



Hochschule **RheinMain**
Architektur und Bauingenieurwesen

Projekt KLIMPRAX Starkregen und Katastrophenschutz in Kommunen

Hinweise zur Berechnung und Erstellung von Starkregengefahrenkarten

in Hessen

Hochschule RheinMain

Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen

Arbeitsgruppe "Starkregen und Sturzfluten"

am Wasserbaulaboratorium

Prof. Dr.-Ing. Ernesto Ruiz Rodriguez

Nele Guthörl (M. Eng.)

Wiesbaden, Stand Juni 2021

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Hintergrund	3
Überflutungssimulation bei Starkregen	4
1. Niederschlags-Abfluss-Prozess im Einzugsgebiet	4
2. Simulationsmodelle und Mindestanforderungen	4
3. Abgrenzung des Untersuchungsgebiets/ des Modellgebiets	6
4. Eingangsgrößen	7
Topographie	8
Hydraulisch relevante Bauwerke und Strukturen	13
Oberflächenrauheit	15
Niederschlagsbelastung.....	18
Plausibilitätsprüfung des Modells/ der Ergebnisse	21
Untersuchung von Szenarien, Verhalten der hydraulischen Infrastruktur	23
Ergebnisdarstellung	24
Weitergehende Empfehlungen	26
Quellenangaben	I

Hintergrund

Starkniederschläge sind Niederschläge mit einer vergleichsweise sehr hohen Intensität und einer kurzen Dauer, die in ihrer räumlichen Ausdehnung stark begrenzt sind. Die daraus resultierenden Sturzfluten stellen Städte und Gemeinden vor besondere Herausforderungen. Trotz der Verbesserung der Unwetterwarnungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ist es nach wie vor nicht möglich mit ausreichender Lage- und Intensitätsinformation und mit ausreichender Vorhersagezeit vor Starkregenereignisse zu warnen. Anders als bei einem Flusshochwasser mit Vorhersagesystem steht den Betroffenen keine ausreichende Vorwarnzeit zur Verfügung, um ereignisspezifische Schutzmaßnahmen ergreifen zu können. Bau- und Flächenvorsorge in den Städten und Gemeinden und die persönliche Verhaltensvorsorge der Betroffenen während eines Starkregenereignisses sind die Aktionsfelder eines Starkregenrisikomanagements.

Laut LAWA Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement (2018) muss das Ziel eines gemeinsamen Starkregenrisikomanagements darin liegen, das Risiko durch starkregen- und sturzflutbedingte nachteilige Folgen auf den Menschen, auf Gebäude und Infrastruktur, die Umwelt, das Kulturerbe und wirtschaftliche Tätigkeiten herabzusetzen. Unbedingt notwendig dafür ist die systematische Analyse der Gefährdungs- und Schadenspotentiale durch eine Ermittlung der Überflutungsgefährdung. Das Land Hessen stellt in einer ersten Stufe eine landesweite **Starkregen-Hinweiskarte für Hessen** zur Identifizierung von besonders durch Starkregen gefährdete Kommunen bereit.

Auf der Gemeindeebene kann in einer zweiten Stufe mit Hilfe von **kommunalen Fließpfadkarten** eine erste Abgrenzung besonders gefährdeter Bereiche in den Kommunen erfolgen.

Entscheidungshilfen, welche Kartenprodukte für welche Kommunen geeignet sind, finden Sie unter:

<https://www.hlnug.de/?id=11199>

In der dritten Stufe ist die **Starkregen-Gefahrenkarte** auf Basis einer komplexen hydrodynamischen Modellierung eine belastbare Planungsgrundlage und stellt ergänzend zur kommunalen Fließpfadkarte für das gewählte Starkregenszenario die maximale Überflutungsausdehnung und die maximalen Überflutungstiefen dar, ggf. können Fließgeschwindigkeiten abgeleitet werden.

Die nachfolgenden Arbeitshinweise beziehen sich ausschließlich auf die letzte der drei genannten Stufen und dienen einer einheitlichen Erstellung von Starkregen-Gefahrenkarten in Hessen. Sie schildern eine Zusammenfassung der Erfahrungen aus der Erarbeitung von Starkregen-Gefahrenkarten für die ländlich geprägten Pilotgemeinden im Rahmen des Projektes KLIMPRAX Starkregen und Katastrophenschutz in Kommunen.

Überflutungssimulation bei Starkregen

1. Niederschlags-Abfluss-Prozess im Einzugsgebiet

Der Niederschlags-Abfluss-Prozess in einem natürlichen Einzugsgebiet ist ein sehr komplexer Vorgang der trotz des stetigen Erkenntnisgewinns in der Forschung **nur vereinfacht abgebildet** werden kann. In der Ingenieurhydrologie wird der Niederschlags-Abfluss-Prozess stark vereinfacht in **zwei Teilprozesse** unterteilt. Im Teilprozess der **Abflussbildung** wird der Anteil am Niederschlag bestimmt, der als Oberflächenabfluss die Hänge hinunter strömt. Dieser wird als effektiver oder abflusswirksamer Niederschlag bezeichnet. Je nach Detaillierungsgrad der Modelle sind Bodentyp, Bodennutzung, Hangneigung und die aktuelle Bodenfeuchte die Parameter die über den Infiltrationsanteil des Niederschlags entscheiden. Der nachfolgende Teilprozess der **Abflusskonzentration** beschreibt dann den eigentlichen Oberflächenabfluss des abflusswirksamen Niederschlags. Die Hangneigung, das Gelände relief mit dem Gewässernetz (Fließpfade) und die Bodennutzung mit deren hydraulischer Oberflächenrauheit sind die bestimmenden Parameter des Oberflächenabflusses.

Die bislang in der Ingenieurhydrologie verwendeten Black-Box-Modelle (z.B. das Einheitsganglinienverfahren oder die parallel-Speicher-Kaskadenmodelle) bilden den Niederschlags-Abfluss-Prozess zwar ab und berechnen für definierte Kontrollpunkte die jeweilige Abflussganglinie, der Abflussprozess zwischen den Kontrollpunkten wird aber nicht betrachtet. Damit können sie die inhaltlichen Anforderungen der Starkregen-Gefahrenkarten nicht erfüllen. Zur Ermittlung der in den Starkregen-Gefahrenkarten darzustellende max. Überflutungsausdehnung und max. Überflutungstiefen während des Starkregenereignisses ist eine 2-Dimensionale instationäre hydrodynamische Simulation des Oberflächenabflusses erforderlich.

2. Simulationsmodelle und Mindestanforderungen

Auf der Grundlage der vorhandenen bewährten 2-Dimensionalen Flussschlauch-Simulationsmodelle bieten mehrere Softwarehersteller Erweiterungen oder Anpassungen an, mit deren Hilfe auch der 2-Dimensionale Oberflächenabfluss bei Starkregen simuliert werden kann. Es lassen sich grob zwei Modellfamilien unterscheiden. Die Raster orientierten Modelle (i.d.R. als GIS-Applikation konzipiert) mit einer einheitlichen Rasterweite und die Finiten Element Modelle (FEM) Modelle mit variabler Netzweite. Grundsätzlich sind beide Modellkonzepte geeignet den Oberflächenabfluss zu simulieren.

Folgende Mindestanforderungen sollte das verwendete Modell jedoch erfüllen:

- Modellauflösung (Raster- oder Netzweite) von mind. 1 m zur ausreichenden Abbildung der hydraulisch relevanten Oberflächengeometrie (z.B. Gräben, Mauern). Finite Element Modelle (FEM) mit variabler Netzweite können Geländebruchkanten und die Geometrie der hydraulisch relevanten Oberflächengeometrie sehr gut abbilden.
- Zur Berücksichtigung der besonderen Erscheinungsform von Starkniederschlägen sollte die Eingabe von räumlich und zeitlich differenzierten Starkniederschlägen (RADOLAN Niederschlagsradardaten) auf das Einzugsgebiet möglich sein (vgl. Abschnitt Niederschlagsbelastung).
- Jedem Raster- oder FEM Element muss eine Oberflächenrauheit entsprechend der Oberflächennutzung zugewiesen werden können.
- Die Eingabe von wasserstandsabhängigen Oberflächenrauheiten sollte möglich sein (vgl. Abschnitt Oberflächenrauheit)
- Zur Plausibilitätskontrolle sollte das verwendete Modell an ausgewählten Kontrollquerschnitten zu jedem Zeitpunkt der Simulation die Abflussganglinie und deren Abflussvolumen bereitstellen (vgl. Abschnitt Niederschlagsbelastung).
- Das verwendete Modell sollte die Möglichkeit anbieten, hydraulische Grundelemente (z.B. Durchlässe, Brückendurchlässe, Verrohrungen, usw.) hydraulisch vollständig abzubilden. Die Möglichkeit eine Verklausung verschiedener hydraulischer Grundelemente im Einzugsgebiet als Szenario vorzuwählen wäre wünschenswert.
- Bei Simulationen von Ortslagen mit ländlichen Charakter kann auf eine numerische Kopplung des Oberflächenabflusses mit dem Abfluss im Kanalnetz verzichtet werden.

3. Abgrenzung des Untersuchungsgebiets/ des Modellgebiets

Bei der Abgrenzung des Untersuchungsgebietes, also des Modellausschnitts, bei dem mit Hilfe des Simulationsmodells der Niederschlags-Abfluss-Prozess berechnet werden soll, sollte folgendes beachtet werden:

- Die Grenzen des Einzugsgebietes der Gewässer sind zu beachten. Wenn möglich ist der Modellraum bis zur oberen Wasserscheide des Teileinzugsgebietes, in dem sich die betrachteten Ortslagen befinden, zu führen. Sofern eine Fließpfadkarte für das betrachtete Gebiet vorliegt, zeigt diese die Hauptfließpfade und die Grenzen des Einzugsgebietes.
- Da konvektive Starkniederschläge eine vergleichsweise kurze Dauer, eine kleine Ausdehnung und eine markante zeitliche und räumliche inhomogene Intensitätsverteilung besitzen, sollte die Ausdehnung des Modellausschnittes die Größenordnung von $A_{Ei} < 5 \text{ km}^2$ möglichst nicht überschreiten. Ggf. müssen bei der Erstellung der Starkregen-Gefahrenkarten für eine Gemeinde das Gewässereinzugsgebiet in mehrere Teileinzugsgebiete unterteilt werden und entsprechend vielen Simulationen des Niederschlags-Abfluss-Prozesses durchgeführt werden.

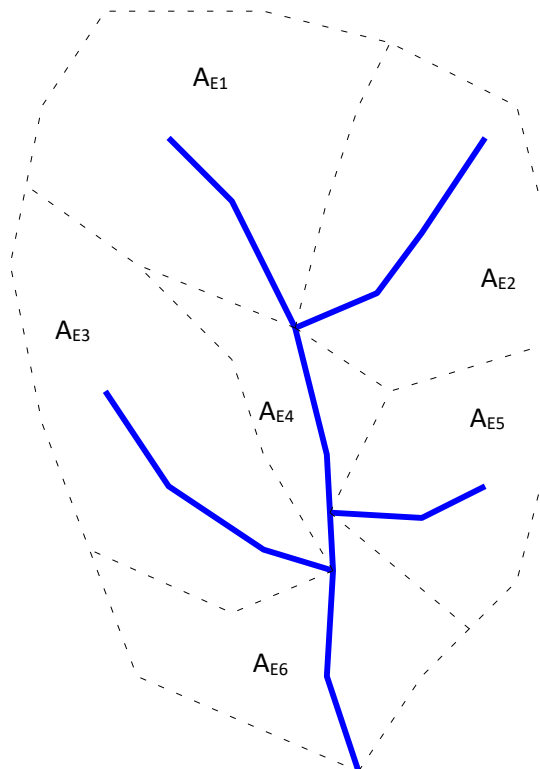


Abbildung 1: Abgrenzung und Einteilung des Untersuchungsgebietes

Es ist zu beachten, dass die erzielten Ergebnisse (Starkregen-Gefahrenkarte), unabhängig von den sorgfältig gewählten Modelleingangsgrößen nur ein mögliches Szenario der Wirklichkeit sind. Reale Starkregenereignisse können aufgrund von sich verändernden Randbedingungen (z.B. Verklausung von Brückendurchlässen) zu anderen Ergebnissen führen.

4. Eingangsgrößen

Eingangsdaten für eine zweidimensionale instationäre hydraulische Modellierung sind:

- Topographie: digitales Geländemodell (DGM).
- Gebäudebestand und hydraulisch relevante Bauwerke/ Infrastruktur.
Alle Bauwerke und Infrastruktureinrichtungen, die den Oberflächenabfluss maßgeblich beeinflussen, sind zu erfassen (Gebäude, große und kleine Mauern, Brücken, Durchlässe, Querschnitt der Gewässer und Gräben, kleine Verwallungen, etc.). Um Angebote vergleichbar zu machen wird vorgeschlagen, eine erste Inventarliste maßgeblicher Bauwerke und Infrastruktureinrichtungen zu erarbeiten und diese für die Angebotsabgabe zu Grunde zu legen. In Abstimmung mit den Bearbeitern, kann diese während der Projektbearbeitung angepasst werden. Letztendlich muss ein akzeptabler Kompromiss zwischen Erfassungsaufwand und der Güte der Ergebnisse erzielt werden.
- Landnutzungsdaten zur Bestimmung des effektiven und abflusswirksamen Niederschlags und zur Bestimmung der hydraulischen Oberflächenrauheit.
- Niederschlagsbelastung (RADOLAN Niederschlagsradardaten als Modellinput).

Als Datengrundlage sind mindestens folgende Geodaten erforderlich:

- Digitales Geländemodell Auflösung von mindestens 1 m oder
- Airbone-Laser-Scan-Daten
- Gebäudebestand (ALKIS)
- Landnutzungen (ATKIS oder DLM)
- Aktuelle Digitale Orthophotos (nicht älter als 2 Jahre)
- historische RADOLAN-Radarniederschlagsdaten des DWD

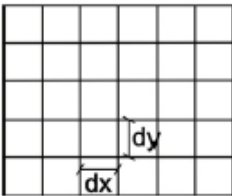
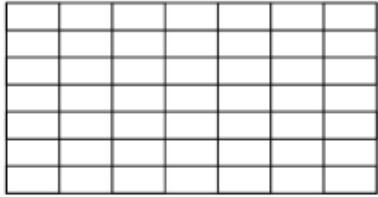
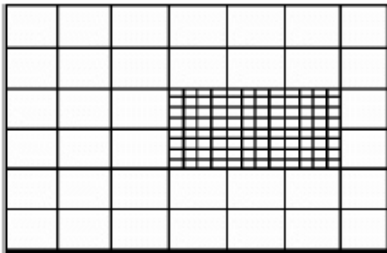
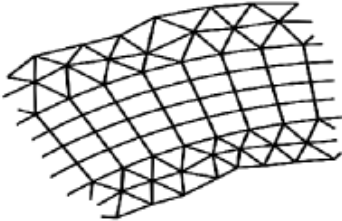
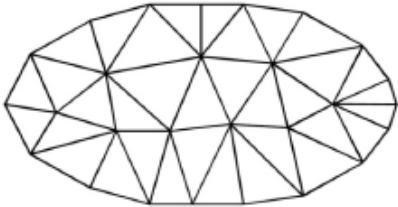
Die Güte der Modellergebnisse hängt unmittelbar von der Güte der Eingangsdaten ab. Die Aufbereitung dieser ist der aufwändigste Arbeitsschritt und sollte generell mit großer Sorgfalt erfolgen. Hierfür ist eine Ortsbegehung unbedingt zu empfehlen. Zur Verifizierung der realen Nutzung haben sich im Projekt KLIMPRAX Starkregen Drohnenflüge bewährt.

Im Folgenden werden einige Hinweise zu den verschiedenen Eingangsgrößen gegeben.

Topographie

Die Darstellung der Topographie im zu untersuchenden Gebiet erfolgt durch ein Geländemodell in Form eines Berechnungsgitters. Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie ein solches zweidimensionales Berechnungsgitter aufgebaut sein kann (vgl. DWA M 543-3):

Tabelle 1: Auswahl möglicher zweidimensionaler Berechnungsgitter (Quelle: DWA M 543-3)

Gittertyp	Beschreibung	Ansicht
Strukturiert	Geordnete Knotenabfolge durch eindeutige Nachbarschaftsbeziehungen	
Orthogonal, strukturiert	Rechtwinklige Gitterzellen	
Block-strukturiert	Variable Gitterabstände (bereichsweise detailliertere Abbildung der Topographie als bei äquidistanten Gittern möglich)	
Krummlinig, strukturangepasst	z. B. entlang der Stromlinien im Fluss strukturiert und im Vorland unstrukturiert	
Unstrukturiert	Knoten ohne feste Regeln beliebig verknüpft (bessere Anpassung an das Gelände als bei strukturierten Gittern möglich)	

Welcher Gittertyp verwendet werden muss hängt meist von der eingesetzten Software ab. Bei der Auswahl eines Berechnungsgitters, bzw. bei der Umwandlung des ursprünglichen Geländemodells ist sicherzustellen, dass die kleinräumigen Höhenverhältnisse nicht verfälscht (vereinfacht) werden und lokale Strukturen (z. B. Mauern) zusätzlich hydraulisch sinnvoll integriert werden können. Folgendes ist zu beachten:

Um kleinräumige Strukturen wie z.B. Mauern, Gräben etc. in das Modell plausibel einzuarbeiten sollte die Auflösung eines rasterbasierten Modells (Finite-Differenzen Modell, FDM) nicht geringer als 1 m sein. In besonders fein strukturierten Bereichen (enge Häuserfluchten, schmale Grabensysteme) wird eine Auflösung von Halb-Meter-Rastern empfohlen.

Unregelmäßige Dreiecks- bzw. Vierecksnetze (Finite Elemente Modell, FEM bzw. Volumen Modelle, FVM) können stellenweise auch größerer Elemente haben, jedoch sollten auch hier kleinräumige Strukturen (z.B. Straßenbereiche, Dämme, Mauern etc.) durch entsprechend kleine Elemente repräsentiert werden. Die Auflösung sollte folglich den topographischen Gegebenheiten im Gelände angepasst sein.

Es gilt, je geringer der Abstand der einzelnen Gitterpunkte ist, desto detaillierter wird die Geländetopographie erfasst. Mit einer höheren Anzahl an Berechnungsknoten erhöht sich allerdings auch die Rechenzeit. Es ist daher unbedingt eine Abwägung zwischen Modellgenauigkeit und akzeptabler Rechenzeit notwendig. Außerdem sollte auch die Auflösung der zu Grunde liegenden geometrischen Eingangsdaten beachtet werden, da die Erstellung eines feinen Berechnungsnetzes auf Basis von Interpolation sehr grober Ausgangsdaten meistens nur scheinbare Genauigkeiten erzeugen kann.

Unregelmäßige Gitterstrukturen haben den Vorteil, dass komplexe Geländeformen detailliert nachgebildet werden können, in eher flachen und weniger relevanten Bereichen aber größerer Elementgrößen gewählt werden können und dadurch Rechenkapazitäten optimal ausgenutzt werden könne.

Netzerstellung mit Airbone-Laserscan-Daten (ALS)

ALS-Daten beschreiben die Geländeoberfläche mit mindesten 4 Punkten/m² sehr genau, wobei durch die hohe Messdichte auch kleinere Strukturelemente wie Straßen- und Bordsteinkanten erfasst werden können. Die Bestimmung der Geländehöhen ist innerhalb der ALS-Daten über die Registrierung von Signallaufzeiten und –winkeln möglich. Die Daten enthalten daher neben der Geländehöhe auch

weiterer Informationen, wie zum Beispiel zur Vegetationsdichte oder zur Bebauung. Das Filtern der Bodenpunkte ist mit einfachen Geoinformationsprogrammen wie ArcGIS möglich.

In topographisch wenig ausgeprägten Bereichen liegen in den ALS-Daten meist deutlich mehr Messpunkte vor, als für eine repräsentative Beschreibung der Oberfläche notwendig wären. Die Bearbeitung der gesamten Daten wäre aufgrund der hohen Datenmenge mit einem enormen Rechenaufwand verbunden. Um diesen zu reduzieren, müssen die Daten ausgedünnt werden, wobei eine möglichst genaue Darstellung der Geländeoberfläche weiterhin gegeben sein muss. Eine qualitativ hochwertige Ausdünnung kann zum Beispiel durch einen Netzgenerator erreicht werden.

Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades ist bei der Netzerstellung mit einem Netzgenerator meist eine deutliche Zeitersparnis gegenüber einer manuellen Netzerstellung gegeben. Dennoch ist an dieser Stelle unbedingt zu betonen, dass auch ein automatisch generiertes Netz mit hydraulischen Sachverstand erstellt und geprüft werden muss. Eine Nachbearbeitung ist fast immer erforderlich. Abbildung 2 zeigt eine mögliche Fehlerquelle: Bei der Filterung nicht erkannte Vegetation, welche auf das Berechnungsnetz übertragen wurde.

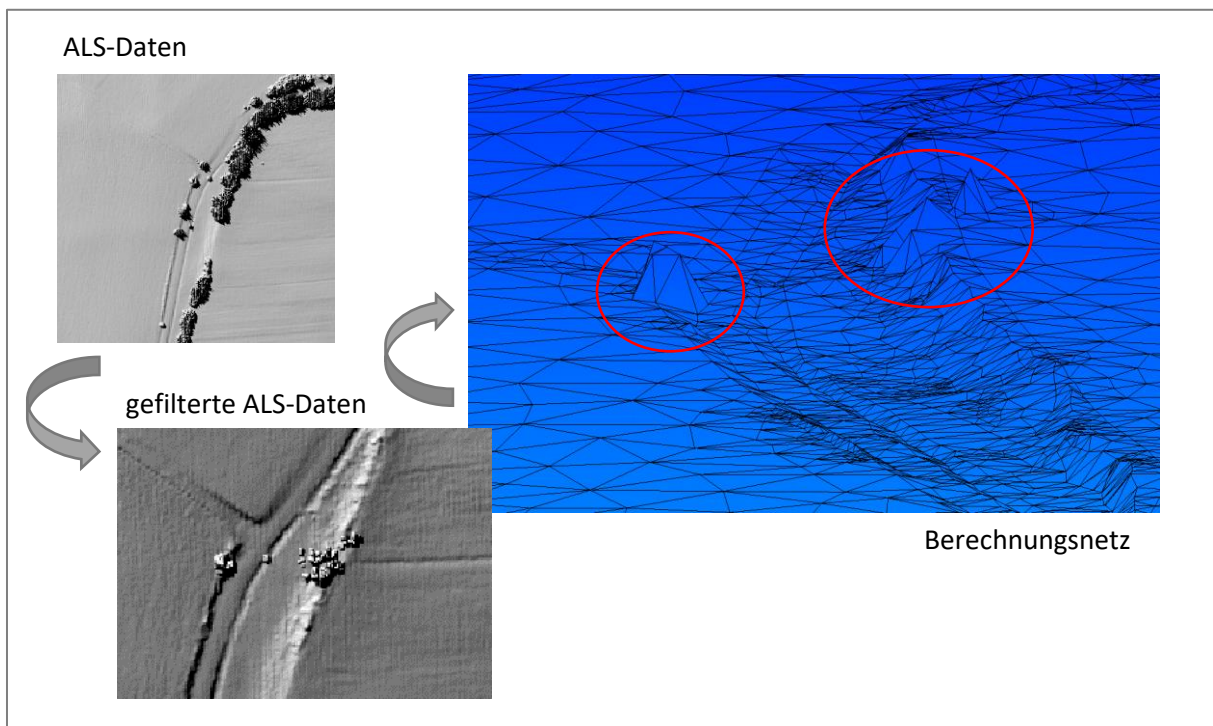


Abbildung 2: Fehler in gefilterten ALS-Daten

Bruchkanten in Berechnungsnetzen

Um die natürliche Topographie bestmöglich abzubilden, sollten mit Hilfe des Netzgenerators sogenannte Bruchkanten bzw. Zwangskanten generiert werden. Eine weitere Möglichkeit ist diese Bruchkanten in Form von Polylinien vorzugeben. Bruchkanten sind Linien, auf denen bei der Netzerstellung erzeugte Verbindungslinien benachbarter Stützstellen liegen müssen. Sie werden eingesetzt, um die Abbildungsgenauigkeit entlang linearer Strukturen zu erhöhen.

Abbildung 3 zeigt deutlich, dass durch die Generierung von Zwangskanten lineare Strukturen wie Geländeübergänge und Straßen plausibler abgebildet werden.

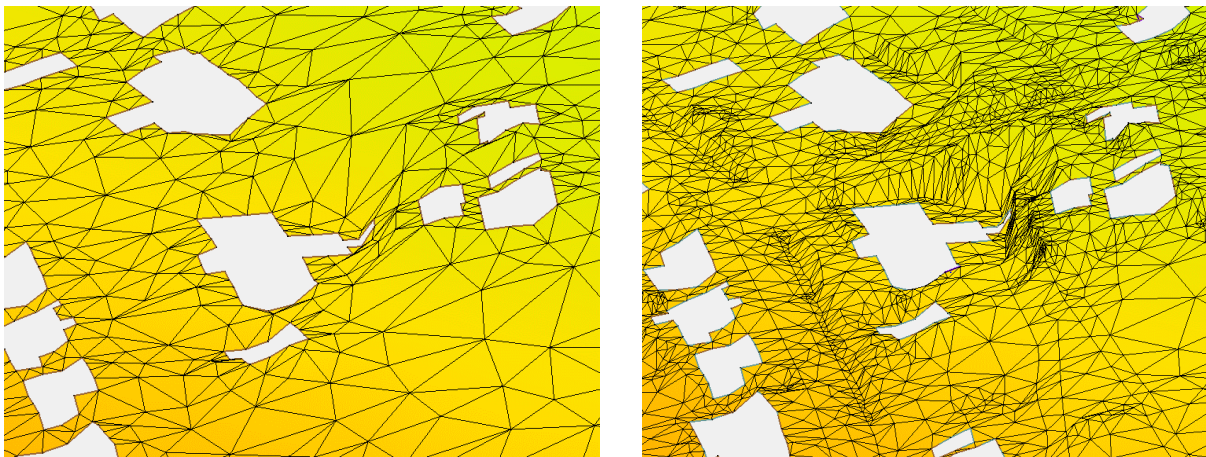


Abbildung 3: Berechnungsnetz ohne Bruchkanten (links) und mit Bruchkanten (rechts)

Eine Hilfe bei der Digitalisierung von Bruchkanten können die ALK- Flurstücksgrenzen sein. Jedoch sollten diese vor der Einarbeitung in ein Berechnungsnetz unbedingt detailliert geprüft werden. Nicht jede Flurstücksgrenze stellt auch eine topographisch vorhandene Bruchlinie dar.

Manche Netzgeneratoren bieten die Möglichkeit über einen Parameter die Feinheit der Bruchkantengenerierung zu steuern. Je nach Software gibt es hier unterschiedliche Bezeichnungen bzw. Vorgaben. Es handelt es sich bei dem Parameter meist um einen Schwellenwert, ab wann Bruchkanten im Gelände erkannt werden sollen. Der Parameter sollte in einem iterativen Vorgehen bestimmt werden, wobei ein Wertebereich von 5 – 30 cm ausgetestet werden sollte.

Da mehr Bruchkanten auch automatisch mehr Knotenpunkte, und damit höherer Rechenzeiten bedeuten wird empfohlen, den Parameter flächenabhängig zu wählen. In Bereich von Straßen können somit detailliertere Bruchkanten generiert werden (Schwellenwert = 5 – 15 cm), als in weniger relevanten Bereichen, wie zum Beispiel auf landwirtschaftlichen Flächen (Schwellenwert = 15 – 30 cm).

Darstellung von Fließgewässern

ALS-Daten sind im Bereich des Gewässers normalerweise ungeeignet, da sie zum einen in dicht bewachsenen Bereichen, wie es Flussufer meist sind, eher ungenau sind und zum anderen im Gewässer selbst nicht das Flussbett, sondern die Wasseroberfläche wiedergeben.

Da bei der Simulation von Starkregenereignissen allerdings nicht die Ausuferung einer Hochwasserwelle aus dem Flussbett im Vordergrund steht und dieses deshalb auch nicht 1:1 wie in der Realität abgebildet sein muss, ist zu prüfen inwiefern auch eine vereinfachte Aufbereitung des Berechnungsnetzes im Bereich eines Gewässers ausreichend ist. Unter Beachtung der Durchgängigkeit kann ein Flussschlauch zum Beispiel auf Basis der ALS-Daten womöglich kostengünstiger erstellt werden. Um die Durchgängigkeit und damit die Plausibilität zu gewährleisten sollten fehlerhaft abgebildete Bereiche (z.B. Brücken oder Bereiche dichter Vegetation) bei dieser Vorgehensweise händisch korrigiert werden.

Können damit nur unzureichende Ergebnisse erzielt werden, oder spielt das Gewässer bei der Simulation eine wesentliche Rolle sollten für die Aufbereitungen des Gewässers Querprofile und die Uferlinie vermessen werden.

Abbildung 4 zeigt wie dichte Vegetation am Ufer zu einem eher unregelmäßigen Flussschlauch, erstellt aus ALS Daten führt. Solange solche Unregelmäßigkeiten im Flussnetz allerdings weder den Abfluss im Fließgewässer (solange die Durchgängigkeit gewährleistet ist) noch die Abflussbildung auf der Fläche beeinflussen, können sie für die Simulation von Starkregen aufgrund der hohen Kostenersparnis (bei nicht benötigter Gewässervermessung) in Kauf genommen werden.

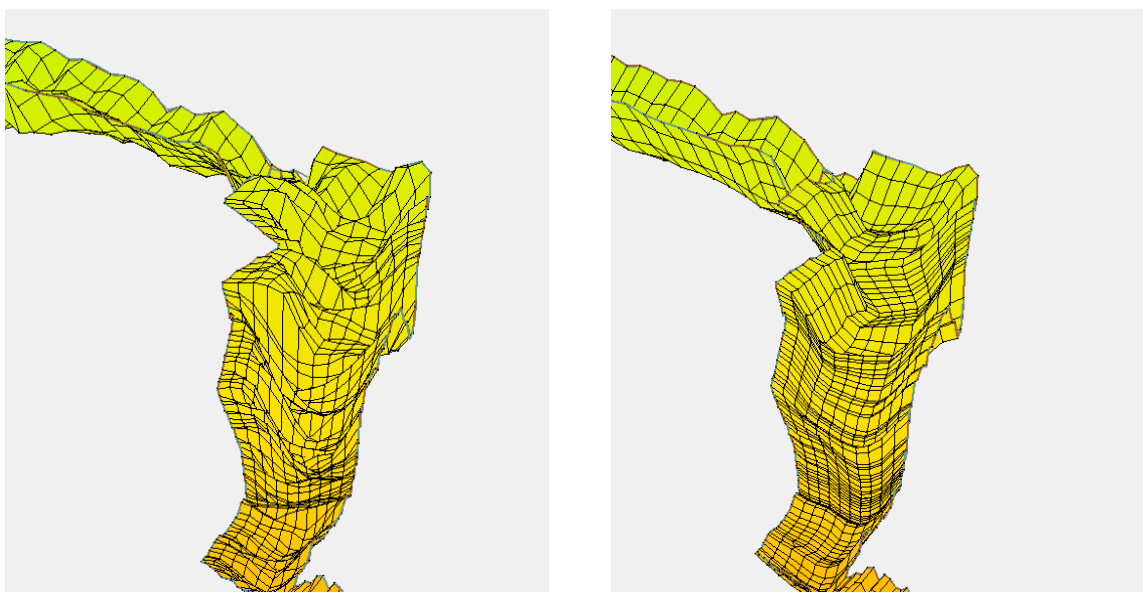


Abbildung 4: Vergleich des Flussschlauchs erstellt aus ALS-Daten (links) und Querprofilen (rechts)

Weiterführende Informationen zur Qualitätsanforderungen von Berechnungsgittern finden sich im DWA Merkblatt 543-3.

Die gewählten Methoden zur Netzerstellung sollten vom Auftragnehmer klar erläutert werden.

Hydraulisch relevante Bauwerke und Strukturen

Um die Plausibilität der Modelle zu gewährleisten sollten nicht durchströmbare Elemente und durchströmbare Elemente in die Modelle integriert werden. Je nach Software und Art des Berechnungsnetzes gibt es hierfür unterschiedliche Vorgehensweisen.

Generell ist bei 2D-Berechnungsgittern allerdings zu beachten, dass zu einem Punkt (X,Y) auch nur eine Höheninformation vorliegen kann (Z). Dem entsprechend können in den Modellen keine senkrechten Wände abgebildet werden. Da die Flachwassergleichungen ab einer Geländeneigung von ca. 20 – 30 % zunehmend an Gültigkeit verlieren, können sehr steil geneigte Bereiche im Modell zudem zu numerischen Problemen führen (Musall 2011, S. 90). Für senkrechte bzw. sehr steile Wände muss daher eine Ersatzdarstellung gewählt werden:

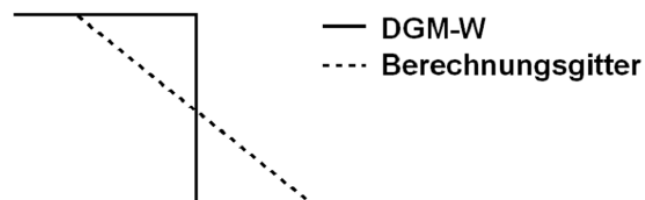


Abbildung 5: Ersatzdarstellung für senkrechte Wände (Musall 2011)

Folgende Tabelle gibt eine Übersicht über einzelne Bauwerke, die in die das Modell eingearbeitet werden sollten.

Tabelle 2: für die Starkregensimulation hydraulisch relevante Bauwerke

Bauwerk	Möglichkeiten der Einarbeitung	
	Strukturierte Vierecksvermaschung (FDM)	Unstrukturierte Dreiecksvermaschung (FEM)
Nicht überströmbare Elemente (z.B. Gebäude)	Addition von Gebäudehöhen (Annahmen) auf das eigentliche Geländemodell. Ausstanzen aus dem Geländemodell. Ausstanzen aus der vorgegebenen Berechnungsfläche.	Ausstanzen aus dem Berechnungsnetz, Definition der Ränder als undurchströmbare Wand. Darstellung als Inaktive Netzelemente.
Überströmbare Elemente (z. Bsp. Mauern)	Addition der Bauerwerkshöhe auf das eigentliche Geländemodell. Es ist darauf zu achten, dass durch die Rasteranordnung und –Auflösung keine unplausiblen Fließwege zwischen Bauwerken entstehen.	Addition der Bauerwerkshöhe auf das eigentliche Geländemodell, zu steile Wände sind zu vermeiden.
Durchlässe und Verrohrungen	Definition einer „Einlauf-„ und einer „Auslaufzelle“	Darstellung mittels 1D-Bauwerken
Durchströmbare Bauwerke (Brücken, Unterführungen etc.)	Ausstanzen aus dem Geländemodell. Darstellung einer Bauwerksoberkante ist nicht immer möglich.	Ausstanzen aus dem Geländemodell. Angabe einer Konstruktionsunterkante zur Begrenzung des Durchflusses.
Größere Einlaufbauwerke (in die Kanalisation)	Definition einer „Entnahme-zelle“	Definition eines Knotenpunkts als Modell-Auslauf
Gräben (Straßengräben, Feldgräben etc.)	Subtraktion der tiefe vom eigentlichen Geländemodell.	Subtraktion der tiefe vom eigentlichen Geländemodell, zu Steile Wände sind zu vermeiden.

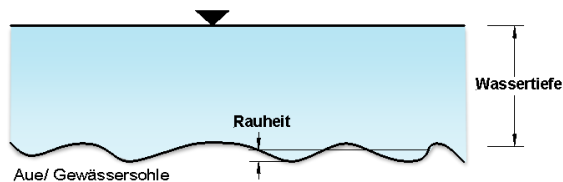
Oberflächenrauheit

Für die Simulation des Oberflächenabflusses an Steilhängen werden aktuell dieselben hydraulischen Ansätze verwendet wie zur Berechnung des Abflusses in Gewässern und auf flachen Überflutungsflächen auf den Auen. Die nachfolgende Tabelle und Abbildung zeigen die unterschiedlichen Ausprägungen von wichtigen hydraulischen und geometrischen Randbedingungen für den steilen Oberflächenabfluss und für die Wasserausbreitung auf den vergleichsweise flachen Gewässerauen.

Tabelle 3: Ausprägung der hydraulischen und geometrischen Randbedingungen im Vergleich Gewässer mit steiler Hanglage

Parameter	Ausprägung	
	Gewässer und Aue	Steile Hanglage
Gefälle	klein wenige ‰ bis 5%	groß 5% bis über 100%
Wassertiefe	groß Dezimeter bis mehrere Meter	klein Dünnschichtabfluss bis Dezimeter
Rauheit	kleiner als Wassertiefe	größer als Wassertiefe

Flusshydraulik: Wassertiefe \gg Rauheit



Oberflächenabfluss: Wassertiefe \ll Rauheit

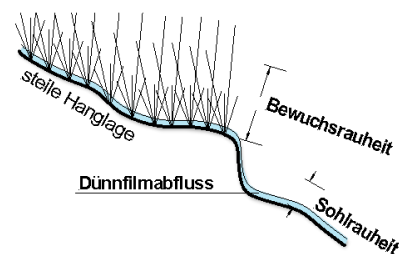


Abbildung 6: Ausprägung der hydraulischen und geometrischen Randbedingungen im Vergleich Gewässer mit steiler Hanglage

Es ist zu beachten, dass die Rauheitswerte insbesondere bei natürlichen und vegetationsbehafteten Nutzungen von der Überflutungstiefe abhängen und bei kleinen Überflutungstiefen rauer gewählt werden müssen. Da bei Starkregenüberflutungen flächig geringe Überflutungstiefen auftreten, bedeutet das für die hydrodynamische numerische Modellierung von Starkregengefahrenkarten, dass mit überflutungstiefenabhängigen Rauheitswerten zu rechnen ist, sofern dies in der verwendeten Software berücksichtigt werden kann.

In der nachfolgenden Tabelle 4 sind auf Basis aktueller Forschungsarbeiten¹ Empfehlungen für die Wahl der Rauheiten für den Berechnungsansatz nach der Fließformel von Gauckler-Manning-Strickler (k_{St} -Werte) für unterschiedliche Landnutzungsarten aufgeführt. Bei der Berücksichtigung fließtiefenabhängiger Rauheitswerte wird folgende Grenzziehung vorgeschlagen:

- Bis zu einer Überflutungstiefe von 2 cm wird der „**Dünnpilm**“-Wert (siehe nachfolgende Tabelle) als Rauheitswert verwendet.
- Ab 10 cm wird der Rauheitswert aus der Literatur (siehe nachfolgende Tabelle 4, rechte Spalte) angesetzt.
- Dazwischen wird interpoliert (ggf. auch in Stufen).

Tabelle 4: Empfehlungen für Rauheitswerte nach Gauckler-Manning-Strickler (k_{St} -Werte) zur Modellierung von Starkregen-Gefahrenkarten (Stand 07/2020 – zukünftige Änderungen möglich)

	Rauheit nach Gauckler-Manning-Strickler k_{St} [$m^{1/3}/s$]	
	Dünnpilm bis 2 cm	ab 10 cm
Ackerland	8-12	15-30
Ackerland, verschlamm	10-15	20-35
Gartenland	3-6	5-15
Wald, Gehölz, Laub- und Nadelholz	3-6	5-20
Grünland	5-10	20-35
Rasen	3-8	20-35
Siedlungsfläche	6-15	10-20
Dachflächen *	50-60	
Fließgewässer, Stehendes Gewässer *	15-35	
Fließgewässer, verschlamm *	25-50	
Fließgewässer, stark bewachsen *	5-20	
Wildbach *	10-15	
Gerinne, gemauert, Beton *	50-80	
Landwirtschaftlicher Weg (Kies, Schotter) *	20-40	
Straße, Weg (Asphalt) *	40-60	
Straße, Weg (gepflastert) *	30-50	

* Für diese Nutzungsarten sind keine Dünnpilmabflüsse anzusetzen.

¹ Forschungsvorhaben KLIMPRAX, Labormessungen am Wasserbaulaboratorium der Hochschule RheinMain; Literaturstudie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) am Fachbereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik sowie Labormessungen an der Hochschule für Technik und Wirtschaft, Saarbrücken

Für die zur Verwendung der Fließformel nach Darcy Weisbach benötigten äquivalenten Sandrauheiten k_s , können zurzeit keine durch Laborversuche oder aus Literaturquellen belastbaren Werte für den Dünnfilmabfluss angegeben werden. Das Umrechnen der in der nachfolgenden Tabelle angegebenen Rauheit k_{St} in äquivalente Sandrauheiten k_s ergeben für den Dünnfilmabfluss keine sinnvollen Ergebnisse. Beim Einsatz dieser Fließformel ist auf den Gültigkeitsbereich des Moody-Diagramms zu achten.

Die in der Tabelle 4 angegebenen Differenzierung und Empfehlungen zu Rauheitswerten dienen als Orientierung zur Modellierung von Starkregengefahrenkarten. Es ist wichtig, dass Straßen, Wege und Plätze oder andere Nutzungen mit entsprechend glatter Oberfläche ohne Vegetation, insbesondere bei entsprechendem Gefälle, gut abgebildet sind. Wenn es im konkreten Bearbeitungsfall sinnvoll erscheint, kann von Empfehlungen für die Rauheitswerte auch abgewichen werden.

Die getroffenen Annahmen sollen dann im Erläuterungsbericht zur Starkregen Gefahrenkarte erläutert werden. Zur Nachvollziehbarkeit der gewählten Rauheitsannahmen müssen diese in Kartenform dargestellt werden. Während in der Karte die differenzierten Landnutzungen dargestellt werden, müssen in der Legende und im Erläuterungsbericht die jeweils angesetzten Rauheitswerte pro Landnutzungsart tabellarisch aufgeführt werden. Wurde mit überflutungstiefenabhängigen Rauheitswerten gerechnet, so muss jeweils der minimale und der maximale Wert sowie die Grenzwerte des jeweils gültigen Tiefenbereichs aufgeführt werden.

Es ist zu beachten, dass die oben genannten Rauheitswerte weiterhin Thema laufender Forschungsarbeiten sind.

Niederschlagsbelastung

Bei einer räumlich differenzierten Darstellung des Oberflächenabflusses spielt die Heterogenität der Abflussbildung im Raum eine wesentlich größere Rolle, als bei der Abbildung einer Abflussganglinie am Gebietsausgang. Die Eingangsinformationen für Starkregensimulationen müssen folglich in einer räumlichen Parameterstruktur vorliegen, um das Abflussgeschehen im Raum realitätsnah abzubilden. Bisher war dies gerade bei Niederschlagsdaten nicht der Fall. Zur Simulation wurden oftmals Niederschlagsintensitäten aus dem KOSTRA-Katalog des DWD ausgewählt, welche auf den Aufnahmen der punktuellen Niederschlagsmessstationen basieren. Da gerade Starkregen allerdings durch extrem hohe Intensitäten auf sehr kleinem Raum (wenige km²) gekennzeichnet sind, und gerade diese von den Niederschlagsstationen nur unzureichend erfasst werden, sind solche Annahmen für die realitätsnahe Simulation von Starkregen nicht geeignet.

Durch die zur Verfügung stehenden RADOLAN Niederschlagsdaten wird eine räumlich differenzierte Abbildung von Niederschlagsintensitäten möglich. Es handelt sich hierbei um die radargestützte Analyse stündlicher Niederschlagshöhen im Echtzeitbetrieb des DWD. Das Verfahren liefert seit 2001 flächendeckende, räumlich und zeitlich hochaufgelöste quantitative Niederschlagsdaten, welche online in verschiedenen Formaten frei und kostenlos zur Verfügung stehen. Grundlage hierfür bilden das Messnetz aus 18 C-Band Radarstationen mit einem Erfassungsbereich von 150 km in Kombination mit den Ombrometern des Niederschlagsmessnetzes des DWD und der Bundesländer. Zum Download zur Verfügung stehen die Daten in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten (RY bzw. YW-Daten) oder einer Stunde (RW-Daten) als ascii oder Binärdaten. Je nach Dateiformat liegen die Werte in mm, 1/10 mm oder 1/100 mm je Zeiteinheit vor.

Weitere Informationen dazu in der RADOLAN-Kurzbeschreibung des DWD: https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radarniederschlagsprodukte/radolankurzbeschreibung_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=6

Mit Hilfe der RADOLAN Daten ist es möglich, ein Niederschlagsereignis in seinem räumlichen und zeitlichen Verlauf abzubilden und als Input für Simulationen zu verwenden. Hierbei ist folgendes zu beachten:

1. Die RADOLAN-Daten des DWD liegen in einer Polar Stereographischen Projektion vor und müssen vor der Verwendung in das üblicherweise verwendete Koordinatensystem umgewandelt werden. (Empfehlung UTM32) Erläuterungen dazu und zur Darstellung in ArcGIS unter:

https://www.dwd.de/DE/leistungen/radarklimatologie/radklim_kompositformat_1_0.pdf?__blob=publicationFile&v=1

- Zur Auswahl eines passenden historischen Niederschlagsereignisses zur Simulation wird eine Auswertung von 5 min. Intensitätsmaxima der Jahre 2001 –2020 von der Hochschule RheinMain als ArcGIS Projekt zur Verfügung gestellt. Zusätzlich stehen für 30 historische Starkregenereignisse (siehe Anlage 1: Starkregen-Sammlung) die 5min RADOLAN RY-Daten zur Verfügung und können ebenfalls bei der Hochschule RheinMain bei der AG Starkregen und Sturzfluten (Prof. Ruiz Rodriguez) kostenfrei angefordert werden.

Falls möglich sollte ein über dem Untersuchungsgebiet gefallener Niederschlag mit Intensitäten > 100 mm/h gewählt werden. Falls ein solcher nicht vorliegt, kann ein Niederschlag aus benachbarten Gebieten auf das Untersuchungsgebiet „geschoben“ werden.

Je nach Größe des Einzugsgebiets, müssen die erstellten Starkregen Gefahrenkarten auf mehreren Simulationen basieren. Es ist darauf zu achten, dass in verschiedenen Szenarien alle kritischen Punkte im Untersuchungsgebiet entsprechend beregnet und abgebildet werden.

Abbildung 7 zeigt das Vorgehen beispielhaft. Als Hilfe zur Identifizierung von Untersuchungsschwerpunkten kann eine zuvor erstellte Fließpfadkarte herangezogen werden.

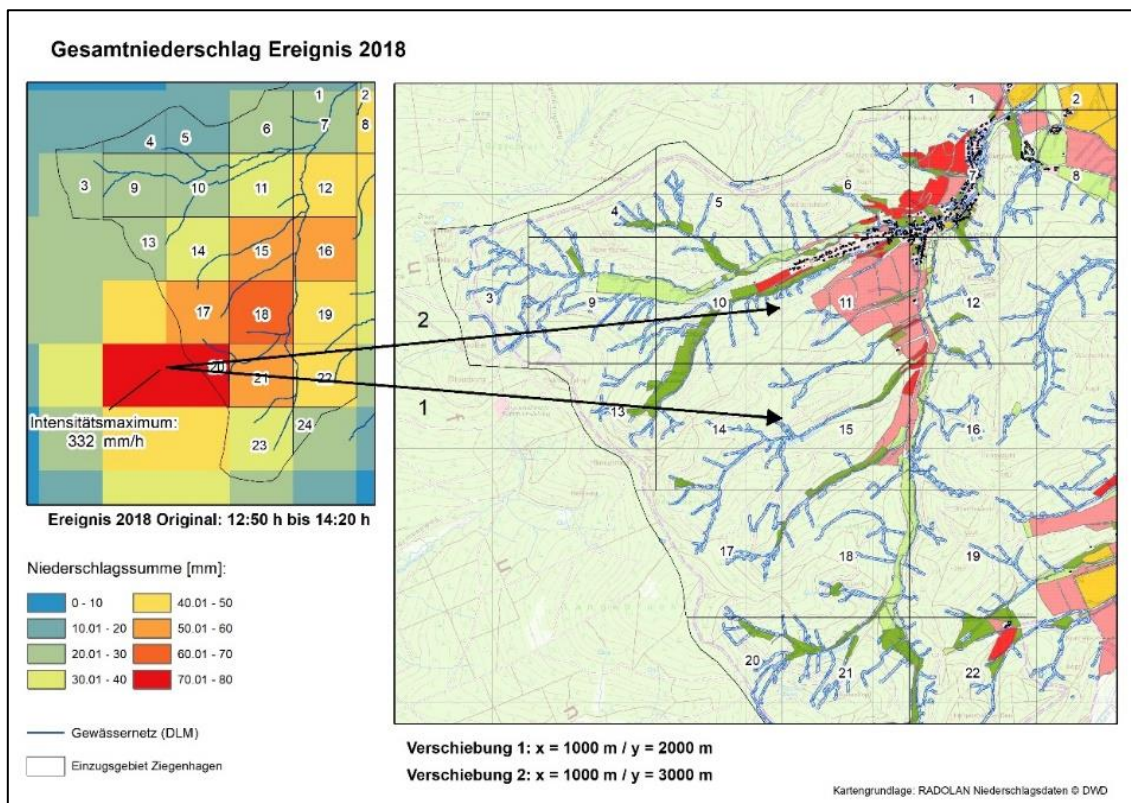


Abbildung 7: Verschiebung eines RADOLAN-Starkregens auf die Untersuchungsschwerpunkte im Einzugsgebiet

3. In den RADOLAN-Niederschlagsdaten wird der Gesamtniederschlag je Zeitschritt abgebildet. Der Anteil des effektiven Niederschlags muss daher vor der eigentlichen Simulation ermittelt werden. Der zu ermittelnde Abflussbeiwert ist stark abhängig von der Regendauer und den auftretenden variablen Niederschlagsintensitäten. Es wird daher empfohlen für das Niederschlagsereignis einen räumlich und zeitlich differenzierten Abflussbeiwert auf Basis der RADOLAN-Niederschlagsdaten zu ermitteln. Erprobt wurde dafür das SCS-Verfahren nach Zaiß, auch andere Abflussbeiwertverfahren die die Kriterien erfüllen sind zulässig. Es sollte der Vorregen der 21 Tage vor dem gewählten Ereignis berücksichtigt werden (Vorregenindex VN21).

Anders als bei Flusshochwasser kann zurzeit einem Starkregenereignis kein Wiederkehrintervall (Jährlichkeit) zuordnet werden. Starkregenereignisse sind in ihrer Form und Ausdehnung und in ihrer inhomogenen Intensitätsverteilung nicht erfasst. Eine Parametrisierung und statistische Auswertung konvektiver Starkregenereignisse steht noch aus. Die berechneten Starkregen-Gefahrenkarten bleiben vorerst eine Szenarienbetrachtung. Durch die Nutzung historischer Starkregenereignisse als Modellantrieb ist sichergestellt, dass keine unrealistisch hohen Niederschläge zur Simulation genutzt werden.

Plausibilitätsprüfung des Modells/ der Ergebnisse

Da in kleinen Einzugsgebieten in der Regel kein Pegel vorhanden ist und es keine Möglichkeit gibt anhand von historischen Ereignissen das hydrodynamische Modell zu kalibrieren, sollte zur Plausibilitätsprüfung des Modells eine Bilanzierung der In- und Outputgrößen erfolgen.

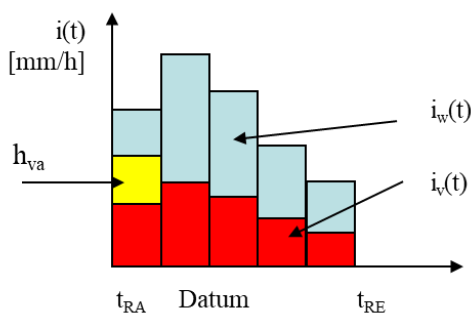
Es gilt:

Das Volumen V_{i_w} des effektiven Niederschlags $i_w(t)$ muss der Summe aus dem Volumen der Direktabflussganglinie $V_{Q,D}$ und dem beim letzten Berechnungsschritt auf der Einzugsgebietsfläche befindlichen Wasservolumen V_o entsprechen (Restvolumen auf der Einzugsgebietsfläche).

$$V_{i_w} = V_{Q,D} + V_o$$

$$V_{i_w} = A_E \int_{t_{RA}}^{t_{RE}} \frac{1}{1000 \cdot 3600} \cdot i_w(t) dt = \int_{t_0}^{t_e} Q_D(t) dt + V_o$$

mit:



Ganglinie des effektiven Niederschlags

V_{i_w} - Volumen des effektiven Niederschlags [m^3]

A_E - Fläche des Einzugsgebietes [m^2]

$i_w(t)$ - effektive Niederschlagsintensität [mm/h]

$i_v(t)$ - Verlust Niederschlagsintensität [mm/h]

$$i(t) = i_w(t) + i_v(t); \quad \psi = \frac{i_w(t)}{i(t)}$$

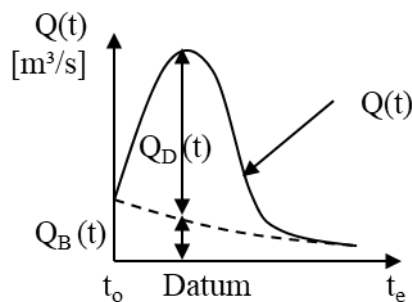
Ψ - Abflussbeiwert

t_{RA} - Beginn des Niederschlags [s]

t_{RE} - Ende des Niederschlags [s]

h_{va} - Anfangsverlust [mm]

V_o - Restvolumen auf der Einzugsgebietsfläche [m^3]



$Q(t)$ - Abflussganglinie am Gebietsausgang [m^3/s]

$Q_B(t)$ - Basisabfluss [m^3/s]

$Q_D(t)$ - Direktabfluss am Gebietsausgang [m^3/s]

$$Q_D(t) = Q(t) - Q_B(t)$$

Ganglinie am Gebietsausgang (Kontrollquerschnitt)

Hierzu sind im Modell Kontrollquerschnitte zu setzen, an denen der Abfluss zeitlich differenziert erfasst wird (Abflussganglinie). Die Lage der Kontrollquerschnitte ist entsprechend der Hauptfließwege (Gewässernetz) zu setzen, wobei mindestens am Modellrand (Gebietsauslass) ein solcher Kontrollquerschnitt gesetzt sein sollte.

Der Volumenfehler sollte +/- 5 % nicht überschreiten.

Falls das Simulationsergebnis anhand einer realen Ganglinie an einem Pegel kalibriert wird ist folgendes zu beachten:

- Im SCS-Verfahren nach Zaiß (1989) werden Muldenverluste im Anfangsverlust berücksichtigt. Da bei einer 2-Dimensionalen Simulation die Muldenverluste aber auch als solche simuliert werden, erfolgt eine doppelte Darstellung. Der Einfluss auf die Ganglinie ist in den meisten Fällen eher gering, sollten aber größere Abweichungen auftreten kann das entsprechende Volumen mit einer Fill-Sink-Analyse in GIS ermittelt werden.
- Durch die Projektion der RADOLAN-Raster kann es bei den Radarwerten zu Abweichung im Vergleich zu den Bodenmessstationen kommen.

Erfahrungen von Kommunen mit bereits abgelaufenen Starkregenereignissen sind bei der Plausibilitätsprüfung unbedingt zu berücksichtigen. Ergebnisse aus den Simulationen sind mit den abgelaufenen Ereignissen abzugleichen und es ist zu überprüfen ob die dargestellten Überflutungsflächen und Überflutungstiefen beobachtet worden sind.

Untersuchung von Szenarien, Verhalten der hydraulischen Infrastruktur

Konvektive Niederschlagsereignisse werden häufig von hohen Windgeschwindigkeiten begleitet die zu entsprechendem Windbruch führen. Kommen lokale Erosionserscheinungen hinzu, ist damit zu rechnen, dass ein Teil der hydraulischen Infrastruktur seine Leitungsfähigkeit verliert.

Es wird empfohlen, dass mögliche Versagen von Rohrdurchlässen, Straßenseitengräben und engen Brückendurchlässen in verschiedenen Szenarien zu untersuchen. Je nach örtlicher Topographie kann das Verhalten der hydraulischen Infrastruktur zu erheblichen Erhöhungen der Überflutungsauswirkungen führen.

Ergebnisdarstellung

Der Arbeitsprozess ist in Form eines Erläuterungsberichts zu dokumentieren, wobei dieser sich an folgender Gliederung zu orientieren hat:

1. Einführung / Allgemeines
2. Gebietsbeschreibungen/Ausgangslage/Beauftragung/abgelaufene Starkregenereignisse
3. Datengrundlage
 - a. Topographie
 - b. Zusätzliche Vermessung / Geländeaufnahmen/ Drohnenbefliegung
 - c. Gewässernetz / Angaben zur Ortsentwässerung
 - d. Hydraulisch relevante Bauwerke / Gebäudebestand
 - e. Landnutzung
 - f. Niederschlagsereignisse (RADOLAN-Radardaten)
4. Eingesetzte Software
 - a. Grundlagen der Modellsoftware mit Version
 - b. Rauheitsansatz und gewählte Rauheitswerte
5. Modellaufbau
 - a. Gebietsaufteilung (optional)
 - b. Geländemodell: Netzauflösung / Berücksichtigung von Bruchkanten
 - c. Modifikationen im Geländemodell: Einarbeitung von Bauwerken, Verrohrungen etc.
 - d. Niederschlagsbelastung / Ermittlung des effektiven Niederschlags
 - e. Modellränder (Berücksichtigung der Ortsentwässerung) und Kontrollquerschnitte
6. Rechenläufe und Ergebnisprüfung
 - a. Rechenläufe / Simulationseinstellungen
 - b. Überflutungsausdehnung /-tiefen und –geschwindigkeiten
 - c. Kontrollquerschnitte
 - d. Volumenbilanz
 - e. Abgleich mit abgelaufenen Ereignissen
 - f. Besonderheiten
7. Kartendarstellungen

Im Einzelnen sollten mindestens folgende Ergebnisse des Arbeitsprozesses graphisch aufbereitet werden:

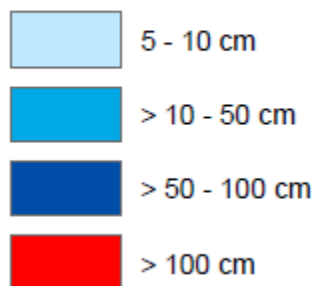
- Übersicht der Nutzungsarten mit Rauheitswerten
- Übersicht der hydraulisch relevanten Bauwerke im Untersuchungsgebiet
- Übersicht der betrachteten Szenarien
- Räumliche Verteilung der Niederschlagsbelastung (Niederschlagssummen) mit Angabe der maximalen Niederschlagsintensität

Als Ergebnis der 2-Dimensionalen hydrodynamischen Simulation liegen für die Berechnungsknoten bzw. die Berechnungselemente die Wasserspiegellagen (WSPL) und die Überflutungstiefen als Differenz zur Geländehöhe (UT / depth) vor.

In den Starkregengefahrenkarten sind dann folgende Informationen darzustellen:

- Maximale Überflutungstiefen und –Ausdehnungen
Folgende Legende für die Darstellung der Überflutungstiefe wird empfohlen:

Maximale Überflutungstiefe [cm]



- Maximale Fließgeschwindigkeiten in kritischen Bereichen (optional)

Außerdem sollte in einer Überflutungstiefenanimation die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Überflutungstiefen in 5-Minuten Schritten erfolgen.

Die Ergebnisse sind in Form von Karten (digital und gedruckt) darzustellen, wobei Detailkarten im Format A1 oder A0 mit einem Maßstab von mindestens 1:5.000 dargestellt werden sollten. Falls die Auftraggeber die Möglichkeit zur Nutzung haben, sind alle Ergebnisse auch als GIS-Projekt auszuliefern.

Anlage 1: Liste historischer Regen (Starkregen-Sammlung)

Nr.	Jahr/Monat	Starkregen	Wetterlage	Zugrichtung	
				von	bis
2006					
1	Juni	15.06.2006	BM	W	NO
2		25./26.06.2006	SWz	W	O
3	Juli	05./06.07.2006	SEa	SW	NO
4		06./07.07.2006	TrW	SW	NO
5		26.07.2006	BM	SW	NO
6		27.07.2006	TrW	SW	NO
7		28./29.07.2006	TrW	SW	NO
2007					
8	Mai	22./23.05.2007	BM	W	NO
9		25./26.05.2007	TrW	NO	SW
10	Juni	10.06.2007	HNfz	NO	SW
11		12.06.2007	U	NO	SW
12		14.06.2007	SWz	SW	NO
13		20./21.06.2007	TrW	SW	NNO
2008					
14	Mai	30.05.2008	SEz	SSO	NNW
15	Juli	26./27.07.2008	HNfz	SO	NW
2009					
16	Juli	23./24.07.2009	SWz	SW	NO
17	August	10.08.2009	Wz	SSW	NNO
2010					
18	Juni	09./10.06.2010	TrW	S	NNO
19	Juli	12.07.2010	SWz	relativ lokal (Osten)	
2011					
20	Juni	05./06.06.2011	Sz	SW	NO
21	August	23.08.2011	TrW	SW	NO
22		24.08.2011	Sz	SW	NO
23		25./26.08.2011	Sz	SSW	NO
24	September	11.09.2011	SWz	SW	NO
2012					
25	Mai	02.05.2012	HNz	S	N
26	Juni	30.06.2012	TrW	SSW	NO
27	Juli	27.07.2012	TrW	SW	NO
28	August	29.08.2012	SWz	SW	NO
2013					
29	Juli	01.07.2013	TrM	SW	NO
30		23.07.2013	HNa	NO	SW
31		24.07.2013	HNz	NW	SO
2014					
32	Juni	09.06.2014	Sa	NW	SO
33		10.06.2014	Sa	SW	NO
34	Juli	10.07.2014	HFz	NO	SW
35		11.07.2014	HFz	NO	SW
36	August	04./05.08.2014	TB	SW	NO

RADOLAN RY-Daten können bei der Hochschule RheinMain angefordert werden.

Quellenangaben

LAWA (2018): LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz. Erfurt.

DWA (2019): Merkblatt DWA-M 543-1 bis 543-3: Geodaten in der Fließgewässermodellierung. Teil 1-3. Erarbeitet von der DWA-Arbeitsgruppe WW-3.2 "Mehrdimensionale numerische Modelle" (DWA-Regelwerk, 543-1).

Musall, Mark (2011): Mehrdimensionale hydrodynamisch-numerische Modelle im praxisorientierten und operationellen Einsatz. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

Zaiß, Hermann (1989): Simulation ereignisspezifischer Einflüsse des Niederschlag-Abfluß-Prozesses von Hochwasserereignissen kleiner Einzugsgebiete mit Niederschlag-Abfluß-Modellen. Technischer Bericht des Instituts für Wasserbau der TH Darmstadt. Nr. 42. Hg. v. Ralph C.M. Schröder.

Peter Oberle, Andreas Kron, Tim Kerlin, Ernesto Ruiz Rodriguez, Franz Nestmann: Diskussionsbeitrag zur Fließwiderstandsparametrisierung zur Simulation der Oberflächenabflüsse bei Starkregen. Wasserwirtschaft, Heft 4/2021, Verlag Springer Vieweg.