IN-DEPTH KNOWLEDGE:

HAZARD MAPS WITH OPENLISEM

IN-DEPTH KNOWLEDGE AS PART OF T4.3.1 MODULE FOR ASSESSMENT AND MAPPING OF HEAVY RAIN RISKS (RAINMAN TOOL 1)

Stephanie Albrecht, Axel Sauer*

*Leibniz Institute of Ecological Urban and Regional Development (PP 10)

Our Project is funded by the Interreg CENTRAL EUROPE Programme that encourages cooperation on shared challenges in central Europe and is supported under the European Regional Development Fund.

T4.3.1 Module for assessment and mapping of heavy rain risks (RAINMAN Tool 1)

In-depth knowledge: Hazard maps with OpenLISEM

Version 1 **27/02/2020**

Authors Stephanie Albrecht, Axel Sauer*

*Leibniz Institute of Ecological Urban and Regional Development (PP 10)

Summary

The present investigation has shown that OpenLISEM is in principle suitable for creating heavy rainfall hazard maps. The points at which the model was checked all show a high hazard risk, which is well reflected by the maximum flooding depths calculated by OpenLISEM. Since only unsystematic photographs taken by local residents were available, the quality of the model predictions in areas with less severe damage and flooding cannot be conclusively assessed. The same applies to the spread in the entire study area. However, the model prediction appears plausible, so that further systematic investigations with future heavy rainfall events appear to be useful here.

The resolution of the digital elevation model plays a decisive role for the quality of the results. Based on the model variants with different spatial and temporal resolutions, a spatial resolution of at least 2 x 2 m and a temporal resolution of at least 1 minute can be recommended.

Model calculations with and without local channel discharge show that the required resolution of 2 x 2 m leads to unrealistic flood depths in the model with local discharge due to too small cell size (see 2.5.1 Flow processes).

The model requires a large amount of input data, some of which are difficult to obtain or can only be obtained through experiments (e.g. taking and analysing soil samples, surveying the channel). In addition, a new calibration of the model must be carried out for each simulation. For the user this means a high effort. In addition, because of the need for calibration, OpenLISEM is not readily suitable for risk analysis with regard to future heavy rainfall events.

Our Project is funded by the Interreg CENTRAL EUROPE Programme that encourages cooperation on shared challenges in central Europe and is supported under the European Regional Development Fund.

The results of the erosion modelling seem plausible. There is a lack of systematic data on the deposition quantities in the study area, so a well-founded evaluation of the model results is not possible. Here, too, further investigations are necessary.

In this work the water absorption capacity of the soil was considered saturated, therefore infiltration processes do not take place and could therefore be neglected. OpenLISEM is able to take infiltration processes into account. Further investigations are required to estimate whether taking infiltration processes into account increases the accuracy of the model.

Our Project is funded by the Interreg CENTRAL EUROPE Programme that encourages cooperation on shared challenges in central Europe and is supported under the European Regional Development Fund.

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

Fakultät Landbau / Umwelt / Chemie

Studiengang
Umweltmonitoring/Umweltanalyse

Eignet sich OpenLISEM zur Erstellung von Gefahrenkarten für die Überflutung im Zuge von Starkregenereignissen?

Bachelor-Arbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Bachelor of Science (B. Sc.)

im Studiengang
Umweltmonitoring/Umweltanalyse

vorgelegt von

Stephanie Albrecht

1. Betreuerin: **Prof. Dr. habil. Ankea Siegl**

2. Betreuer: **Dr. Axel Sauer**

Dresden, September 2018

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis ..... **V**

Tabellenverzeichnis ..... **VI**

Formelverzeichnis ..... **VIII**

1 Einleitung **1**

2 Grundlagen **3**

2.1 Starkregen 3

2.1.1 Überflutungen durch Starkregen 3

2.1.2 Erosion durch Starkregen 3

2.2 Einflüsse auf die Ausprägung von Überflutungen im Zuge von Starkregenereignissen 4

2.2.1 Klimawandel in Sachsen 4

2.2.2 Landnutzung 4

2.3 Starkregengefahrenkarten 5

2.4 RAINMAN-Projekt 5

2.5 OpenLISEM 6

2.5.1 Hydrologische Prozesse 9

2.5.2 Erosionsprozesse 21

2.5.3 Eingabe- und Ausgabedateien 24

3 Aktueller Stand der Forschung **28**

3.1 Eingangsdaten 29

3.1.1 Digitales Geländemodell 29

3.1.2 Landnutzungskarte 30

3.1.3 Bodenkarte 30

3.1.4 Straßen 30

3.1.5 Gebäude 30

3.1.6 Gerinne 31

3.2 Niederschlag 31

3.3 Kalibrierung 32

3.4 Validierung 32

3.5 Ergebnisse ... 33

4 Untersuchungsgebiet ... 34

4.1 Allgemein ... 34

4.2 Meißen Triebischtal ... 34

4.3 Geologie ... 34

4.4 Naturräume ... 34

4.5 Böden ... 35

4.6 Landnutzung ... 35

4.7 Vegetation ... 36

4.8 Triebisch ... 37

4.8.1 Hochwasserrisiko ... 37

5 Methodik ... 38

5.1 Verwendete Programme ... 38

5.2 Grundlegende Anforderungen Kartenmaterial ... 38

5.3 Preprocessing mit Arcmap ... 38

5.3.1 Digitales Geländemodell ... 38

5.3.2 Landnutzung ... 39

5.3.3 Gebäude ... 40

5.3.4 Straßen ... 40

5.3.5 Boden ... 40

5.4 Kartenerstellung mit PCRaster ... 40

5.4.1 Basiskarten ... 40

5.4.2 Einzugsgebiet ... 41

5.4.3 Landnutzungs- und Bodeneigenschaften ... 42

5.4.4 Gebäude und Straßen ... 43

5.4.5 Gerinne ... 43

5.4.6 Niederschlag ... 44

5.5 Parameter ... 45

5.5.1 Landnutzung ... 45

5.5.2 Boden ... 45

5.6 Simulation ... 46
5.6.1 Einstellungen ... 46
5.6.2 Übersicht Simulationen ... 46
5.7 Validierung ... 47
5.7.1 Maximale Überflutungstiefen ... 47
5.7.2 Abgelagertes Material ... 48
6 Ergebnisse ... 49
6.1 Simulationsdauer ... 49
6.2 Maximale Überflutungstiefen ... 49
6.3 Abgelagertes Material ... 50
6.4 Kalibrierung ... 50
6.4.1 Maximale Überflutungstiefen ... 50
6.4.2 Abgelagertes Material ... 51
6.4.3 Starkregengefahrenkarte ... 51
7 Diskussion ... 52
7.1 Auswirkung der räumlichen und zeitlichen Auflösung auf die maximale Überflutungstiefe ... 52
7.2 Kalibrierung ... 54
7.2.1 Vergleich der Simulationen mit und ohne Gerinne ... 54
7.2.2 Rauheitsbeiwerte nach MANNING ... 55
7.3 Starkregengefahrenkarte ... 55
7.4 Abgelagertes Material ... 58
8 Zusammenfassung und Ausblick ... 59
9 Literaturverzeichnis ... 60
9.1 Bildquellen ... 66
9.2 Datenquellen ... 68
9.2.1 Karten ... 68
9.2.2 Software ... 68
10 Anhang I ... 69
10.1 PCRaster-Befehle ... 69

10.2 Karte-Abgelagertes Material 71

11 Anhang II 72

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Starkregengefahrenkarte für das Einzugsgebiet der Glems (Quellenangabe S. 66)..... 5
Abb. 2 Beispiel für den Aufbau der unterschiedlichen Layer innerhalb einer Zelle nach JETTEN &VAN DEN BOUT (2017)..... 7
Abb. 3 Übersicht über die in OpenLISEM integrierten Prozesse. 8
Abb. 4 Übersicht über die Reihenfolge, in der die Prozesse während der Simulation ablaufen (DE ROO et al. 1996a)..... 15
Abb. 5 Empfohlene Ordnerstruktur nach Jetten (2002). 26
Abb. 6 Übersicht über die Gebiete, in denen die Studien durchgeführt wurden. Die Legende kann aus Tabelle 2 (ID-Karte) entnommen werden (Quellenangabe S. 66)..... 29
Abb. 7 Links: Lage des Untersuchungsgebietes in Sachsen. Rechts: Ausdehnung des Untersuchungsgebietes. 34
Abb. 8 Bodentypen im Untersuchungsgebiet Meißen Triebischtal. 35
Abb. 9 Anteil der Landnutzungsflächen im Untersuchungsgebiet. 36
Abb. 10 Übersicht über die Landnutzung im Untersuchungsgebiet. 36
Abb. 11 Vorkommen von Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-Richtlinie und Habitatflächen für Arten nach Anhang IV der FFH-Richtlinie im Untersuchungsgebiet (Quellenangabe S. 66). 37
Abb. 12 Lage der Aufnahmepunkte für die Überprüfung der maximale Überflutungstiefen (Quellenangabe S. 66). 47
Abb. 13 Vergleich der Auswirkung der räumlichen und zeitlichen Auflösung auf die maximal Überflutungstiefe. Für den Vergleich wurden die Werte der Simulationen ohne Kalibrierung verwendet. 52
Abb. 14 Vergleich der zeitlichen Auflösung des Niederschlages für die Simulation 2 x 2 m. 53
Abb. 15 Vergleich der maximalen Überflutungstiefen in Abhängigkeit der räumlichen Auflösung. Oben links: 2 x 2 m, oben rechts: 10 x 10 m, unten links 25 x 25 m (Quellenangabe S. 66)..... 53
Abb. 16 Vergleich der Simulationen mit und ohne Gerinne. Die Abbildung zeigt die Differenz zwischen den berechneten maximalen Wassertiefen. Oben links: 2 m x 2m, oben rechts: 10 m x 10 m, unten links: 25 m x 25 m. 54
Abb. 17 Gefälle von der Ackerfläche bis zur Ossietzkystraße. 55
Abb. 18 Vergleich der Punkte 9, 8 und 6 mit der Gefährdungskarte (Quellenangabe S. 66). 56
Abb. 19 Sedimente, die durch die Verkaufsräume des Kauflands gespült wurden (Quellenangabe S. 66)..... 56
Abb. 20 Gefälle auf der Talstraße. 57
Abb. 21 Blick auf die Talstraße. Das abgelagerte Material weist auf eine Überflutung hin (Quellenangabe S. 66). 57
Abb. 22 Vergleich der Gefahrenkarte mit den Punkten 3, 4 und 5 (Quellenangabe S. 67). 58
Abb. 23 Lage und Menge des abgelagerten Materials im Untersuchungsgebiet Meißen Triebischtal. 71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht über die von OpenLISEM benötigten Karten für die Simulation der verschiedenen Prozesse nach DE ROO et al. (1996a). 25
Tabelle 2 Überblick über die ausgewerteten Studien. 28
Tabelle 3 Klassifizierung der Landnutzungskassen für die Modellierung. 39
Tabelle 4 Die Bodenarten im Untersuchungsgebiet Meißen mit den Anteilen an Sand, Ton und Schluff nach DÜWEL et al. (2007). 40
Tabelle 5 Beschreibung und Datentyp der benötigten Basiskarten. 41
Tabelle 6 Beschreibung und Datentyp der Karten, die die hydrologischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes wiedergeben. 41
Tabelle 7 Eigenschaften der einzelnen Landnutzungsklassen für das Untersuchungsgebiet Meißen Triebischtal. 42hg
Tabelle 8 Beschreibung und Datentyp der Karten, die die Eigenschaften der Vegetation, der Landnutzung und des Bodens wiedergeben. 42
Tabelle 9 Übersicht über die gewählte Straßenbreite in Abhängigkeit der Auflösung. 43
Tabelle 10 Beschreibung und Datentyp der Karten, die die Infrastruktur und Gebäude beschreiben. 43
Tabelle 11 Beschreibung und Datentyp der Karten, die die Lage und Eigenschaften der Gerinne wiedergeben. 44
Tabelle 12 Anzahl der verwendeten Zellen für die Berechnung der Gerinne. Die Anzahl der Zellen ist abhängig von der Auflösung des Geländemodells. 44
Tabelle 13 Wiederkehrhäufigen und Niederschlagsmenge für die Dauerstufe 120 min nach den KOSTRA-DWD-2010-Daten (DEUTSCHER WETTERDIENST). 45
Tabelle 14 Parameter für die Landnutzung. Die für die Simulation benötigten Parameter wurden aus BAUER (2004), JETTEN & VAN DEN BOUT (2017) und SAUER (2004) entnommen. 45
Tabelle 15 Übersicht über die verwendeten Bodenparameter. 46
Tabelle 16 Übersicht über die durchgeführten Simulationen. 46
Tabelle 17 Simulationsdauer für alle durchgeführten Simulationen. Die Auflösung des digitalen Geländemodells und des Niederschlags kann anhand der ID aus Tabelle 16 entnommen werden. 49
Tabelle 18 Vergleich der geschätzten Überflutungstiefen mit den von OpenLISEM berechneten maximalen Überflutungstiefen. Die grün unterlegten Felder zeigen eine Übereinstimmung der Werte an. 49
Tabelle 19 Anteil der berechneten Ablagerungen für den Siedlungsbereich. 50
Tabelle 20 Vergleich der berechneten maximalen Überflutungstiefen mit den geschätzten Wassertiefen nach der Kalibrierung der einzelnen Simulationen. Grün: gute Übereinstimmung, orange: keine Übereinstimmung, blau: plausible Werte. 50
Tabelle 21 Menge des abgelagerten Materials nach der Kalibrierung. 51

Tabelle 22 Übersicht über die PCRaster-Befehle mit denen die von OpenLISEM benötigten Karten erstellt werden. 69

Formelverzeichnis

Formel 1 Berechnung des Niederschlages über die Niederschlagsintensität, dargestellt als Summand der Wasservolumenänderung. 9
Formel 2 Gleichung nach HOYNINGEN-HUENE (1983) für die Berechnung der maximalen Speicherkapazität. 9
Formel 3 Berechnung der Gesamtinterzeption mit der von ASTON (1979) entwickelten und durch MERRIAM (1960) modifizierten Gleichung. 9
Formel 4 Berechnung des Korrekturfaktors *p*. 10
Formel 5 Richards-Gleichung zur Berechnung der Infiltration und des Bodenwassertransports. 10
Formel 6 Wassertransportgleichung nach Richards. 10
Formel 7 Gleichung nach dem MUALEM-VAN GENUCHTEN-Modell zur Berechnung der Saugspannung. 11
Formel 8 Gleichung nach dem MUALEM-VAN GENUCHTEN-Modell zur Berechnung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. 11
Formel 9 Vereinfachte Darcy-Gleichung nach GREEN & AMPT (1911) zur Berechnung der Infiltrationsrate. 11
Formel 10 Berechnung der Tiefe der Feuchtefront nach GREEN & AMPT (1911). 11
Formel 11 Die Kombination von Gleichung 11 und 12 ergibt eine finale Gleichung zur Berechnung der Infiltrationsrate. 12
Formel 12 Empirische Gleichung nach Smith & Parlange zur Berechnung der potenziellen Infiltrationsrate. 12
Formel 13 Berechnung des Parameters *C* nach Smith und Parlange. 12
Formel 14 Berechnung des Oberflächenrückhalts nach ONSTAD (1984). 13
Formel 15 Berechnung des überschüssigen Niederschlags, der benötigt wird, um alle Rückhalteflächen zu füllen (ONSTAD 1984). 13
Formel 16 Gleichung für den Startpunkt des Oberflächenabflusses. 13
Formel 17 Berechnung des maximalen Anteils der mit Wasser bedeckten Fläche nach ONSTAD (1984). 13
Formel 18 Berechnung des Anteils der mit Wasser bedeckt ist nach MOORE & LARSON (1979) und ONSTAD (1984). 14
Formel 19 Berechnung der isolierten Oberflächenspeicher nach LINDEN et al. (1988). 14
Formel 20 Gleichung für die Simulation des Abflusses des Oberflächenwassers. 15
Formel 21 Berechnung der Fließgeschwindigkeit nach MANNING. 15
Formel 22 Potenzfunktion nach CHOW (2009). 16
Formel 23 Berechnung des Abflusses nach CHOW (2009). 16
Formel 24 Berechnung des Abflusses in einer einzelnen Zelle. 16

Formel 25 Berechnung des Abflusses über eine räumliche Diskretisierung. 16
Formel 26 Bilineare Interpolation für die Ausbreitung des Abflusses als zweidimensionale diffuse Welle. 18
Formel 27 Navier-Stokes-Gleichungen für zwei Dimensionen (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017). 18
Formel 28 Berechnung der kinematischen Viskosität. 18
Formel 29 Berechnung des Drucks. 19
Formel 30 Zweidimensionale Saint-Venant-Gleichungen. 19
Formel 31 Dreidimensionale Saint-Venant-Gleichung. Die dritte Dimension ergibt sich aus dem vertikalen Fließprofil. 19
Formel 32 Darcy-Weißbach-Gleichung zur Berechnung der *x*- und *y*-Terme für den Anstieg der Reibungskraft. 19
Formel 33 Berechnung des Wasseranteils, welches in ein Gerinne fließt. 20
Formel 34 Geleichung zur Erhöhung der Rauheitsbeiwerte nach MANNING. 21
Formel 35 Berechnung des Wasseranteils, der zur Überflutung hinzugefügt wird. 21
Formel 36 Berechnung der Planschwirkung des Niederschlages. 22
Formel 37 Berechnung der kinematischen Energie des Niederschlages. 22
Formel 38 Berechnung der kinematischen Energie des durchfallenden Niederschlages. 22
Formel 39 Berechnung des Niederschlages, der auf Oberflächen fällt, die keine Straßen darstellen. . 22
Formel 40 Berechnung der Größe der Flächen, die keine Straße darstellen. 22
Formel 41 Berechnung der Transportkapazität. 22
Formel 42 Berechnung der Depositionsrate. 23
Formel 43 Formel zur Berechnung der Erosionsrate. 23
Formel 44 Effizienzkoeffizient nach RAUWS & GOVERS (1988) und MORGAN et al. (1992). 23
Formel 45 Formel zur Berechnung des Volumens des abgelagerten Materials. 48

1 Einleitung

Starkregenereignisse sind ein ernstzunehmendes Problem, da sie innerhalb von Siedlungsflächen und in der Landwirtschaft große Schäden verursachen können. Durch den Klimawandel treten extreme Wetterereignisse nicht nur häufiger auf, sondern werden auch in ihrer Ausprägung erheblich verstärkt. Daher müssen Anpassungsstrategien und Maßnahmen entwickelt werden, um die Auswirkungen solcher extremen Ereignisse zu verringern.

Überschwemmungen durch Flüsse sind gut erforscht und im Zuge der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie wurden Gefährdungskarten für Hochwasserrisikogebiete erstellt. Für Starkregenereignisse hingegen gibt es keine flächendeckenden Gefährdungskarten für Deutschland und die Starkregenvorsorge ist noch relativ unerforscht. Es gab in den letzten Jahren etliche Studien, die den Zusammenhang zwischen extremen Wetterereignissen und dem Klimawandel untersuchten (BERNHOFER et al. 2016) sowie regionale Projekte, die Leitfäden für die regionale Starkregenvorsorge entwickelten (METROPOLREGION BREMEN-OLDENBURG IM NORDWESTEN E.V. 2016). Zudem bietet die DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall) ein „Audit Hochwasser“ an, welches von verschiedenen Bundesländern gefördert wird und Kommunen bei der Starkregenvorsorge unterstützen soll (DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E.V.).

Die Voraussetzung für eine zielführende Vorsorge ist die Ermittlung des Gefährdungsrisikos. Dafür können die folgenden Methoden verwendet werden, die sich jedoch in ihrer Genauigkeit stark unterscheiden:

1) vereinfachte Gefährdungsabschätzung

2) topografische Gefährdungsanalyse mittels geografischer Informationssysteme

3) hydraulische Analyse mittels Überflutungssimulationen

Die Analyse mittels Überflutungssimulation weist die höchste Genauigkeit auf und kann unmittelbar für die Erstellung von Gefahrenkarten verwendet werden (METROPOLREGION BREMEN-OLDENBURG IM NORDWESTEN E.V. 2016). Aufgrund dieser Gefährdungsanalysen können Risikobereiche identifiziert und bewertet werden. Zudem können mögliche Folgen eines Starkregenereignisses abgeschätzt werden.

Die folgende Untersuchung findet im Rahmen des RAINMAN-Projekts unter der Betreuung des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung Dresden (IÖR) statt und soll einen Beitrag zur Entwicklung von Methoden zur Gefährdungsanalyse leisten.

Ziel der Arbeit ist die Betrachtung und Bewertung der Software OpenLISEM hinsichtlich ihrer Eignung für Gefährdungsanalysen. Es soll mit dem Programm eine hydraulische Analyse des Untersuchungsgebietes Meißen Triebischtal durchgeführt werden, welches auch im Rahmen des RAINMAN-Projektes untersucht wird. Dafür soll das Starkregenereignis vom 27.05.2014 simuliert werden. Die daraus resultierende Ausbreitung des Wassers sowie die Wassertiefe sollen anhand von Fotoaufnahmen exemplarisch validiert werden

OpenLISEM ist ein frei verfügbares Open-Source Programm, das hydrologische Prozesse modelliert, die während eines Starkregenereignisses auftreten und zu Erosions- und Ablagerungsprozessen führen. Das eventbasierte Modell bietet die Möglichkeit, die hydrologischen Prozesse zu simulieren ohne die Erosionsprozesse zu berücksichtigen. Die dafür benötigten Karten können in frei verfügbaren GIS-Programmen wie QGIS, SAGA-Gis und GRASS-Gis erstellt werden. Das Programm kann kostenfrei auf der Download-Seite der Universität von Twente heruntergeladen werden und ist daher auch für Anwender mit geringem Budget, wie z. B. kleinen Kommunen, interessant

Für das Untersuchungsgebiet Meißen werden drei Simulationen mit einer Zellgröße von 2, 10 und 25 m sowie mit einer unterschiedlichen zeitlichen Auflösung des Niederschlags von 1 Minute und von 10 Minuten durchgeführt, um die Genauigkeit des Modells in Abhängigkeit der räumlichen und zeitlichen Auflösung zu überprüfen.

Zudem wird neben der hydraulischen Analyse eine Erosionsmodellierung für das Untersuchungsgebiet Meißen Triebischtal durchgeführt, da durch das im Wasser mitgeführte Material große Schäden entstanden sind. Die Ergebnisse der Erosionsmodellierung können aufgrund fehlender Daten nur präsentiert werden. Eine Einschätzung der Güte der Ergebnisse ist nicht möglich.

Folgende Fragestellungen werden in dieser Arbeit untersucht:

- Eignet sich OpenLISEM zur Erstellung von Gefahrenkarten für die Überflutung im Zuge von Starkregenereignissen?
- Welche Funktionen und Möglichkeiten besitzt OpenLISEM? Auf welchen theoretischen und methodischen Grundlagen basiert das Modell?
- Welche Eingangsdaten werden benötigt?
- Was ist der aktuelle Erkenntnisstand zur Modellierung von starkregenbedingten Überflutungen mit OpenLISEM?
- Welchen Einfluss hat die räumliche sowie zeitliche Auflösung auf die Ergebnisse?

2 Grundlagen

2.1 Starkregen

Starkregen sind lokal auftretende Niederschlagereignisse, die meist während der Sommerzeit und oft zusammen mit Gewitter und Hagel auftreten. Während eines Starkregenereignisses können große Niederschlagsmengen innerhalb kurzer Zeit auf relative kleine Flächen treffen, woraus Überschwemmungen und Hochwasser auch fernab von Gewässern entstehen können (METROPOLREGION BREMEN-OLDENBURG IM NORDWESTEN E.V. 2016). Laut dem DEUTSCHEN WETTERDIENST (2018) gibt es drei Warnstufen für Starkregenereignisse:

- Warnung vor markantem Wetter:
  - 15 bis 25 l/m² in 1 Stunde
  - 20 bis 35 l/m² in 6 Stunden
- Unwetterwarnung:
  - 25 l/m² in 1 Stunde
  - 35 l/m² in 6 Stunden
- Warnung vor extremem Unwetter:
  - 40 l/m² in 1 Stunde

Laut dem GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V. (2017) verursachten die Starkregen, die in Verbindung mit den Unwettern Elvira und Frederike auftraten einen Schaden von rund einer Milliarde Euro, also rund die Hälfte der Sachschäden im Jahr 2016.

Beispielsweise war das Einzugsgebiet Simbach (Bayern) am 01.06.2016 von starken Niederschlägen betroffen, mit maximalen Stundenwerten von 20 bis 30 mm (20 bis 30 l/m²). Mit der Hilfe des KOSTRA-Datensatzes des DWD konnte die Jährlichkeit der Tagesniederschläge bestimmt werden: ein vergleichbares Ereignis findet statistisch einmal alle 100 Jahre statt (Jährlichkeit 100) (BRANDHUBER et al. 2017).

2.1.1 Überflutungen durch Starkregen

Durch die enormen Wassermassen, die während eines Starkregens entstehen können, wird die Leistungsfähigkeit des Kanalsystems sowie der Gewässer und Grundstücksentwässerung deutlich überschritten. Zudem fließt Regenwasser aus den Außengebieten unkontrolliert in die Siedlungsflächen und sammelt sich dort in Senken. Die aus Starkregen resultierenden Überschwemmungen und Sturzfluten können eine Gefahr für Leib und Leben darstellen und zu hohen monetären Schäden führen (METROPOLREGION BREMEN-OLDENBURG IM NORDWESTEN E.V. 2016).

Starkregen verursacht jedoch nicht nur Schäden im Siedlungsbereich, sondern führt auch zu Schäden in der Landwirtschaft. So können durch extreme Niederschlagsereignisse Pflanzen irreversibel geschädigt werden, zudem kann es bei bestimmten Kulturen (Spargel, Zwiebel, Wein u.a.) und brachliegenden Flächen zu Erosionsschäden und Bodenverschlämmung kommen (GÖMANN et al. 2015).

2.1.2 Erosion durch Starkregen

Erosionsschäden betreffen auch vor allem landwirtschaftliche Flächen, die keine Pflanzen- oder Mulchdeckung aufweisen, sowie solche, auf denen bestimmte Kulturen (Spargel, Zwiebel etc.) angebaut

werden. Dabei werden Schäden auf dem Feld (*onsite*-Schäden) und Schäden außerhalb der Felder (*offsite*-Schäden) unterschieden. *Onsite*-Schäden sind unter anderem Verletzungen, Überdeckung oder Vernichtung von Kulturpflanzen sowie das Wegspülen von Saatgut, Pflanzenschutzmittel und Dünger. *Offsite*-Schäden treten dann auf, wenn die Ablagerung der erodierten Böden andere Landschaftsteile beeinträchtigt. Dazu gehören neben Wäldern und Gewässern auch Straßen-, Gewerbe- und Siedlungsbereiche (HILLER 2007). Durch Hangabflüsse und wild abfließendes Wasser kann das im Wasser mitgeführte Material große Schäden an Gebäuden verursachen und Verkehrswege erheblich beeinträchtigen.

2.2 Einflüsse auf die Ausprägung von Überflutungen im Zuge von Starkregenereignissen

2.2.1 Klimawandel in Sachsen

In einer Studie des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (BERNHOFER et al. 2015a) wurde in Sachsen für ein 1 x 1 km-Gitter (19.572 Punkte) eine Analyse hinsichtlich der Veränderung des Starkregenverhaltens durchgeführt. Es wurden vier Starkniederschlagsindizes definiert (R80p, R90p, R95p, R99p), die auf Perzentilen des örtlichen Niederschlags basieren. Dabei wurden die Regenmenge, die Überschreitungstage, die mittlere Intensität sowie die Auftrittshäufigkeit für die Transekte und die Fläche Sachsens betrachtet. Die jeweilige Niederschlagsmenge der einzelnen Perzentile weist einen ausgeprägten Höhengradienten auf und zeigt eine höhere Niederschlagsmenge in höheren Lagen. Bei der Analyse der Häufigkeit der Überschreitungen dieser Schwellenwerte ergab sich eine markante Veränderung zwischen der Klimanormalperiode 1961-1990 und der aktuellen Klimaperiode 1981-2010. Die flächenhafte Verteilung der Starkregenmengen ist bei allen Indizes ähnlich, jedoch zeigt sich beim 99. Perzentil eine Verschiebung der Maxima ins mittlere Bergland. Es zeigt sich auch eine nordwärts gerichtete Verschiebung höherer Regenmengen, der Höhengradient bezüglich der anderen Indizes wird abgeschwächt. Dies deutet auf einen hohen Einfluss des Klimawandels auf die Entstehungsmechanismen solcher Niederschläge hin. Der Temperaturanstieg, der in den letzten Jahren beobachtet wurde, bewirkt insbesondere in flachen Gebieten eine Zunahme von Starkregenereignissen (BERNHOFER et al. 2015a). Im Zeitraum von 1961- 2010 wurden Veränderungen in der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlägen aller Indizes festgestellt, welche sich vor allem im Jahresverlauf zeigen. In der Vegetationsperiode I (April-Juni) hat die Anzahl der Starkregenereignisse abgenommen, während in der Vegetationsperiode II (Juli-September) eine Zunahme zu verzeichnen ist (BERNHOFER et al. 2015a). In der Untersuchung von BERNHOFER et al. (2015b) wurde ein Anstieg der Jahresmitteltemperatur in Sachsen sowie eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen im Vergleich der Klimaperioden festgestellt.

2.2.2 Landnutzung

Neben dem Klimawandel spielt auch die Landnutzung bei der Entstehung und Ausprägung urbaner Sturzfluten eine Rolle. Einflussfaktoren sind unter anderem die Bebauung von hochwassergefährdeten

Gebieten bzw. natürlichen Überschwemmungsgebieten und der hohe Anteil versiegelter Flächen innerhalb von Stadtgebieten. Diese verhindern zum einen die Versickerung des Niederschlages in den Boden und erhöhen zum anderen die Fließgeschwindigkeit des Wassers. Auch Bäche und Flüsse, die nicht naturnah ausgebaut sind, können zu einer Verschärfung der Überflutung führen. Ihr hydraulisches Leistungsvermögen wird schnell überschritten und sie treten bei Starkregenereignissen über die Ufer (METROPOLREGION BREMEN-OLDENBURG IM NORDWESTEN E.V. 2016). Eine weitere Rolle spielen Forst- und Landwirtschaft, da durch gerodete Waldflächen und brachliegende Felder die Interzeption durch Pflanzen erheblich verringert wird und der auf den Boden auftreffende Niederschlag zu einer höheren Abflussmenge führt (JUNGE 2013) .

2.3 Starkregengefahrenkarten

In Starkregengefahrenkarten werden Überflutungsszenarien dargestellt, die bei extremen Niederschlagsereignissen zu erwarten sind. Da Starkregen überall auftreten können, sind die Gefahrenkarten nicht auf Gebiete in Gewässernähe beschränkt. Basis für die Berechnung der Starkregengefahrenkarten sind neben dem Niederschlag die Abflussbildung an der Oberfläche, die Bodeneigenschaften und die Landnutzung. Die Starkregengefahrenkarte enthält Informationen zur Ausbreitung der Überflutung sowie zur Wassertiefe und der Fließrichtung (modellabhängig). Aufgrund dieser Karten kann eine Risikoanalyse durchgeführt werden, indem betroffene Bereiche und kritische Objekte ermittelt sowie mögliche Schäden abgeschätzt werden. Auf dieser Grundlage können Maßnahmen zum Schutz vor Überflutungen entwickelt werden. Abbildung 1 zeigt eine Starkregengefahrenkarte für das Einzugsgebiet der Glems (Baden-Württemberg).

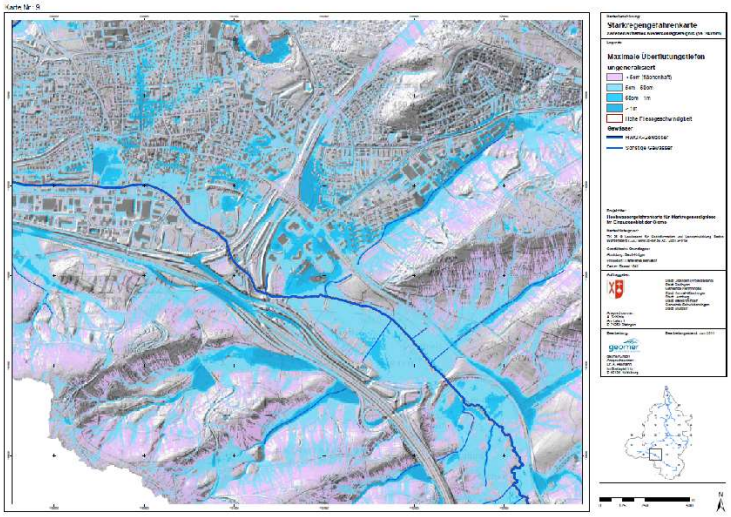

Abb. 1 Starkregengefahrenkarte für das Einzugsgebiet der Glems (Quellenangabe S. 66).

2.4 RAINMAN-Projekt

Das RAINMAN-Projekt (Integrated Heavy Rain Risk Management) ist ein von der EU gefördertes Projekt an dem sechs EU-Länder beteiligt sind: Deutschland, Österreich, Ungarn, Polen, Kroatien und die Tschechische Republik. Das Projekt beschäftigt sich mit der Entwicklung von Methoden und

Werkzeugen für das integrierte Starkregenmanagement und soll diese pilothaft erproben. Zudem soll das Projekt einen Beitrag dazu leisten, Starkregenereignisse in der EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie stärker zu berücksichtigen (STAATSMINISTERIUM DES INNERN 2018). Im Rahmen des Projektes sollen für das Untersuchungsgebiet Meißen Triebischtal verschiedene Modelle getestet werden.

2.5 OpenLISEM

Das **LI**mburg **S**oil **E**rosion **M**odel (LISEM) ist ein physikalisches Modell, das im Rahmen eines Projektes in Süd Limburg (Niederlande) von der Utrecht University (Department of Physical Geography) und der Soil Physics Devision of the Winard Staring Centre (Wageningen) entwickelt wurde (DE ROO et al. 1996a). Es handelt sich um ein Open-Source-Modell, welches die öffentliche Weiterentwicklung durch unabhängige Entwickler/Programmierer ermöglicht. Auch wenn das Programm umfangreich getestet wurde, handelt es sich doch um ein großes Projekt, das durchaus kleine Fehler und Bugs in den Codes aufweisen kann (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017). Das Modell basiert auf dem hydrologischen SWATRE- Modell und dem ANSWERS-Erosions-Modell und bietet die Möglichkeit, hydrologische und erosive Prozesse in einem Einzugsgebiet während und unmittelbar nach einem Niederschlagsereignis zu simulieren (DE ROO et al. 1996a).

Nach JETTEN & VAN DEN BOUT (2017) bietet OpenLISEM unter anderem folgende Features:

- Modellierung von Prozessen des Boden-Wasserhaushaltes, inklusive räumlich variablem Niederschlag, Interzeption und Infiltration
- Oberflächenabfluss als eindimensionale kinematische Welle oder zweidimensionale diffuse Welle
- Abfluss im Gerinne als eindimensionale kinematische Welle
- Überflutung des Gerinnes als zweidimensionale voll-hydrodynamische Welle
- Erosion (Regenerosion, Wassererosion)
- Sedimenttransport in allen Abflüssen

Der eventbasierte Charakter des Modells hat zwei grundsätzliche Implikationen:
1) Das Modell simuliert keine „langsamen“ Prozesse wie die Evapotranspiration, den Grundwasserfluss oder Veränderungen der Vegetation (Wachstum). Das heißt, das Modell ist nicht geeignet um langfristige Veränderungen zu simulieren.
2) Das Modell hat keine Limitierung hinsichtlich der Einzugsgebietsgröße, allerding muss die Zellengröße des Gitters unter 50 m liegen, damit die Prozessannahmen im Modell korrekt sind.

Die einzelnen Zellen im Modell können mehrere Informationen zur Oberflächencharakteristik des untersuchten Gebietes enthalten. Die Oberflächeneigenschaften werden in separaten Layern als Anteil an der Gitterzelle dargestellt. Abbildung 2 zeigt die Layer-Struktur innerhalb einer Gitterzelle. Den Basis-Layer bildet die Bodenkarte mit den entsprechenden hydrologischen Eigenschaften, zusätzlich werden

vom Nutzer Layer hinzugefügt, die zu weiteren hydrologischen Prozessen führen z. B. die Interzeption durch Pflanzen (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

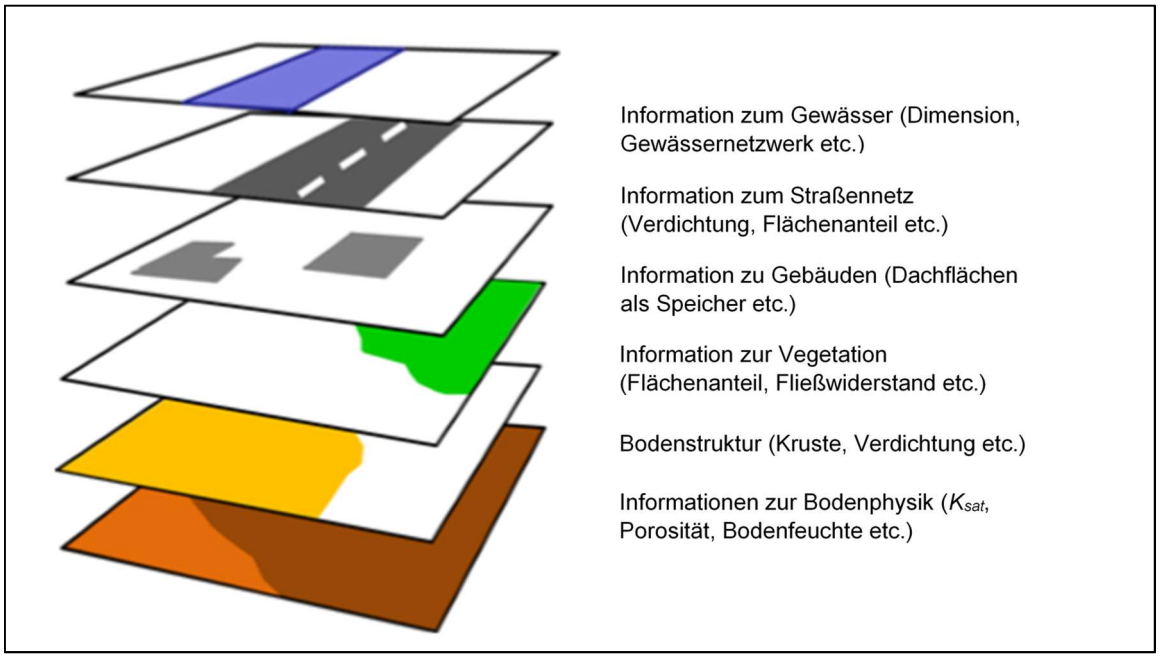

Abb. 2 Beispiel für den Aufbau der unterschiedlichen Layer innerhalb einer Zelle nach JETTEN &VAN DEN BOUT (2017).

OpenLISEM ist eines der ersten Modelle, die in ein Geoinformationssystem (PCRaster) integriert wurden. Daraus ergibt sich ein großer Vorteil hinsichtlich der Nutzerfreundlichkeit, da die große Datenmenge, die OpenLISEM für die Simulation benötigt, nicht von Hand eingegeben werden muss. Außerdem können Fernerkundungsdaten von Flugzeugen und Satelliten genutzt werden (DE ROO et al. 1996a). OpenLISEM verwendet PCRaster-Karten als Eingabe- und Ausgabeformat (JETTEN 2002). Die Berechnungen in OpenLISEM erfolgen in einem Gitternetz mit einzelnen Zellen, welche die räumliche Variabilität der Oberflächenabfluss- und Erosionsprozesse berücksichtigen.

Für jede Zelle im Gitter wird der Niederschlag und die Interzeption durch die Vegetation berechnet. Anschließend werden die Infiltration und die oberflächliche Wasserspeicherung (z. B. durch Senken, Mulden etc.) subtrahiert, woraus sich letztendlich der verbleibende Oberflächenabfluss ergibt. Zudem wird die Erosion durch Niederschläge und die Ablagerung des erodierten Materials nach dem Prinzip der Strömungskraft berechnet. Das Wasser sowie die Sedimente werden je nach Art des Abflusses (Oberflächenabfluss, Gerinne-Abfluss, Überflutung) mittels der eindimensionalen kinematischen Welle, der zweidimensionalen diffusen Welle und den Flachwassergleichungen zu den Abflussmöglichkeiten (Outlets) geleitet (JETTEN 2002, JETTEN & VAN DEN BOUT 2017). Für Straßen und verdichtete Bereiche können Spezialfälle definiert werden, weiterhin können künstlich entstandene Wasserläufe (z. B. Kanäle) berücksichtigt werden. Abbildung 3 gibt eine Übersicht über die in OpenLISEM integrierten Prozesse.

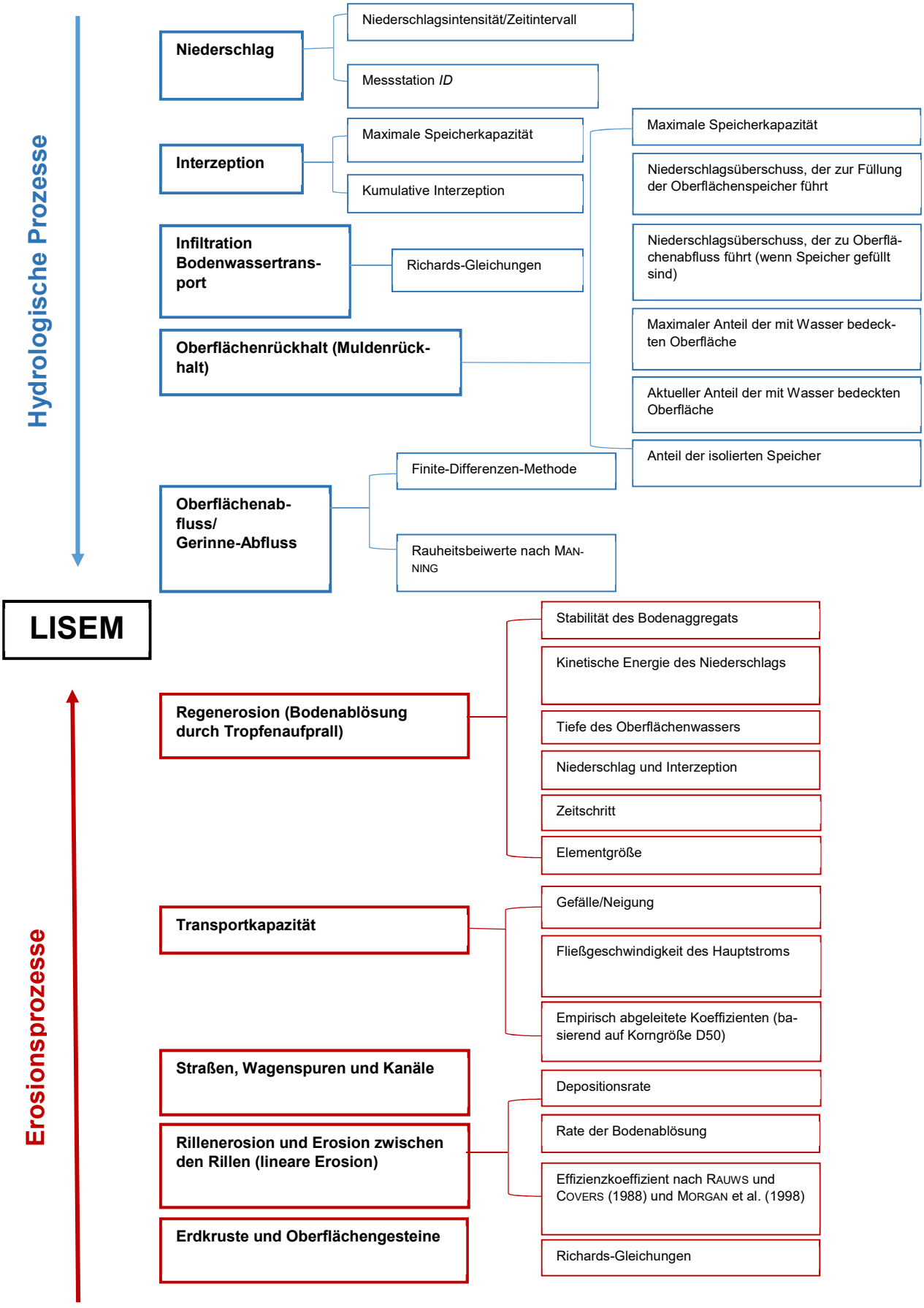

Abb. 3 Übersicht über die in OpenLISEM integrierten Prozesse.

2.5.1 Hydrologische Prozesse

Niederschlag

Für den Niederschlag wird eine Eingangsdatei (ASCII-Datei) generiert, in der die Intensität des Niederschlags pro Zeitschritt angegeben wird. Für die Erstellung der Datei können Daten von verschiedenen Messstationen genutzt werden (JETTEN 2002). Außerdem wird eine Karte zur Identifikation der einzelnen Messstationen mittels einer numerischen *ID* erstellt, die die Zuordnung der Messstationen zu den einzelnen Zellen definiert. Basierend auf dieser Karte und der zuvor erwähnten Eingangsdatei wird während der Simulation des Niederschlagsereignisses für jeden Zeitschritt eine Karte mit den Niederschlagswerten ausgegeben (DE ROO et al. 1996a). Der Niederschlag wird durch seine Intensität modelliert, welche eine räumlich-zeitliche Abhängigkeit aufweisen kann (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

$$\frac{dV}{dt} = Ps_{xy}^2 + \dots$$

Formel 1 Berechnung des Niederschlages über die Niederschlagsintensität, dargestellt als Summand der Wasservolumenänderung.

Wobei V das Wasservolumen in einer Zelle (m^3) bezeichnet, P die Niederschlagsintensität ($m\ h^{-1}$) und s_{xy} die Länge und Breite der Gitterzellen (m).

Die Länge und Breite der Zellen wird je nach der Neigung innerhalb des Gebietes korrigiert. Daher besitzen die Zellen mit einer steileren Neigung eine größere Fläche und der Niederschlag wird über eine größere Fläche verteilt (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Interzeption

Die Simulation der Interzeption durch Kulturpflanzen und natürliche Vegetation erfolgt durch die Berechnung der maximalen Speicherkapazität, die während des Niederschlagsereignisses erreicht wird. Die maximale Speicherkapazität der Interzeption wird mittels folgender Gleichung nach HOYNINGEN-HUENE (1983) berechnet:

$$SMAX = 0.935 + 0.498 \cdot LAI - 0.00575 \cdot LAI^2$$

Formel 2 Gleichung nach HOYNINGEN-HUENE (1983) für die Berechnung der maximalen Speicherkapazität.

wobei *SMAX* die maximale Speicherkapazität (mm) bezeichnet und *LAI* den Blattflächenindex.

Die Gesamtinterzeption wird mit der von ASTON (1979) entwickelten und durch MERRIAM (1960) modifizierten Gleichung simuliert:

$$CINT = SMAX \cdot \left(1 - e^{-(1-p)\cdot \frac{PCUM}{SMAX}}\right)$$

Formel 3 Berechnung der Gesamtinterzeption mit der von ASTON (1979) entwickelten und durch MERRIAM (1960) modifizierten Gleichung.

wobei *CINT* die Gesamtinterzeption (mm) bezeichnet. *PCUM* den Gesamtniederschlag (mm) und *p* den folgenden Korrekturfaktor:

$$p = 1 - 0.048 \cdot LAI$$

Formel 4 Berechnung des Korrekturfaktors *p*.

Gleichung 3 simuliert den durchfallenden Niederschlag bevor *SMAX* erreicht wird.
Um die langsamere Interzeption bei dichter Vegetation zu berücksichtigen, wurde von ASTON (1979) der Faktor *k* eingeführt mit *k* = (1 – p).
Denn nur der Teil des Gesamtniederschlages, der auf die Vegetation fällt (PCUM·PER, wobei PER die von der Vegetation bedeckte Fläche bezeichnet), spielt für die Speicherkapazität der Interzeption eine Rolle.
Mittels der Gesamtinterzeption (*CINT*) wird die Interzeptionsrate berechnet, in dem die Gesamtinterzeption bei der Zeit *(t-1)* von der Gesamtinterzeption bei der Zeit *t* subtrahiert wird.
In OpenLISEM sind einige Gleichungen zur Berechnung der maximalen Speicherkapazität für unterschiedlichen Vegetationstypen integriert. Neben der Interzeption durch Pflanzen, wird auch die Interzeption durch Dächer und Retentionsflächen modelliert. Der Anteil des Niederschlages, der auf diese Flächen fällt, wird gespeichert und erreicht die Bodenoberfläche nicht (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Infiltration und Wasserbewegung im Boden

SWATRE- Modell

Die Infiltration und der Bodenwassertransport werden durch die Richards-Gleichung simuliert, welche die Darcy-Gleichung und die Kontinuitätsgleichung kombiniert:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K(h) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)$$

Formel 5 Richards-Gleichung zur Berechnung der Infiltration und des Bodenwassertransports.

wobei *K* die hydraulische Leitfähigkeit bezeichnet, *h* das Matrixpotential, θ den Wassergehalt des Bodens, *t* die Zeit und *z* die vertikale Raumkoordinate (m).
Für die spezifische Speicherkapazität *C* (mit $C = \partial\theta/\partial h$, dem Anstieg der Saugspannungskurve) ergibt sich die Wassertransportgleichung nach Richards (GISI 1997, DE ROO et al. 1996a):

$$C(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} K(h) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)$$

Formel 6 Wassertransportgleichung nach Richards.

wobei *C* der spezifischen Speicherkapazität entspricht.

Die für die Lösung der Partikel benötigte Saugspannung sowie die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit können mithilfe des MUALEM-VAN GENUCHTEN-Modells bestimmt werden (VAN GENUCHTEN 1980).

Daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$\theta(h) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (ah)^n}\right)^m$$

Formel 7 Gleichung nach dem MUALEM-VAN GENUCHTEN-Modell zur Berechnung der Saugspannung.

wobei θ den relativen Wassergehalt (-) bezeichnet, θ_r den Restwassergehalt (-), θ_s den gesättigten Wassergehalt (-) und *a, n, m* bodenspezifische Parameter (-).
Es gilt:

$$K(h) = \frac{1 - (ah)^{n-2} \cdot (1 + (ah)^n)^{-m}}{(1 + (ah)^n)^{2m}}$$

Formel 8 Gleichung nach dem MUALEM-VAN GENUCHTEN-Modell zur Berechnung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit.

Für die Berechnung in OpenLISEM müssen die Bodentypen des Einzugsgebiets definiert werden. Außerdem wird eine Tabelle mit den Werten zum Matrixpotential, der Saugspannung und dem Wassergehalt für jeden Bodenhorizont benötigt. Die Gleichungen werden mit dem sogenannten Thomas-Algorithmus gelöst (JETTEN 2002). Das SWATRE-Modell nutzt einen dynamischen Zeitschritt, der von dem hydraulischen Potential abhängig ist (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Für Einzugsgebiete ohne genaue Informationen über die Bodenphysik können verschiedene Modellversionen mit empirischen Infiltrationsgleichungen nach Green & Ampt verwendet werden (JETTEN 2002).

Green & Ampt

Bei der Green & Ampt-Infiltrations-Methode wird angenommen, dass sich eine Feuchtefront parallel zur Bodenoberfläche abwärts in die Bodenschichten bewegt. Über dieser Front ist der Boden gesättigt feucht, während unter der Feuchtefront der Boden komplett trocken ist. Nach GREEN & AMPT (1911) kann eine vereinfachte Darcy-Gleichung angewendet werden, wenn die Wasserhöhe über der Bodenoberfläche Null ist. Daraus ergibt sich:

$$f = K\left(\frac{h_f - h_0}{z_f}\right) = K\left(\frac{\Psi}{z_f} + 1\right)$$

Formel 9 Vereinfachte Darcy-Gleichung nach GREEN & AMPT (1911) zur Berechnung der Infiltrationsrate.

wobei *f* die Infiltrationsrate (m s^{-1}) bezeichnet, h_f das hydraulische Potential an der Feuchtefront (m), *h0* das hydraulische Potential an der Bodenoberfläche (m), Z_f die Tiefe der Feuchtefront (m) und Ψ die Saugspannung an der Feuchtefront ($h = \Psi + Z$) (m).
Es gilt:

$$Z_f = \frac{F}{\theta_s - \theta_i}$$

Formel 10 Berechnung der Tiefe der Feuchtefront nach GREEN & AMPT (1911).

wobei F das akkumulierte Volumen des infiltrierten Wassers (m) bezeichnet, θ_s die Durchlässigkeit (Porosität) ($m^3\ m^{-3}$) und θ_i die Vorfeuchte ($m^3\ m^{-3}$).

Der Ψ-Wert ist abhängig vom Bodentyp. Wenn die Formeln 9 und 10 nach GREEN & AMPT (1911) kombiniert werden, ergibt sich die finale Gleichung für die Infiltrationsrate:

$$f = f_{pot} = -K\left(\Psi\frac{\theta_s - \theta_i}{F} + 1\right)$$

Formel 11 Die Kombination von Gleichung 11 und 12 ergibt eine finale Gleichung zur Berechnung der Infiltrationsrate.

wobei f_{pot} die potentielle Infiltrationsrate ($m\ s^{-1}$) bezeichnet.
Diese Methode kann für ein System mit einem oder zwei Layern angewendet werden, mit offenen oder geschlossenen Randbedingungen (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Smith & Parlange

Smith und Parlange nutzen andere empirische Gleichungen um die potenzielle Infiltration zu berechnen (Formeln 12 und 13):

$$f = f_{pot} = -K\frac{C}{C-1}$$

Formel 12 Empirische Gleichung nach Smith & Parlange zur Berechnung der potenziellen Infiltrationsrate.

$$C = e^{\frac{F}{(h_f - h_0)(\theta_s - \theta_i)}}$$

Formel 13 Berechnung des Parameters C nach Smith und Parlange.

wobei C einen dimensionslosen Parameter (-) bezeichnet.

Diese Methode kann ebenso für einen oder zwei Layer angewendet werden. Zwischen den Layern können geschlossene oder offene Randbedingungen gewählt werden (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017). Die Modelle nach Green & Ampt und Smith & Parlange sind sehr empfindlich bezüglich des K_{sat}-Wertes und der Ausgangsbodenfeuchte. Die Annahme, dass sich die Feuchtefront abhängig von der hydraulischen Leitfähigkeit ausbreitet, kann zu großen Unterschieden zwischen gemessenen und berechneten Werten führen. Um möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten, können Bodenproben im Untersuchungsgebiet entnommen und analysiert werden. Eine praktikablere Möglichkeit ist es jedoch, die Modelle zu kalibrieren. Dies kann entweder durch das Herabsetzen der K_{sat}-Werte oder durch die Erhöhung der Ausgangsbodenfeuchte erfolgen (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Oberflächenrückhalt des Wassers

Nach DE ROO et al. (1996a) wird der Oberflächenrückhalt durch eine Reihe von Gleichungen beschrieben, die von ONSTAD (1984) und LINDEN (1988) entwickelt wurden. Die Variable *RR*

(Standardabweichung der gemessenen Höhenwerte (cm)) dient als Maßzahl für die Ausformung des Mikroreliefs. Der Oberflächenrückhalt wird nach ONSTAD (1984) berechnet:

$$RETMAX = 0.112 \cdot RR + 0.031 \cdot RR^2 - 0.012 \cdot RR \cdot S$$

Formel 14 Berechnung des Oberflächenrückhalts nach ONSTAD (1984).

wobei *RETMAX* den maximalen Muldenrückhalt (cm) bezeichnet, *RR* die Standardabweichung der gemessenen Höhenwerte (cm) und *S* die Hangneigung (%).

Der überschüssige Niederschlag (= Niederschlag + Oberflächenabfluss – Interzeption – Infiltration), der benötigt wird, um alle Rückhalteflächen zu füllen, wird mit folgender Gleichung nach ONSTAD (1984) berechnet:

$$RETRAIN = 0.329 \cdot RR + 0.073 \cdot RR^2 - 0.018 \cdot RR \cdot S$$

Formel 15 Berechnung des überschüssigen Niederschlags, der benötigt wird, um alle Rückhalteflächen zu füllen (ONSTAD 1984).

wobei *RETRAIN* dem überschüssigen Niederschlag entspricht, der benötigt wird um alle Rückhalteflächen zu füllen.

MOORE & LARSON (1979) identifizierten drei mögliche Stadien während eines Niederschlagsereignisses:

1. Speicherung des Wassers im Mikrorelief, kein Oberflächenabfluss.
2. Zusätzliche Speicherung im Mikrorelief begleitet von Oberflächenabfluss.
3. Nur Oberflächenabfluss, die maximale Speicherkapazität im Mikrorelief ist erreicht.

Um den Übergang von Stadium 1 nach Stadium 2 zu bestimmen, wurden die Daten von ONSTAD (1984) analysiert und eine Gleichung für den Startpunkt des Oberflächenabflusses entwickelt:

$$DETSTART = RETRAIN \cdot (0.0527 \cdot RR - 0.0049 \cdot S)$$

Formel 16 Gleichung für den Startpunkt des Oberflächenabflusses.

wobei *DETSTART* die benötigte überschüssige Niederschlagmenge bezeichnet, die den Oberflächenabfluss auslöst.

Dementsprechend wird während Stadium 1 der überschüssige Niederschlag als Muldenrückhalt gespeichert. Innerhalb von *DESTART* bis *RETRAIN* treten sowohl Muldenrückhalt als auch Oberflächenabfluss auf und ab *RETRAIN* fließt der überschüssige Niederschlag als Oberflächenabfluss ab. Durch die Beziehung der Gleichungen zueinander ist es möglich den Muldenrückhalt (*RET*) zu berechnen. Außerdem kann mit denselben Eingangsdaten der maximale Anteil der mit Wasser bedeckten Fläche berechnet werden (ONSTAD 1984):

$$FWAMAX = 0.152 \cdot RR - 0.008 \cdot RR^2 - 0.008 \cdot RR \cdot S$$

Formel 17 Berechnung des maximalen Anteils der mit Wasser bedeckten Fläche nach ONSTAD (1984).

wobei *FWAMAX* den maximalen Anteil der mit Wasser bedeckten Fläche bezeichnet.

Der tatsächliche Anteil der mit Wasser bedeckten Fläche wird mit einer Gleichung berechnet, die auf der Arbeit von MOORE & LARSON (1979) und ONSTAD (1984) beruht:

$$FWA = FWAMAX \cdot \left(\frac{RET}{RETMAX} \right)^{0.6}$$

Formel 18 Berechnung des Anteils der mit Wasser bedeckt ist nach MOORE & LARSON (1979) und ONSTAD (1984).

wobei *FWA* den tatsächlichen Anteil der mit Wasser bedeckten Fläche bezeichnet.

Nach LINDEN et al. (1988) sind einige Oberflächenspeicher mindestens zeitweise isoliert und tragen somit nicht zum Oberflächenabfluss bei. Anhand von Versuchen konnte bestimmt werden, dass bei einem Muldenrückhalt (*RET*) unter 75% des maximalen Muldenrückhalts 20% der Oberflächenspeicher isoliert sind. Wenn der Muldenrückhalt zwischen 75 und 100% des maximalen Muldenrückhaltes liegt, ergibt sich folgende Gleichung:

$$FWAISO = 0.20 \cdot FWA \cdot \left(1 - \frac{\frac{RET}{RETMAX} - 0.75}{0.25} \right)$$

Formel 19 Berechnung der isolierten Oberflächenspeicher nach LINDEN et al. (1988).

wobei *FWAISO* den Anteil der isolierten Oberflächenspeicher bezeichnet.

Fließprozesse

Das Modell arbeitet mit drei Typen von Fließprozessen: dem Oberflächenabfluss, dem Gerinne-Abfluss und der Überflutung. Die verschiedenen Fließprozesse werden mit unterschiedlichen numerischen Prinzipien gelöst. Zwischen dem Überflutungsbereich und den Bereichen mit Oberflächenabfluss gibt es keine räumliche Trennung, das heißt, dass alle Fließprozesse in einer Zelle zeitgleich stattfinden können, wobei der Gerinne-Abfluss nur in Zellen erfolgt, die ein Gerinne-Element enthalten (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Abbildung 4 zeigt die Reihenfolge, in der die Prozesse ablaufen. Durch die Prozesse im Boden-Wasserhaushalt (z. B. Niederschlag) ergibt sich Oberflächenwasser, das über eine definierte Oberfläche mit der eindimensionalen kinematischen Welle oder mit der zweidimensionalen diffusen Welle über das digitale Geländemodell geleitet wird. Das Oberflächenwasser kann in ein Gerinne abfließen und wird mittels der eindimensionalen kinematischen Welle simuliert. Wenn dieser Abfluss die Kapazität des Gerinnes übersteigt, kommt es zur Überflutung, die mit der zweidimensionalen voll-hydrodynamischen Welle simuliert wird. Das Oberflächenwasser interagiert mit dem Überflutungsbereich, Prozesse wie die Infiltration werden ebenso für die überfluteten Bereiche berechnet (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

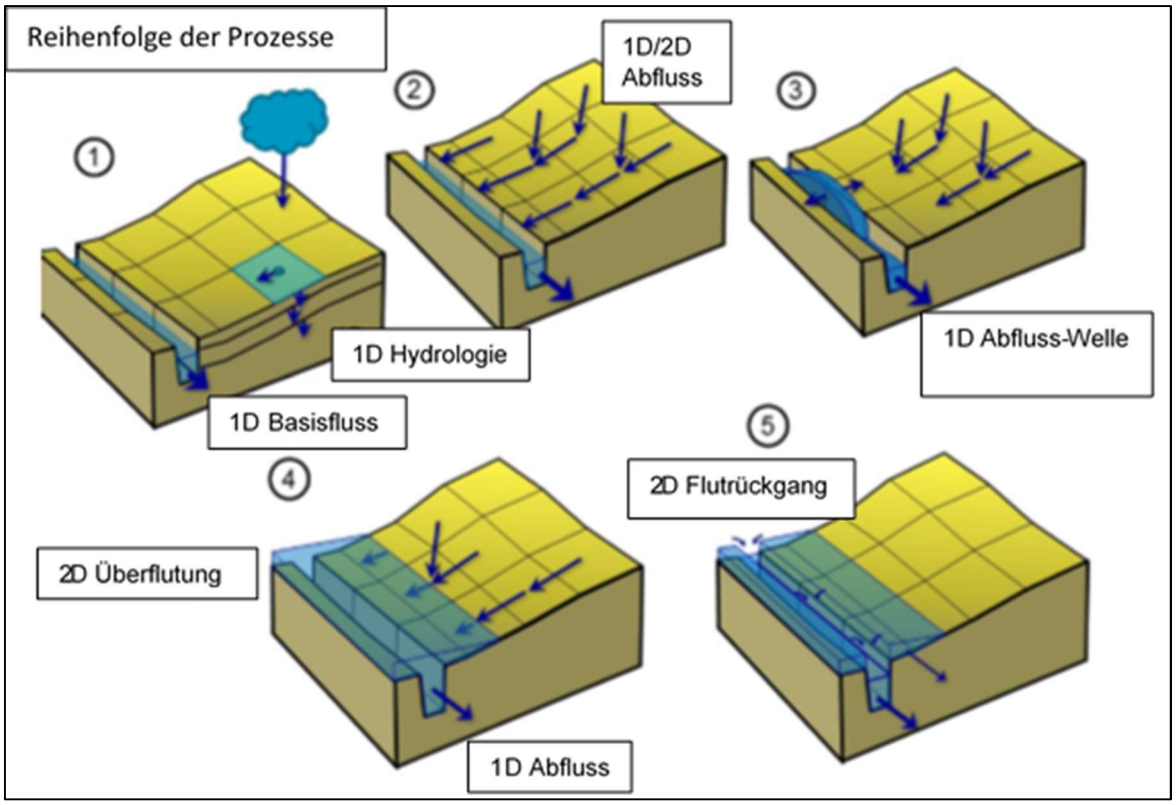

Abb. 4 Übersicht über die Reihenfolge, in der die Prozesse während der Simulation ablaufen (DE ROO et al. 1996a).

Eindimensionaler Oberflächenabfluss – kinematische Welle

Nach JETTEN & VAN DEN BOUT (2017) wird nur der Anteil des Niederschlages als Oberflächenabfluss modelliert, der nicht durch Interzeption, Infiltration und oberflächliche Speicherung zurückgehalten wird. Die Gleichung für die kinematische Welle kann aus dem Massenerhaltungssatz abgeleitet werden. Die Veränderung des Abflussquerschnittes muss dabei der räumlichen Ableitung des Abflusses entsprechen, damit das Volumen des Wassers innerhalb der Welle erhalten bleibt.

Um den Abfluss des Oberflächenwassers über das digitale Geländemodell zu simulieren, wird die folgende Gleichung (Formel 20) zusammen mit der MANNING-Gleichung (Formel 21) für die Fließgeschwindigkeit genutzt. Da es sich um die eindimensionale Form der Gleichung handelt, wird der Oberflächenabfluss über das lokale Gerinne-System abgeleitet.

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dx} = q - i$$

Formel 20 Gleichung für die Simulation des Abflusses des Oberflächenwassers.

Wobei Q den Abfluss ($m^3\ s^{-1}$) bezeichnet, A den Abflussquerschnitt (m^2), i die Infiltration und q andere Wasserquellen (Niederschlag und Schneeschmelze) ($m^3\ s^{-1}$).

Es gilt:

$$u = R^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{\sqrt{s}}{n}$$

Formel 21 Berechnung der Fließgeschwindigkeit nach MANNING.

wobei u die Fließgeschwindigkeit (m ms^{-1}) bezeichnet, R den hydraulischen Radius (m) und n den Rauheitsbeiwert nach MANNING (s $m^{1/3}$).

Die Beziehung zwischen dem Abflussquerschnitt und dem Abfluss wird durch eine Potenzfunktion beschrieben (CHOW 2009):

$$A = \alpha Q^{\beta}$$

Formel 22 Potenzfunktion nach CHOW (2009).

wobei β einen Koeffizienten (= 0,6) (-) bezeichnet.
Es gilt:

$$\alpha = \left(\left(\frac{n}{s^{0.5} R} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\beta}$$

Formel 23 Berechnung des Abflusses nach CHOW (2009).

Die Berechnung in einer einzelnen Zelle erfolgt mit einer räumlichen Diskretisierung der eindimensionalen kinematischen Wellen-Gleichung durch die Substituierung des Abflusses mit dem Abflussquerschnitt. Daraus ergeben sich folgende Gleichungen:

$$\frac{d\left(\alpha Q^{\beta}\right)}{dt} + \frac{dQ}{dx} = q - i$$

Formel 24 Berechnung des Abflusses in einer einzelnen Zelle.

$$\frac{\alpha\beta\left((Q_x^t)^{\beta-1} - (Q_x^{t-1})^{\beta-1}\right)}{\Delta t} + \frac{Q_x^t - Q_{x-1}^t}{dx} = q_x - I_x$$

Formel 25 Berechnung des Abflusses über eine räumliche Diskretisierung.

Da die Gleichung nicht linear ist, wird eine Newton-Raphson-Iteration für die Lösung von Q_x^t verwendet. Die implizite Eigenschaft dieser Gleichung hat eine geringere Sensitivität der eindimensionalen kinematischen Wellen-Gleichung gegenüber des Zeitschrittes zur Folge, daher sind Zeitschritte mit einer Auflösung von Minuten möglich. Die Leitung des Oberflächenabflusses durch das Untersuchungsgebiet ist nur über die lokale Abflussrichtung möglich (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).
Für die Nutzung einer lokalen Abflussrichtung ergeben sich nach JETTEN & VAN DEN BOUT (2017) folgende Annahmen:

- Die Richtung des Oberflächenabflusses kann maximal 9 Werte annehmen.
- Der Abfluss einer Zelle fließt immer in die verbundene Nachbarzelle.
- Das Netzwerk wird vom Nutzer definiert und als durchgängig angenommen, mit einem Outlet für jedes Einzugsgebiet. Die Outlet-Zellen für die Gerinne und das Gewässer bzw. Oberflächenabflussnetz sollten übereinstimmen.
- Die Kontinuität impliziert, dass jeder Oberflächenspeicher, in dem Wasser zwischengespeichert wird, ignoriert wird, da das Netzwerk diese ignoriert. Daraus ergibt sich eine sehr schnelle Lösung für die Berechnung der Strömung, jedoch liefert sie nicht immer realistische Ergebnisse.

Die einzige Möglichkeit, die Strömung zu verlangsamen, ist die Erhöhung der MANNING-Werte.

Diese Annahmen können in bestimmten Situationen zu einem unrealistischen Verhalten führen. Der diagonale Wasserfluss legt eine größere Distanz zurück als der vertikale und horizontale Wasserfluss. Außerdem kann die Größe des Einzugsgebietes dazu führen, dass große Wassermengen zu einer Zelle geleitet werden, da sich das Wasser nicht auf andere Zellen verteilen kann, sondern zusammenläuft. Bei großen Einzugsgebieten oder einer kleinen Zellgröße führt dies zu unrealistischen Überflutungstiefen. Da die Bodenfläche unter dem Abfluss ebenfalls kleiner ist, wird eine zu geringe Infiltration berechnet. Dies kann vor allem einen Einfluss auf die simulierten Erosionsprozesse haben, da sich die Transportkapazität nicht-linear zur Wassertiefe verhält (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Eindimensionale kinematische Welle für den Gerinne-Abfluss

Der Gerinne-Abfluss folgt dem gleichen Prinzip der eindimensionalen kinematischen Welle. Der Nutzer definiert ein oder mehrere durchgehende Gewässernetze, die an einem Outlet-Punkt enden, an dem das Wasser aus dem Gebiet fließt. Entlang dieses Netzwerks wird die kinematische Welle berechnet. Das Ausmaß des Abflusses ist abhängig von der Größe des Gerinnes, dafür müssen dessen Breite und Höhe vom Nutzer definiert werden sowie die Winkel der Seitenwände, die Fließrichtung und die Rauheitsbeiwerte für die Gerinne-Zellen. Das Gerinne kann schmaler oder breiter als die Zelle sein. Der Niederschlag wird direkt den Gerinnen in den jeweiligen Zellen zugeordnet und es wird für das Gerinne keine Interzeption angenommen, jedoch kann es in den Gerinnen zu Infiltration kommen. Diese wird als stationär (unabhängig vom Wasserdruck im Gerinne) angenommen und ist abhängig von der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit. Das Gerinne kann jedoch auch als undurchlässig angenommen werden (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Ein stationärer Basisfluss kann für die Gerinne definiert werden, ohne Zufluss von Grundwasser. Der Nutzer definiert den Basisabfluss für das Outlet und OpenLISEM bestimmt iterativ einen Basisfluss in jeder Gerinne-Zelle. Daraus ergibt sich die Wassertiefe am Outlet-Punkt des Untersuchungsgebietes. Dieser Basisfluss wird während der gesamten Simulation konstant gehalten, während er in der Realität durch den Niederschlag leicht verzögert, ansteigt. Jedoch wird dies in der Simulation nicht berücksichtigt.

Zweidimensionale diffuse Wellen-Gleichung

Die zweidimensionale Wellengleichung wird nach der Zeit und dem Raum diskretisiert und dann explizit gelöst. Um eine gewisse Stabilität zu erhalten, werden kleine Zeitschritte gewählt, die auf dem Courant-Faktor basieren, sodass der Oberflächenabfluss mehrmals während eines Zeitschrittes berechnet wird. Als Lösung ergibt sich eine diffuse Welle. Anders als bei der kinematischen Wellengleichung werden die unterschiedlichen Wassertiefen zwischen den einzelnen Zellen bei der Berechnung der Fließgeschwindigkeit und des Abflusses einbezogen und nicht nur die Wassertiefen innerhalb der Zellen.

Allerdings gilt hier im Vergleich zur voll-hydrodynamischen Welle kein Impulserhaltungssatz (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Für die Ausbreitung des Abflusses als zweidimensionale diffuse Welle wird eine bilineare Interpolation verwendet. Dafür wird die kinematische Wellen-Gleichung für jede Zelle umgeschrieben:

$$\frac{dA_{i,j}}{dt} + Q_{\mathrm{in},i,j} - Q_{\mathrm{out},i,j} = q_{i,j} - I_{i,j}$$

Formel 26 Bilineare Interpolation für die Ausbreitung des Abflusses als zweidimensionale diffuse Welle.

wobei Q_{in} den *inflow* und Q_{out} den *outflow* bezeichnet.

Für jede Zelle ist der *outflow* der gesamte Abfluss, der in eine benachbarte Zelle abfließt, und der *inflow* ist der Gesamtzufluss, der aus benachbarten Zellen in die Zelle fließt. Wenn in eine Zelle Wasser in Abflussrichtung einströmt, kann die Masse jeder benachbarten Zelle im Vergleich zur Zelle mit dem einströmenden Wasser mittles bilineare Interpolation bestimmt werden. Die Masse repräsentiert den Anteil des Abflusses, der in die Zelle transportiert wird (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Saint-Venant-Gleichungen

Nach JETTEN & VAN DEN BOUT (2017) verhält sich der durch Überflutung entstehende Abfluss anders als der Oberflächenabfluss und der Gerinne-Abfluss. Während die Terme der kinematischen Welle ausreichend für Abflüsse mit Massenerhaltung sind, muss bei dieser Methode der Impulsterm berücksichtigt werden. Die Saint-Venant-Gleichungen können aus den Navier-Stokes-Gleichungen abgeleitet werden. Die volle Navier-Stokes-Gleichung für zwei Dimensionen wird in Formel 29 dargestellt:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u\frac{\partial u_x}{\partial x} + \nu\frac{\partial u_x}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{p_f} + \upsilon\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \upsilon\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u\frac{\partial u_y}{\partial x} + \nu\frac{\partial u_y}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x}\frac{1}{p_f} + \upsilon\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \upsilon\frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2}$$

Formel 27 Navier-Stokes-Gleichungen für zwei Dimensionen (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

wobei v die kinematische Viskosität ($m^2\ s^{-1}$) bezeichnet, p den Druck (kPa) und p_f die Dichte der Flüssigkeit ($kg\ m^{-3}$).

Nach JETTEN & VAN DEN BOUT (2017) können einige der Terme vernachlässigt werden, wenn Annahmen zur Art, Größenordnung und den Eigenschaften des Stromes gemacht werden. Die Reibungsterme werden als externe Kraft integriert, die auf den Wasserkörper einwirkt und die vernachlässigt werden kann, wenn für die kinematische Viskosität der Wert Null angenommen wird (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

$$\nu\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \nu\frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} = 0$$

Formel 28 Berechnung der kinematischen Viskosität.

Des Weiteren kann angenommen werden, dass sich der Druck hydrostatisch verhält:

$$p = p_f g h$$

Formel 29 Berechnung des Drucks.

Wenn diese Gleichung mit der Kontinuitätsgleichung kombiniert und umgestellt wird, ergibt sich die zweidimensionale Saint-Venant-Gleichung. Die Reibungskraft sowie die Gravitationskraft werden hier als Anstieg angenommen. Die Fließgeschwindigkeitsvektoren ergeben sich aus der gemittelten Fließgeschwindigkeit und daraus folgt die Zweidimensionalität. In einer dreidimensionalen Lösung wird das vertikale Fließprofil (und der sich daraus ergebende Abfluss und Impuls) spezifiziert (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (h u_x)}{\partial x} + \frac{\partial (h u_y)}{\partial y} = q - I$$

$$\frac{\partial h u_x}{\partial t} + \frac{\partial \left(h u_x^2 + \frac{1}{2} g h^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial (h u_x h u_y)}{\partial y} = g h \left(S_x - S_{f,x}\right)$$

Formel 30 Zweidimensionale Saint-Venant-Gleichungen.

$$\frac{\partial h u_y}{\partial t} + \frac{\partial \left(h u_x h u_y\right)}{\partial y} + \frac{\partial (h u_y^2 + \frac{1}{2} g h^2)}{\partial x} = g h \left(S_y - S_{f,y}\right)$$

Formel 31 Dreidimensionale Saint-Venant-Gleichung. Die dritte Dimension ergibt sich aus dem vertikalen Fließprofil.

Wobei S_x und S_y die Anstiege in die *x*- und *y*-Richtung (m m^{-1}) bezeichnen und $S_{f,x}$ und $S_{f,y}$ die Terme für den Anstieg der Reibungskraft in die x- und y-Richtung.

Die Terme für den Anstieg der Reibungskraft werden mit der Darcy-Weißbach-Gleichung berechnet (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

$$S_{f,x} = n^2 \frac{u_x \left|\vec{u}\right|}{h}$$

$$S_{f,y} = n^2 \frac{u_y \left|\vec{u}\right|}{h}$$

Formel 32 Darcy-Weißbach-Gleichung zur Berechnung der *x*- und *y*-Terme für den Anstieg der Reibungskraft.

Die Gleichungen werden mit der FullSWOF2D-Funktion gelöst, indem die Strömungswerte für jede Zellengrenze berechnet werden. Um diese zunächst abzuschätzen, wird ein Schema nach MUSCLE (Monotonic Upstream-Centered Scheme for Conservation Laws) benutzt, das mittels der Taylor-Approximation alle für die Berechnung der Strömung benötigten Werte abschätzt. Im zweiten Schritt werden die Strömungen mit einem Riemann-Solver berechnet. Diese Funktion bietet die Möglichkeit, Riemann-Probleme zu lösen, um das Verhalten von Schockwellen zu erfassen. In OpenLISEM sind mehrere Riemann-Solver integriert, wie z.B. Harten-Lax-van Leer. Die berechneten Strömungen werden dann in

einer expliziten Diskretisierung der Saint-Venant-Gleichung genutzt. Außerdem kann das Heun's-Predictor-Scheme für die Modellierung mit OpenLISEM genutzt werden (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Koppelung der Fließprozesse

Koppelung von Oberflächenabfluss und Gerinne-Abfluss

Um den *inflow* der Oberfläche in den Gerinnen zu berechnen, wird angenommen, dass die Richtung des Oberflächenabflusses in den Zellen mit Gerinne-Anteil, senkrecht zur Richtung des Gerinnes verläuft. Es wird des Weiteren angenommen, dass das Gerinne in der Mitte liegt. Auf diese Art ist es möglich anhand von Gerinne-Breite und Fließgeschwindigkeit den Anteil des Wassers zu berechnen, der in das Gerinne fließt (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

$$f_{qch} = \frac{dt\,u}{0.5(C_{xy} - B_c)}$$

Formel 33 Berechnung des Wasseranteils, welches in ein Gerinne fließt.

Wobei B_c die Gerinne-Breite an der Oberfläche (m) bezeichnet.

Dieser Anteil wird dann mit dem Volumen des Oberflächenabflusses und dem *inflow*-Volumen multipliziert und mit dem Gerinne-Volumen addiert. Anschließend werden alle Fließgeschwindigkeiten sowie die Strömung, der Sedimentgehalt und die Konzentration für die Gerinne-Zellen erneut berechnet (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Koppelung des Gerinne-Abflusses und der Überflutungsbereiche

Nach JETTEN & VAN DEN BOUT (2017) können in den Gerinne-Zellen verschiedene Situationen auftreten:

- Die Wasserhöhe im Gerinne übersteigt die das Gerinne umgebende Wasserhöhe. Das Wasser fließt dann mit einer Geschwindigkeit, die abhängig vom Unterschied der Wasserhöhen, der Neigung und den MANNING-Werten der Umgebung ist. Der Abfluss aus dem Gerinne endet an der Zellgrenze und führt zu einem erhöhten Flutniveau. Dieses wird dann in den Berechnungen der zweidimensionalen Wellengleichung verwendet, was zu einer weiteren Ausbreitung des Wassers führt. Die Ausbreitung wird dann gestoppt, wenn das Wasser ein ausgeglichenes Niveau innerhalb des Zeitschrittes erreicht hat.
- Die Wasserhöhe im Gerinne ist geringer als die Wasserhöhe der Umgebung. Wasser fließt von beiden Seiten in das Gerinne, abhängig von der Fließgeschwindigkeit, wenn die Überflutung als dynamische Welle fungiert. Der Abfluss in das Gerinne endet, wenn ein ausgeglichenes Niveau innerhalb des Zeitschrittes erreicht wird.
- Wenn die Wassertiefe der Überflutung sehr gering ist und sich die Wassertiefe im Gerinne unter der Gerinne-Höhe befindet, gibt es weder Zufluss noch Abfluss.

Die Interaktion zwischen Gerinne-Zellen und Überflutung ist abhängig von der Fließgeschwindigkeit und der Distanz, aber bis zu einem gewissen Punkt unabhängig von der räumlichen und zeitlichen

Auflösung. Überschüssiges Wasser aus dem Gerinne wird sofort in Überflutungswasser umgewandelt, umgekehrt strömt Wasser in das Gerinne sofern dieses seine Kapazität noch nicht erreicht hat (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

Kopplung des Oberflächenabflusses und der Überflutungsbereiche

Der Oberflächenabfluss, der eine Überflutungszelle erreicht, wird mit deren Überflutungshöhe kombiniert. Jedoch scheint es, dass ein einfacher Transfer des Oberflächenwassers zum Überflutungswasser am äußeren Rand der Zelle zu einer Instabilität der Berechnung führen kann, da der Abfluss beträchtlich sein kann, während die Überflutungshöhe eher gering ist. Daher wird angenommen, dass der Abfluss einen Impuls besitzt und nur bis zu einem bestimmten Punkt dem Überflutungswasser zufließt. Simuliert wird dies durch eine Erhöhung der Rauheitsbeiwerte nach MANNING (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

$$n_{eff} = n \cdot \exp\left(c_m h_{fl}\right)$$

Formel 34 Geleichung zur Erhöhung der Rauheitsbeiwerte nach MANNING.

Wobei c_m den Vermischungskoeffizienten, der mit 2,0 angesetzt wird (beliebig), bezeichnet, h_{fl} die Höhe der Überflutung, n den Rauheitsbeiwert nach MANNING und n_{eff} den effektiven Rauheitsbeiwert nach MANNING.

In jeder Zelle, in der eine Vermischung stattfindet, wird ein Teil des Abflusses der Überflutung hinzugefügt, während der andere weiterfließt. Der zur Überflutung hinzugefügte Anteil wird durch eine Exponentialfunktion (ungetestet) bestimmt.

$$f_p = 1 - \exp\left(-c_p \frac{h_{of}}{h_{fl}}\right)$$

Formel 35 Berechnung des Wasseranteils, der zur Überflutung hinzugefügt wird.

Wobei f_p den Aufteilungskoeffizienten (0-1) bezeichnet, c_p den Aufteilungskoeffizienten, der mit 2,0 angesetzt wird (beliebig) und h_{of} die Wasserhöhe des Oberflächenabflusses.

Ein hoher Aufteilungskoeffizient führt zu einer geringeren Vermischung von Oberflächenwasser und Überflutungswasser (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

2.5.2 Erosionsprozesse

Niederschlagserosion

Nach DE ROO et al. (1996a) wird die Niederschlagserosion (auch Regentropfenerosion) als Funktion der Aggregatstabilität, der kinetischen Energie des Niederschlages und der Tiefe der oberflächlichen Wasserschicht simuliert. Die Kalibrierung dieses (Unter-)Modells erfolgte durch Feldexperimente. Die kinetische Energie des Niederschlags ergibt sich aus dem durchfallenden Niederschlag und dem Abfluss von den Blättern der Pflanzen.

Im Modell wird die folgende Gleichung benutzt:

$$DETR = \left(\frac{2.82}{AGGRSTAB} \cdot KE \cdot e^{-1.48 \cdot DEPTH} + 2.96 \right) \cdot (P - I) \cdot \frac{(dx)^2}{dt}$$

Formel 36 Berechnung der Planschwirkung des Niederschlages.

wobei *DETR* die Planschwirkung (g s^{-1}) bezeichnet, *AGGRSTAB* die Aggregatstabilität, *KE* die kinetische Energie des Niederschlags, *DEPTH* die Tiefe der oberflächlichen Wasserschicht (mm), *P* den Niederschlag (mm), *I* die Interzeption (mm), *dx* die Größe eines Elementes (m) und *dt* den Zeitschritt.

Der Anstieg der Wasserhöhe sorgt für eine abnehmende Niederschlagserosion, da die kinetische Energie des Niederschlages durch die Wasserschicht verringert wird. Die kinematische Energie wird einmal für den Niederschlag und für den durchfallenden Niederschlag berechnet:

$$K_{e,r} = 8.95 + 8.44 \log(P_h)$$

Formel 37 Berechnung der kinematischen Energie des Niederschlages.

$$K_{e,t} = 15.8 \sqrt{h_{veg}} - 5.87$$

Formel 38 Berechnung der kinematischen Energie des durchfallenden Niederschlages.

wobei P_h den durchfallenden Niederschlag (mm) bezeichnet, h_{veg} die Höhe der Vegetation (m). $K_{e,r}$ die kinetische Energie des durchfallenden Niederschlags (J m^{-2} mm^{-1}) und $K_{e,t}$ den Niederschlag der von der Vegetation auf den Boden fällt (J m^{-2} mm^{-1}).

Bereiche mit Oberflächenspeichern (die Berechnung erfolgt mit den Gleichungen für die Oberflächenspeicherung) werden genutzt um eine trockene Niederschlagserosion (Niederschlag fällt auf trockene Erde) und eine feuchte Niederschlagserosion (Niederschlag fällt auf feuchte Erde) zu berechnen. Dies verändert die Niederschlagswerte und die Aggregatstabilität (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017):

$$P_{nonroad} = (1 - f_{road}) \cdot P$$

Formel 39 Berechnung des Niederschlages, der auf Oberflächen fällt, die keine Straßen darstellen.

$$A_{nonroad} = (1 - f_{road}) \cdot A$$

Formel 40 Berechnung der Größe der Flächen, die keine Straße darstellen.

wobei $P_{nonroad}$ den Niederschlag bezeichnet, der auf Oberflächen fällt, die keine Straßen sind (mm), $A_{nonroad}$ die Größe der Flächen, die keine Straßen sind (m^2) und f_{road} den Anteil der Zelle, der mit Straßen bedeckt ist (-).

Transportkapazität

Die Transportkapazität des Oberflächenabflusses wird als Funktion der nichtspezifischen Strömungskraft nach GOVERS (1990) simuliert:

$$TC = Cl \cdot (S \cdot V - 0.4)^{Dl}$$

Formel 41 Berechnung der Transportkapazität.

wobei *TC* das Volumen der Transportkapazität ($cm^3\ cm^{-3}$) bezeichnet, *S* die Hangneigung ($m\ m^{-1}$) und *V* die mittlere Fließgeschwindigkeit ($cm\ s^{-1}$). *Cl* und *Dl* sind empirisch abgeleitete Koeffizienten, die auf der Korngröße *D50* der obersten Bodenschicht beruhen (GOVERS 1990). In OpenLISEM können diese Koeffizienten zur Kalibrierung des Modelles genutzt werden.

Rillenerosion und Erosion zwischen den Rillen (lineare Erosion)

Die durch den Oberflächenabfluss entstehenden Erosions- und Ablagerungsprozesse werden mit einer Gleichung des EUROSEM-Modells gelöst (MORGAN et al. 1998). Wenn die Transportkapazität des Abflusses geringer ist als der Anteil der verfügbaren Sedimente, erfolgt eine Ablagerung mit folgender Rate:

$$DEP = w \cdot v_s \cdot (TC - C)$$

Formel 42 Berechnung der Depositionsrate.

wobei *DEP* die Ablagerungsrate ($kg\ m^{-3}$) bezeichnet, *w* die Breite des Stromes (m), *v* die Absetzgeschwindigkeit der Partikel ($m\ s^{-1}$), *TC* die Transportkapazität ($kg\ m^{-3}$) und *C* die Sedimentkonzentration im Strom.

Wenn die Transportkapazität den Anteil verfügbarer Sedimente im Strom übersteigt, kommt es zur Erosion, die durch folgende Gleichung beschrieben wird (MORGAN et al. 1992, MORGAN 1994):

$$DF = ywu_s(TC - C)$$

Formel 43 Formel zur Berechnung der Erosionsrate.

wobei *DF* die Abtragungsrate bezeichnet ($kg\ m^{-3}$) und *y* einen Effizienzkoeffizienten, der von RAUWS & GOVERS (1988) sowie MORGAN et al. (1992) ermittelt wurde:

$$y = \frac{u_{gmin}}{u_{gcrit}} = \frac{1}{0.89 + 0.56\,COH}$$

Formel 44 Effizienzkoeffizient nach RAUWS & GOVERS (1988) und MORGAN et al. (1992).

wobei u_{gmin} einem Wert entspricht, der für die kritische Schergeschwindigkeit ($cm\ s^{-1}$) benötigt wird, u_{gcrit} bezeichnet die kritische Schergeschwindigkeit, bei der die Rillenformung beginnt und *COH* die Kohäsion bei einer bestimmten Sättigung (kPa).

In OpenLISEM können sowohl die Kohäsion des unbedeckten Bodens als auch die Kohäsion, die zusätzlich durch Pflanzen entsteht, als Karten eingegeben werden. Beide Werte werden addiert und in Gleichung 46 verwendet (DE ROO et al. 1996a).

Straßen, Wagenspuren und Kanäle

Straßen und Traktorspuren, die kleiner sind als die Zellgröße, werden durch Informationen über ihre Breite simuliert. Entsprechend der Breite ergibt sich ein prozentualer Anteil an der Zelle, in dem keine Interzeption stattfinden, dies gilt sowohl für Wagenspuren als auch für Straßen.

Im Bereich der Straßen findet zudem weder Infiltration noch Regenerosion (Niederschlagserosion) statt. Die Bodenwasserbewegung in Wagenspuren wird aufgrund der Bodenverdichtung separat simuliert und die Werte werden einer entsprechenden Tabelle entnommen. Der Wasser- und Sedimentfluss in Kanälen wird ebenfalls separat mit dem Rauheitsbeiwert nach MANNING für das Gerinne-Bett, der Breite des Gerinnes, der Gerinne-Steigung, der Form des Gerinnes und der Kohäsion im Gerinne-Bett simuliert (DE ROO et al. 1996a).

Verkrustete Böden und Oberflächengesteine

Die Infiltration in verkrustete Böden wird einer Tabelle mit Werten für die Leitfähigkeit unterschiedlicher verkrusteter Böden entnommen und der prozentuale Anteil des verkrusteten Bodens an der Zelle wird in eine Karte eingegeben.

Die Richards-Gleichung wird für normale Böden und verkrustete Böden gelöst, die Wassermenge wird summiert und anschließend werden die anderen Prozesse simuliert. Der Anteil der Zellen, die mit Oberflächengesteinen bedeckt sind, können ebenfalls in einer separaten Karte gegeben werden (DE ROO et al. 1996a).

2.5.3 Eingabe- und Ausgabedateien

Im folgenden Abschnitt werden die Eingangsdaten beschrieben, die OpenLISEM für die Simulation der hydrologischen Prozesse und der Erosionsprozesse benötigt.

Eingabe-Dateien

Niederschlagsdaten werden als Tabelle und die Daten der Niederschlagsmessstationen werden als Karten in das Modell eingegeben. Die Daten einer oder mehrerer Messstationen werden in eine Datei eingegeben, die für jeden Zeitschritt die entsprechende Niederschlagsmenge enthält. In einer Stationskarte wird jeder Zelle eine bestimmte Messstation mit entsprechender Identifikationsnummer zugeordnet. Dadurch wird die räumliche und zeitliche Variabilität des Niederschlags im Modell berücksichtigt (DE ROO et al. 1996a).

In OpenLISEM ist eine modifizierte Version des SWATRE-Modells integriert, welches die vertikale Bewegung des Wassers im Boden simuliert. Dazu werden im Einzugsgebiet die unterschiedlichen Bodenprofile definiert und anschließend auf eine benutzerdefinierte Anzahl von Layern unterteilt. Für jeden charakteristischen Bodenhorizont werden die Daten für die hydraulische Leitfähigkeit (K), das Matrixpotential (h) und den Wassergehalt des Bodens (θ) aus einer Tabelle für die spezifischen Bodenhorizonte entnommen (DE ROO et al. 1996a).

OpenLISEM benötigt für die Simulation eine Reihe von Karten im PCRaster-Format (map-Datei). Eine Übersicht über die benötigten Karten gibt Tabelle 1.

Tabelle 1 Übersicht über die von OpenLISEM benötigten Karten für die Simulation der verschiedenen Prozesse nach DE ROO et al. (1996a).

Kartengruppe	Benötigte Karte
Morphologie des Einzugsbereiches	-Definition des Einzugsgebietes -Definition der räumlichen Niederschlagsmuster -Definition der Orte für den Hauptabfluss aus dem Einzugsgebiet und den Nebeneinzugsgebieten -Lokale Abflussrichtung -Neigungswinkel -Rauheitsbeiwert nach MANNING für den Oberflächenabfluss -Neigungswinkel der Hauptströme (Gerinne) -Rauheitsbeiwerte nach MANNING für den Gerinne-Abfluss (Abfluss in den Wasserläufen) -Zwei Karten, die die Morphologie der Wasserläufe beschreiben -Lage und Breite der Straßen -Lage und Breite der Reifenspuren von Traktoren
Bodenwasser-Modell	-Bodenprofiltypen mit Bezug auf die Tabelle mit der spezifischen Leitfähigkeit -Bodentyp unter den Traktorspuren -Bodentyp unter verkrusteten Böden -Anfängliches Matrixpotenzial für jede Bodenschicht -Green und Ampt-Infiltrations-Variablen
Boden- und Landnutzung	-Blattflächenindex -Fläche, die mit Vegetation bedeckt ist -Höhe der Kulturpflanzen -*Random Roughness* für die Bodenoberfläche -Aggregatstabilität des Bodens -Kohäsion der unbedeckten Bodenfläche -Kohäsion, die von der Vegetation verursacht wird -Kohäsion der Wasserläufe

Wenn das Modell eingesetzt werden soll, ist der Nutzer angehalten das Einzugsgebiet, das Niederschlagsereignis und einige Parameter zu bestimmen sowie den gewünschten Output festzulegen. Dies

kann über eine grafische Benutzeroberfläche geschehen. Alternativ kann der Nutzer die Parameter in einem sogenannten Run-file spezifizieren.

Das Interface bietet dem Nutzer unter anderem folgende Einstellungsmöglichkeiten:

1. Auswahl des Einzugsgebietes durch die Spezifizierung des Auswahlverzeichnisses der topografischen Karten sowie Boden- und Landnutzungskarten.
2. Bestimmung eines Verzeichnisses, in das die Ausgabedateien ausgegeben werden.
3. Auswahl des Niederschlagsereignisses und Bestimmung der Niederschlagsdatei.
4. Auswahl des Start- und Endpunktes der Berechnung.
5. Auswahl der Zeitschritte für das Modell und des minimalen Zeitschrittes für das Boden-Wasser-Modell.
6. Auswahl eines Präzisionsfaktors für das Boden-Wasser-Modell.
7. Auswahl einer Anzahl von Parametern und Koeffizienten, die in den Erosions- und Transportgleichungen verwendet werden sollen (z. B. Absetzgeschwindigkeit der Partikel).
8. Auswahl der Namen für die Ausgabedateien (z. B. die Abflussganglinien-Datei, die Karten zum Abfluss zu verschiedenen Zeitpunkten, die Bodenerosionskarten und die Ergebnisdatei mit allen Werten).

Ausgabe-Dateien

Die Ergebnisse des OpenLISEM-Modells bestehen aus:

1. Einer Datei mit den Gesamtwerten (Gesamtniederschlag, Gesamtabfluss, gesamter Bodenverlust etc.).
2. Einer Datei mit Zeitschritten, so dass die Möglichkeit besteht, zu jedem Zeitschritt den Hydrographen grafisch darzustellen.
3. PCRaster-Karten zu Bodenerosion und Ablagerung, die durch das Niederschlagereignis verursacht wurden.
4. PCRaster-Karten zum Oberflächenabfluss zu den gewünschten Zeitschritten während des Niederschlagsereignisses.

Nach JETTEN (2002) ist es empfehlenswert eine bestimmte Ordnerstruktur für die Simulation mit OpenLISEM anzulegen. Es wird ein Haupt-Ordner angelegt, in dem sich in Unter-Ordnern alle benötigten Daten befinden (s. Abb. 5).

Abb. 5 Empfohlene Ordnerstruktur nach Jetten (2002).

Im Ordner „maps“ werden alle Karten gespeichert, die für die Simulation benötigt werden. Der „Rainfall“-Ordner enthält die Datei mit den Niederschlagsdaten. Der „run“-Ordner enthält die Run-Datei und im „res“-Ordner werden alle Ergebnisse gespeichert.

3 Aktueller Stand der Forschung

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Zusammenfassung der durchgeführten Literaturrecherche zur Überflutungssimulation mit OpenLISEM. Dafür wurden acht Untersuchungen ausgewählt, die einen Überblick zum aktuellen Stand der Forschung sowie die unterschiedlichen Methoden, mit denen die Karten für OpenLISEM erstellt werden können, geben sollen. Folgende Fragestellungen wurden untersucht:

- Welche Eingangsdaten wurden verwendet und wie wurden die Daten erhoben und aufbereitet?
- Welcher Niederschlag wurde verwendet (z. B. homogener Niederschlag, räumlich-zeitlich variabler Niederschlag, Modellregen)?
- Wie erfolgte die Kalibrierung des Modells und welche Parameter wurden angepasst?
- Wie erfolgte die Validierung des Modells?
- Welche Ergebnisse lieferte das Modell?

Tabelle 2 enthält einen Überblick über die ausgewerteten Studien, die für die Literaturrecherche verwendet wurden. Abbildung 6 enthält eine Übersicht über die Gebiete, in denen die Studien durchgeführt wurden.

Tabelle 2 Überblick über die ausgewerteten Studien.

ID-Karte	Autoren	Studie
A	BAARTMAN et al. (2012)	Exploring effects of rainfall intensity and duration on soil erosion at the catchment scale using OpenLISEM: Prado catchment, SE Spain
B	BREBANTE (2017)	Analyzing the Effects of Land cover/ Land use changes on Flashflood: A case study of Markinia River Basin (MRB), Phillipines
C	ELIJZEN (2017)	The effects of climate change on the robustness of the urban drainage system of the Soesterkwartier
D	HABONIMANA (2014)	Integrated Flood Modelling in Lubigi Catchment Kampala
E	HABONIMANA et al. (2015)	Integrated flood modeling for flood hazard assessment in Kigali City, Rwanda
F	JETTEN (2016)	CHaRIM Project – Dominica National Flood Hazard Map – Methodology and Validation Report
G	JETTEN & CHAVARRO (2016)	Flood modelling for Integrated Watershed Management Bois d'Orange watershed St Lucia.
H	NURRITASARI et al. (2015)	OpenLISEM Flash Flood Modelling Application in Logung Sub-Catchment, Central Java

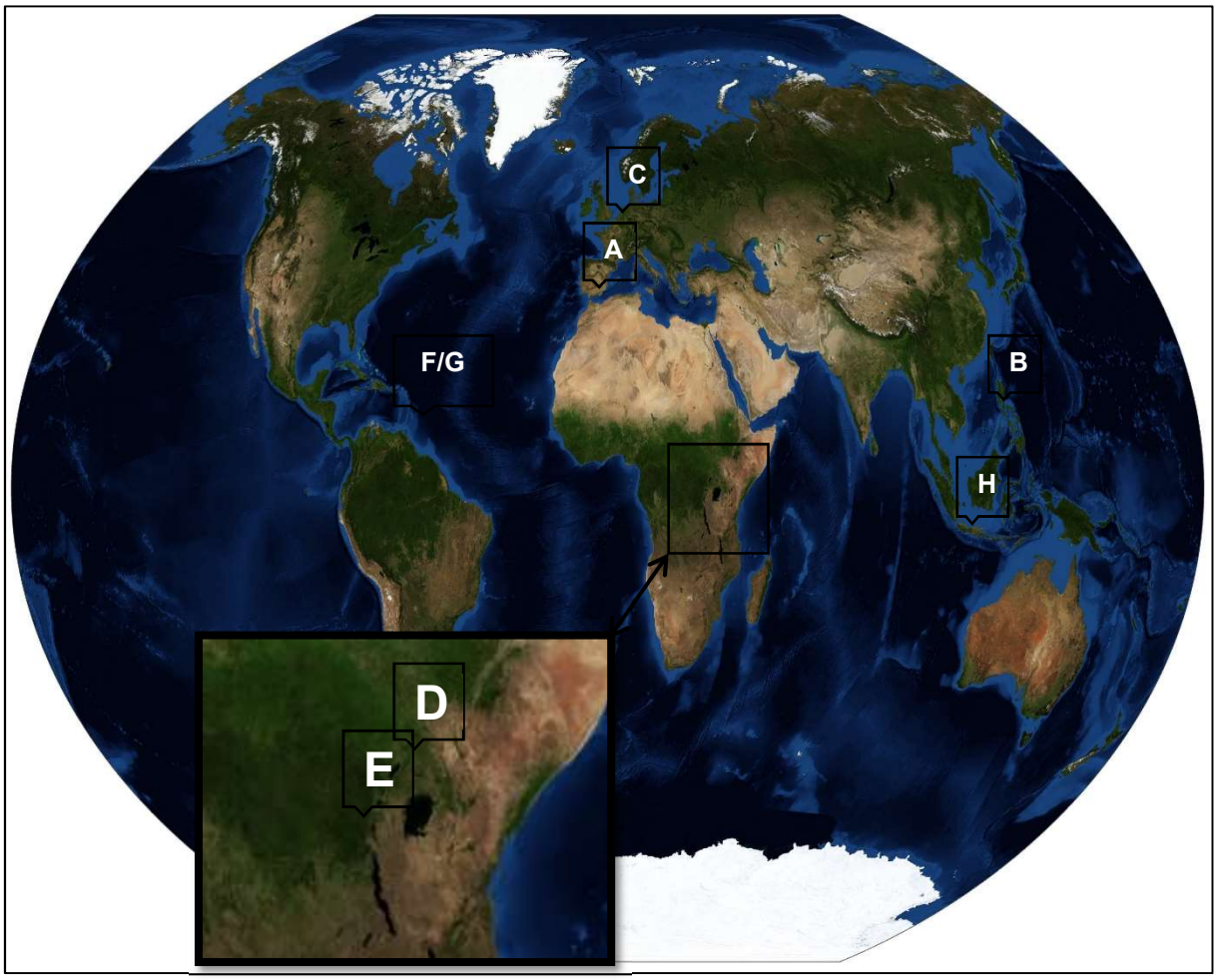

Abb. 6 Übersicht über die Gebiete, in denen die Studien durchgeführt wurden. Die Legende kann aus Tabelle 2 (ID-Karte) entnommen werden (Quellenangabe S. 66).

3.1 Eingangsdaten

3.1.1 Digitales Geländemodell

Die Erstellung eines digitalen Geländemodells (DGM), welches die Höhendaten enthält, kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. In der Untersuchung von JETTEN (2016) lag bereits ein DGM im Rasterformat vor, welches in eine andere Auflösung transformiert wurde. NURRITASARI et al. (2015) nutzten eine topografische Karte, aus der das DGM berechnet wurde. In der Studie von HABONIMANA et al. (2015) wurde das DGM aus einem von dem Rwanda Natural Resources Authority (RNRA) zur Verfügung gestellten DGM (10 m) extrahiert. In der Untersuchung von BREBANTE (2017) wurde das DGM mit ERDAS und ArcGIS erstellt bzw. vorbereitet und anschließend in ASCII-Dateien mit einer Zellgröße von 30 m umgewandelt. In der Studie von JETTEN & CHAVARRO (2016) wurde das DGM mittels Kriging-Interpolation in einer Auflösung von 10 x 10 m erstellt und anschließend mit der „window average“-Funktion in PCRaster neu berechnet. Das daraus resultierende DGM hat eine Auflösung von 20 x 20 m.

3.1.2 Landnutzungskarte

Anhand der Landnutzungskarte können unterschiedliche Parameter bezüglich der Vegetation bestimmt werden (HABONIMANA 2014). Zudem kann die Berechnung der Infiltration ebenfalls über die Landnutzungskarte gesteuert werden, in dem zuvor definierten Landnutzungsklassen entsprechende Infiltrationsraten zugewiesen werden (ELIJZEN 2017).In einer Reihe von Studien wurden die Landnutzungsklassen anhand von Bildern klassifiziert, dazu wurden hochauflösende Bing-Bilder (NURRITASARI et al. 2015), worldview-Bilder (HABONIMANA et al. 2015) oder Pleiades- und RapidEye-Bilder (JETTEN & CHAVARRO 2016) genutzt. In der Studie von BAARTMAN et al. (2012) wurden die Landnutzungsklassen nach der CORINE 2000-Landnutzungsklassifikation definiert. Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Vegetationsdaten (z. B. Blattflächenindex, Vegetationshöhe u.a.) ist die Erhebung von Daten in Feldversuchen oder die Entnahme der entsprechenden Werte aus der Literatur (BAARTMAN et al. 2012).

3.1.3 Bodenkarte

Für die Berechnung der Infiltration wird eine Bodenkarte mit den entsprechenden Bodentypen benötigt. Die Karten wurden entweder von öffentlichen Stellen bezogen (JETTEN 2016, BAARTMAN et al. 2012, JETTEN & CHAVARRO 2016) oder mit Daten aus Feldversuchen erstellt (HABONIMANA 2014, NURRITASARI et al. 2015). Die Werte, die für die Berechnung der Infiltration benötigt werden, wurden entweder selbst erhoben oder aus der Literatur entnommen (BREBANTE 2017, HABONIMANA 2014). In den Untersuchungen von JETTEN (2016) und JETTEN & CHAVARRO (2016) wurden standardisierte USDA-Texturklassen verwendet um die Bodeneigenschaften mittels der Pedotransfer-Funktion (SAXTON & RAWLS 1986) abzuleiten, hierbei wird auch der Steinanteil berücksichtigt.

3.1.4 Straßen

JETTEN (2016) und JETTEN & CHAVARRO (2016) nutzten in ihren Untersuchungen Shape-Dateien des Straßennetzes und teilten die Straßen in Klassen mit entsprechender Breite ein. In der Studie von BREBANTE (2017) wurde eine Karte von OpenStreetMap als Grundlage verwendet. Die Straßen wurden in Primär-, Sekundär- und Tertiär-Straßen eingeteilt. Die Breite der einzelnen Straßen waren angenäherte Messungen, die auf Google Earth basierten und zwischen 3 m und 30 m lagen.

3.1.5 Gebäude

Die Gebäude wurden in drei Studien berücksichtigt. In der Untersuchung von ELIJZEN (2017) wurden die Gebäude durch die Zuweisung einer Infiltrationsrate berücksichtigt. Bei JETTEN (2016) lagen für die Gebäude innerhalb der Siedlung genaue Daten vor. Gebäude, die sich außerhalb der Siedlung befanden, wurden als Punkte dargestellt. Da für diese Gebäude keine genauen Informationen vorlagen, wurde eine Größe von 100 m² angenommen. JETTEN & CHAVARRO (2016) nutzen eine Shape-Datei mit Gebäudeinformationen (FUGRO). Diese wurde in eine Rasterkarte mit einer Auflösung von 1 x 1m umgewandelt und anschließend zu einer Bebauungsdichte bezüglich einer Auflösung von 10 m bzw. 20 m umgerechnet.

3.1.6 Gerinne

Bei der Erstellung der Gewässernetzwerke tritt oft das Problem auf, dass die Gerinne nicht mit den tiefsten Punkten im digitalen Geländemodell übereinstimmen. In der Untersuchung von JETTEN (2016) wurde ein künstliches Gewässernetz genutzt, welches auf dem DGM basiert. Alle Outlets wurden manuell auf Basis von hochauflösenden Bildern von Google Earth, korrigiert. In der Studie von HABONIMANA et al. (2015) wurden die Daten anhand von Felduntersuchungen gewonnen, in denen die Gerinne an 97 Punkten vermessen wurden. In der Untersuchung von HABONIMANA (2014) wurden ebenfalls Feldversuche als Datengrundlage verwendet. In der Studie von BREBANTE (2017) wurde das Gewässernetz aus OpenStreetMap-Daten generiert und die Konturen sowie die Breite der Gerinne später in ArcGIS nach dem LIDAR-DGM angepasst. JETTEN & CHAVARRO (2016) nutzten eine Shape-Datei, in der die Gerinne in zwei Klassen eingeteilt wurden (natürliche Gerinne und künstliche Gerinne). Diese Datei kombiniert digitalisierte und natürliche Gerinne in der Küstenzone mit aus dem DGM generierten Flüssen in schlecht sichtbaren Bereichen (z. B. unter Vegetation). ELIJZEN (2017) nutzt für die Modellierung des Kanalsystems das Modell SOBEK.

3.2 Niederschlag

BAARTMAN et al. (2012) nutzten in ihrer Untersuchung die Niederschlags- und Abflussdaten aus dem EU MEDALUS-Projekt. Auf Basis des EVI (Event Index) wurden vier Niederschlagsereignisse ausgewählt. Da es sich um heterogene Niederschläge handelt, wurden die Daten von 10 Messstationen in ArcGIS mit der inversen Distanz-Wichtung interpoliert und in Klassen eingeteilt. Die Gesamtniederschlagsmenge wurde dann in Beziehung zu den gemessenen Werten der Station Prado gesetzt. Dieser Koeffizient wurde genutzt, um die genaue Niederschlagsintensität für jede Klasse zu berechnen.

Der Untersuchung von BREBANTE (2017) liegen fünf Szenarien zugrunde. Für das erste und das zweite Szenario wurde jeweils eine Niederschlagskarte generiert. Um die räumliche Variabilität der Niederschläge zu berücksichtigen, wurden die Daten von vier umliegenden Messstationen mit der Thiessen-Polygon-Methode interpoliert. Für Szenario 3-5 wurde ein gleichmäßiger Niederschlag angenommen, der in einer Station gemessen wurde (Science Garden Station). Für die Modellierung wurde eine Tabelle mit den Zeitschritten und dem dazugehörigen Niederschlag sowie eine Messstationsidentifikations-Karte (id.map) generiert.

In der Studie von ELIJZEN (2017) wurden zwei vergangene Niederschlagsereignisse betrachtet, die am 11. und 28. Juli 2014 stattfanden. Die Niederschlagswerte stammten von HydroNET und gaben den Gesamtniederschlag für ein Gebiet von 1 km² in Zeitschritten von 5 min an.

In der Untersuchung von HABONIMANA (2014) wurden die Daten von zwei Messtationen kombiniert, welche hochauflösende Messungen in einem Zeitintervall von 10 min und 15 min aufzeichnen. Aus den Daten wurden einzelne Niederschlagsereignisse entnommen. Eine Interpolation der Daten erfolgte mit dem Weather Research Forecast-Modell.

In der Studie von HABONIMANA et al. (2015) wurde der tägliche Niederschlag mit einem von der USDA-NRCS entwickelten Online-Tool synthetisiert. Die Auflösung wurde auf 10 min als idealen Zeitschritt festgelegt. Die Dauer der Simulation betrug 1380 min, mit Zeitschritten von jeweils 15 min und einer Zellgröße von 15 m.

JETTEN (2016) verwendete hochauflösende Daten des Stationsnetzwerkes auf Santa Lucia, welche die Niederschläge mit einer Auflösung von einer Minute erfassen. Diese Daten wurden zur Generierung des Modellniederschlags für die Wiederkehrhäufigkeiten 5, 10, 20 und 50 Jahre genutzt. Aus der Analyse der Häufigkeit und Ausprägung des maximalen jährlichen Niederschlags lässt sich der maximale tägliche Niederschlag für verschiedene Wiederkehrhäufigkeiten ableiten. Daraus wurden Modellniederschläge mit einer Auflösung von 5 min erstellt.

JETTEN & CHAVARRO (2016) nutzten in ihrer Untersuchung zwei historische Niederschlagsereignisse, die zu Überflutungen im Untersuchungsgebiet führten.

In der Untersuchung von NURRITASARI et al. (2015) wurden mittels der Gumbel-Verteilung die historischen Niederschlagsdaten extrahiert und die Häufigkeitsverteilung bestimmt. Die stündlichen Niederschlagswerte wurden durch die Disaggregation der täglichen Niederschlagswerte mit der Mononobe-Methode berechnet. Anhand der Gleichung von SOSRODARSONO & TAKEDA (1977) wurde die durchschnittliche Niederschlagsrate während des Ereignisses sowie der prozentuale Anteil des Niederschlags pro Stunde berechnet.

3.3 Kalibrierung

BAARTMAN et al. (2012) führten eine Kalibrierung des Niederschlages sowie eine Kalibrierung der Abflusswerte durch. Die Kalibrierung musste für jede Simulation einzeln erfolgen. Neben dem Niederschlag und den Abflusswerten wurden auch die K_{sat}-Werte und die MANNING-Werte für die Gerinne und Gefälle angepasst. Eine Anpassung der K_{sat}-Werte und der MANNING-Werte erfolgte ebenfalls in den Untersuchungen von BREBANTE (2017) und HABONIMANA et al. (2015). Bei der Untersuchung von HABONIMANA (2014) erfolgte eine Kalibrierung der Niederschlagswerte. In der Studie von NURRITASARI et al. (2015) wurden die K_{sat}-Werte sowie die Ausgangsfeuchte des Bodens angepasst, wofür ein Kalibrierungsfaktor berechnet wurde.

3.4 Validierung

Für die Validierung wurden in der Studie von ELIJZEN (2017), HABONIMANA (2014) und HABONIMANA et al. (2015) Anwohnerbefragungen und Vergleiche mit Fotos durchgeführt. JETTEN (2016) und BREBANTE (2017) verglichen die Ergebnisse mit bereits vorhandenen Gefährdungskarten. In der Untersuchung von NURRITASARI et al. (2015) erfolgte die Validierung durch den Vergleich der berechneten Werte mit gemessenen Werten.

3.5 Ergebnisse

In der Untersuchung von BAARTMAN et al. (2012) waren das simulierte Verhältnis von Niederschlag und Abfluss sowie der gesamte Bodenverlust im untersuchten Einzugsgebiet gering und deckten sich mit einer anderen Untersuchung im nahe gelegenen Mula-Becken (BATHURST et al. 1996). Außerdem wurde festgestellt, dass auch wenn die räumlichen Muster nicht der Realität entsprechen, der Anteil der Gesamterosion, der vom Modell berechnet wurde, plausibel ist.

In der Studie von ELIJZEN (2017) ergaben sich zu geringe Fließgeschwindigkeiten für den Abfluss, zudem entsprach die Modellierung des Kanalsystems nicht der Realität. Auch eine Kalibrierung der Eingangsparameter zeigte keinen Effekt. Daher wird angenommen, dass die Fehler modellbedingt sind.

Die Ergebnisse der Untersuchung von HABONIMANA (2014) zeigten hinsichtlich der Dauer der Überflutung keine Übereinstimmung mit beobachteten Werten. Für die Wassertiefe ergaben sich nur einige Übereinstimmungen.

Die Untersuchung von JETTEN (2016) führte zu dem Ergebnis, dass die Genauigkeit des Modells und der Eingangsdaten als unzureichend für die Untersuchung eingeschätzt wurden. OpenLISEM konnte zwar die Ausbreitung des Wassers wiedergeben, jedoch keine akkuraten Wassertiefen und eignet sich daher nicht für die Schadensabschätzung.

In der Studie von NURRITASARI et al. (2015) ergab sich, dass die berechneten Abflusswerte deutlich höher lagen als die gemessenen, allerdings konnten die Werte durch die Kalibrierung der K_{sat}-Werte und der Ausgangsfeuchte angenähert werden.

4 Untersuchungsgebiet

4.1 Allgemein

Die Stadt Meißen ist eine große Kreisstadt, die im gleichnamigen Landkreis rund 25 km nordwestlich von der Landeshauptstadt Dresden liegt. Das Stadtgebiet umfasst eine Fläche von rund 3092 ha, mit einer Einwohnerzahl von 27 984 (Dezember 2016) (STADT MEIßEN 2018).

4.2 Meißen Triebischtal

Das Untersuchungsgebiet liegt im Südwesten des Stadtgebietes im Stadtteil Triebischtal und umfasst eine Fläche von rund 5,4 km² (s. Abb. 7). Der Siedlungsbereich verläuft entlang der Triebisch und wird von Waldflächen und daran angrenzende Landwirtschaftsflächen umschlossen.

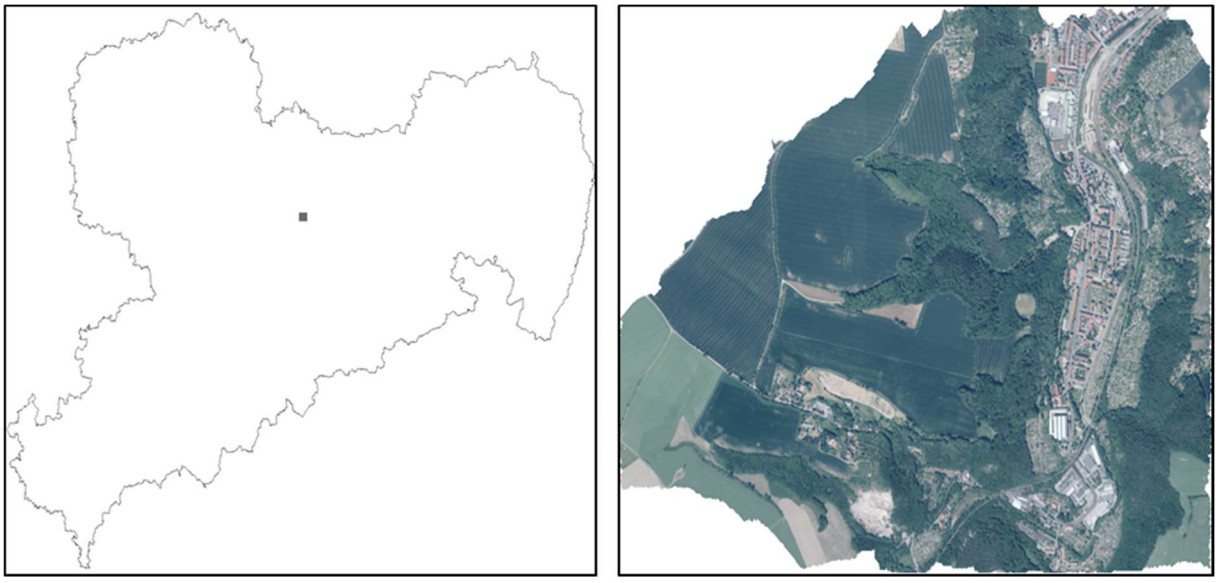

Abb. 7 Links: Lage des Untersuchungsgebietes in Sachsen. Rechts: Ausdehnung des Untersuchungsgebietes.

4.3 Geologie

Die Ausgangsgesteine im Untersuchungsgebiet stammen überwiegend aus dem Oberkarbon, dem Karbon sowie der Weichselkaltzeit und sind auf vielfältige Weise entstanden. Neben plutonischen Gesteinen wie Granodiorit, kommen auch vulkanogen entstandene Rhyolithe vor. Während der Weichsel-Kaltzeit sind vor allem feinsandige, tonige Schluffe entstanden, die nach unten zunehmend kalkhaltiger werden. (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSHAFTEN UND ROHSTOFFE).

4.4 Naturräume

Das Untersuchungsgebiet liegt in zwei Naturräumen. Der westliche Teil des Gebietes liegt im Mittelsächsischen Lösshügelland. Dieses ist vor allem durch Lössauflagen von mehreren Metern gekennzeichnet und weist überwiegend schluffige Sedimente der jüngsten Kaltzeit auf, die die älteren Locker- und Festgesteine fast völlig verdecken (LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE, SACHSEN). Der östliche Teil des Untersuchungsgebietes liegt im Naturraum „Elbe-Durchbruchstal um

Meißen, Dresdner Elbtalweitung und Randlagen“ am Übergang zum Mittelsächsischen Lösshügelland. Im Bereich Meißen treten Höhenunterschiede von bis zu 100 m auf. Durch die rückschreitende Erosion der Triebisch und anderer Nebenflüsse der Elbe entstanden markante Kerbtäler, wobei die pleistozänen Auflagen komplett abgetragen wurden. Die Täler sind durch steile, teilweise blockbedeckte Hänge sowie schmale Auen gekennzeichnet (LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE, SACHSEN).

4.5 Böden

Meißen gehört zur Bodenregion der Löss- und Sandlösslandschaften und weist einen hohen Anteil an Parabraunerden mit unterschiedlicher Zusammensetzung auf. Dabei kommen neben Parabraunerden aus Löss und grusführendem Löss auch Braunerden-Parabraunerden aus Löss und Lehm, Lehmschutt und Sandgrus vor. Einen ebenfalls hohen Anteil bilden die Gely-Vegen aus Auenlehm oder Auenschluff und die anthropogen stark geprägten Hortisole aus verkipptem Lehm sowie versiegelte Flächen. Einen geringen Anteil am Untersuchungsgebiet haben die Pseudogleye aus periglaziärem Löss. Abbildung 8 gibt eine Übersicht über die Verteilung der verschiedenen Bodentypen im Untersuchungsgebiet.

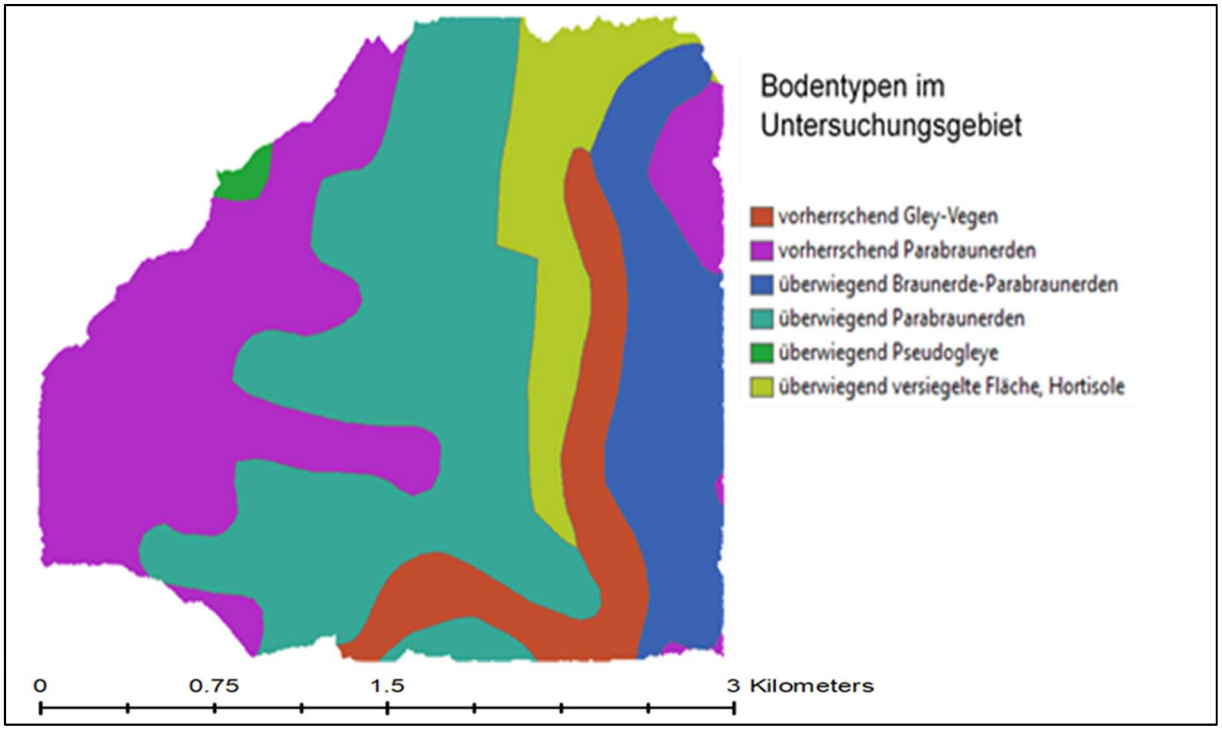

Abb. 8 Bodentypen im Untersuchungsgebiet Meißen Triebischtal.

4.6 Landnutzung

Das Untersuchungsgebiet wird überwiegend land- und forstwirtschaftlich genutzt. Es zeichnet sich durch Waldflächen mit Laubholz und teilweise Nadel- und Laubholz, sowie landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Äckern und Grünland aus. Der Siedlungsbereich teilt sich in einen dicht besiedelten

Bereich mit Wohngebäuden und Gewerbegebieten auf sowie in offene Siedlungsbereiche mit Grünflächen, wie z. B. Sportanlagen und Kleingärten (s. Abb. 9 & Abb. 10).

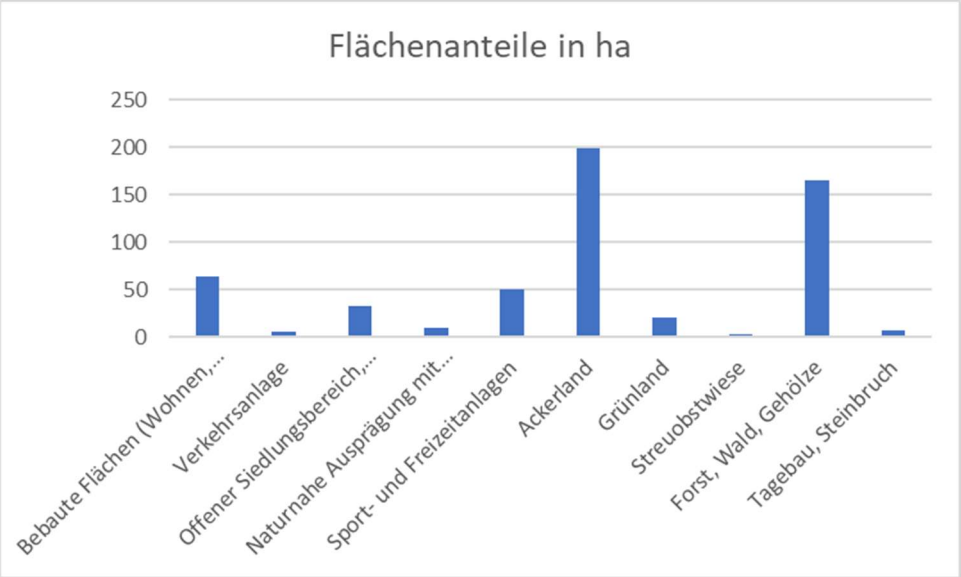

Abb. 9 Anteil der Landnutzungsflächen im Untersuchungsgebiet.

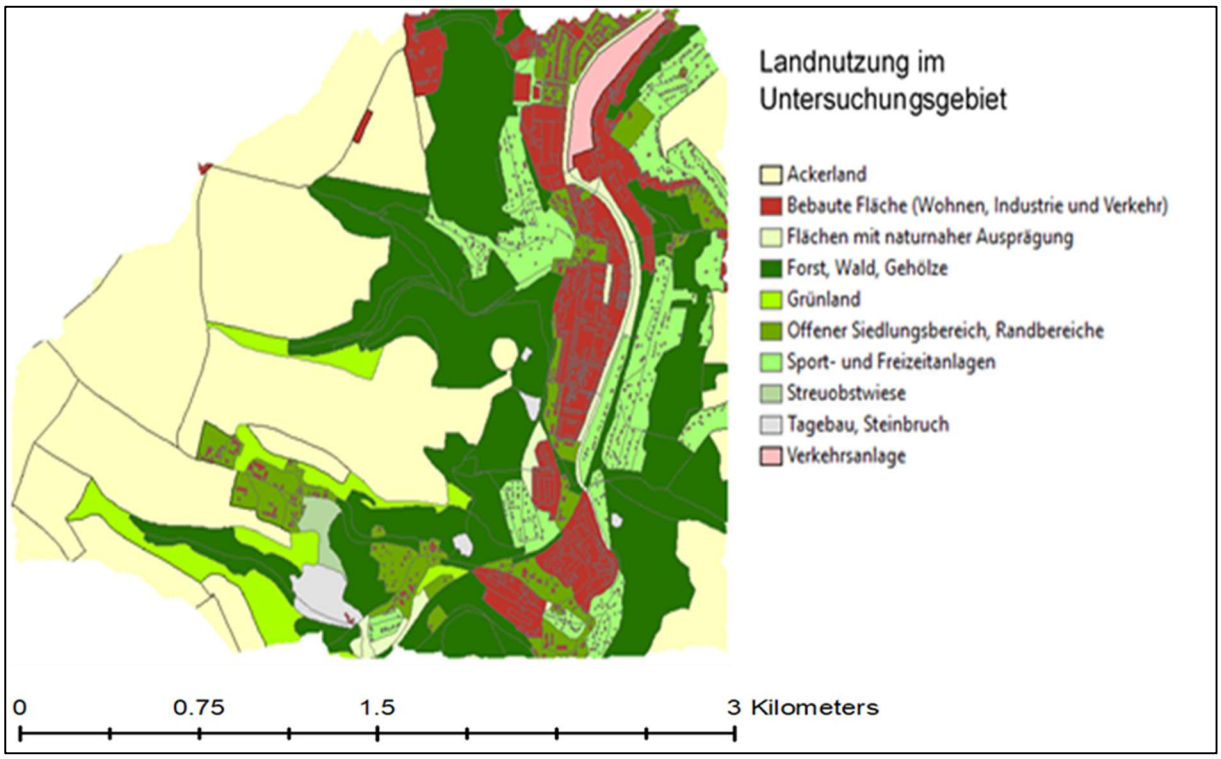

Abb. 10 Übersicht über die Landnutzung im Untersuchungsgebiet.

4.7 Vegetation

Die Waldflächen im Untersuchungsgebiet sind Teil des Schutzgebietsystems Natura 2000 und werden im Rahmen der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH) als FFH-Gebiet 171 „Triebischtäler“ geführt. Im Untersuchungsgebiet kommen etliche Lebensraumtypen nach FFH-Richtlinie Anhang I vor, dazu

gehören der Labkraut-Eichen-Hainbuchenwald (LRT 9170) sowie Kalk- und Silikatfelsen (LRT 8210, 8220, 8230). Weiterhin kommen einige Fledermausarten im Untersuchungsgebiet vor z. B. die kleine Hufeisennase, die im Anhang II der FFH-Richtline geführt wird (s. Abb. 11).

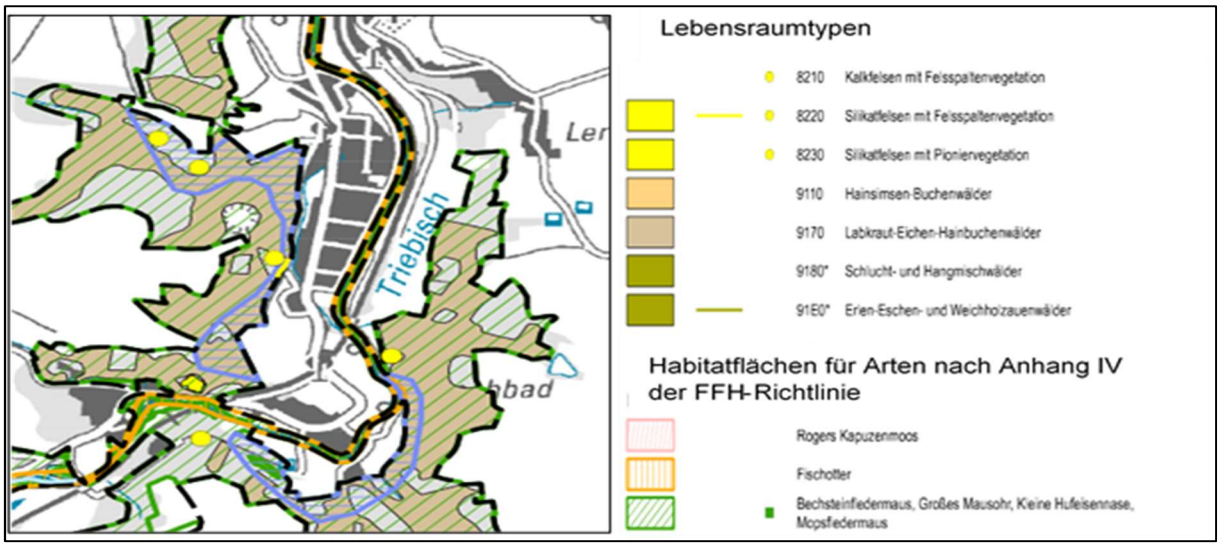

Abb. 11 Vorkommen von Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-Richtlinie und Habitatflächen für Arten nach Anhang IV der FFH-Richtlinie im Untersuchungsgebiet (Quellenangabe S. 66).

4.8 Triebisch

Die Triebisch ist ein grobmaterialreicher silikatischer Mittelgebirgsfluss, der im Tharandter Wald entspringt und bei Meißen in die Elbe mündet. Im Untersuchungsgebiet stellt die Triebisch gemäß Anlage I SächsWG ein Gewässer 2. Ordnung dar (SCHUBERT 2017). Außerhalb der Ortslagen weist die Triebisch überwiegend mäßig veränderte Abschnitte auf. Innerhalb der Ortslage Meißen ist der Fluss stark ausgebaut und erreicht lediglich eine Gewässerstrukturklasse von 4 bis 5 (ZUMBROICH et al. 2001).

4.8.1 Hochwasserrisiko

Für Deutschland wurden landesweit Hochwassergefahrenkarten erstellt, die die möglichen Ausmaße einer Überflutung durch Fließgewässer darstellen. Für die Triebisch in der Ortslage Meißen wurden verschiedene Hochwasserereignisse mit unterschiedlichen Wiederkehrwahrscheinlichkeiten untersucht. Das Starkregenereignis vom 27.05.2014 im Untersuchungsgebiet weist eine Jährlichkeit von mehr als 10 Jahren, aber knapp unter 20 Jahren auf (s. 5.4.6). Daher wird für die Triebisch die Hochwassergefahr für die Jährlichkeit 20 Jahre betrachtet. Bei HQ 20 treten keine Verklausungen auf, es kommt lokal zur Ausuferung. Im Bereich „Buschbad“ kommt es links- und rechtseitig der Triebisch zu Überschwemmungen in geringem Ausmaß. (LANDESTALSPERRENVERWALTUNG DES FREISTAATES SACHSEN 2005).

5 Methodik

5.1 Verwendete Programme

Schritt 1) Vorbereitung des Datenmaterials für PCRaster mit:

- Arcmap 10.5.1
- QGIS 3.0.1
- SAGA GIS 2.3.2
- Water Soil Characteristics

Schritt 2) Aufbereitung der Daten für wie Verwendung mit OpenLISEM:

- PCRaster 4.1.0/ PCRaster 4.2.0
- Aguila 1.3.3 (in PCRaster integriert)

Schritt 3) Eingabe und Verarbeitung der Daten in OpenLISEM:

- OpenLISEM 3.9.6

Schritt 4) Auswertung der Ergebnisse:

- Arcmap 10.5.1
- QGIS 3.0.1

5.2 Grundlegende Anforderungen Kartenmaterial

OpenLISEM benötigt für die Simulation eine Vielzahl von Karten, die aus einigen grundlegenden Karten erstellt werden können: dem digitalen Geländemodell, der Karte der Landnutzung, der Karte der Bodentypen des Gebiets und der Karte mit allen Niederschlagsstationen, die für das Untersuchungsgebiet relevant sind. Um diese Karten mit PCRaster erstellen zu können, ist eine Vorbereitung der Eingangsdaten in Arcmap nötig, da die Daten nicht im benötigten Format vorlagen.

5.3 Preprocessing mit Arcmap

Generell gilt, dass alle Karten mit derselben Ausdehnung exportiert werden müssen, da sich sonst Fehler bei der Erstellung der map-Dateien in PCRaster ergeben. Um eine einheitliche Ausdehnung zu erreichen, kann während des Exports der Raster-Dateien in ASCII- Dateien die Funktion „Environments“ genutzt werden und es muss der entsprechende Layer ausgewählt werden, der die gewünschte Ausdehnung enthält. Für die Untersuchung wurde jeweils die Ausdehnung des digitalen Geländemodells auf alle anderen Karten übertragen.

5.3.1 Digitales Geländemodell

Das digitale Geländemodell für das Untersuchungsgebiet Meißen Triebischtal wurde vom Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung zur Verfügung gestellt und lag als ASCII-Datei mit den Koordinatensystem ETRS 1989 UTM Zone 33 N vor. Die ASCII- Datei wurde in eine Raster-Datei

umgewandelt. Diese weist in der Regel Senken ohne eine Abflussrichtung auf, was zu falschen Ergebnissen führen würde. Daher wurden die Senken mit der Funktion „Sink Removal/Deepen Drainage Routes“ (SAGA-GIS) beseitigt (KIPFER et al. 2018). Das DGM wurde anschließend in Arcmap mit der „Resample“-Funktion in die Auflösungen 2 m, 10 m und 25 m transformiert, um die Genauigkeit der Ergebnisse mit verschiedenen Auflösungen vergleichen zu können. Die Raster-Dateien wurden in ASCII-Dateien umgewandelt und dann in PCRaster importiert.

5.3.2 Landnutzung

Die Landnutzungskarte wurde aus den ATKIS-Dateien von Sachsen erstellt. Die ATKIS-Dateien wurden vom IÖR zur Verfügung gestellt und lagen als Shape-Dateien vor. Die einzelnen Dateien wurden mit der „Update“-Funktion zusammengeführt und anschließend die Landnutzung klassifiziert (s. Tabelle 3). Zunächst wurde eine Raster-Datei für die Auflösung 2 x 2 m erstellt. Diese Datei diente als Grundlage zur Erstellung der Raster-Dateien mit der Auflösung 10 m und 25 m, für die die „Resample“-Funktion genutzt wurde. Anschließend wurden die Raster-Dateien in ASCII-Dateien transformiert und in PCRaster importiert.

Tabelle 3 Klassifizierung der Landnutzungskassen für die Modellierung.

Landnutzungsklasse nach ATKIS	Nutzungsklasse im Modell	Klassifizierung im Modell
Wohnbaufläche	Bebaute Flächen (Wohnen, Industrie und Verkehr)	1
Gebäude		
Industrie und Gewerbefläche		
Fläche besonderer funktionaler Prägung		
Platz		
Straßen		
Bahnverkehr	Verkehrsanlage	2
Fläche gemischter Nutzung	Offener Siedlungsbereich, Randbereiche	3
Friedhof		
Unland, vegetationslose Fläche	Naturnahe Ausprägung mit Vegetation	4
Sportanlage	Sport- und Freizeitanlagen	5
Kleingartenanlage		
Freizeitanlage		
Spielfeld		
Wochenend- und Ferienhausfläche		
Ackerland	Landwirtschaftlich geprägte Flächen	6
Grünland		7
Streuobstwiese		8
Gehölz	Forst, Wald, Gehölze	9
Laub- und Nadelholz		
Laubholz		
Tagebau, Grube, Steinbruch	Tagebau, Steinbruch	10
Felsen, Felsblock, Felsnadel		

5.3.3 Gebäude

Für die Simulation mit OpenLISEM müssen die Gebäude als Flächenanteil an der Gitterzelle vorliegen (Werte von 0-1). Dafür wurden die Gebäude-Daten aus der ATKIS-Shape-Datei genutzt. Die Flächenanteile wurden wie folgt ermittelt: Zunächst wurde in der Attributtabelle der Shape-Datei in Arcmap ein neues Feld erstellt und jedem Gebäude eine 1 zugewiesen. Anschließend wurden die Gebäude-Shape-Dateien anhand dieses Attributes in eine Rasterdatei mit einer Auflösung von 1 x 1m umgewandelt. Diese Raster-Datei wurde in eine ASCII-Datei transformiert und in PCRaster importiert (Datentyp scalar). Damit die Gebäudeinformation als Anteil an der Fläche vorliegt, musste die Karte in PCRaster auf die Auflösung des digitalen Geländemodells umgerechnet werden (s. 5.4.4).

5.3.4 Straßen

Die Erstellung des Straßennetzes erfolgte aus den ATKIS-Daten. Die Daten lagen als Shape-Datei vor und wurden mit der „Merge"-Funktion zu einer Datei zusammengefügt. Diese wurde zunächst in eine Raster-Datei umgewandelt, mit der „Resample"-Funktion in die entsprechenden Auflösungen umgerechnet, in eine ASCII-Datei transformiert und in PCRaster importiert.

5.3.5 Boden

Zur Erstellung der Karte mit den Bodentypen wurde die BÜK 200, Kartenblatt Dresden verwendet. Die Datei lag als Shape-Datei vor und konnte heruntergeladen und direkt in Arcmap verwendet werden. Anhand der Bodentypen wurde die Bodenart mit dem entsprechenden Anteil an Sand, Ton und Schluff identifiziert (s. Tabelle 4). Die Daten wurden in Raster-Dateien umgewandelt, anschließend in ASCII-Dateien transformiert und mit PCRaster importiert.

Tabelle 4 Die Bodenarten im Untersuchungsgebiet Meißen mit den Anteilen an Sand, Ton und Schluff nach DÜWEL et al. (2007).

Bodenart	**Klassifizierung im Modell**	**Anteile Sand, Ton, Schluff**		
		Sand	Ton	Schluff
stark sandiger Lehm	3	45	15	40
lehmiger Schluff	33	10	18	69
lehmiger Schluff	35	5	13	80
schluffiger Lehm	38	11,9	22,.9	63,5
schluffiger Lehm	42	12,1	17,9	66,3
lehmiger Schluff	81	37,4	14,9	47,7

5.4 Kartenerstellung mit PCRaster

Nach der Aufbereitung der Daten können diese in einer einheitlichen Auflösung in PCRaster importiert werden. Mithilfe von PCRaster können die für OpenLISEM benötigten Karten erstellt werden.

5.4.1 Basiskarten

Für die Verarbeitung der ASCII-Dateien muss zunächst eine Basiskarte erstellt werden. Diese enthält alle relevanten Informationen zu Ausdehnung der Karte, Zellgröße und Datentyp (scalar, ordinal,

nominal, boolean). Mit Hilfe dieser Basiskarte können nun die ASCII-Dateien in eine Karte im PCRaster-Format (.map) umgewandelt werden (s. Tabelle 5). Anschließend wird das Haupteinzugsgebiet und eventuelle Nebeneinzugsgebiete identifiziert, um später die richtige Anzahl der Outlets definieren zu können. Wenn keine Identifizierung erfolgt, kann es zu Fehlern kommen, da für die Nebeneinzugsgebiete sogenannte „pits“ in der ldd-Karte entstehen. Diese „pits“ werden von OpenLISEM als Abflusspunkte gelesen, sind jedoch in der Outlet-Karte nicht als solche verzeichnet. Für die Infiltration wurden keine Karten erstellt, da in dieser Untersuchung die Wasseraufnahmekapazität des Bodens als gesättigt betrachtet wird.

Tabelle 5 Beschreibung und Datentyp der benötigten Basiskarten.

Karte	Beschreibung	Datentyp
dem.map	Die Karte des digitalen Geländemodells	scalar
landunit.map	Karte mit den Landnutzungsklassen	scalar
soiltype.map	Karte mit den Bodentypen	scalar
gauge.map	Karte mit der Niederschlagsstations-Nr.	nominal
catchmentmask.map	Maske des Einzugsgebiets nach der die Basiskarten ausgeschnitten werden	nominal

5.4.2 Einzugsgebiet

Nach der Identifizierung der Einzugsgebiete wurde das Haupteinzugsgebiet ausgewählt und als Maske verwendet, um dieses aus den Karten auszuschneiden und so das Untersuchungsgebiet einzugrenzen. Im Anschluss wurde die Karte mit der lokalen Abflussrichtung (ldd.map) erstellt. Dabei muss die „-- lddin“-Funktion genutzt werden, da sonst Abflusspunkte an den Rändern entstehen, die nicht mit dem Abflusspunkt der Outlet-Karte übereinstimmen. Dann erfolgte die Erstellung der restlichen Karten für das Einzugsgebiet (s. Tabelle 6).

Tabelle 6 Beschreibung und Datentyp der Karten, die die hydrologischen Eigenschaften des Untersuchungsgebietes wiedergeben.

Karte	Beschreibung	Datentyp
ldd.map	Karte mit der lokalen Abflussrichtung	ldd
area.map	Karte der Fläche des Einzugsgebiets	boolean
grad.map	Karte der Neigung im Einzugsgebiet, die Karte folgt der ldd.map	scalar
id.map	Karte mit Identifikations-Nr. der Niederschlagsstation	nominal
outlet.map	Karte mit dem Hauptabfluss des Einzugsgebiets	nominal

5.4.3 Landnutzungs- und Bodeneigenschaften

Die Eigenschaften der Landnutzungsklassen (z. B. Rauheitsbeiwerte nach MANNING, Random Roughness u.a.) sowie die Eigenschaften der Bodentypen (z. B. Kohäsion) wurden über die „matrixtable"-Funktion generiert. Dafür wurden im Vorfeld Tabellen erstellt, in denen die entsprechenden Werte nach Landnutzungsklassen und Bodentypen eingetragen wurden. Tabelle 7 zeigt ein Beispiel einer solchen Tabelle für die Landnutzungsklassen entsprechend Tabelle 14.

Tabelle 7 Eigenschaften der einzelnen Landnutzungsklassen für das Untersuchungsgebiet Meißen Triebischtal.

0	1	2	3	4	5	6
1	0.025	0.26340129	1	5	0.1	100
2	0.03	0.26340129	1	0.2	0.1	100
3	0.038	1.73286795	0.5	5	0.5	15
4	0.038	1.73286795	0.5	5	0.5	15
5	0.03	1.73286795	0.5	5	0.5	15
6	0.038	4.02359478	1	1	0.8	10
7	0.04	12	0.5	0.2	1	15
8	0.053	5.75646273	0.75	0.35	0.9	15
9	0.067	4.02359478	1	5	0.8	15
10	0.025	0	0.5	0	0	100

Mit Hilfe der „matrixtable"-Funktion wurde im nächsten Schritt eine neue Karte erstellt. Dafür wurden Lage und Ausbreitung der einzelnen Landnutzungsklassen über die Landnutzungskarte (landunit.map) ermittelt und anschließend mit den entsprechenden Werten der Tabellen verschnitten. Mit dieser Funktion wurden folgende Karten erstellt (s. Tabelle 8):

Tabelle 8 Beschreibung und Datentyp der Karten, die die Eigenschaften der Vegetation, der Landnutzung und des Bodens wiedergeben.

Karte	Basiskarte	Parameter	Tabelle
Hydrologie			
lai.map	landunit.map	Blattflächenindex	veg_tbl.txt
ch.map	landunit.map	Vegetationshöhe	veg_tbl.txt
per.map	landunit.map	Anteil der mit Vegetation bedeckten Fläche	veg_tbl.txt
n.map	landunit.map	Rauheitsbeiwerte nach MANNING	landuse.txt
rr.map	landunit.map	Standartabweichung der Höhe des Mikroreliefs	landuse.txt
stonefrc.mp	landunit.map	Anteil der Steine an der Gesamtfläche der Zelle	landuse_st.txt
crustfrc.map	landunit.map	Anteil verkrusteter Böden an der Gesamtfläche der Zelle	landuse_st.txt
coh.map	soil.map	Kohäsion Boden	cohesion.txt
cohadd.map	soil.map	Kohäsion Pflanzenwurzeln	cohesion.txt

Erosion			
d50.map	landunit.map	mittlerer Korndurchmesser D50	landuse.txt
d90.map	landunit.map	mittlerer Korndurchmesser D90	landuse.txt
aggrstab.map	landunit.map	Aggregatstabilität	landuse.txt

5.4.4 Gebäude und Straßen

Neben den Landnutzungsklassen und Bodentypen werden für OpenLISEM auch Karten mit Daten zu Gebäuden und Straßen benötigt (s. Tabelle 10). Die Gebäudekarte wurde in Arcmap mit einer Auflösung von 1 x 1 m erstellt und anschließend in PCRaster auf die Auflösung des Modells umgerechnet. Vorher mussten noch fehlende Werte korrigiert werden, da sich sonst Fehler bei der Berechnung im Modell ergeben. Dafür wurde ein Skript verwendet, das fehlende Werte in Nullen umwandelt (s. Anhang II Ordner 1). Dadurch ergab sich der angenäherte Flächenanteil der Zelle, der durch Gebäude bedeckt wird. Die Straßenkarte wurde ebenfalls in Arcmap erstellt und in PCRaster als Grundlage für die Zuweisung der Straßenbreite genutzt. Auf dieser Basis wurde eine neue Karte erstellt (roadwidt.map), die für alle Straßen die entsprechende Breite enthält (s. Tabelle 9). Dabei ist zu beachten, dass die Straßenbreite die Zellgröße nicht überschreiten darf.

Tabelle 9 Übersicht über die gewählte Straßenbreite in Abhängigkeit der Auflösung.

Auflösung DGM	Straßenbreite
2 x 2 m	2
10 x 10 m	5
25 x 25 m	10

Tabelle 10 Beschreibung und Datentyp der Karten, die die Infrastruktur und Gebäude beschreiben.

Karte	Beschreibung	Datentyp
housecover.map	Karte mit dem Anteil den die Gebäude an einer Zelle haben	scalar
roofstore.map	Karte mit den Speicherflächen der Dächer	scalar
drumstore.map	Karte mit Retentionsflächen	scalar
roadwidt.map	Karte mit der Straßenbreite	scalar

5.4.5 Gerinne

In OpenLISEM können auch Flüsse und Gerinne berücksichtigt werden. Dafür muss eine Karte mit den Gerinnen sowie deren Breite und Eigenschaften definiert werden. Für die Erstellung der Gerinne-Karte wurde zuerst eine „accuflux.map“ erstellt. Dies ist eine Karte, in der die Gerinne anhand der lokalen Abflussrichtung definiert werden. Zur Erstellung der „accuflux.map“ wurde von PCRaster die Wassermenge berechnet, die bei 1mm Niederschlag durch jede Zelle fließt. Danach wurde eine Maske erstellt (chanmask.map), welche die Gewässer in Abhängigkeit der berechneten Zellen wiedergibt. Anschließend wurde die chanmask.map mit dem Gewässernetzwerk aus den ATKIS-Dateien verglichen, um zu überprüfen, ob die berechneten Gerinne mit den tatsächlichen Gerinnen übereinstimmen. Um die

Gerinne im Modell möglichst genau wiederzugeben, wurde die Anzahl der Zellen angepasst, die PCRaster zu Berechnung der Gerinne nutzte. Dabei gilt allgemein: Je größer die Anzahl der berechneten Zellen, desto mehr Gerinne werden dargestellt. Anschließend wurden auf Grundlage der chanmask.map die Karten für die Gerinne-Eigenschaften erstellt (Rauheitswerte nach MANNING, Neigung, Breite etc.) (s. Tabelle 11). Tabelle 12 enthält eine Übersicht über die Anzahl der berechneten Zellen in Abhängigkeit der Auflösung des digitalen Geländemodells.

Tabelle 11 Beschreibung und Datentyp der Karten, die die Lage und Eigenschaften der Gerinne wiedergeben.

Karte	Beschreibung	Datentyp
accuflux.map	Karte, in der die Gerinne anhand der lokalen Abflussrichtung definiert werden	scalar
chanmask.map	Maske der Gerinne im Einzugsgsbiet	scalar
chandepth.map	Karte mit den Gerinnetiefen	scalar
lddchan.map	Karte mit der lokalen Abflussrichtung der Gerinne	ldd
changrad.map	Neigung der Gerinne im Einzugsgebiet	scalar
chanman.map	Rauheitsbeiwerte des Gewässerbettes	scalar
chancoh.map	Kohäsion im Gewässerbett	scalar
chanwidt.map	Breite der Gerinne	scalar
chanside.map	Form des Gerinnes	scalar
chanmaxq.map	maximaler Durchfluss im Gerinne	scalar

Tabelle 12 Anzahl der verwendeten Zellen für die Berechnung der Gerinne. Die Anzahl der Zellen ist abhängig von der Auflösung des Geländemodells.

Auflösung DGM	Anzahl berechneter Zellen
2 x 2 m	130 000
10 x 10 m	5 000
25 x 25 m	3 000

Eine vollständige Übersicht mit den benötigten Befehlen zur Erstellung der Karten mit PCRaster befindet sich im Anhang (s. Anhang I 10.1).

5.4.6 Niederschlag

Für die Simulation musste eine Tabelle mit den Niederschlagswerten erstellt werden, die für jeden Zeitschritt einen Niederschlagswert in mm/h enthält. Da in dieser Untersuchung mit räumlich homogenen Niederschlag gearbeitet wurde, waren lediglich die Daten einer Station notwendig.

Für das Untersuchungsgebiet Meißen Triebischtal lagen Stationsdaten der Station Garsebach vor. Die Daten wurden vom Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) zur Verfügung gestellt und lagen bereits formatiert vor, somit konnten die Daten direkt für die Simulation verwendet werden (s. Anhang II Ordner 6). Für die Bestimmung der Wiederkehrhäufigkeit des Ereignisses wurden die Daten

des KOSTRA-DWD-2010 in Arcmap ausgewertet (s. Tabelle 13). Die Daten können auf der Seite des Deutschen Wetterdienstes heruntergeladen werden und liegen als Shape-Datei vor. Für das Starkregenereignis in Meißen wurde von OpenLISEM für die Dauerstufe 120 min ein Niederschlag von 46,725 mm berechnet. Damit liegt das Ereignis deutlich über der Jährlichkeit von 10 Jahren und knapp unter der Jährlichkeit von 20 Jahren.

Tabelle 13 Wiederkehrhäufigen und Niederschlagsmenge für die Dauerstufe 120 min nach den KOSTRA-DWD-2010-Daten (DEUTSCHER WETTERDIENST).

Wiederkehrhäufigkeit in Jahren	Dauerstufe in min	Niederschlag in mm
HQ 10	120	41
HQ 20	120	47

5.5 Parameter

5.5.1 Landnutzung

Für das Untersuchungsgebiet wurde eine Simulation der Erosions- und Ablagerungsprozesse durchgeführt. Dafür wurden die Korngrößen für D50 und D90 sowie die Aggregatstabilität der Landnutzungstypen benötigt. Diese Parameter wurden aus verschiedenen Literaturquellen übernommen. Die Werte für die mittleren Korngrößen für D50 und D90 wurden von JETTEN & VAN DEN BOUT (2017) übernommen, die Werte für die Aggregatstabilität wurden von SAUER (2004) übernommen. Die Rauheitsbeiwerte wurden von BAUER (2004) übernommen. Alle anderen Parameter wurden von JETTEN & VAN DEN BOUT (2017) übernommen (s. Tabelle 14).

Tabelle 14 Parameter für die Landnutzung. Die für die Simulation benötigten Parameter wurden aus BAUER (2004), JETTEN & VAN DEN BOUT (2017) und SAUER (2004) entnommen.

Klasse	Rauheitsbeiwerte nach MANNING (s/m1/3)	Blattflächenindex (LAI)(m)	RR (cm)	Pflanzenhöhe (m)	Vegetationsbedeckung (Anteil)	Aggregatstabilität
1	0,025	0,263401289	1,0	5,0	0,1	100
2	0,030	0,263401289	1,0	0,2	0,1	100
3	0,038	1,732867951	0,5	5,0	0,5	15
4	0,038	1,732867951	0,5	5,0	0,5	15
5	0,030	1,732867951	0,5	5,0	0,5	15
6	0,038	4,023594781	1,0	1,0	0,8	10
7	0,040	12	0,5	0,2	1,0	15
8	0,053	5,756462732	0,75	0,35	0,9	15
9	0,067	4,023594781	1,0	5,0	0,8	15
10	0,025	0	0,5	0,0	0,0	100

5.5.2 Boden

Die Kohäsionswerte für die entsprechenden Bodenarten wurden mit der frei verfügbaren Software „Soil Water Characteristics“ ermittelt, die auf der Seite des United States Department of Agriculture heruntergeladen werden kann. Nach Eingabe des Sand- und Tonanteils kann die Kohäsion als Schnittpunkt

zweier Geraden abgelesen werden. Die Wurzel-Kohäsion der Pflanzen verhält sich linear zur Kohäsion des Bodens und der Vegetationsbedeckung und wurde anhand dieser Beziehung bestimmt (s. Tabelle 15).

Tabelle 15 Übersicht über die verwendeten Bodenparameter.

Klasse	Kohäsion Boden (kPA)	Kohäsion Pflanzen (kPA)	Mittlere Lagerungsdichte g/cm³
3	20	0,8	1,44
33	28	4,0	1,35
35	30	5,6	1,35
38	27	4,0	1,34
42	29	6,4	1,36
81	25	0,8	1,42

5.6 Simulation

5.6.1 Einstellungen

Um die numerische Stabilität des Modells zu gewährleisten, müssen für die Berechnung des zweidimensionalen Oberflächenabflusses der Zeitschritt sowie der Courant-Faktor festgelegt werden. Je höher die Werte gewählt werden, desto schneller läuft die Simulation. Für alle Simulationen wurde ein Zeitschritt von 0,2 Sekunden und ein Courant-Faktor von 0,15 gewählt. Die Auswahl des Zeitschrittes und des Courant-Faktors erfolgte nach JETTEN & VAN DEN BOUT (2017). Für das Untersuchungsgebiet wurde angenommen, dass der Boden gesättigt ist und demnach keine Infiltration berechnet werden muss. Die Simulation des Oberflächenabflusses erfolgte mittels einer diffusen Welle, die über das digitale Höhemodell geleitet wurde.

Alle weiteren Einstellungen wurden im Run-File festgelegt und entsprechen ebenfalls den Empfehlungen von JETTEN & VAN DEN BOUT (2017). Der Run-file für die jeweiligen Simulationen befindet sich im Anhang (s. Anhang II Ordner 2.1.3, 2.2.3, 2.3.3).

5.6.2 Übersicht Simulationen

Insgesamt wurden 6 Simulation mit unterschiedlichen Auflösungen des digitalen Geländemodells sowie unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen des Niederschlages durchgeführt, um die Genauigkeit der Ergebnisse in Abhängigkeit der Auflösung zu überprüfen (s. Tabelle 16).

Tabelle 16 Übersicht über die durchgeführten Simulationen.

ID	Auflösung DGM (m)	Auflösung Niederschlag (min)
1	2 x 2	1
2	2 x 2	10
3	10 x 10	1
4	10 x 10	10
5	25 x 25	1
6	25 x 25	10

5.7 Validierung

Die Validierung kann anhand unterschiedlicher Quellen, wie Fotoaufnahmen, Anwohneranfragen oder gemessenen Abflusswerten erfolgen. Für diese Untersuchung lagen Fotoaufnahmen der Bereiche vor, die vom Starkregenereignis am 27.05.2014 am stärksten betroffen waren. Die Vergleiche der berechneten Wassertiefen mit den geschätzten Wassertiefen erfolgte mit Arcmap 10.5.1.

5.7.1 Maximale Überflutungstiefen

Für die Überprüfung der Modellergebnisse bezüglich der Überflutungstiefe wurde die von OpenLISEM berechnete Karte der maximalen Überflutungstiefe (whmax.map) mit Fotoaufnahmen verglichen, die Informationen zur Wasserhöhe enthalten. Für die Punkte 1-12 konnten anhand von Wassermarken die Überflutungstiefe abgeschätzt werden (s. Abb. 12). Für die Punkte 13-15 konnten keine Wassertiefen abgeschätzt werden, jedoch sind deutliche Spuren erkennbar, dass Wasser in diesen Bereichen Material abgelagert hat. Die Wassermarken wurden in den Fotos mit einer roten Linie markiert (s. Anhang II Ordner 4.2).

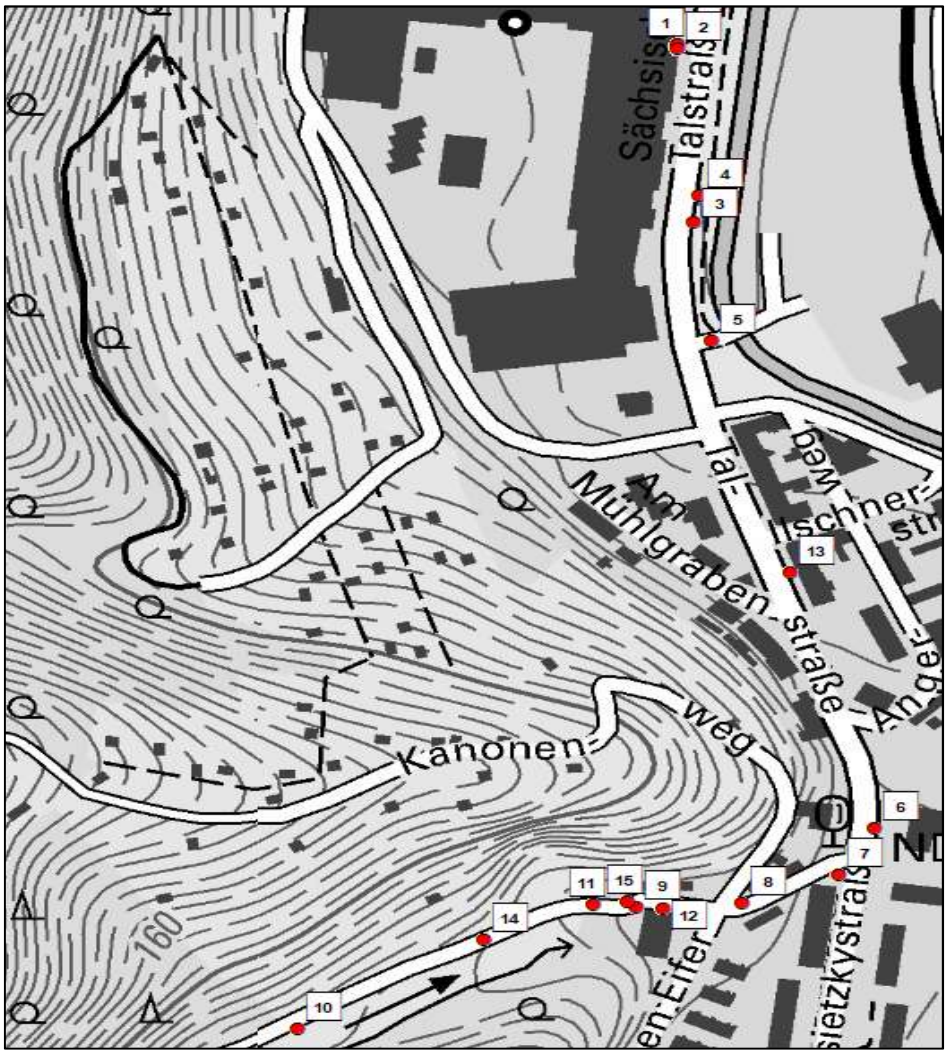

Abb. 12 Lage der Aufnahmepunkte für die Überprüfung der maximale Überflutungstiefen (Quellenangabe S. 66).

5.7.2 Abgelagertes Material

Nach dem Ereignis von 27.05.2014 wurden rund 4 000 m³ Material aufgesammelt (Quelle: IÖR). Anhand der Gesamtwerte der berechneten Ablagerung für die einzelnen Landnutzungsklassen, wird der Anteil des abgelagerten Materials für die Siedlungsflächen berechnet.

Die Berechnung des Volumens des abgelagerten Materials erfolgte mit folgender Formel:

$$V = \frac{m}{D}$$

Formel 45 Formel zur Berechnung des Volumens des abgelagerten Materials.

wobei V das Volumen des abgelagerten Materials (m³) bezeichnet, m die Masse des abgelagerten Materials (kg) und D die mittlere Lagerungsdichte (kg/m³).

Für die mittlere Lagerungsdichte D wurde ein Durchschnittswert mit den Werten aus Tabelle 15 berechnet.

6 Ergebnisse

6.1 Simulationsdauer

In Tabelle 17 wird die Simulationsdauer für alle durchgeführten Simulationen dargestellt. Für jede Auflösung wurden mehrere Kalibrierungen durchgeführt, die Dauer der Simulation hat sich dadurch nicht verändert.

Tabelle 17 Simulationsdauer für alle durchgeführten Simulationen. Die Auflösung des digitalen Geländemodells und des Niederschlags kann anhand der ID aus Tabelle 16 entnommen werden.

ID	1	2	3	4	5	6
Simulationsdauer	25 h	25 h	53 min	53 min	8 min	8 min

6.2 Maximale Überflutungstiefen

Tabelle 18 zeigt den Vergleich der anhand von Fotoaufnahmen geschätzten Überflutungstiefen mit den von OpenLISEM berechneten maximalen Überflutungstiefen. Insgesamt wurden für fast alle Punkte die maximalen Überflutungstiefen stark unterschätzt. Von allen berechneten Werten stimmen lediglich zwei Werte mit den geschätzten Wassertiefen der Fotoaufnahmen (Punkt 5) überein.

Tabelle 18 Vergleich der geschätzten Überflutungstiefen mit den von OpenLISEM berechneten maximalen Überflutungstiefen. Die grün unterlegten Felder zeigen eine Übereinstimmung der Werte an.

	ID - Foto	Geschätzte Überflutungstiefe (cm)	Berechnete Überflutungstiefe mit N = 1 min (cm)			Berechnete Überflutungstiefe mit N = 10 min (cm)		
			Auflösung (m)			Auflösung (m)		
			2 x 2	10 x 10	25 x 25	2 x 2	10 x 10	25 x 25
1	6461	30	16	13	0	0	14	0
2	6462	30-40	16	13	0	0	8	0
3	6466	40-50	0	1	1	0	0	0
4	6467	60	0	1	1	0	1	1
5	6472	30-40	32	22	10	34	10	10
6	6479	100	0	1	1	0	0	1
7	6481	100-120	190	1	0	195	1	0
8	6493	80	7	0	14	10	0	13
9	6498	100-120	25	4	14	20	0	13
10	6502	30-40	0	0	5	6	0	4
11	6505	100-120	25	4	14	20	0	13
12	6510	100-120	6	10	14	6	3	13
13	6475		2	3	6	1,9	2	6
14	6503		31	3	5	18	0,4	5
15	6508		55	10	14	52	3	13

6.3 Abgelagertes Material

Tabelle 19 zeigt die von OpenLISEM berechnete Menge des abgelagerten Materials für die Landnutzungsklasse 1 (Bebaute Flächen: Wohnen, Industrie und Verkehr). Die Werte liegen deutlich über der Menge des während der Aufräumarbeiten eingesammelten Materials.

Tabelle 19 Anteil der berechneten Ablagerungen für den Siedlungsbereich.

	Auflösung Niederschlag = 1 min	**Auflösung Niederschlag = 10 min**
Auflösung	Ablagerung Siedlung (m³)	Ablagerung Siedlung (m³)
2 x 2 m	12 674	13 023
10 x 10 m	15 011	15 358
25 x 25 m	16 273	16 750

6.4 Kalibrierung

Für alle Auflösungen wurde eine Kalibrierung durchgeführt um eine Anpassung der berechneten an die geschätzten Überflutungstiefen zu erreichen.-

6.4.1 Maximale Überflutungstiefen

Für alle Auflösungen wurde eine Kalibrierung der Rauheitsbeiwerte nach MANNING für die Gefälle vorgenommen. Außerdem wurden die Simualtionen ohne Gerinne durchgeführt, da sich sonst zu niedrige Überflutungstiefen ergeben. Tabelle 20 zeigt den Vergleich zwischen den berechneten und den geschätzten Überflutungstiefen. Durch die Kalibrierung konnte eine bessere Übereinstimmung der Werte für die Simulationen mit der Auflösung 2 x 2 m und 10 x 10 m erzielt werden. Für die Auflösung 25 x 25 m konnte trotz Kaliebrierung keine Übereinstimmung der Werte erreicht werden. Für die Valdierungspunkte 13-15 ergaben sich für die Punkte 14 und 15 plausible Werte, da Punkt 15 im Bereich der Punkte 9, 11 und 12 liegt und in diesem Bereich ähnlich hohe Werte berechnet bzw. geschätzt wurden. Punkt 15 liegt im Bereich der Talstraße unterhalb von Punkt 5 und weist abgelagertes Material auf (s. Abb 12).

Tabelle 20 Vergleich der berechneten maximalen Überflutungstiefen mit den geschätzten Wassertiefen nach der Kalibrierung der einzelnen Simulationen. Grün: gute Übereinstimmung, orange: keine Übereinstimmung, blau: plausible Werte.

			Berechnete Überflutungstiefe mit N = 1 min (cm)			**Berechnete Überflutungstiefe mit N = 10 min (cm)**		
Auflösung (m)			2 x 2	10 x 10	25 x 25	2 x 2	10 x 10	25 x 25
Kalibrierungsfaktor			0,16	0,12	0,16	0,16	0,12	0,16
ID	ID-Foto	Geschätzte Überflutungstiefe (cm)						
1	6461	30	16	13	0	24	13	0,7
2	6462	30-40	16	13	0	10	13	0,7
3	6466	40-50	0	0	2	0	0	1
4	6467	60	0	0	1	0	0	0,9
5	6472	30-40	37	14	12	35	12	8

6	6479	100	10	2	2	10	0	1
7	6481	100-120	240	11	14	246	10	5
8	6493	80-120	115	47	18	114	47	15
9	6498	100-120	92	125	18	140	110	15
10	6502	30-40	29	34	0	32	35	14
11	6510	100-120	76	116	18	76	107	21
Überflutete Flächen ohne Wassermarken								
12	6475		7	4	6	5	4	3
13	6503		50	4	2	50	3	1
14	6508		140	125	18	143	110	15

6.4.2 Abgelagertes Material

Die Kalibrierung hat bei der Auflösung 2 x 2 m nur einen geringen Einfluss auf die Menge des abgelagerten Materials. Bei den Auflösungen 10 x 10 m und 25 x 25 m ergeben sich deutlich höhere Werte für die Menge des abgelagerten Materials (s. Tabelle 21). Alle Ergebnisse liegen weit über der Menge des eingesammelten Materials. Bei den Auflösungen 10 x 10 m und 25 x 25 m wird deutlich mehr abgelagertes Material berechnet. Eine Karte mit der Lage und Menge des abgelagerten Materials befindet sich im Anhang (s. Anhang I 10.2)

Tabelle 21 Menge des abgelagerten Materials nach der Kalibrierung.

	Auflösung Niederschlag = 1 min	**Auflösung Niederschlag = 10 min**
Auflösung	Ablagerung Siedlung (m³)	Ablagerung Siedlung (m³)
2 x 2 m	12 592	13 259
10 x 10 m	21 355	22 482
25 x 25 m	24 750	26 040

6.4.3 Starkregengefahrenkarte

Auf Basis der einzelnen Untersuchungspunkte wurde eine Ergebniskarte im Format A3 erstellt. Diese befindet sich im Anhang II (s. Anhang II Ordner 6) sowie im Bucheinband. Die Karte gibt eine Übersicht über die maximalen Überflutungstiefen im gesamten Untersuchungsgebiet, sowie eine detaillierte Ansicht der Untersuchungsflächen, die anhand von Fotoaufnahmen überprüft wurden. Für die Erstellung der Starkregenkarte wurden die kalibrierten Ergebnisse der Simulation mit der höchsten räumlichen und zeitlichen Auflösung verwendet, da diese die beste Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Überflutungstiefen zeigt.

7 Diskussion

7.1 Auswirkung der räumlichen und zeitlichen Auflösung auf die maximale Überflutungstiefe

Ein Vergleich der maximalen Überflutungstiefen zeigt, dass die räumliche Auflösung einen hohen Einfluss auf die berechneten Werte hat, während die zeitlich Auflösung des Niederschlages einen deutlich geringeren Einfluss hat (s. Abb. 13).

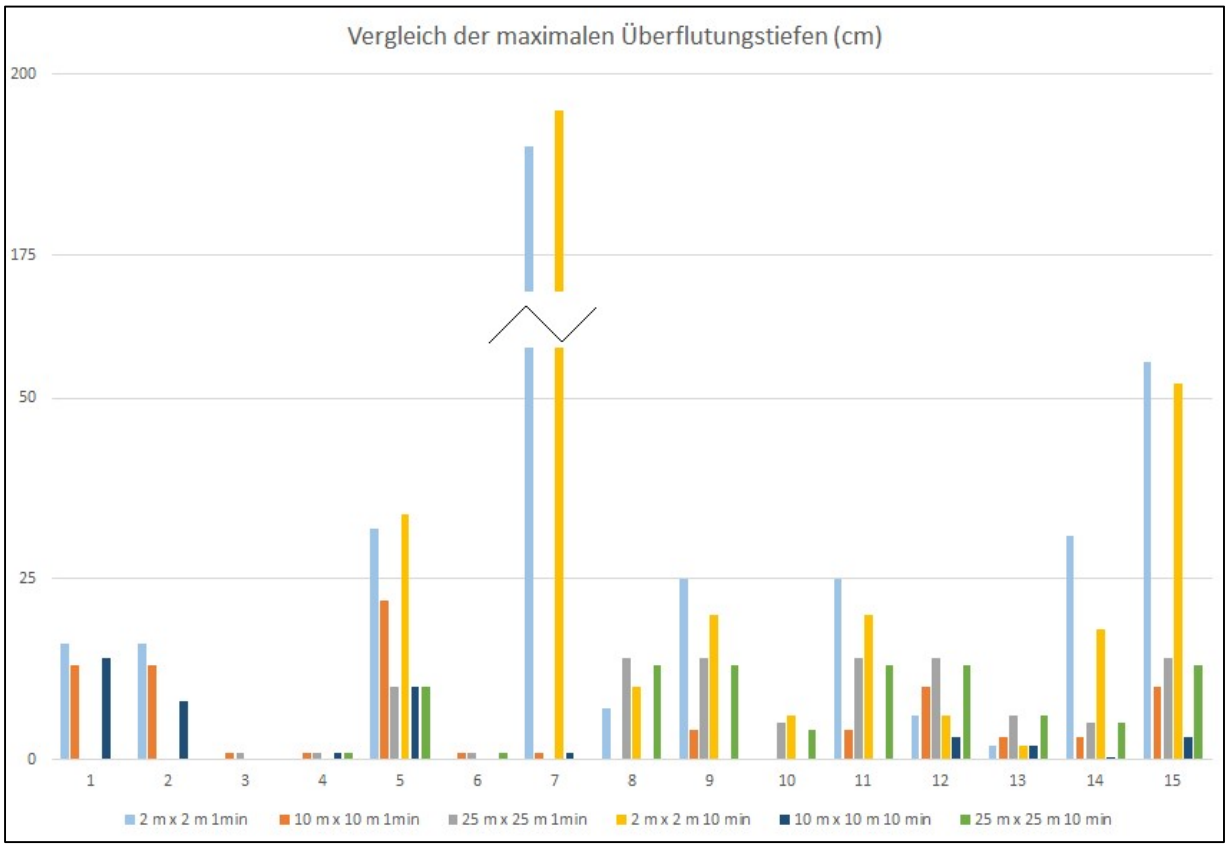

Abb. 13 Vergleich der Auswirkung der räumlichen und zeitlichen Auflösung auf die maximal Überflutungstiefe. Für den Vergleich wurden die Werte der Simulationen ohne Kalibrierung verwendet.

Abbildung 15 zeigt den Vergleich des zeitlichen Verlaufs sowie der zeitlichen Auflösung für die Simulation 2 x 2 m mit der zeitlichen Auflösung von 1 Minute und von 10 Minuten. Der Niederschlag mit einem Zeitintervall von 10 Minuten (rot) weist im Vergleich zum Intervall von 1 Minute (blau) deutlich geringere Spitzen auf, fällt jedoch auch nicht so stark ab wie bei 1 Minute. Daher ergibt sich für den gesamten Zeitraum von 120 min eine gleich große Fläche unter beiden Graphen. In der Regel weist jedoch die Auflösung von 1 Minute höhere Überflutungstiefen auf (s. Abb. 14), eine der Ursachen dafür ist der extremere Verlauf der Niederschlagskurve bei der Auflösung von 1 Minute.

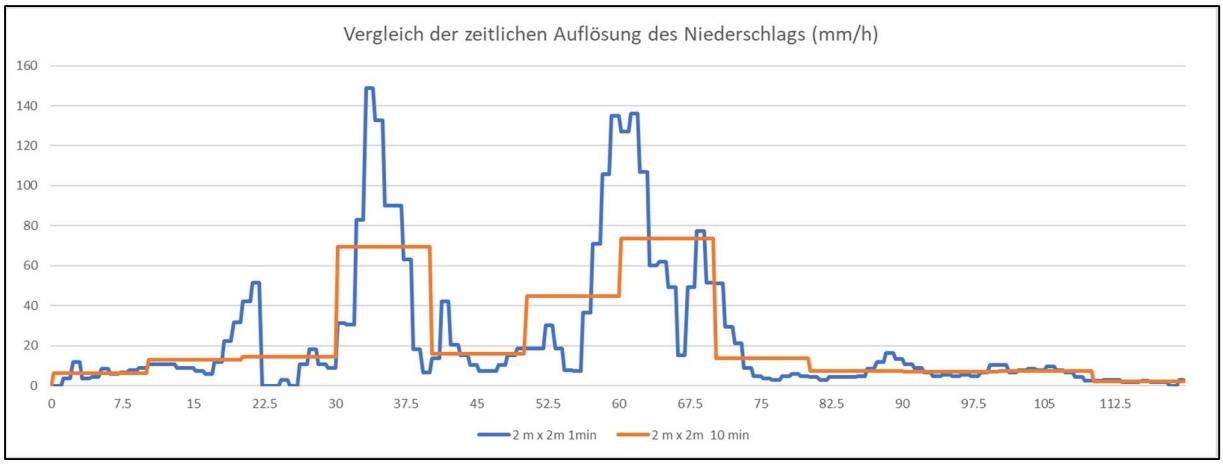

Abb. 14 Vergleich der zeitlichen Auflösung des Niederschlages für die Simulation 2 x 2 m.

Nach JETTEN & VAN DEN BOUT (2017) hat die Auflösung des digitalen Höhenmodells den größten Einfluss auf die Vorhersage der maximalen Überflutungstiefen. Dabei gilt: je geringer die Auflösung ist, desto geringer sind die Überflutungstiefen, die vom Modell vorhergesagt werden. Im Untersuchungsgebiet Meißen Triebischtal tritt dieses Phänomen ebenfalls auf (s. Abb. 15).

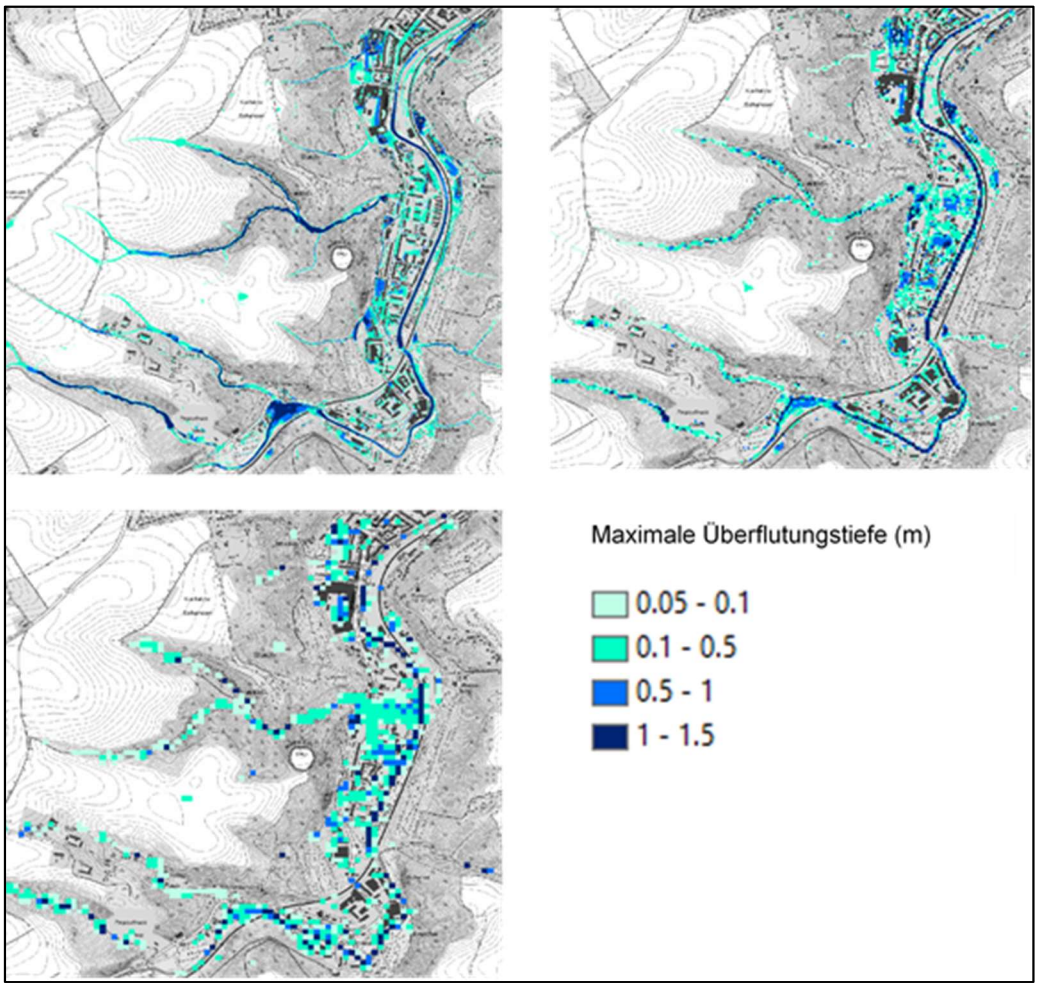

Abb. 15 Vergleich der maximalen Überflutungstiefen in Abhängigkeit der räumlichen Auflösung. Oben links: 2 x 2 m, oben rechts: 10 x 10 m, unten links 25 x 25 m (Quellenangabe S. 66).

7.2 Kalibrierung

7.2.1 Vergleich der Simulationen mit und ohne Gerinne

Im Laufe der Untersuchung wurde festgestellt, dass die Simulation mit den Gerinnen bei der Auflösung 2 x 2m zu deutlich geringeren maximalen Überflutungstiefen führt als die Simulation ohne Gerinne. Bei der Simulation mit der Zellgrößen 10 m liegen die Unterschiede vor allem im Bereich mit größeren Höhenunterschieden zwischen den Abflussbahnen und dem umliegenden Gelände, da kleinere Höhenunterschiede durch das digitale Höhenmodell nicht mehr abgebildet werden. Hier liegen die Unterschiede vor allem im besiedelten Bereich und die maximalen Überflutungstiefen werden vom Modell deutlich unterschätzt. Die Simulation mit der Zellgröße 25 m zeigt lediglich Unterschiede im Bereich der Triebisch, da kleinere Gerinne und Abflussbahnen im digitalen Höhenmodell nicht mehr abgebildet werden können. Auch hier werden die maximalen Überflutungstiefen deutlich unterschätzt. Abbildung 16 zeigt die Differenz zwischen den berechneten maximalen Wassertiefen mit und ohne Gerinne. OpenLISEM berechnet bei der Simulation mit Gerinne erheblich geringere maximale Überflutungstiefen als bei der Simulation ohne Gerinne, vor allem im Siedlungsbereich und im Bereich der Gerinne können sich Unterschiede von 0,25-1 m ergeben. Bei der Einschätzung der Risikogefahr spielt dies eine wichtige Rolle, weil höhere Überflutungstiefen deutlich mehr Schäden anrichten, da für die Geschiebebewegung eine Abhängigkeit zur Wassertiefe hergestellt werden kann (MANIAK 2016).

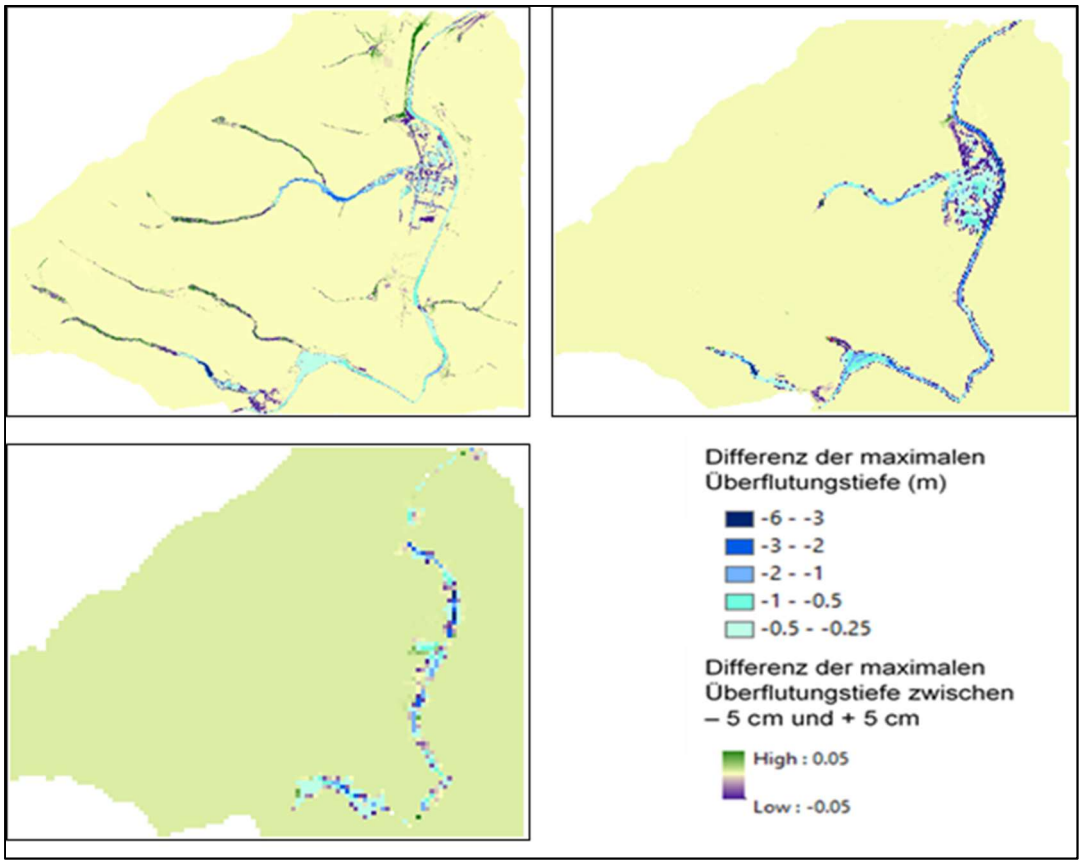

Abb. 16 Vergleich der Simulationen mit und ohne Gerinne. Die Abbildung zeigt die Differenz zwischen den berechneten maximalen Wassertiefen. Oben links: 2 m x 2m, oben rechts: 10 m x 10 m, unten links: 25 m x 25 m.

7.2.2 Rauheitsbeiwerte nach MANNING

Für alle Simulationen wurde eine Kalibrierung der Rauheitsbeiwerte nach MANNING für die Gefälle durchgeführt. Dabei wurde für jede Simulation ein eigener Kalibrierungsfaktor verwendet, der durch mehrere Versuche ermittelt wurde. Es wird nicht empfohlen für alle Simulationen denselben Kalibrierungsfaktor zu verwenden, da sich die Ergebnisse dadurch erheblich verschlechtern können (DE ROO et al. 1996b). Durch die Kalibrierung erfolgte eine Herabsetzung der Oberflächenrauigkeit, wodurch zum einen weniger Wasser zurückgehalten wird und zum anderen ergeben sich höhere Fließgeschwindigkeiten. Durch die Kalibrierung konnten für die Auflösungen 2 x 2 m und 10 x 10 m bessere Übereinstimmungen der berechneten und geschätzten Überflutungstiefen erzielt werden.

7.3 Starkregengefahrenkarte

Für die Validierung des Modells waren Fotoaufnahmen von den Bereichen vorhanden, die am stärksten betroffen waren (s. Anhang II Ordner 4.2). Im oberen Bereich der Straße „An der Hohen Eifer“ und der Ossietzkystraße (Punkte 14, 9, 11, 8 und 7) kam es durch eine Sturzflut zu starken Schäden. Der Asphalt der kleinen Anwohnerstraße wurde aufgerissen, außerdem entstanden Schäden an Wohngebäuden und Garagen. Der Bereich „An der Hohen Eifer“/Ossietzkystraße liegt unterhalb von landwirtschaftlich genutzten Flächen (Acker), die keinerlei Rückhalteflächen für das Regenwasser bieten. Zudem fällt das Gelände von den Ackerflächen bis zur Ossietzkystraße um rund 80 m ab, daher ergeben sich für diesen Bereich hohe Fließgeschwindigkeiten (s. Abb. 17).

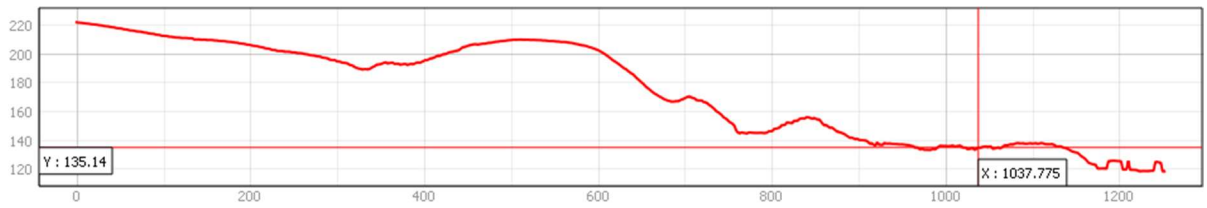

Abb. 17 Gefälle von der Ackerfläche bis zur Ossietzkystraße.

OpenLISEM hat für diesen Bereich maximale Wassertiefen von 76-140 cm berechnet, was sich relativ gut mit den geschätzten Wassertiefen deckt. Anhand der Starkregengefahrenkarte lässt sich erkennen, dass hier ein Risikobereich vorliegt (s. Abb. 19).

Die Fotoaufnahme von Punkt 8 zeigt ein Garagengebäude, das ebenfalls starke Schäden aufweist. Die geschätzte Wassertiefe liegt zwischen 80-120 cm, die von OpenLISEM berechnete maximale Überflutungstiefe beträgt 115 cm und zeigt eine gute Übereinstimmung (s. Abb. 19).

Im Bereich des Getränkemarktes auf der Ossietzkystraße wurde nur eine geringe maximale Überflutungstiefe berechnet, obwohl der Getränkemarkt starke Schäden aufweist. Die geschätzte Wassertiefe liegt bei rund 120 cm, OpenLISEM hat jedoch nur eine maximale Überflutungstiefe von 10 cm berechnet (s. Abb. 18). Für die Simulation wurde eine Gesamtdauer von 120 min festgelegt, es ergab sich also keine Nachlaufzeit für das Wasser. Dies könnte korrigiert werden, in dem die Gesamtdauer der Simulation angepasst wird.

Das Kaufland im Bereich der Talstraße/Schützestraße war ebenfalls von Überschwemmungen betroffen. Das Wasser drückte vom Parkplatz aus in die Verkaufsräume und führte zu Überschwemmungen im Gebäude. Die Aufnahmepunkte 1 und 2 befinden sich auf der Straßenseite des Gebäudes und zeigen abgelagertes Material, welches aus den Verkaufsräumen auf die Straße geflossen ist. OpenLISEM hat für den Bereich hinter dem Gebäude (Parkplatz) eine maximale Überflutungstiefe von rund 76 cm berechnet. Auch wenn keine Informationen zur tatsächlichen Wasserhöhe vorliegen, so liegt der von OpenLISEM berechnete Wert im plausiblen Bereich. Die Gefahrenkarte zeigt, dass es sich hier ebenfalls um einen Risikobereich handelt (s. Abb. 19).

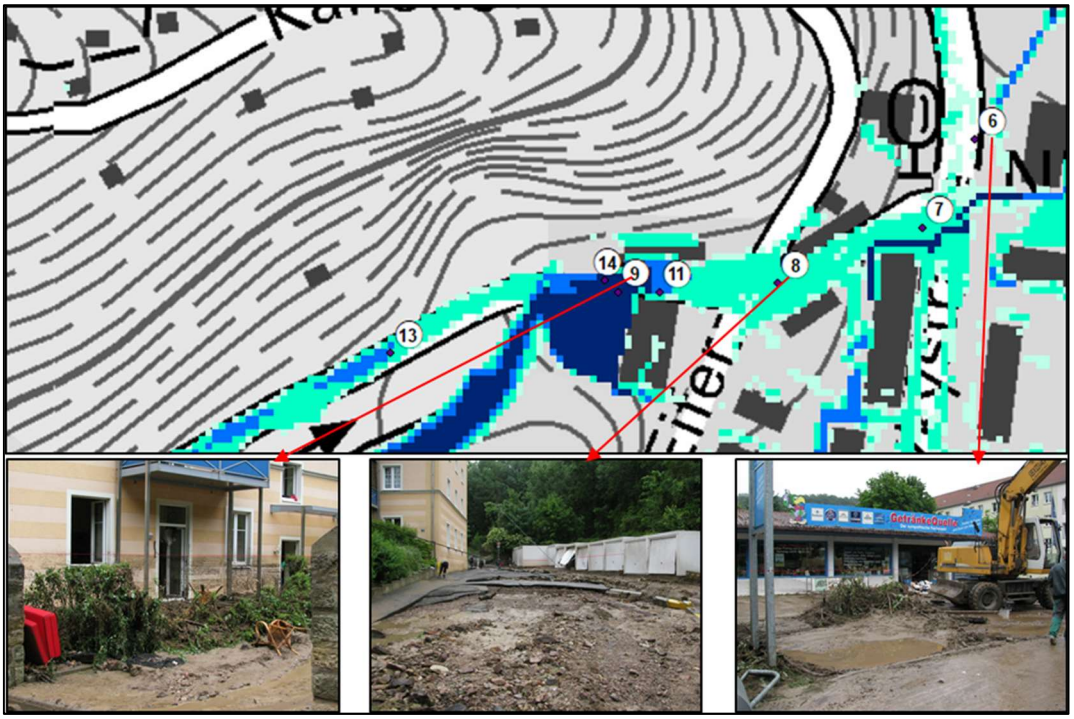

Abb. 18 Vergleich der Punkte 9, 8 und 6 mit der Gefährdungskarte (Quellenangabe S. 66).

Abb. 19 Sedimente, die durch die Verkaufsräume des Kauflands gespült wurden (Quellenangabe S. 66).

Punkt 12 liegt im Bereich der Talstraße/Ilschnerstraße und weist Schlammablagerungen auf, daher ist anzunehmen, dass auch dieser Bereich von Überflutung betroffen war. OpenLISEM hat für Punkt 12

eine maximale Wassertiefe von 7 cm berechnet, was zu gering erscheint. Die Talstraße ist leicht abschüssig (s. Abb. 20). Oberhalb des Aufnahmepunktes (im Bereich des Punkts 5) wurde eine maximale Überflutungstiefe von 32 cm berechnet (s. Abb. 21). Um die geringe Wasserhöhe zu korrigieren, wäre eine Verlängerung der Gesamtlaufzeit der Simulation möglich.

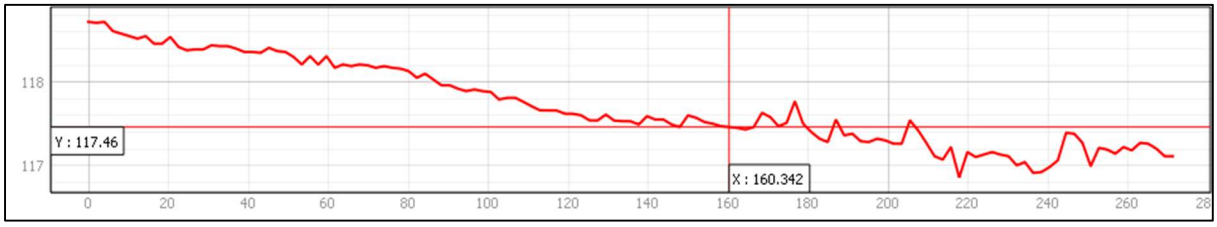

Abb. 20 Gefälle auf der Talstraße.

Abb. 21 Blick auf die Talstraße. Das abgelagerte Material weist auf eine Überflutung hin (Quellenangabe S. 66).

Die Punkte 3 und 4 liegen auf der Talstraße unterhalb der Punkte 1 und 2, obwohl an der Hauswand Wassermarken zu erkennen sind, wurde von OpenLISEM hier keine Überflutung vorhergesagt. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Punkte vor einem relativ großen Gebäude liegen, an dem sich das Wasser staut, zudem wurde oberhalb der Punkte von OpenLISEM eine Überflutung mit einer maximalen Überflutungstiefe von 30 cm vorhergesagt, auch hier könnte eine längere Simulationsdauer die Ergebnisse verbessern. Die berechnete maximale Überflutungstiefe und die geschätzte Überflutungstiefe zeigen am Punkt 5 eine gute Übereinstimmung (s. Abb. 22).

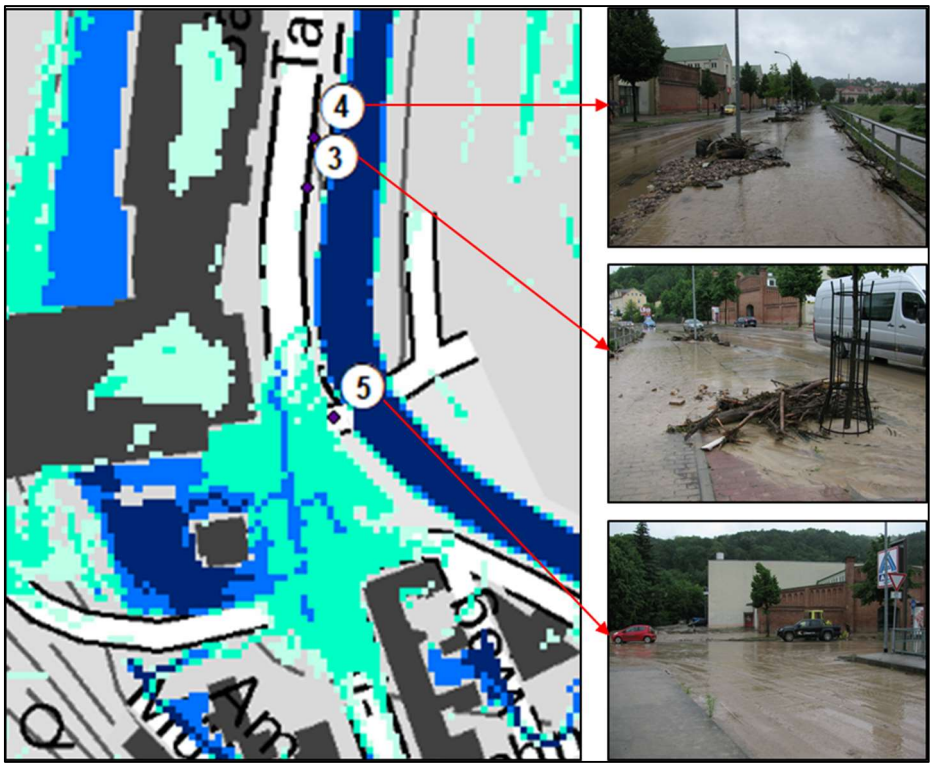

Abb. 22 Vergleich der Gefahrenkarte mit den Punkten 3, 4 und 5 (Quellenangabe S. 67).

7.4 Abgelagertes Material

Während der Aufräumarbeiten wurden rund 4000 m³ abgelagertes Material beseitigt (Quelle: IÖR). OpenLISEM hat für den Siedlungsbereich eine Ablagerungsmenge von rund 12 592 m³ berechnet (Auflösung: 2 x 2 m und 1 Minute). Für die Überprüfung der Plausibilität sind weitere Untersuchungen notwendig, da keine Information zur Größe der Fläche vorliegt, auf der das Matreial eingesammelt wurde. Da für das Untersuchungsgebiet keine Infiltration berechnet wurde, erfolgte die Erosionssimulation über drei Bodenparameter (D50, D90, Aggregatstabilität). Für die Berechnung der Infiltration werden weitere Bodenparameter benötigt, die einen Einfluss auf die Menge des abgelagerten Materials haben (z. B. hydrologische Leitfähigkeit). Zudem spielt die Genauigkeit der Eingangsdaten eine entscheidende Rolle. Die Bodenparameter für diese Untersuchung wurden aus Literaturquellen übernommen und können ungenau sein. Um genauere Ergebnisse zu erzielen, wäre eine Berücksichtigung weiterer Bodeneigenschaften empfehlenswert. Außerdem wäre die Entnahmen von Bodenproben und deren Auswertung im Labor sinnvoll um möglichst genaue Eingangsdaten zu erhalten (JETTEN & VAN DEN BOUT 2017).

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Untersuchung hat ergeben, dass OpenLISEM prinzipiell geeignet ist um Starkregengefahrenkarten zu erstellen. Die Punkte, an denen das Modell überprüft wurde, weisen alle ein hohes Gefährdungsrisiko auf, das durch die von OpenLISEM berechneten maximalen Überflutungstiefen gut wiedergegeben wird. Da nur unsystematische, durch Anwohner angefertigte Fotoaufnahmen zur Verfügung standen, kann die Güte der Modellvorhersagen in Bereichen mit weniger starken Schäden und Überflutungen nicht abschließend beurteilt werden. Ähnliches gilt für die Ausbreitung im gesamten Untersuchungsgebiet. Die Modellvorhersage erscheint jedoch plausibel, sodass hier weitere systematische Untersuchungen mit zukünftigen Starkregenereignissen sinnvoll erscheinen.

Die Auflösung des digitalen Höhenmodells spielt für die Güte der Ergebnisse eine entscheidende Rolle. Auf Grundlage der Modellvarianten mit verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen kann eine räumliche Auflösung von mindestens 2 x 2 m und eine zeitliche Auflösung von mindestens 1 Minute empfohlen werden.

Modellberechnungen mit und ohne lokalem Gerinne-Abfluss zeigen, dass die benötigte Auflösung von 2 x 2 m aufgrund zu geringer Zellgröße im Modell mit lokalem Abfluss zu unrealistischen Überflutungstiefen führt (siehe 2.5.1 Fließprozesse).

Das Modell benötigt viele Eingangsdaten, die teilweise schwer oder nur durch Versuche (z. B. Entnahmen und Analyse von Bodenproben, Vermessung der Gerinne) zu beschaffen sind. Außerdem muss eine Kalibrierung des Modells für jede Simulation neu erfolgen. Für den Anwender bedeutet dies einen hohen Aufwand. Zudem eignet sich OpenLISEM wegen der Notwendigkeit einer Kalibrierung nicht ohne Weiteres zur Gefährdungsanalyse bezüglich zukünftiger Starkregenereignisse.

Die Ergebnisse der Erosionsmodellierung erscheinen plausibel. Es fehlen systematische Daten zu den Ablagerungsmengen im Untersuchungsgebiet, daher ist eine fundierte Bewertung der Modellergebnisse nicht möglich. Auch hier sind weitere Untersuchungen notwendig.

In dieser Arbeit wurde die Wasseraufnahmekapazität des Bodens als gesättigt betrachtet, daher finden keinen Infiltrationsprozesse statt und konnten dadurch vernachlässigt werden. OpenLISEM ist in der Lage, Infiltrationsprozesse zu berücksichtigen. Es erfordert weitere Untersuchungen um abschätzen zu können, ob eine Berücksichtigung der Infiltrationsprozesse die Modellgenauigkeit erhöht.

9 Literaturverzeichnis

ASTON A.R. (1979): Rainfall interception by eight small trees. In: *Journal of Hydrology* 42 (3-4), S. 383–396. DOI: 10.1016/0022-1694(79)90057-X.

BAARTMAN, J.E.M., JETTEN, V. RITSEMA, J.C., DE VENTE, J. (2012): Exploring effects of rainfall in tensity and duration. Prado catchment, SE Spain. In: *Hydrol. Process.* 26 (7), S. 1034–1049. DOI: 10.1002/hyp.8196.

BATHURST, J. C., KILSBY, C., WHITE, S. (1996): Modelling the impacts of climate and land-use change on basin hydrology and soil erosion in Mediterranean Europe. Hg. v. Brandt, C. J., Thornes, J. B. Chichester (In Mediterranean Desertification and Land Use).

BAUER, C. (Hg.) (2004): Bestimmung der Retentionspotenziale naturnaher Maßnahmen in Gewässer und Aue mit hydraulischen Methoden. Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2004. Kassel: Herkules Verl. (Kasseler Wasserbau-Mitteilungen, 16).

BERNHOFER C., HÄNSEL, S., SCHALLER, A., PLUNKTE T. (2015a): Charakterisierung von meteorologischer Trockenheit. Hg. v. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden (Schriftenreihe des LfULG, 7). Online verfügbar unter https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/24200.

BERNHOFER, C., FRANKE, J., FISCHER, S., KIRSTEN, L., KÖRNER, P., KOSTROWSKI, D., PRASSE, H., SCHALLER, A., DONIX T. (2015b): Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen. Hg. v. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Dresden (Schriftenreihe des LfULG, 3). Online verfügbar unter file:///C:/Users/Stephanie/Downloads/LfULG_Schriftenreihe_Heft_3_2015_Analyse_der_Klimaentwicklung_in_Sachsen.pdf.

BRANDHUBER, R., TREISCH, M., FISCHER, F., KISTLER, M., MAIER, H., AUERSWALD, K. (2017): Starkregen, Bodenerosion, Sturzfluten Beobachtungen und Analysen im Mai/Juni 2016. 1. Aufl. Unter Mitarbeit von Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz. Hg. v. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (LUL). Freising-Tüntenhausen (Schriftenreihe der Bayrischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 2). Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/starkregen-bodenerosion_sturzfluten_lfl-schriftenreihe.pdf.

BREBANTE, B. M. (2017): Analyzing the Effects of Land Cover/Land Use changes on Flashflood: A Case Study of Marikina River Basin (MRB), Philippines. Masterarbeit. University of Twente, Enschede, Netherlands. Faculty og Geo-Information Science and Earth Observation.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSHAFTEN UND ROHSTOFFE (Hg.): Geologische Übersichtskarte 1 : 200 000. Generallegende für Web-Dienste. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Sammlungen-Grundlagen/GG_geol_Info/Karten/Deutschland/GUEK200/guek200_Generallegende_Dienst.pdf?blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 23.07.2018.

CHOW, V. T. (2009): Open-channel hydraulics. Reprint of the 1959 ed., McGraw Hill Book Company, Inc. Caldwell, New Jersey: Blackburn Press.

DE ROO, A. P. J., WESSELING, C. G., RITSEMA, C. J. (1996a): LISEM. A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. In: *Hydrol. Process.* 10 (8), S. 1107–1117. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1107::AID-HYP415>3.0.CO;2-4.

DE ROO, A. P. J., OFFERMANNS, R. J. E.,CREMERS, N. H. D. T. (1996b): LISEM. LISEM: A single-event, physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: Sensitivity analysis, validation and application. In: *Hydrol. Process.* 10 (8), S. 1119–1126. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1119::AID-HYP416>3.0.CO;2-V.

DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E.V.: Hochwasseraudit - DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Online verfügbar unter https://de.dwa.de/de/hochwasseraudit.html, zuletzt geprüft am 20.06.2018.

DEUTSCHER WETTERDIENST: KOSTRA-DWD-2010. Online verfügbar unter ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA_DWD_2010R/gis/.

DEUTSCHER WETTERDIENST: Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Warnungen aktuell - Warnkriterien. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html, zuletzt geprüft am 22.06.2018.

ELIJZEN, L. (2017): The effects of climate change on the robustness of the urban drainage system of the Soesterkwartier. Masterarbeit. Utrecht University, Utrecht, Netherlands.

GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V. (Hg.) (2017): Naturgefahrenreport 2017. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer in Zahlen, Stimmen und Ereignissen. Unter Mitarbeit von Burghoff, O., Jarosch, K., Schult, J. Berlin. Online verfügbar unter https://www.gdv.de/resource/blob/11662/d69427a10ce7f276ff35b21901f9648c/publikation---naturgefahrenreport-2017-data.pdf.

GISI, U. (1997): Bodenökologie. 51 Tabellen. 2., neu bearb. und erw. Aufl. Stuttgart: Thieme (Bücher Biowissenschaften).

GÖMANN, H., BENDER, A., BOLTE, A., DIRKSMEYER, W., ENGLERT, H., FEIL, JAN., FRÜHAUF, C., HAUSCHILD, M., KRENGEL, S., LILIENTHAL, H., LÖPMEIER, F., MÜLLER, J., MUßHOFF, O., NATKHIN, M., OFFERMANN, F., SEIDEL, P., SCHMIDT, M., SEINTSCH, B., STEIDL, J., STROHM, K., ZIMMER, Y. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagement-systemen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut (Thünen Report, 30).

GOVERS, G. (1990): Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. International Association of Hyxdrological Sciences (189).

GREEN, W.H., AMPT, G. A. (1911): Studies on Soil Phyics. In: *J. Agric. Sci.* 4 (01), S. 1. DOI: 10.1017/S0021859600001441.

HABONIMANA, H. V. (2014): Intergrated Flood Modelling in Lubigi Catchment Kampala. University of Twente, Enschede, Netherlands. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation.

HABONIMANA, H. V., BIZIMANA, J.P., UWAYEZU, E., TUYISHIMIRE, J., MUGISHA, J. (Hg.) (2015): Integrated flood modeling for flood hazard assessment in Kigali City, Rwanda. GeoTech Rwanda. Kigali, Rwanda, 18-20. November.

HILLER, D. A. (2007): Bodenerosion durch Wasser. Ursachen, Bedeutung und Umgang in der land-wirtschaftlichen Praxis von NRW. Hg. v. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. Münster. Online verfügbar unter https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/acker bau/pdf/broschuere-bodenerosion.pdf.

HOYNINGEN-HUENE, J. (1983): Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Pflanzen-beständen // Einfluß der Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt. Hamburg: Parey in Komm (DVWK-Schriften, 57).

JETTEN, V. (2002): LISEM user manual, version 2.x. Draft version. Utrecht Centre for Environment and Landscape Dynamics, Utrecht University. The Netherlands. Online verfügbar unter http://manualzz.com/doc/4197714/limburg-soil-erosion-model-user-manual.

JETTEN, V. (2016): CHaRIM Project. Dominica National Flood Hazard Map Methodology and Validation Report. Draft Version 1.1. Faculty of Geoinformation Science and Earth Observation, University of Twente. Netherlands.

JETTEN, V., CHAVARRO, D. (2016): Flood modelling for Integrated Watershed Management Bois d'Orange watershed St Lucia. Caribbean Handbook for Risk Information Management. Final Version. Faculty of Geoinformation Science and Earth Observation. Netherlands.

JETTEN, V., VAN DEN BOUT, B. (2017): LISEM Limburg Soil Erosion Model v 3.9x. Documentation & User Manual. Second Draft. University of Twente. Netherlands.

JUNGE, E. (2013): Hochwasser in Deutschland. Kategorisierung und Charakteristik, Gefahrenpotential, besondere historische Ereignisse, Prävention und Katastrophenmanagement. Zugl.: München, Ludwig-Maximilians-Univ., Staatsexamensarbeit, 2011. Hamburg: Bachelor + Master Publ (Staatsexamensarbeit).

KIPFER, A., BERGER, C., MANI, P., HULLIGER, R., CADUFF, U., DOBMANN, J., GSTEIGER, P. PAULI, M., SCHNEIDER, M. (2018):
Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz. Bundesamt für Umwelt. Bern.

LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (Hg.): 10_Mittelsaechsisches_Loesshuegelland. Sachsen. Online verfügbar unter https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/10_Mittelsaechsisches_Loesshuegelland.pdf, zuletzt geprüft am 23.07.2018.

LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (Hg.): 7_Elbe-Durchbruchstal. Online verfügbar unter https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/7_Elbe-Durchbruchstal.pdf, zuletzt geprüft am 23.07.2018.

LANDESTALSPERRENVERWALTUNG DES FREISTAATES SACHSEN (Hg.) (2005): Hochwasser 2002. Studie Hochwasserschutzkonzept Schadensgebiet der Fließgewässer I. Ordnung. Los5-Triebisch, Wilde Sau, Ketzerbach. Unter Mitarbeit von Lindemann, S., Ehle, H., Klose, P. Freiberg. Online verfügbar unter https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/08_11_Meissen.pdf.

LANGSTÄDTLER, G., EINFALT, T., QUIRMBACH, M. (2016): Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) – Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf die Eintretenswahrscheinlichkeit. Abschlussbericht. Hg. v. Landesamt fur Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW). Aachen/Lübeck/Hattingen. Online verfügbar unter https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/klima/pdf/ExUS_Bericht_1a.pdf.

LINDEN, D.R., VAN DOREN, D.M., ALLMARAS, J.R., ALLMARAS, R.R: A MODEL OF THE EFFECTS OF TILLAGE-INDUCED SOIL SURFACE ROUGHNESS ON EROSION. In: Proceedings of the 11 th ISTRO Conference, July 1988, Edinburgh, Scotland, Bd. 1, S. 373–378. Online verfügbar unter http://iworx5.webxtra.net/~istroorg/download/ISTRO1988_Vol1.pdf.

MANIAK, U. (2016): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. 7., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Lehrbuch).

MERRIAM, R. A. (1960): A note on the interception loss equation. In: *Journal of Geophysical Research* 65 (11), S. 3850–3851. DOI: 10.1029/JZ065i011p03850.

METROPOLREGION BREMEN-OLDENBURG IM NORDWESTEN E.V. (Hg.) (2016): Leitfaden zur Starkregenvorsorge. Ein Nachschlagewerk für Kommunen der Metropolregion Nordwest. Delmenhorst. Online verfügbar unter http://www.metropolregion-nordwest.de/portal/seiten/leitfaeden-zur-starkregenvorsorge-900000107-10018.html.

MOORE, I. D., LARSON, C. L. (1979): Estimating Micro-Relief Surface Storage from Point Data. In: *Transactions of the ASAE* 22 (5), S. 1073–1077. DOI: 10.13031/2013.35158.

MORGAN, R. P. C. (1994): The European Soil Erosion Model an update on its structure and research base. In: *Conserving Soil Resources: European Perspectives.*, S. 286–299.

MORGAN, R. P. C., QUINTON, J. N., RICKSON, R. J. (1992): EUROSEM. Documentation Manual. Version 1. Silsoe College. Silsoe.

MORGAN, R. P. C., QUINTON, J. N., SMITH, R. E., GOVERS, G., POESEN, J. W. A., CHISCI, G., TORRI, D. (1998): The EUROSEM Model. In: John Boardman und David Favis-Mortlock (Hg.): Modelling Soil Erosion by Water. Berlin, Heidelberg: Springer (NATO ASI Series, Series I, 55), S. 389–398.

MORGAN, R.P.C., QUINTON, J.N., SMITH, R.E., GOVERS, G. (1998): The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide. Version 3.6. Online verfügbar unter http://eprints.lancs.ac.uk/13189/1/user_v2.pdf.

NURRITASARI, F. A., SUDIBYAKTO, JETTEN, V. (2015): OpenLISEM Flash Flood Modelling Application in Logung Sub-Catchment, Central Java. In: *Indonesien Journal of Geography* (Vol. 47, No. 2), S. 132–141.

ONSTAD, C. A. (1984): Depressional Storage on Tilled Soil Surfaces. In: *Transactions of the ASAE* 27 (3), S. 729–732. DOI: 10.13031/2013.32861.

RAUWS, G., GOVERS, G. (1988): Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. In: *Journal of Soil Science* 39 (1), S. 111–124. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1988.tb01199.x.

SAUER, A. (2004): Vergleichende Untersuchungen zur Anwendbarkeit von physikalisch basierten Bodenerosionsmodellen. Einsatz von EROSION 2D/3D und LISEM auf weinbaulich genutzten Testflächen im Rheingau. Diplomarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz. Geographisches Institut. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Axel_Sauer/publication/292155338_Vergleichende_Untersuchungen_zur_Anwendbarkeit_von_physikalisch_basierten_Bodenerosionsmodellen_Einsatz_von_EROSION_2D3D_und_LISEM_auf_weinbaulich_genutzten_Testflachen_im_Rheingau/links/56ab732c08aeadd1bdce47ff/Vergleichende-Untersuchungen-zur-Anwendbarkeit-von-physikalisch-basierten-Bodenerosionsmodellen-Einsatz-von-EROSION-2D-3D-und-LISEM-auf-weinbaulich-genutzten-Testflaechen-im-Rheingau.pdf.

SCHUBERT (2017): Flächennutzungsplan mit integriertem Landschaftsplan. Umweltbericht. Hg. v. Stadt Tharandt. Tharandt. Online verfügbar unter file:///C:/Users/STEPHA~1/AppData/Local/Temp/170915_FNP_Tharandt_Umweltbericht_2-Fassung.pdf.

SOSRODARSONO, S., TAKEDA, K. (1977): Manual on Hydrology. Pradnya Paramita: Jakarta.

STAATSMINISTERIUM DES INNERN (2018): Landesentwicklung - RAINMAN. Online verfügbar unter http://www.landesentwicklung.sachsen.de/29536.htm, zuletzt aktualisiert am 26.04.2018, zuletzt geprüft am 20.06.2018.

STADT MEIßEN (Hg.) (2008): Stadt Meißen. Städtebaulicher Rahmenplan Historische Altstadt. Neufassung 2008/2009. Unter Mitarbeit von Architekturbüro Langer. Meißen. Online verfügbar unter https://www.stadt-meissen.de/download/rathaus/Text_Stand_03112008.pdf.

STADT MEIßEN (2018): Zahlen – Fakten – Wissenswertes über Meißen. Online verfügbar unter https://www.stadt-meissen.de/download/zahlen-und-fakten/Zahlen-Fakten-Wissensw.pdf, zuletzt geprüft am 23.07.2018.

VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. In: *Soil Science Society of America Journal* 44 (5), S. 892. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.

ZUMBROICH, T., MÜLLER, A., NEUGEBAUER, C., BUSCH, G.,BUSCHMANN, M., RIECKER, T., HOFFMANN, S. (2001): Gewässerstrukturbericht 2001. Bewertung der ökomorphologischen Gewässerstruktur ausgewählter sächsischer Fließgewässer nach LAWA-Übersichtsverfahren mit Gewässerstrukturkarte. 700. Aufl. Hg. v. Landesamt für Umwelt und Geologie. Dresden. Online verfügbar unter https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/download/GSCK-Sachs-Bericht-druck2001.pdf.

9.1 Bildquellen

Abb. 1 Starkregengefahrenkarte für das Einzugsgebiet der Glems.
Quelle: http://www.starkregengefahr.de/glems/gefahrenkarten/starkregengefahrenkarten/

Abb. 6 Übersicht über die Gebiete, in denen die Studien durchgeführt wurden. Die Legende kann aus Tabelle 2 entnommen werden.
Quelle: http://www.ginkgomaps.com/de/rl1w_xx_weltkarte_satbmngtb08_jr_150_th.jpg

Abb. 11 Vorkommen von Lebensraumtypen nach Anhang I der FFH-Richtlinie und Habitatflächen für Arten nach Anhang IV der FFH-Richtlinie im Untersuchungsgebiet.
Quelle: https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/natur/natura2000/ffh/Uebersichtskarten/171_MaP_KF_K.PDF).

Abb. 12 Lage der Aufnahmepunkte für die Überprüfung der maximale Überflutungstiefen.
Quelle: http://www.landesvermessung.sachsen.de/inhalt/produkte/online/geodatendienste.html#karten

Abb. 15 Vergleich der maximalen Überflutungstiefen in Abhängigkeit der räumlichen Auflösung. Oben links: 2 x 2 m, oben rechts: 10 x 10 m, unten links 25 x 25 m
Quelle Karte: http://www.landesvermessung.sachsen.de/inhalt/produkte/online/geodatendienste.html#karten

Quelle Foto: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung

Abb. 18 Vergleich der Punkte 9, 8 und 6 mit der Gefährdungskarte.
Quelle Karte: http://www.landesvermessung.sachsen.de/inhalt/produkte/online/geodatendienste.html#karten

Quelle Foto: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung

Abb. 19 Sedimente, die durch die Verkaufsräume des Kauflands gespült wurden.
Quelle Karte: http://www.landesvermessung.sachsen.de/inhalt/produkte/online/geodatendienste.html#karten

Quelle Foto: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung

Abb. 21 Blick auf die Talstraße. Das abgelagerte Material weist auf eine Überflutung hin.
Quelle Karte: http://www.landesvermessung.sachsen.de/inhalt/produkte/online/geodatendienste.html#karten

Quelle Foto: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung

Abb. 22 Vergleich der Gefahrenkarte mit den Punkten 3, 4 und 5.
Quelle Karte: http://www.landesvermessung.sachsen.de/inhalt/produkte/online/geodatendienste.html#karten

Quelle Foto: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung

9.2 Datenquellen

9.2.1 Karten

Übersichtskarte Sachsen:	https://geoportal.sachsen.de/cps/metadaten_portal.html?id=26df8686-08cd-4dc2-b459-4d51b9badfe8
Kulturlandschaftsgebiete:	https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/natur/37307.htm
Landschaftsgliederung:	https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/natur/37307.htm
KOSTRA-DWD-2010:	ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/return_periods/precipitation/KOSTRA/KOSTRA_DWD_2010R/

Geologische Übersichtskarte 1:1.000.000 (GK1000):

https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/DetailResult.do?fileIdentifier=1C60DDA9-EF73-47B9-9ED7-FCD22B3226C1

Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK200)

Kartenblatt CC5542 Dresden
https://produktcenter.bgr.de/terraCatalog/DetailResult.do?fileIdentifier=E16BAC02-1B42-493A-9635-CF9A325BA477

Topografische Karte TK 10

Geodaten online:	http://www.landesvermessung.sachsen.de/inhalt/produkte/online/geodatendienste.html#karten
WMS-Dienst:	https://geodienste.sachsen.de/wms_geosn_dtk-p-grau/guest?

9.2.2 Software

PCRaster:	http://pcraster.geo.uu.nl/downloads/latest-release/
OpenLISEM:	https://sourceforge.net/projects/lisem/files/
Soil Water Characteristics:	(https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?modeCode=80-42-05-10&softwareid=492).
QGIS 3.0.1	https://qgis.org/en/site/forusers/download.html
SAGA GIS 2.3.2	https://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/SAGA%20-%202/SAGA%202.2.3/

10 Anhang I

10.1 PCRaster-Befehle

Tabelle 22 Übersicht über die PCRaster-Befehle mit denen die von OpenLISEM benötigten Karten erstellt werden.

Karte	Daten-typ	PCRaster-Befehl
Basiskarten		
dem.map	scalar	asc2map --clone base.map dem.asc dem.map
landunit.map	scalar	asc2map --clone base.map landunit.asc landunit.map
soiltype.map	scalar	asc2map --clone base.map soiltype.asc soiltype.map
gauge.map	nominal	asc2map --clone base_g.map gauge.asc gauge.map
catchment-mask.map	ldd	pcrcalc ldd.map=lddcreate(dem.map,1e10,1e10,1e10,1e10) pcrcalc catchment.map = catchment(ldd.map,pit(ldd.map)) pcrcalc catchmentmask.map = nominal (if (catchment.map eq 123 then 1 else 0))
	ldd	pcrcalc catchment.map = catchment(ldd.map,pit(ldd.map))
	nominal	pcrcalc catchmentmask.map = nominal (if (catchment.map eq EG-Nr. then 1 else 0))
Catchment-mask.map für mehre EG	nominal	pcrcalc catchmentmask.map = nominal (if (catchment.map eq EG-Nr. then 1 else if(catchment.map eq 55 then 1 else if(catchment.map eq EG-Nr. then 1 else 0))))
Einzugsgebiet		
Ausschneiden des Haupt-ein-zugsgebiets		
DEM	scalar	pcrcalc dem.map = scalar (if (catchmentmask.map eq 1 then dem1.map))
landunit.map	scalar	pcrcalc landunit.map = scalar (if (catchmentmask.map eq 1 then landunit1.map))
soil.map	scalar	pcrcalc soil.map = scalar (if (catchmentmask.map eq 1 then soil1.map))
roads.map	scalar	pcrcalc roads.map = scalar (if (catchmentmask.map eq 1 then roads1.map))
buildings.map	scalar	pcrcalc buildings.map = scalar (if (catchmentmask.map eq 1 then buildings1.map))
gauge.map	nominal	pcrcalc gauge.map = nominal (if (catchmentmask.map eq 1 then gauge1.map))
Eigenschaften des EG		
ldd.map	ldd	pcrcalc --lddin ldd.map=lddcre-ate(dem.map,1e10,1e10,1e10,1e10)
area.map	ldd	pcrcalc area.map=catchment(ldd.map,pit(ldd.map))
grad.map	scalar	pcrcalc grad.map=slope(dem.map) pcrcalc grad.map=sin(atan(max(0.001, grad.map)))
id.map	nominal	pcrcalc id.map=nominal(spreadzone(gauge.map,0,1))
outlet.map	ldd	pcrcalc outlet.map=pit(ldd.map)
lai.map	scalar	pcrcalc --matrixtable lai.map = lookupscalar(veg_tbl.txt, 1, landunit.map)
per.map	scalar	pcrcalc --matrixtable per.map = lookupscalar(veg_tbl.txt, 2, landunit.map)
ch.map	scalar	pcrcalc --matrixtable ch.map = lookupscalar(veg_tbl.txt, 3, landunit.map)

n.map	scalar	pcrcalc --matrixtable n.map = lookupscalar(landuse.txt, 1, landunit.map)
rr.map	scalar	pcrcalc --matrixtable rr.map = lookupscalar(landuse.txt, 2, landunit.map)
stonefrc.map	scalar	pcrcalc --matrixtable stonefrc.map = lookupscalar(landuse_st.txt, 1, landunit.map)
crustfrc.map	scalar	pcrcalc --matrixtable crustfrc.map = lookupscalar(landuse_st.txt, 2, landunit.map)
Gerinne		
accuflux.map	ldd	pcrcalc accuflux.map = accuflux(ldd.map,1)
chanmask.map	scalar	pcrcalc chanmask.map = scalar (if (accuflux.map gt 5000 then 1))
chandepth.map	scalar	pcrcalc chandepth.map = scalar (if (chanmask.map eq 1 then 0))
lddchan.map	ldd	pcrcalc lddchan.map=lddcreate(dem.map*chanmask.map,1e10,1e10,1e10,1e10)
changrad.map	scalar	pcrcalc changrad.map=slope(dem.map*chanmask.map)
chanman.map	scalar	pcrcalc chanman.map=n.map*chanmask.map
coh.map	scalar	pcrcalc --matrixtable coh.map = lookupscalar(cohesion.txt, 1, soil.map)
cohadd.map	scalar	pcrcalc --matrixtable cohadd.map = lookupscalar(cohesion.txt, 2, soil.map)
chancoh.map	scalar	pcrcalc chancoh.map=(coh.map+cohadd.map)*chanmask.map
chanwidt.map	scalar	pcrcalc chanwidt.map= scalar (if (chanmask.map ne 0, 3))
chanside.map	scalar	pcrcalc chanside.map= scalar (if (chanmask.map ne 0, 0))
chanmaxq.map	scalar	pcrcalc chanmaxq.map = scalar (if (chanmask.map eq 1 then 0))
Straßen		
roads.map		asc2map --clone base1.map roads.asc roads.map
roadwidt.map	scalar	pcrcalc roadwidt.map = scalar(if (roads.map ne 0, *width*, 0)) pcrcalc roadwidt.map = scalar (if (roads.map eq 20, 4, if (roads.map eq 21, 5,0)))
Gebäude		
housecover.map	scalar	asc2map --clone base1.map buildings1.asc housecover.map
	scalar	resample -e 0 housecover.map housecover2.map --clone dem.map
roofstore.map	scalar	pcrcalc roofstore.map = scalar (if (dem.map gt 0 then 0))
drumstore	scalar	pcrcalc drumstore.map = scalar (if (dem.map gt 0 then 0))
Erosion		
aggrstab.map	scalar	pcrcalc --matrixtable aggrstab.map = lookupscalar(landuse.txt, 3, landunit.map)
d50.map	scalar	pcrcalc --matrixtable d50.map = lookupscalar(landuse.txt, 4, landunit.map)
d90.map	scalar	pcrcalc --matrixtable d90.map = lookupscalar(landuse.txt, 5, landunit.map)

10.2 Karte-Abgelagertes Material

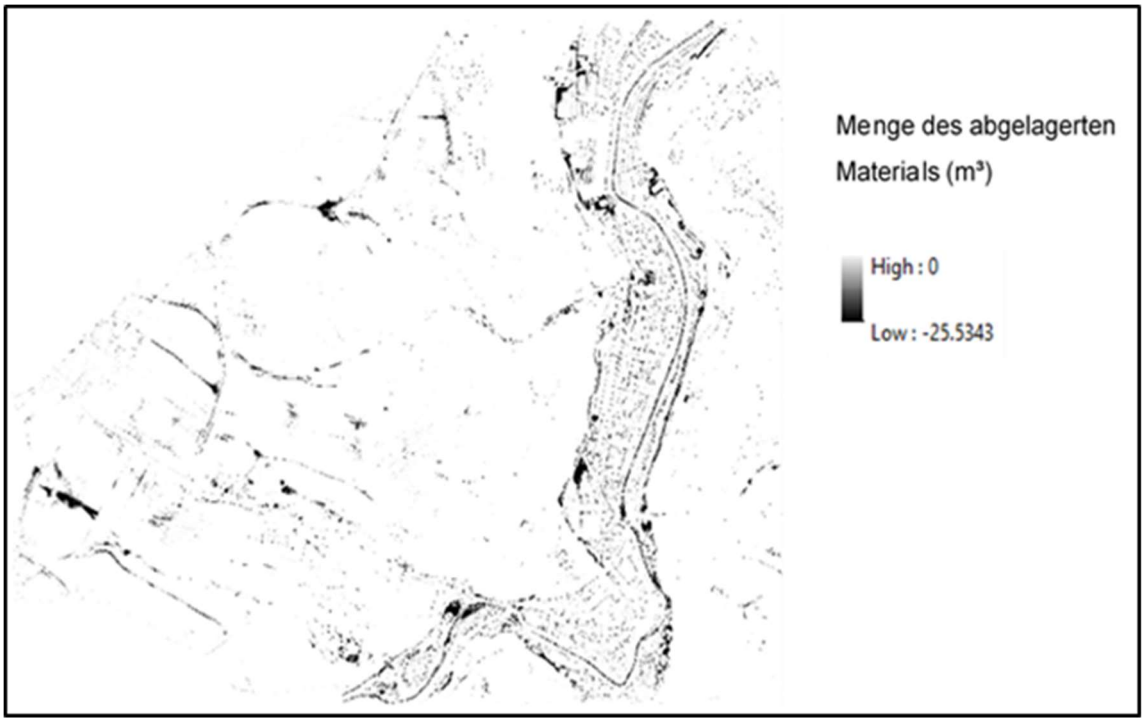

Abb. 23 Lage und Menge des abgelagerten Materials im Untersuchungsgebiet Meißen Triebischtal.

11 Anhang II

Der Anhang II liegt in elektronischer Form auf CD-ROM bei.

RAINMAN Key Facts

Project duration:	07.2017 – 06.2020
Project budget:	3,045,287 €
ERDF funding:	2,488,510 €
RAINMAN website & newsletter registration:	**www.interreg-central.eu/rainman**

Lead Partner

LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE | Freistaat SACHSEN

Saxon State Office for Environment, Agriculture and Geology

rainman.lfulg@smul.sachsen.de

Project Partner

Saxon State Ministry of the Interior | STAATSMINISTERIUM DES INNERN | Freistaat SACHSEN

Environment Agency Austria | umweltbundesamt

Office of the Styrian Government | Das Land Steiermark → Wasserwirtschaft

T. G. Masaryk Water Research Institute, p.r.i | VÚV TGM

Region of South Bohemia | The Region of South Bohemia

Croatian Waters | HRVATSKE VODE

Middle Tisza District Water Directorate

Institute of Meteorology and Water Management National Research Institute | IMGW

Leibniz Institute of Ecological Urban and Regional Development | Leibniz Institute of Ecological Urban and Regional Development

Project support

INFRASTRUKTUR & UMWELT Professor Böhm und Partner

INFRASTRUKTUR & UMWELT
Professor Böhm und Partner

RAINMAN@iu-info.de