesamte Einzugsgebiete (EZG) modelliert werden. In den Untersuchungen werden EZG mit einer Fläche $< 1 \text{ km}^2$ mit verschiedenen Landnutzungen in der Gemeinde Karlsbad betrachtet und anhand ihrer Abflussganglinien am unteren Gebietsrand verglichen. So kann das Verhalten der Modelle auf Veränderungen bodenspezifischer Parameter im kleinskaligen Bereich untersucht werden und Rückschlüsse können anhand der Gebietsdaten gezogen werden.

1 Einführung

1.1 Untersuchungen zu den Folgen von Starkregen

Seit den Ereignissen im Ahrtal im Sommer 2021 hat das Thema rund um die Gefahren von Starkregenniederschlägen viel Aufmerksamkeit erregt. In Anbetracht des Klimawandels und dem damit verbundenen erhöhten Auftreten von Starkregen steigt die Notwendigkeit für eine kontinuierliche Verbesserung realitätsnaher Abbildungen der Überflutungen bei diesen Ereignissen. Die daraus resultierenden Gefahren durch Starkregen sollen durch Untersuchungen angemessen beurteilt und präventiv verhindert werden. Untersuchungen dieser Art finden in Baden-Württemberg bereits seit 2016 standardisiert nach dem Leitfaden der Landesanstalt für Umwelt Baden-

Württemberg (LUBW) statt. Nach dem Leitfaden wird die Untersuchung für fünf Oberflächenabflussszenarien durchgeführt (Tab. 1): Unterschieden werden ein seltenes (SEL), ein außergewöhnliches (AUS) und ein extremes (EXT) Abflussereignis.

Tab. 1 Übersicht der Szenarien bei einer Starkregenuntersuchung (nach LUBW, 2020)

Szenario	Niederschlagsdauer	Einordnung des Niederschlags	Variation
SEL	1h	~30-50-jährlich	Unverschlämmt
	1h	~30-50-jährlich	Verschlämmt
AUS	1h	~100-150-jährlich	Unverschlämmt
	1h	~100-150-jährlich	Verschlämmt
EXT	1h	128 mm/h (höchster gemessener Wert in BW)	Verschlämmt

Der zeitliche Verlauf des Niederschlags bei diesen Szenarien zeichnet sich durch eine anfangsbetonte Intensität aus. Die Untergliederung der Szenarien SEL und AUS in unverschlämmt und verschlämmt soll das Spektrum der Untersuchungen erweitern. Hierbei wird im Bereich von Ackerflächen die Infiltration des Wassers in den Boden variiert. Eine Verschlämmung des Bodens bedeutet das Verschließen von Poren durch Bodenpartikel und das damit verbundene Verringern der Infiltrationskapazität. Das sogenannte Verschlämmen geschieht durch den Aufprall der Regentropfen und das Fließen des Oberflächenwassers, wodurch die Bodenpartikel zerkleinert und verlagert werden (Elhaus, 2015).

Mit einem 2D-HN-Modell werden die Fließwege, Fließgeschwindigkeiten und Überflutungstiefen berechnet. In das Modell sind verschiedene Daten über das jeweilige Untersuchungsgebiet einzuarbeiten. Dazu gehören die Topografie eines Gebietes in Form eines digitalen Geländemodells, der Gebäudebestand, die Landnutzungen aber auch das Gewässernetz mit Verdolungen und Durchlässen. Der Niederschlagsinput wird als Effektivniederschlag in Form von Oberflächenabflusskennwerten (OAK) eingegeben. Die Ermittlung des oberflächenabflusswirksamen Effektivniederschlags, welcher sowohl eine räumliche als auch zeitliche Inhomogenität aufweist, stellt als Summe vieler Abflussprozesse einen höchst komplexen Ablauf in der Hydrologie dar. Hierzu wurden bereits viele Untersuchungen, wie die von Beven & Germann (1982), Ries et al. (2020), Scherrer et al. (2007), Steinbrich et al. (2015) und Weiler & Naef (2003) vorgenommen. Tab. 2 gibt einen Überblick über die wesentlichen Gebietseigenschaften, die eine wichtige Rolle für das Abflussgeschehen bei Starkregenereignissen spielen.

Um die Gefahren von Starkregenereignisse durch realitätsnähere Simulationen besser einschätzen zu können, sind Erkenntnisse aus vergangenen Starkregenereignissen und eine stetige Überprüfung der bisher angenommen Ansätze für diese Parameter unerlässlich. Daher werden im Folgenden (Kapitel 2) die Ereignisse in Karlsbad näher betrachtet.

Tab. 2 Übersicht wichtiger Prozesse und Parameter der Abflussbildung

Zuordnung		Erklärung
Meteorologische Parameter	Niederschlagshöhe	Niederschlagsmenge in einem bestimmten Zeitraum
	Niederschlagsdauer & -verlauf	Zeitspanne des Niederschlags, sowie die Verteilung der Intensität
Bodenspezifische Prozesse und Parameter	Verschlämmung	Verminderung der Infiltration
	Infiltrationsrate	Eindringen des Wassers in den Boden pro Zeiteinheit
	Bodenmatrix	Bodensubstanz ohne Luftporen
	Makroporen	Luftporen mit Durchmesser > 1 mm
	Vorfeuchte	Bodenfeuchtwert zu Beginn eines Ereignisses
	Vegetation	Pflanzenentwicklungsstufe, sowie Bedeckungsgrad durch Vegetation
Landnutzung	Flächenzuordnung	Versiegelungsgrad; Rauheiten
Relief	Topografie	Höheninformationen

1.2 Hydrologisches Modell RoGeR

Zur Ermittlung des Effektivniederschlags wird in Baden-Württemberg das N-A-Modell Runoff Generation Research (RoGeR) von der Albert-Ludwig-Universität Freiburg genutzt. Somit ist eine einheitliche Grundlage auf Landesebene für die Starkregenuntersuchungen gewährleistet. RoGeR liefert als Ergebnis Effektivniederschläge, die als rasterbasierte OAK dem 2D-HN-Modell als Eingangsdaten dienen. Die Ergebnisse werden in zeitlicher Auflösung von 5 min und räumlicher Auflösung von 5 m * 5 m geliefert. RoGeR basiert auf einer Beschreibung hydrologischer Prozesse und wurde an 13 EZG in Baden-Württemberg validiert. Aufgrund dieser Validierung und den räumlich verteilten Eingabeparametern kann RoGeR für neue Untersuchungsgebiete ohne weitere Kalibrierung übertragen werden und ist somit für alle Gebietsgrößen einsetzbar (Steinbrich et al., 2015). Somit bietet RoGeR die Möglichkeit, die hydrologischen Ergebnisse aus dem Modell auf jedes Untersuchungsgebiet anzuwenden und gleichzeitig Parameter, wie z.B. die Vorfeuchte zu variieren.

2 Starkregenereignisse in Karlsbad

Im Sommer 2021 fanden in der Gemeinde Karlsbad, zu der unter anderem die Ortsteile Mutschelbach, Langensteinbach und Auerbach gehören, innerhalb kurzer Zeit drei aufeinanderfolgende Starkregenereignisse statt, deren Eigenschaften in Tab. 3 aufgelistet sind. Die Informationen zu den Niederschlagsverläufen wurden einem virtuellen Niederschlagsschreiber, der im Flutinformations- und -warnsystem FLIWAS (FLIWAS, 2023) integriert ist, entnommen. Die Betroffenheit durch den Regen erstreckt sich bei allen drei Ereignissen über jeden der oben genannten Ortsteile hinweg. Die Stellen, an denen Schäden auftraten, variierten jedoch je Ereignis.

Tab. 3 Eigenschaften und Abschätzung der Jährlichkeit der Ereignisse in Karlsbad

Ereignis	Dauer	Niederschlagshöhe	Abschätzung nach KOSTRA
18.06.21	1 h	> 65 mm	>> 100 a
29.06.21	0,5 h	25 mm	~10 a
04.07.21	1 h	31 mm	~ 5 a

Das erste Ereignis vom 18.06. mit einer Dauer von 1 h weist die höchste Niederschlagshöhe auf und liegt nach Abschätzungen und Einordnung nach KOSTRA weit über einem 100-jährlichen Ereignis. Im Laufe dieses Ereignisses wurden primär im Ortsteil Mutschelbach größere Schäden dokumentiert. An Stellen mit einer hohen Konzentration des Oberflächenwassers, wie beispielsweise am Friedhof in Mutschelbach, führte die Kraft des Wassers zu einer vollständigen Zerstörung der Zugangstreppe aus Sandsteinblöcken. Mit einer geringeren Dauer, aber auch einer geringeren Niederschlagshöhe wird für das zweite Ereignis eine Eintrittswahrscheinlichkeit von etwa 10 Jahren abgeschätzt. Das dritte Ereignis vom 04.07. mit einer Dauer von 1 h zeigt eine leicht höhere Niederschlagshöhe im Vergleich zum zweiten Ereignis. Nach einer Abschätzung kann solch ein Niederschlag statistisch gesehen alle fünf Jahre auftreten. Bei dem dritten Ereignis meldeten insbesondere die Ortsteile Langensteinbach und Auerbach deutlich höhere Schäden im Vergleich zu den ersten beiden Ereignissen. So standen ganze Bereiche der Fliederstraße in Langensteinbach beim Eintritt des Außengebietswassers in die Siedlung unter Wasser, was zu großen Sachschäden an Privathäusern führte.

Die Dokumentation der Ereignisse zeigt, dass die Folgen eines Starkregens von den erwarteten Schäden anhand der Einstufung der Jährlichkeit stark abweichen können. Dies führt zur Vermutung, dass Faktoren wie die Vorfeuchte oder Verschlämmung zum Zeitpunkt der Ereignisse einen wesentlichen Einfluss auf die Abflussbildung bei Starkregenereignissen haben können. Frei verfügbare Daten des DWD können eine erste Einschätzung zur vorliegenden Vorfeuchte bei den Ereignissen geben. Aus diesen Daten geht hervor, dass eine geringere Vorfeuchte am 18.06.21 gegenüber dem Ereignis vom 04.07.21 vorliegt (DWD, 2023).

3 Vorgehensweise bei der Sensitivitätsanalyse

3.1 Auswahl der Parameter und Standorte

Wie in Tab. 2 erwähnt, bestimmen eine Vielzahl von Faktoren das Abflussgeschehen bei Starkregenereignissen. Aufgrund der Ereignisse in Karlsbad war das Ziel der vorliegenden Untersuchung, den Einfluss der Vorfeuchte und Verschlämmung auf das Ergebnis des 2D-HN-Modells des Gebietes in Karlsbad mittels einer Sensitivitätsanalyse zu untersuchen. Dem 2D-HN-Modell vorangeschaltet, ist ein hydrologisches N-A-Modell, welches die Effektivniederschläge (OAK) liefert. In diesem N-A-Modell sind die Ansätze für Vorfeuchte und Verschlämmung implementiert. Neben der Sensitivitätsanalyse werden die drei vergangenen Ereignisse in Karlsbad modelliert und miteinander verglichen. Auch in Feldversuchen wurde nachgewiesen, dass eine erhöhte Vorfeuchte und das Auftreten von Verschlämmung den Oberflächenabfluss erhöhen kann. Dies variiert jedoch bei verschiedenen Landnutzungen stark, da eine Vielzahl von weiteren Faktoren das Abflussgeschehen beeinflussen kann (Ries et al., 2020; Rickli & Forster, 1997). Insbesondere Ackerflächen neigen dazu, sehr sensitiv auf die Einflüsse der Vorfeuchte und Verschlämmung zu reagieren. Diese Erkenntnisse aus den Feldversuchen bedeuten, dass bei der Auswahl der Standorte auf verschiedene Landnutzungen geachtet werden sollte. Abb. 1 stellt einen Überblick über die Eigenschaften der ausgewählten Standorte dar.

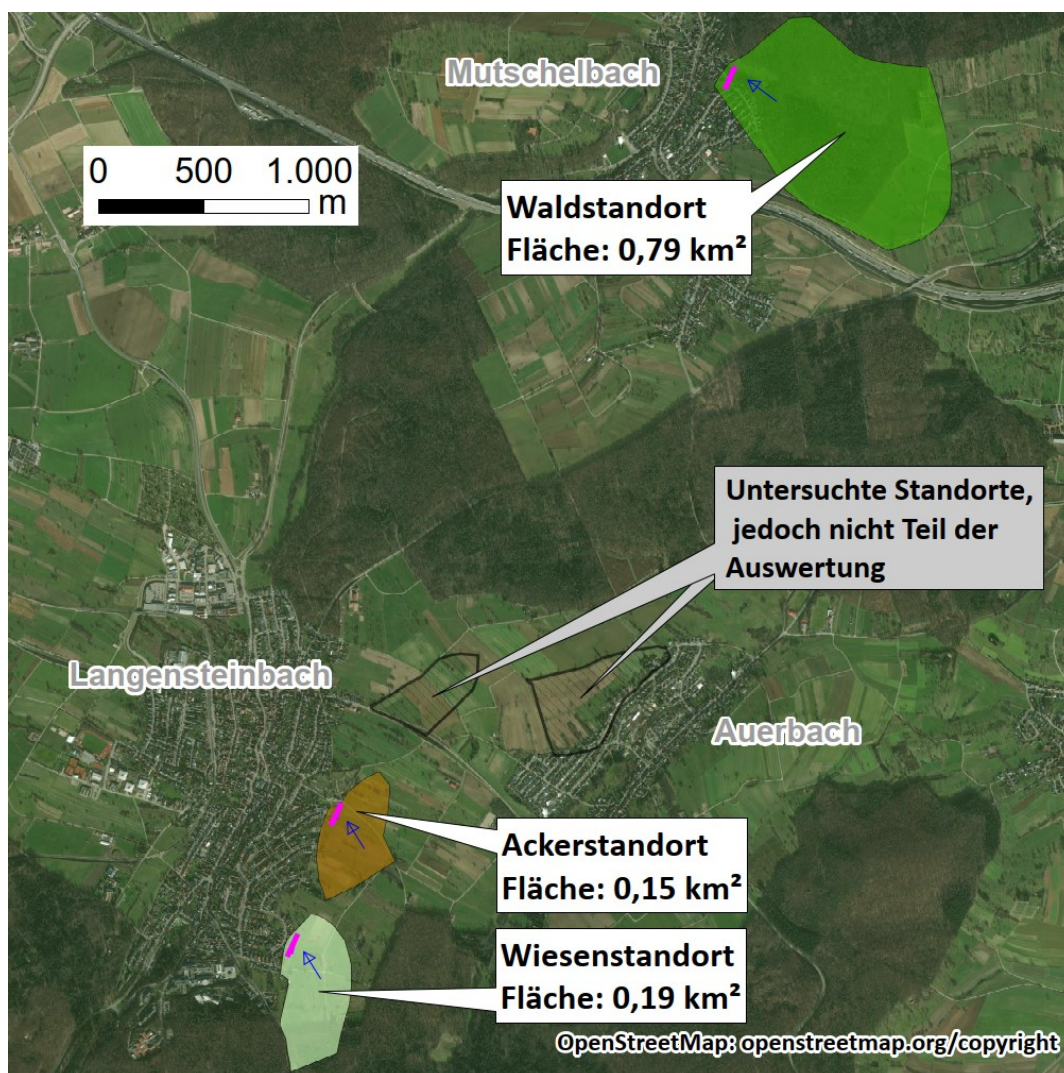


Abb. 1 Lage und Eigenschaften der Standorte mit der Markierung der Abflussentnahme am unteren Gebietsrand (pink) (Quelle Hintergrundkarte: www.openstreetmap.org/copyright)

Um die Interpretation der Ergebnisse zu vereinfachen, beschränkt sich die vorliegende Untersuchung auf kleine ($< 1 \text{ km}^2$) EZG. Die Standorte zeichnen sich durch ihre Siedlungsnähe aus und weisen, mit Ausnahme des Waldstandortes, keine abflusswirksamen Strukturen (z.B. Verdolungen oder Gräben) auf. Am Waldstandort sorgt ein Waldweg für einen Rückstau bei der Hälfte des EZG.

3.2 Durchgeführte Rechenläufe

Für die Sensitivitätsanalyse wird das außergewöhnliche Abflussereignis (AUS) herangezogen. Es wird ein unverschlammtes und ein verschlammtes Szenario betrachtet. Da besonders Ackerflächen stark auf eine Verschlämmung mit erhöhtem Abfluss reagieren, wird die Sensitivitätsanalyse für die Ackerfläche um ein Szenario mit einer maximalen fiktiven Verschlämmung erweitert. Die OAK der Ackerflächen wurden dabei so modifiziert, dass diese mit den OAK von Straßen gleichgesetzt werden. Wasser kann nicht mehr in den Boden infiltrieren, weshalb dort der Niederschlag nahezu vollständig abfließt (Wessolek & Fecklam, 1996).

Die Rechenläufe mit den verschiedenen Vorfeuchten beruhen auf dem unverschlammten Szenario und unterscheiden sich durch eine schrittweise Erhöhung der Vorfeuchte. Tab. 4 gibt einen Überblick über die durchgeführten Rechenläufe. Für die Rechenläufe der historischen Ereignisse wurden die Eingangsdaten zu dem Zeitpunkt der Starkregen mit Wasserhaushaltsmodellen der

Universität Freiburg modelliert, weshalb hier keine Einordnung des Verschlammungszustandes oder der Perzentile möglich ist.

Tab. 4 Übersicht der durchgeführten Rechenläufe mit den zugehörigen Modelleingaben

Nr.	Verschlammung	Vorfeuchte	Bemerkung
1	k.A	23,6 %nFK	Ereignis am 18.06.21
2	k.A	62,6 %nFK	Ereignis am 29.06.21
3	k.A	61,7 %nFK	Ereignis am 04.07.21
4	unverschlämmt	5%-Perzentil: 19,9 %nFK	Perzentile im Sommerhalbjahr
5	unverschlämmt	20%-Perzentil: 38,8 % nFK	Perzentile im Sommerhalbjahr
6	unverschlämmt	50%-Perzentil: 61,2 % nFK	Perzentile im Sommerhalbjahr
7	unverschlämmt	80%-Perzentil: 78,3 % nFK	Perzentile im Sommerhalbjahr
8	unverschlämmt	95%-Perzentil: 92,4 % nFK	Perzentile im Sommerhalbjahr
9	unverschlämmt	k.A	entspricht Leitfaden der LUBW
10	verschlämmt	k.A	entspricht Leitfaden der LUBW
11	fiktiv verschlämmt	k.A	Ackerflächen mit OAK der Straßen belegt

3.3 Numerische 2D-HN-Simulation

Als 2D-HN-Modell wurde die Software HydroAS, Version 5.2.5, vertrieben vom Unternehmen Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH Aachen, verwendet. Im unstrukturierten Berechnungsnetz können kleinräumige Geländestrukturen, welche den Fließweg beeinflussen, eingebaut und Durchlässe sowie Verdolungen berücksichtigt werden. Der Rauheitsansatz erfolgt nach Gauckler-Manning-Strickler mit einer Zuweisung von k_{st} -Werten in Abhängigkeit der Landnutzung (Hydrotec, 2022). Insbesondere bei Flächen mit natürlicher und vegetations-behafteter Nutzung werden variable Rauheitsbeiwerte, abhängig von der Überflutungstiefe, eingesetzt.

4 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

4.1 Ereignisse in Karlsbad aus dem Jahr 2021

Um die Resultate der Rechenläufe miteinander vergleichen zu können, wurden Abflussganglinien am unteren Gebietsrand der Standorte entnommen. Abb. 2 zeigt die Abflussganglinien der in Kapitel 2 beschriebenen Starkregenereignisse.

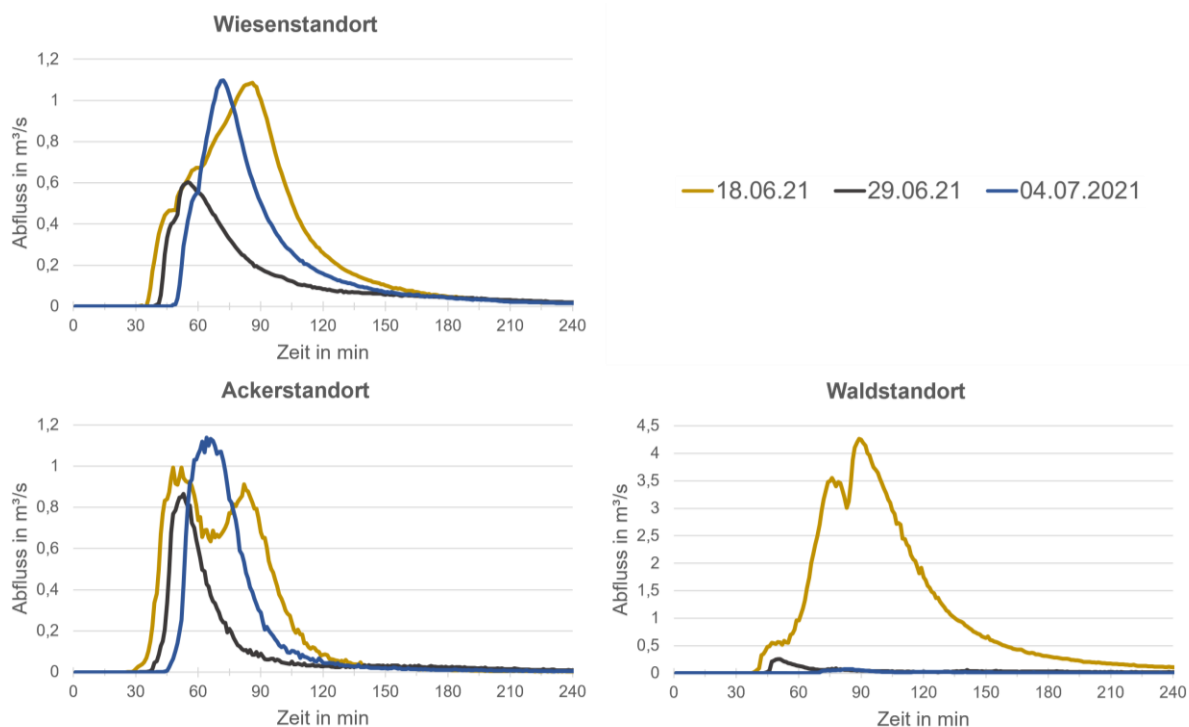


Abb. 2 Abflussganglinien der Ereignisse an den Standorten

Die Unterschiede zwischen den drei Ereignissen variieren je Standort und decken sich qualitativ mit den Beobachtungen. So bewegen sich das erste und dritte Ereignis an dem Wiesen- und Ackerstandort in einem ähnlichen Abflussspektrum. Am Ackerstandort übertrifft der Spitzenabfluss aus dem 5-jährlichen Ereignis (04.07.2021) sogar noch den aus dem 100-jährlichen Ereignis (18.06.2021). Am Waldstandort sind die Differenzen zwischen dem ersten und den darauf folgenden Ereignissen erheblich. Während die Waldfläche mit einem hohen Abfluss auf das 100-jährliche Niederschlagsereignis anspricht, sind die Abflüsse aus den zwei nachfolgenden Ereignissen vernachlässigbar. Somit ist einerseits zu erkennen, dass in der Modellierung durch die Änderungen der Randbedingungen auch geringe Niederschlagsmengen zu deutlich höheren Oberflächenabflüssen führen können. Andererseits wird verdeutlicht, dass der Einfluss der Randbedingungen je Landnutzung variieren kann. Außerdem wird aufgezeigt, dass die räumliche Verteilung des Niederschlags einen Einfluss auf das Abflussgeschehen ausüben kann.

4.2 Außergewöhnliches Ereignis mit unterschiedlicher Vorgeuchte und Verschlammung

Um die möglichen Einflüsse von Vorgeuchte und Verschlammung bei diesen Ereignissen zu identifizieren, werden diese beiden Einflussfaktoren zunächst getrennt betrachtet. Bei den Abflussganglinien aus den Szenarien mit verschiedenen Vorgeuchten ist eine detaillierte Betrachtung der Landnutzungen erforderlich (Abb. 3). So ist bei dem Wiesen- und Waldstandort eine klare Abstufung der Abflussganglinien der einzelnen Szenarien zu erkennen. Die Schritte zwischen den 20%- bis 95%-Perzentilen weisen einen regelmäßigen Abstand auf. Am Waldstandort gibt es in der Abflussganglinie einen abrupten Anstieg, da während des Ereignisses zunächst an einem Waldweg ein Aufstau entsteht und dieser nach einer gewissen Zeit unkontrolliert überströmt wird. Während sich die Abflussganglinien innerhalb der ersten 45 Minuten beim Waldstandort etwas geringer im Vergleich zum Wiesenstandort unterscheiden, wird der Unterschied der Perzentile ab dem Überströmen des Waldwegs deutlich.

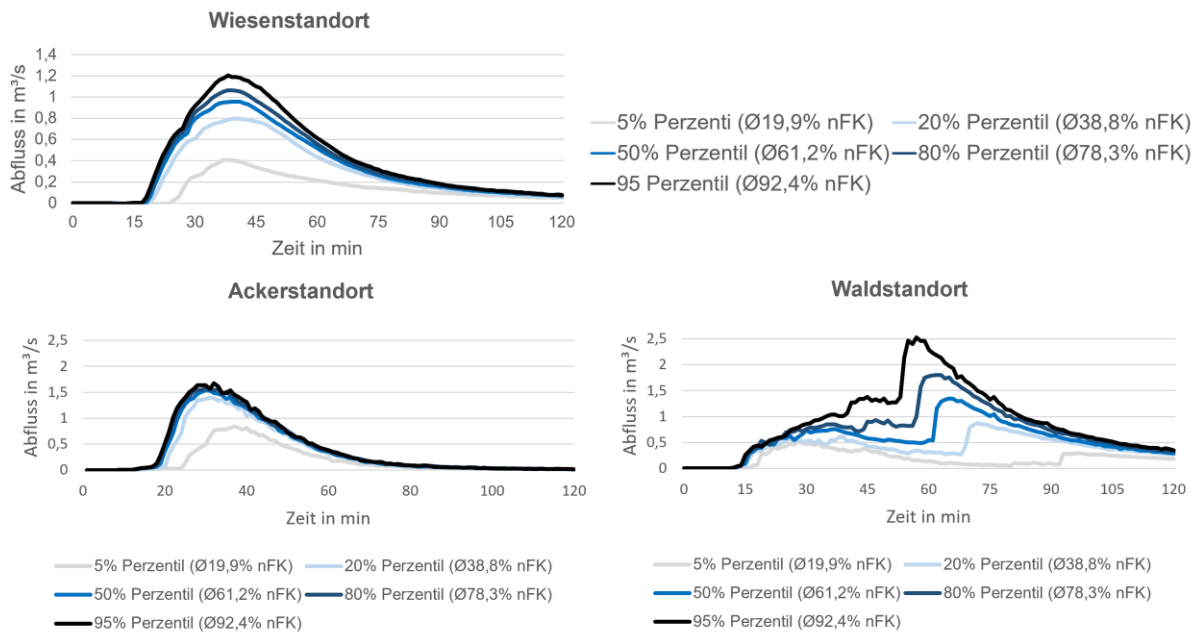


Abb. 3 Abflussganglinien der Vorfeuchteszenarien an den Standorten

Bei dem Ackerstandort fällt auf, dass sich eine Erhöhung der Vorfeuchte ab dem 20%- Perzentil nur noch wenig auf den Abfluss am Gebietsauslass auswirkt. Damit unterscheidet sich die Charakteristik des Ackerstandorts deutlich von denen des Wiesen- und Waldstandorts.

In Abb. 4 sind die Abflussganglinien am unteren Gebietsrand der Ackerfläche für die unterschiedlichen Szenarien der Verschlämmung dargestellt. Die beiden Szenarien „unverschlämmt“ und „verschlämmt“ stellen die bisher standardisiert betrachteten Fälle bei einer Untersuchung zu den Gefahren durch Starkregen dar. Der fiktive Ansatz einer „maximalen Verschlämmung“ ist vergleichbar mit einer vollständigen Versiegelung. Die Rechenläufe zeigen, dass durch die Variation der Verschlämmung, wie sie von den OAK vorgegeben wird, bei den betrachteten Ackerflächen innerhalb der Gemeinde Karlsbad kein erheblicher Einfluss auf das Abflussgeschehen erreicht wird. Hierbei können großräumige geologische Annahmen im N-A-Modell der Grund sein, weshalb in diesem Gebiet die Verschlämmung einen geringen Einfluss aufweist. Das fiktiv verschlammte Szenario stellt die extremste Annahme bezüglich des Oberflächenabflusses dar. Die Annahme einer flächigen Versiegelung aufgrund der Verschlämmung erscheint zwar unrealistisch, dennoch wird durch diese Variation der Modellparameter die Bandbreite möglicher Auswirkungen der Verschlämmung auf das Abflussgeschehen deutlich.

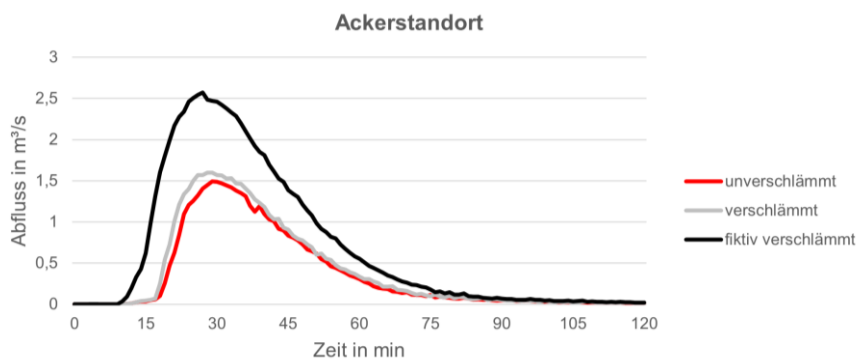


Abb. 4 Abflussganglinien der Verschlammungsszenarien am Ackerstandort

5 Schlussfolgerung

In dieser Untersuchung wurde die Sensitivität der Vorfeuchte und der Verschlämmung auf das Abflussgeschehen aus Starkregenereignissen für kleine Einzugsgebietsflächen ($< 1 \text{ km}^2$) mit unterschiedlicher Landnutzung betrachtet. Dafür wurden einerseits die historischen Niederschlagsereignisse von Karlsbad im Sommer 2021 und andererseits als künstliches Ereignis das außergewöhnliche Niederschlagsereignis nach Leitfaden der LUBW herangezogen.

Das Nachrechnen der historischen Ereignisse in Karlsbad hat gezeigt, dass die Beobachtungen mit dem numerischen Modell qualitativ nachgebildet werden können. Die Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse mit Variation der Vorfeuchte können plausibel auf das Abflussgeschehen der drei aufeinanderfolgenden Niederschlagsereignisse übertragen werden. Es wurde nachgewiesen, dass die Vorfeuchte ein wichtiger und sensitiver Parameter bei der Ermittlung des oberflächenabflusswirksamen Effektivniederschlags ist. Die Auswertungen der Simulationen mit unterschiedlicher Vorfeuchte haben zudem aufgezeigt, dass die Sensitivität der Vorfeuchte auf das Abflussgeschehen im entscheidenden Maße von der Bodennutzung abhängt. Insbesondere bei Ackerstandorten wirkt sich schon eine geringe Erhöhung der Vorfeuchte erheblich auf das Abflussgeschehen aus. Mit dem Szenario der fiktiven maximalen Verschlämmung wurde aufgezeigt, in welcher Bandbreite sich die Auswirkungen auf das Abflussgeschehen, insbesondere auf Ackerflächen bewegen können. Es wurde eine deutlich größere Bandbreite durch diese Verschlämmung aufgezeigt, als die vorgegebenen Standardszenarien aufweisen. Eine starke Verschlämmung wird auch beim dritten Niederschlagsereignis (Jährlichkeit = 5 a) in Karlsbad vermutet, was erklärt, warum dieses Ereignis mit größeren Schäden als das erste Niederschlagsereignis mit einer Jährlichkeit von 100 a einherging.

Die aufeinanderfolgenden Starkregenereignisse in Karlsbad im Sommer 2021 haben auf eindrückliche Weise verdeutlicht, dass für zu erwartende Schäden aus Starkregenereignissen nicht nur die Niederschlagsmenge und die damit verbundene statistische Einordnung der Eintretenswahrscheinlichkeit (z.B. eine Jährlichkeit von 100 a) des Niederschlags relevant ist, sondern vielmehr ein Augenmerk auf den oberflächennah abfließenden Direktabfluss und ein Zusammenspiel aus Bodeneigenschaften und zeitlichen Faktoren der Bodenparameter gelegt werden muss.

6 Danksagung

Die Ergebnisse aus dem N-A-Modell RoGeR stammen von der Professur für Hydrologie der Albert-Ludwig-Universität Freiburg, mit deren Engagement die Datenbereitstellung für die vorliegende Arbeit ermöglicht wurde. Wir danken der Gemeinde Karlsbad für die Bereitstellung der Dokumentation der Ereignisse.

Literatur

- Beven, K., Germann, P. (1982). Makropores and Water Flow in Soils. *Water resources research*, 18(5), S. 1311-1325.
- DWD. (2023). Bodenfeuchteviewer. Zugriff am 25. Februar 2023 von Deutscher Wetterdienst - Wetter und Klima aus einer Hand: https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/appl/bf_view/_node.html?jsessionId=27B3F50C8FB959C1E6EB4F21F9871A17.live11054
- Elhaus, D. (2015). Erosionsgefährdung - Informationen zu den Auswertungen der Erosionsgefährdung durch Wasser. Geologischer Dienst NRW, Krefeld.

- FLIWAS (2023). Das Flutinformations- und Warnsystem FLIWAS. Zugriff am 25. Februar 2023
<https://infoportal.fliwas3.de/Lde/136608.html>.
- Hydrotec (2022). HydroAS - 2D-Strömungsmodell für die wasserwirtschaftliche Praxis Version 5.5.2. Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen.
- LUBW (2020). Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- Rickli, C., Forster, F. (1997). Einfluss verschiedener Standortseigenschaften auf die Schätzung von Hochwasserabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 148(5), S. 367-385.
- Ries, F., Kirn, L., Weiler, M. (2020). Experimentelle Untersuchung der Abflussbildung bei Starkregen. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 64(5), S. 221-236.
- Scherrer, S., Naef, F., Faeh, A.O., Cordery, I. (2007). Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation. Hydrology and Earth System Sciences, 11, S. 907-922.
- Steinbrich, A., Weiler, M., Leistert, H. (2015). Alles RoGeR? Modellierung von Sturzfluten aufgrund von Starkniederschlägen. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 35(15), S. 115-125
- Weiler, M., Naef, F. (2003). An experimental tracer study of the role of macropores in infiltration in grassland soils. Hydrological Processes, 17(2), S. 477-493.
- Wessolek, G., Fecklam, M. (1997). Standorteigenschaften und Wasserhaushalt von versiegelten Flächen. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 160(1), S. 41-46.

Anschrift der Verfasser

Rick Crocoll (B.Eng.), Anne Jakobs (M.Sc.)
WALD + CORBE Consulting GmbH
Am Hecklehamm 18, D-76549 Hügelsheim
r.crocoll@wald-corbe.de, a.jakobs@wald-corbe.de

Eva Gerke (M.Sc.)
WALD + CORBE Consulting GmbH
Niederlassung Stuttgart
Fritz-Reuter-Straße 18, D-70193 Stuttgart
e.gerke@wald-corbe.de