

Diskussionsbeitrag zur Fließwiderstands- parametrisierung zur Simulation von Oberflächenabflüssen infolge Starkregen

Peter Oberle
Kron Andreas
Kerlin Tim
Ruiz Rodriguez Ernesto
Nestmann Franz

B4

Bei der hydraulischen Starkregensimulation kommen Verfahren aus der Fließgewässermodellierung zum Einsatz. Eine Übertragung der empirischen Formeln und Parameter auf die stark unterschiedlichen Randbedingungen (u.a. Fließtiefe, Neigung) ist jedoch nur eingeschränkt möglich. Der Beitrag stellt die Auswertung einer Vielzahl publizierter Feld- und Laborversuche sowie grundsätzliche Überlegungen zur Praxistauglichkeit gängiger Ansätze und Parameterangaben zur Berücksichtigung des Fließwiderstandes bei Starkregen zur Diskussion.

Stichworte: Starkregen, Dünnschichtabfluss, Widerstandsparameter

1 Hintergrund

Der Leitfaden „Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg“ (LUBW 2020) zeigt den Kommunen, wie sie das von Starkregeneignissen ausgehende Risiko beurteilen können und mit welchen Maßnahmen sich mögliche Schäden verringern lassen. Wesentliches Hilfsmittel hierfür sind standardisierte Starkregengefahrenkarten (SRGK), in welchen für vorgegebene Oberflächenabflusskennwerte (OAK, effektiver Niederschlag) detailliert Fließwege und Abflussakkumulation mit Angabe von Überflutungstiefen und Fließgeschwindigkeiten auf Basis zweidimensionaler hydraulischer Strömungsmodelle ausgewiesen werden.

Während sich der Einsatz mehrdimensionaler Strömungsmodelle für Fließgewässer seit ca. 20 Jahren in der Ingenieurspraxis bewährt hat, ist die Simulation von Starkregenabflüssen mit deutlich größeren Unsicherheiten belegt. Eine direkte Übertragung der Erfahrungswerte aus der Fließgewässerhydraulik kann aufgrund der sehr unterschiedlichen Spektren bzw. Skalen der maßgeblichen Fließtiefen (bis hin zum Dünnschichtabfluss), Geländegradienten und morphodynamischen Prozesse (Verschlammung, Rinnenbildung) zu Fehlern und u.U. zu unrealistischen Ergebnissen führen.



Abbildung 1: Komplexe Fließcharakteristik (links; © Ifu.rlp), morphodynamische Prozesse (Mitte; © usda.gov) auf Wiesen und Ackerflächen (exemplarisch) und „roll waves“ auf einer Straße (rechts; © Robinson)

Neben der Frage, welche geometrischen Strukturen mit welcher Genauigkeit bzw. Auflösung für eine zielführende Prognose der Überflutungsflächen abgebildet werden müssen, stellt die adäquate Erfassung der Fließwiderstände infolge Oberflächen- und Formrauheiten bzw. Vegetation die maßgebliche Herausforderung dar (Abbildung 1). So zeigen vergleichende Untersuchungen und Sensitivitätsstudien eine erhebliche Streubreite der sich in den Ortslagen einstellenden Abflussganglinien, welche letztendlich zu unterschiedlichen Risikoeinschätzungen und ggf. Handlungsempfehlungen führen können (Zeisler 2018).

Vorliegender Beitrag stellt weiterführende Überlegungen zur Anwendbarkeit gängiger Fließformeln sowie die Ergebnisse einer Literaturstudie im Auftrag der LUBW vor und wird in der WasserWirtschaft 04/21 ausführlich dargelegt.

2 Anwendungsgrenzen des Darcy-Weisbach Ansatzes

Den Berechnungsverfahren gängiger 2D-Simulationsprogramme liegen die für die Fließgewässerhydraulik entwickelten Fließformeln (i.d.R. Gauckler-Manning-Strickler (GMS) und Darcy-Weisbach) zugrunde, welche jedoch auf Grund der unterschiedlichen maßgeblichen physikalischen Prozesse nur eingeschränkt Gültigkeit besitzen.

Während bei der Verwendung des GMS-Ansatzes durch die Verwendung angepasster Rauheitsbeiwerte dennoch plausible Ergebnisse erzeugt werden können, besteht bei Anwendung der Darcy-Weisbach-Gleichung das Problem, dass bei der Ermittlung des Widerstandsbeiwertes λ für sehr kleine Fließtiefen h bzw. große k_s/h -Verhältnisse sehr stark in einen empirisch (im Moody Diagramm) nicht belegten Bereich extrapoliert werden muss. Wird der Widerstandsbeiwert λ unter Annahme turbulenter Fließverhältnisse (bzw. Übergangsbereich) bspw. mit Ansätzen wie Colebrook-White ermittelt, beginnt ein relevanter Fließprozess ($v > 0$ m/s) für k_s -Werte > 100 mm (natürliche Oberflächen) rechnerisch erst ab einem Schwellenwert im Bereich von 1 - 2 cm (Abbildung 2).

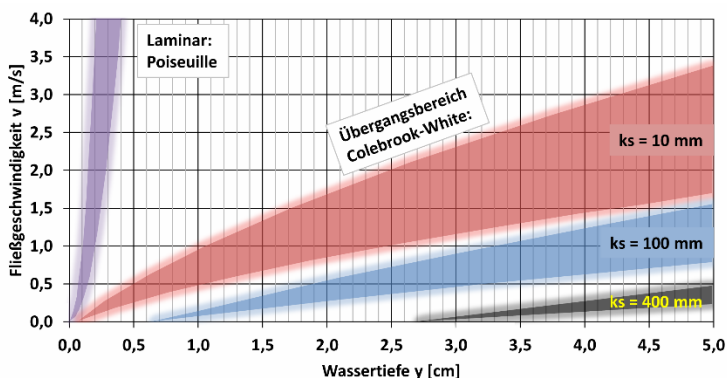


Abbildung 2: Rechnerisch ermittelter Fließbeginn und –geschwindigkeitsspektrum für exemplarische Sohlneigungen von 5 bis 20% mit unterschiedlichen Sandrauheiten © KIT/IWG

Hierdurch kann ein signifikantes unrealistisch hohes Wasservolumen auf der Fläche zurückgehalten werden, welches im Rahmen der Simulation nicht zum Abfluss kommt. Dieser Effekt ist verfahrensbedingt und lässt sich nicht mit dem Flächenrückhalt infolge Oberflächenrauheit (Interzeption, Muldenverluste, o.ä.) begründen, welcher bereits in den hydrologischen

Oberflächenabflusskennwerten (OAK) als Eingangsgröße der hydraulischen Modellierung bilanziert ist (Steinbrich 2015). Folglich ist es notwendig zur Gewährleistung einer angemessenen Modellgüte, neben der Plausibilisierung der Scheitelabflüsse auch einen quantitativen Nachweis der Abflussfülle unter Berücksichtigung einer aus numerischen Gründen definierten Grenzwassertiefe ($< 1 \text{ mm}$) im Rahmen des Qualitätssicherungsprozesses durchzuführen.

Während für flache, befestigte Gebiete (z.B. Siedlungsflächen) mit vergleichsweise hohen Fließtiefen die Verwendung des Darcy-Ansatz u.U. noch zielführend sein kann, ist für Außengebiete mit steileren Hanglagen die praktische Anwendbarkeit der Darcy-Weisbach-Formel (zumindest in der gängigen Form in Verbindung mit Colebrook-White) in Frage zu stellen. Um die Abflussbildung in Bezug auf Scheitel und Fülle realitätsnah abzubilden, müssten k_s -Funktionen in Abhängigkeit der Fließtiefe h vorgegeben werden, um den Erhalt der Abflussfülle zu erzwingen. Hierdurch wären die Vorteile des DW-Ansatzes im Gegensatz z.B. zur GMS-Formel auf messbare Rauheitswerte zuzugreifen und eine Superposition einzelner Widerstandsfaktoren zuzulassen, nicht mehr gegeben. Alternative Ansätze zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes λ (z.B. Bathurst, Julien, Lawrence in Smith 2008) weisen enge Anwendungsgrenzen auf und scheinen noch nicht praktikabel zu sein. Auch die Annahme laminarer Fließverhältnisse (Poiseuille-Formel) ist ungeeignet, da bereits bei geringen Fließtiefen von wenigen mm (unabhängig vom k_s -Wert) viel zu hohe Fließgeschwindigkeiten (Abbildung 2) ermittelt werden.

3 Ergebnisse der Literaturstudie

3.1 Methodik und Widerstandsbeiwerte aus der Literatur

Eine Vielzahl dokumentierter Forschungsarbeiten beschäftigt sich mit Niederschlag-Abfluss-Prozessen in Einzugsgebieten. Da zumeist hydrologische und morphodynamische Fragestellungen im Vordergrund stehen, ist die Ermittlung von hydraulischen Kenngrößen (Fließgeschwindigkeit, -tiefen und Widerstandsparameter) dabei oftmals nebensächlich und methodenbedingt mit hohen Unsicherheiten behaftet.

So erfolgt bei Feldversuchen die künstliche Beregnung eines realen Testfeldes (z.B. Messparzelle auf einer Ackerfläche) mit definierter Intensität und der Messung der Abflussganglinie am Flächenauslass (Engman 1986; Sei-

bert 2011). Ein wesentlicher Vorteil liegt in der Berücksichtigung einer natürlichen Bodenstruktur einschließlich (mikroskaliger) morphodynamischer Prozesse mit Abflusskonzentration. Eine Messung der Fließtiefen findet i.d.R. nicht statt und die Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten (Rückrechnung aus der Abflussganglinie oder über Tracermessung) unterliegt Unsicherheiten.

In Laborversuchen hingegen können die hydraulischen Parameter des Dünnschichtabflusses mit hoher Genauigkeit bestimmt werden (Ruiz Rodriguez 2017; Yörük 2020). Weiterhin ist die Variation der Randbedingungen und die differenzierte Betrachtung der einzelnen Einflussgrößen möglich und reproduzierbar. Als Rauheitselemente werden i.d.R. synthetische Materialien (z.B. Kunstrasen) auf ebenen Trägerelementen verwendet. Die durch Inhomogenitäten einer realen Oberfläche verursachten Effekte werden (bislang) nicht berücksichtigt. Daher ist insbesondere für Wiesen und Ackerflächen eine Übertragung der Ergebnisse auf reale Verhältnisse nur eingeschränkt möglich.

Abbildung 3 gibt eine Übersicht über Wertespektren für Rauheitswerte k_{st} ausgewählter Oberflächenklassen auf Basis der Literaturstudie, welche im weiteren Verlauf diskutiert werden.

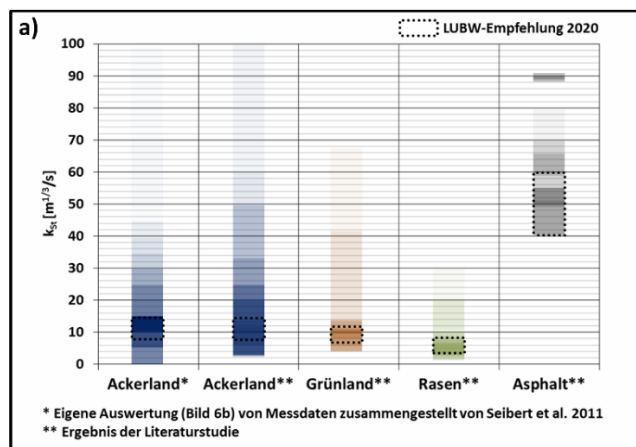


Abbildung 3: a) Wertespektren für Rauheitswerte (k_{st}) auf Basis von Literaturergebnissen und Laborversuchen für ausgewählte Oberflächenklassen © KIT/IWG

3.2 Abfluss auf versiegelten Oberflächen

Versiegelte Flächen (z.B. Asphalt) unterliegen einer geringeren geometrischen Varianz. Hierdurch lassen sich Ergebnisse aus empirischen Versuchsreihen zum Fließwiderstandsverhalten prinzipiell belastbarer auf die Praxis übertragen.

Ein für die Abflusskapazität sehr maßgebliches physikalisches Phänomen auf glatten Oberflächen stellen sogenannte „roll waves“ dar (Abbildung 1), welche sich in Abhängigkeit der Neigung und Fließtiefe einstellen können und die Abflussleistung signifikant und sprunghaft erhöhen (Karantounias 1974). Dies erklärt die sehr glatten Rauheitswerte in der Literatur bzw. die Ergebnisse aus Laborversuchen.

3.3 Abfluss auf natürlichen Oberflächen

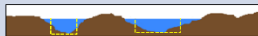
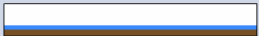
Die Abflussprozesse auf natürlichen Oberflächen wie Wiesen und Ackerflächen haben, insbesondere in ländlichen Gebieten, oftmals maßgeblichen Einfluss auf die Gefährdungssituation in den Ortslagen. Erwartungsgemäß unterliegen die Literaturangaben der Rauheitswerte für Fließtiefen < 3 cm (zumeist ermittelt aus Beregnungsversuchen) einer großen Streubreite. Auffallend ist, dass die Wertespektren auch glatte Rauheitswerte umfassen obwohl die Oberfläche je nach Bewirtschaftung und Zustand geometrische Unregelmäßigkeiten im Bereich mehrerer Zentimeter bis Dezimeter aufweisen kann, welche im Strömungsmodells nicht in entsprechend hoher Auflösung abgebildet werden können.

Es ist zu vermuten, dass die glatten Rauheitswerte auf eine ungleichmäßige Fließtiefenverteilung resp. Abflusskonzentration zurückzuführen ist, da der (Dünnschicht-)Abfluss nicht über die Fläche (wie z.B. auf einer asphaltierten Straße) mit gleichmäßiger Fließtiefe abfließt, sondern sich in einzelnen Fließpfaden konzentriert (Abbildung 1). Dieser Effekt ist abhängig von der Bodenart, dem Bearbeitungszustand der (Acker-)Fläche, der Dichte und Wuchsstadien der Vegetation und kann durch Rillen- bzw. Rinnenerosion verstärkt werden.

In Beregnungsversuchen wird diese Abflusskonzentration im Allgemeinen messtechnisch nicht erfasst. Es wird näherungsweise von einer gleichmäßigen Abflussverteilung ausgegangen und auf Grundlage des effektiven Oberflächenabflusses sowie der ermittelten Fließgeschwindigkeit die mittlere Fließtiefe rückgerechnet. Die so ermittelte Beziehung zwischen Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit führt über die bekannten Fließformeln zur Bestimmung (ggf. fließtiefenabhängiger) Widerstandsparameter.

Diese Vorgehensweise führt jedoch dazu, dass die mittlere Fließgeschwindigkeit einer geringeren (auf die Gesamtbreite projizierte) Fließtiefe zugeordnet wird als sich in den einzelnen Akkumulationsrinnen tatsächlich eingestellt hatte. Folglich ergeben sich für die Widerstandsparameter oftmals zu „glatte“ Werte. Je nach Anzahl und geometrischer Ausprägung der Fließpfade kann mit zunehmendem benetzten Umfang U der durchflossenen Rinnen allerdings auch ein kompensatorischer Effekt auftreten, welcher so rechnerisch sogar gegenläufig zu „raueren“ Werten führen kann. Die stark variierenden Auswirkungen der Abflusskonzentration aufgrund der beschriebenen vereinfachenden Annahmen erklären zum Teil die großen Bandbreiten der in der Literatur angegebenen Rauheitswerte (siehe Kap. 3.1).

In Abbildung 4 ist beispielhaft eine Berechnung von k_{St} -Werten für die Betrachtung mit und ohne Berücksichtigung der kleinskaligen Abflusskonzentration dargelegt. In der linken Spalte ist eine Abflusskonzentration auf 2 Rinnen erkennbar. Hierbei ergibt sich rückgerechnet ein Wert von $k_{St} = 6 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Um die gleiche Widerstandswirkung im HN-Modell abbilden zu können, muss ein Wert von $k_{St} = 12 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ angesetzt werden (rechte Spalte). Zu beachten ist, dass die Abflusskonzentration in Realität ein großes Spektrum an unterschiedlichen Fließtiefen sowie Rinnenbreiten und -anzahl einnehmen und somit kein exakter „Umrechnungsfaktor“ festgelegt werden kann.

Exemplarisches Berechnungsbeispiel Feldversuch (stark vereinfacht)		
Sohlneigung = 5 ‰; $q_{\text{mittel, Messung}} = 0,0002 \text{ [m}^2/\text{s] } ^*)$; $v_{\text{mittel, Messung}} = 0,06 \text{ [m/s]}$		
	mit Berücksichtigung der Abflusskonzentration	ohne Berücksichtigung der Abflusskonzentration
überhöhte Darstellung		
$A_{\text{effektiv}} \text{ [m}^2 \text{] } ^*)$	0,0033	0,0033
$b_{\text{wirksam}} \text{ [-] } ^*)$	(„real“) 0,30	(Annahme einheitlicher Fließtiefe) 1,00
$R_{hy, \text{Rechnung}} \text{ [m]}$	0,011	($R_{hy} \triangleq y$) 0,0033
$k_{St, \text{Rechnung}} \text{ [m}^{1/3}/\text{s}]$	6	12

*) pro Breitenmeter

Abbildung 4: Exemplarische Darstellung des Einflusses der Abflusskonzentration auf Rauheitsbeiwerte (hier: k_{St}) © KIT/IWG

Bei der Anwendung der Rauheitsparameter im Rahmen der Strömungsmodellierung ist zu beachten, dass bei den in der Praxis eingesetzten Verfahren die kleinskalige Abflusskonzentration über die ebenen Gitterelemente eines 2D-Modells nicht abgebildet wird. Somit wären die Wertespektren die sich aus z.B. Beregnungsversuchen ergeben direkt für die 2D-Modellierung anwendbar um die instationären Abflussverhältnisse des EZG adäquat (sprich zeit- und volumentreu) abzubilden, da in beiden Fällen (Rückrechnung aus Versuch als auch Simulation) von einer gleichmäßigen Fließtiefe ausgegangen wird. Je nach Ausprägung der Abflusskonzentration kann das bedeuten, dass sich im 2D-Modell das gleiche Q und v bei geringeren Wasserständen als im Realfall (in den Rinnen) einstellen muss. Für die Bewertung der Übertragbarkeit von Rauheitswerten ist also entscheidend, ob bei der Rückrechnung des k_{st} -Wertes aus den Messungen eine reduzierte Querschnittsbreite und der Einfluss des benetzten Umfangs berücksichtigt wurde.

3.4 Abfluss auf Rasenflächen

Für Rasenflächen liegen die Literaturwerte aus Feldversuchen für Dünn-schichtabfluss allesamt in einem sehr rauen Wertebereich. Berücksichtigt man, dass auch Rasenflächen sowohl von der Struktur der Bodenfläche als auch der Dichte des Bewuchses unterschiedlich ausgeprägt sind, lassen sich über die Gesamtheit der verfügbaren Daten belastbare fließtiefenabhängige Rauheitsfunktionen ableiten. Unsicherheiten entstehen aber auch hier, da der Querschnittsverbau durch die Bewuchselemente i.d.R. in der Berechnung der Widerstandsbeiwerte nicht berücksichtigt wird.

Auch wenn reine Rasenflächen für die Praxis der SR-Modellierung wohl keine allzu große Relevanz haben, geben die Erkenntnisse der differenzierten Laborversuche zum Übergang vom Dünn-schichtabfluss bis hin zu Fließ-tiefen von mehreren Zentimetern bis Dezimeter hilfreiche Ansatzpunkte auch für andere (natürliche) Oberflächen. Abbildung 5 zeigt verschiedene, aus Laborversuchen rückgerechnete, Verläufe wasserstandsabhängiger k_{st} -Werte. Aus den blau dargestellten Umhüllenden sind die Stützstellen der Wertebereiche (k_{st}/y) erkennbar, die auch in den Leitfaden der LUBW (2020) Eingang gefunden haben.

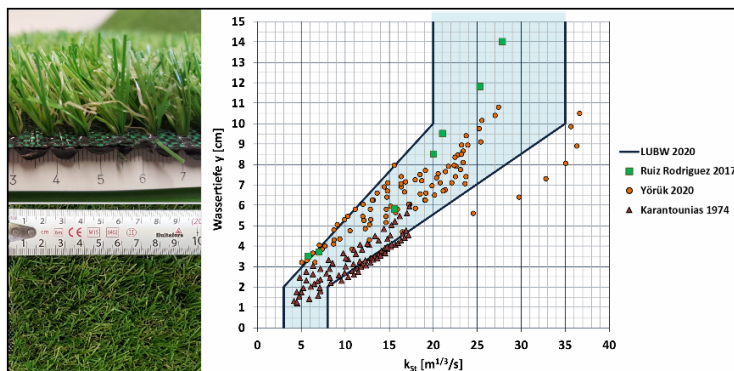


Abbildung 5: Homogener Kunstraseneinsatz im Laborversuch (links; © Ruiz Rodriguez) und Ergebnisse ausgewählter Laboruntersuchungen zum (Dünnschicht-)Abfluss auf Kunstrasen und Festlegung eines tiefenabhängigen Wertebereichs für den Rauheitsbeiwert k_{St} gemäß LUBW 2020 (rechts; © KIT/IWG)

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Bei natürlichen Oberflächen haben die Effekte der Abflusskonzentration einen erheblichen Einfluss auf den Fließwiderstand. Die vereinfachende Annahme einer einheitlichen Fließtiefe kann (z.B. im Rahmen von Beregnungsversuchen) zur Ermittlung von vergleichsweise „glatten“ Rauheitswerten führen. Auch im Strömungsmodell sind zur Simulation der Fließprozesse ggf. glattere Rauheitswerte zu wählen, da die Abflusskonzentration über die Modellgeometrie nicht abgebildet wird. Dieser Zusammenhang ist ggf. gegenläufig zum bisherigen Verständnis, für die Starkregenmodellierung grundsätzlich deutlich „rauere“ Widerstandsbeiwerte anzusetzen als in der Fließgewässerhydraulik und erklärt evtl. auch die große Streubreite der Literaturwerte.

Die von der LUBW (2020) veröffentlichten Wertespektren bei Verwendung der GMS-Formel sind nach derzeitigem Kenntnisstand für die Praxis durchaus geeignet und ermöglichen als Richtwert eine vergleichbare Qualitätssicherung. Über weiterführende Feld- und Laboruntersuchungen mit Fokus auf die hydraulisch relevanten Prozesse sollten die Angaben in den nächsten Jahren überprüft und ggf. angepasste Verfahren entwickelt werden.

Aufgrund der immensen Vielfalt und Veränderlichkeit der Oberflächenstrukturen in realen Einzugsgebieten sowie der fehlenden Möglichkeit einer

Modellkalibrierung wird eine Übertragung von Versuchsergebnissen bzw. Festlegung konkreter Parametersätze jedoch auch weiterhin mit erheblichen Unsicherheiten behaftet bleiben.

Für eine belastbare Einschätzung des Gefährdungspotentials sind daher jetzt und auch zukünftig umfassende Sensitivitätsstudien hinsichtlich der Parameterwahl in Bezug auf deren Auswirkungen auf die maßgeblichen Zielgrößen (Abflussganglinien, Fließwege, innerörtliche Überflutungsflächen) durchzuführen. Der hierzu notwendige Aufwand muss bei der Kostenkalkulation berücksichtigt werden und macht sich über die erhöhte Planungssicherheit bezahlt.

5 Literatur

- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2020): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Anhang 1a. Karlsruhe: LUBW.
- Zeisler, P. (2018): Erkenntnisse aus dem Standardreferenzverfahren und Optimierungserfordernisse. Impulsvortrag: Erfahrungsaustausch im Bereich der Modellierung von Starkregengefahrenkarten in Baden-Württemberg der LUBW in Tübingen.
- Seinbrich, A., Weiler, M., Leistert, H. (2015): Alles RoGeR? Modellierung von Sturzfluten aufgrund von Starkniederschlägen. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung.
- Smith M.W., Cox N.J., Bracken L.J. (2007): Applying flow resistance equations to overland flows. *Progress in Physical Geography* 31 (4): 363-387.
- Engman, E.T. (1986): Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff. Hg. v. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 112 (1): 39-53.
- Seibert, S., Auerwald, K., Fiener, P., Disse, M., Martin, W., Haider, J., Michael, A., Gerlinger, K. (2011): Surface runoff from arable land - a homogenized data base of 726 rainfall simulation experiments. CRC/TR32 Database (TR32DB). DOI: 10.1594/GFZ.TR32.2
- Ruiz Rodriguez E., Trost, L. (2017): Umgang mit Starkniederschlägen in Hessen. Auszug aus dem 3. Zwischenbericht. KLIMPRAX Starkregen Arbeitspaket 2. Hochschule RheinMain. Wiesbaden.
- Yörük, A. (2020): Empfehlung zur Modellparametrisierung von Sturzflutsimulationsmodellen. HTW Saar. Professur Wasserbau und Wasserwirtschaft. Saarbrücken.
- Karantounias, G. (1974): Dünnschichtabfluß auf stark geneigter Ebene. Karlsruhe, Univ., Diss., 1974. Karlsruhe (Mitteilungen des Institutes für Wasserbau und Kulturtechnik, Versuchsanstalt für Wasserbau "Theodor-Rehbock-Laboratorium", Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 162, S. 1-178).

Autoren:

Dr.-Ing Peter Oberle
Dr.-Ing. Andreas Kron
Tim Kerlin, M.Sc.
Univ.-Prof. Dr. -Ing. Dr. h.c. mult. Franz
Nestmann

Prof. Dr.-Ing. Ernesto Ruiz
Rodriguez

Institut für Wasser und
Gewässerentwicklung
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe

Fachbereich Wasserbau/ Wasserwirt-
schaft, FB Architektur und Bauingeni-
eurwesen
Hochschule RheinMain
Kurt-Schumacher-Ring 18
65197 Wiesbaden

Tel.: +49 721 608-4-8094
Fax: +49 721 608-4-2991
E-Mail: p.oberle@kit.edu

Tel.: +49 611 9495-1454
Fax: +49 611 9495-1490
E-Mail: ernesto.ruizrodriguez@hs-rm.de