**Professur für Hydrologie**
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Gilles Lavandier

# Validierung des Modells RoGeR für Starkregenereignisse in Luxemburg mit realen Einsatzdaten

**Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler**

**Freiburg i. Br., März 2019**

**Professur für Hydrologie**
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Gilles Lavandier

# Validierung des Modells RoGeR für Starkregenereignisse in Luxemburg mit realen Einsatzdaten

**Referent: Prof. Dr. Markus Weiler**
**Korreferent: Dr. Michael Stölzle**

**Masterarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler**
**Freiburg i. Br., März 2019**

**Inhalt**


| | | |
|---|---|---|
| **Vorwort** | | **V** |
| **Abbildungen im Text** | | **VII** |
| **Tabellen im Text** | | **XI** |
| **Abbildungen im Anhang** | | **XIII** |
| **Tabellen im Anhang** | | **XIII** |
| **Zusammenfassung** | | **XV** |
| **1** | **Einleitung** | **1** |
| 1.1 | Stand der Forschung | 5 |
| 1.1.1 | Abflussbildungsprozesse | 5 |
| 1.1.2 | Abflusskonzentration | 10 |
| 1.1.3 | Modellierung von Sturzfluten | 10 |
| 1.2 | Sturzfluten in Luxemburg | 15 |
| 1.2.1 | Sturzflut des 22. Juli 2016 | 15 |
| 1.2.2 | Sturzfluten des 1. und 9. Juni 2018 | 16 |
| **2** | **Problemstellung und Zielsetzung** | **19** |
| **3** | **Methoden und Vorgehensweise** | **23** |
| 3.1 | Genutzte Software | 23 |
| 3.2 | Niederschlags-Abflussmodell RoGeR | 23 |
| 3.3 | Datenaufbereitung und Parametrisierung des Modells | 27 |
| 3.3.1 | Allgemeine Datenaufbereitung | 29 |
| 3.3.2 | Parametrisierung der Teilprozesse der Abflussbildung | 31 |
| 3.3.3 | Niederschlag | 44 |
| 3.4 | Visualisierung des Oberflächenabflusses und hydraulische Modellierung | 46 |
| 3.5 | Rekonstruktion der Überschwemmungen | 47 |
| **4** | **Beschreibung der Einzugsgebiete** | **51** |
| 4.1 | Schrondweilerbach | 52 |
| 4.2 | Merscher Straße | 56 |
| 4.3 | Scheerbach | 57 |

**5 Beschreibung der Niederschlagsereignisse 61**
5.1 Starkregenereignis des 22. Juli 2016 61
5.2 Starkregenereignis des 1. Juni 2018 65
5.3 Starkregenereignis des 9. Juni 2018 68

**6 Ergebnisse 73**
6.1 Modellierung des Starkregenereignisses am 22. Juli 2016 74
6.1.1 Schrondweilerbach 74
6.1.2 Merscher Straße 84
6.1.3 Scheerbach 90
6.2 Modellierung des Starkregenereignisses am 1. Juni 2018 103
6.2.1 Schrondweilerbach 104
6.2.2 Merscher Straße 107
6.2.3 Scheerbach 111
6.3 Modellierung des Starkregenereignisses am 9. Juni 2018 116
6.3.1 Schrondweilerbach 117
6.3.2 Merscher Straße 118
6.3.3 Scheerbach 119

**7 Diskussion 123**
7.1 Diskussion der Parametrisierung 123
7.2 Diskussion der Referenzdaten 126
7.3 Diskussion der Ergebnisse mit RoGeR 127
7.4 Diskussion der Ergebnisse mit RoGeR Flow 129
7.5 Diskussion der Ergebnisse mit RoGeR dynamo 129

**8 Fazit 133**

**Literatur 135**
**Anhang 143**
**Ehrenwörtliche Erklärung 151**

## Vorwort

Als langjähriges Mitglied der Feuerwehr kam ich zweimal direkt mit Sturzfluten in Kontakt, war tagelang im Einsatz und kartierte anschließend die Schäden aus eigenem Interesse, da mir bewusst war, dass derartige Ereignisse eher Seltenheitswert haben. Nachdem Herr Markus Weiler einen spannenden Vortrag zu Sturzfluten im Modul „Natural Hazards and Risk Management“ während des Studiums der Umweltwissenschaften gehalten hatte, war mir schnell klar, dass ich in diesem Bereich meine Masterarbeit schreiben wollen würde. Herr Weiler bot mir an, das Modell RoGeR auf die erlebten Ereignisse anzuwenden, und so entschloss ich mich schnell, mich dieser Thematik anzunehmen.

Erschwerend kam allerdings hinzu, dass ich zwischenzeitlich beim Corps grand-ducal d’incendie et de secours, kurz CGDIS, dem großherzoglichen Feuerwehr- und Rettungskorps in Luxemburg als Verantwortlicher der Kartographie und Datenanalyse angestellt wurde, so dass ich die Masterarbeit neben einem Vollzeitjob schreiben musste.

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, Colonel Raymond Guidat, Direktor der Einsatzstrategie, dafür zu danken, dass er mich stets flexibel freistellte, um an Urlaubstagen wieder an der Masterarbeit schreiben zu können.

Besonderen Dank gebührt Herrn Andreas Steinbrich und Herrn Hannes Leistert, den Entwicklern von RoGeR, die mir eine Vielzahl von Fragen zum Modell beantworteten, mich bei der Datenaufbereitung und anschließenden Fehlersuche unterstützten und so dazu beitrugen, dass das Modell lauffähig wurde.

Folgenden Personen sei für die Bereitstellung von Daten und fachliche Unterstützung gedankt, denn ohne deren Hilfe wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen:

- Frau Simone Marx und Herrn Frank Flammang des bodenkundlichen Dienstes der Landwirtschaftsverwaltung
- Herrn Robert Colbach des geologischen Dienstes der Straßenbauverwaltung
- Herrn Claude Meisch der Abteilung der Hydrologie des Wasserwirtschaftsamts
- Lieutenant-Colonel Christopher Schuh und Herrn Bartosz Chylinski des CGDIS.

Abschließend möchte ich meinen Eltern, Sylvie und Pierre Lavandier, dafür danken, dass sie die Arbeit Korrektur gelesen haben und mich stets auf meinem bisherigen Weg unterstützt haben.

Gilles Lavandier

Freiburg, den 24. März 2019

## Abbildungen im Text


Abb. 1-1: Naturkatastrophen in Europa zwischen 1980 und 2017 („NatCatSERVICE - Katastrophen 1980-2017“, 2018) 3

Abb. 1.1.1-1: Ursachen für die Entstehung von Horton’schem Oberflächenabfluss (aus Scherrer *et al*., 2006, S. 918) 6

Abb. 1.1.1-2: Ursachen für die Entstehung von Sättigungsflächenabfluss (aus Scherrer *et al*., 2006, S. 918) 7

Abb. 1.1.1-3: Entstehung von Zwischenabfluss (aus Scherrer *et al*., 2006, S. 918) 8

Abb. 1.1.1-4: Entstehung von Tiefenperkolation (aus Scherrer *et al*., 2006, S. 918) 9

Abb. 3.2-1: Abflussbildungs- und Infiltrationsprozesse in RoGeR (aus Steinbrich *et al*., 2016, S. 3) 24

Abb. 3.3.2-1: Dreiecksdiagramm der Feinbodenarten nach der KA5 (aus Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005, S. 142) 33

Abb. 3.3.3-1: Lage der Wetterstationen um die Einzugsgebiete 44

Abb. 3.5-1: Berechnung der Wassertiefe 48

Abb. 4-1: Lage der Einzugsgebiete 51

Abb. 4.1-1: Geländehöhe und Gefälle des Einzugsgebiets Schrondweilerbach 52

Abb. 4.1-2: Landnutzung und Versiegelungsgrad im Einzugsgebiet Schrondweilerbach 53

Abb. 4.1-3: Geologie und Pedologie des Einzugsgebiets Schrondweilerbach 54

Abb. 4.2-1: Geländehöhe und Gefälle des Einzugsgebiets Merscher Straße 56

Abb. 4.2-2: Landnutzung und Versiegelungsgrad im Einzugsgebiet Merscher Straße 56

Abb. 4.2-3: Geologie und Pedologie des Einzugsgebiets Merscher Straße 57

Abb. 4.3-1: Geländehöhe und Gefälle des Einzugsgebiets Scheerbach 57

Abb. 4.3-2: Landnutzung und Versiegelungsgrad im Einzugsgebiet Scheerbach 58

Abb. 4.3-3: Geologie und Pedologie des Einzugsgebiets Scheerbach 59

Abb. 5.1-1: Entwicklung des Starkniederschlagsereignisses des 22. Juli 2016 mit Niederschlagsintensitäten [mm/h] um 19:00 (a), 19:30 (b), 20:00 (c), 20:20 (d), 20:30 (e) und 21:30 (f) („Kachelmannwetter 22.07.16“, 2019) 62

Abb. 5.1-2: Stündliche Niederschlagssummen an den Wetterstationen um die Einzugsgebiete am 22.07.16 63

Abb. 5.1-3: Niederschlagssummen (10 min) und kumulierter Niederschlag an der Referenzstation am 22.07.16 63

Abb. 5.1-4: Radarbild der Niederschlagssumme am 22.07.16 64

Abb. 5.2-1: Entwicklung des Starkniederschlagsereignisses des 1. Juni 2018 mit Niederschlagsintensitäten [mm/h] um 01:00 (a), 01:30 (b), 01:45 (c), 02:00 (d), 02:30 (e) und 03:00 (f) („Kachelmannwetter 01.06.18“, 2019) 66

Abb. 5.2-2: Stündliche Niederschlagssummen an den Wetterstationen um die Einzugsgebiete am 01.06.18 66
Abb. 5.2-3: Niederschlagssummen (10 min) und kumulierter Niederschlag an der Referenzstation am 01.06.18 67
Abb. 5.2-4: Radarbild der Niederschlagssumme am 01.06.18 67
Abb. 5.3-1: Entwicklung des Starkniederschlagsereignisses des 9. Juni 2018 mit Niederschlagsintensitäten [mm/h] um 18:30 (a), 19:00 (b), 19:30 (c), 20:00 (d), 20:30 (e) und 21:00 (f) („Kachelmannwetter 09.06.18“, 2019) 69
Abb. 5.3-2: Stündliche Niederschlagssummen an den Wetterstationen um die Einzugsgebiete am 09.06.18 70
Abb. 5.3-3: Niederschlagssummen (10 min) und kumulierter Niederschlag an der Referenzstation am 09.06.18 70
Abb. 5.3-4: Radarbild der Niederschlagssumme am 09.06.18 71

Abb. 6.1.1-1: Oberflächenabflussganglinie des Schrondweilerbachs am Auslass in Cruchten am 22.07.16 74
Abb. 6.1.1-2: Landesweit angefallene technische Einsätze je Stunde am 22.07.16 75
Abb. 6.1.1-3: Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses des Schrondweilerbachs am Auslass in Cruchten am 22.07.16 76
Abb. 6.1.1-4: Rekonstruktion des Querschnittsprofils der Wassersäule: oben Referenzbild mit Geschwemmsellinie und Blick Richtung Westen, aufgenommen am Schnittpunkt der blauen Linien am 26.07.16; unten links das Querschnittsprofil abgeleitet aus dem DGM; unten rechts Position des Querschnittsprofils und der kartierten Überschwemmungsfläche des Schrondweilerbachs am 22.07.16 78
Abb. 6.1.1-5: Vergleich des modellierten Spitzenabflusses mit dem mit der GMS-Formel berechneten Spitzenabfluss für das Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 22.07.16 78
Abb. 6.1.1-6: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 22.07.16 79
Abb. 6.1.1-7: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 22.07.16 81
Abb. 6.1.1-8: Fotos der Überschwemmungen im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 22.07.16 82
Abb. 6.1.2-1: Oberflächenabflussganglinie der Merscher Straße am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 22.07.16 84
Abb. 6.1.2-2: Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses in der Merscher Straße am Auslass in Larochette am 22.07.16 85
Abb. 6.1.2-3: Vergleich des modellierten Spitzenabflusses mit dem mit der GMS-Formel berechneten Spitzenabfluss für das Einzugsgebiet der Merscher Straße am 22.07.16 86

Abb. 6.1.2-4: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 22.07.16 87
Abb. 6.1.2-5: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 22.07.16 89
Abb. 6.1.2-6: Nicht abgebildeter bedeutsamer Fließweg in der Merscher Straße am 22.07.16 90
Abb. 6.1.3-1: Oberflächenabflussganglinie des Scheerbachs am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 22.07.16 90
Abb. 6.1.3-2: Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses des Scheerbachs am Auslass in Larochette am 22.07.16 91
Abb. 6.1.3-3: Vergleich des modellierten Spitzenabflusses mit dem mit der GMS-Formel berechneten Spitzenabfluss für das Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16 (links), Foto der Überschwemmungen in der Rue Scheerbach (rechts) 92
Abb. 6.1.3-4: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16 93
Abb. 6.1.3-5: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16 94
Abb. 6.1.3-6: Oberflächenabflussganglinie des RoGeR Flow-Modells am Auslass des Scheerbachs in der Ortsmitte am 22.07.16 95
Abb. 6.1.3-7: Mit RoGeR Flow modellierte maximale Wassertiefen im Laufe der Sturzflut im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16 96
Abb. 6.1.3-8: Oberflächenabflussganglinie des RoGeR dynamo-Modells am Auslass des Scheerbachs in der Ortsmitte am 22.07.16 98
Abb. 6.1.3-9: Ganglinie der mit RoGeR dynamo modellierten Wassertiefe an 3 Punkten im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16 98
Abb. 6.1.3-10: Von RoGeR dynamo automatisch generierte Abbildungen der Wassertiefen zu einzelnen Zeitschritten am 22.07.16 99
Abb. 6.1.3-11: Mit RoGeR dynamo modellierte maximale Wassertiefen im Laufe der Sturzflut im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16 100
Abb. 6.1.3-12: Querschnitt durch das DGM und die mit RoGeR dynamo modellierte Wassertiefe am Referenzpunkt in der Scheerbachstraße am 22.07.16 101
Abb. 6.1.3-13: Sensitivitätsanalyse des mit RoGeR dynamo modellierten Oberflächenabflusses am Auslass des Scheerbachs in der Ortsmitte am 22.07.16 102
Abb. 6.2.1-1: Oberflächenabflussganglinie des Schrondweilerbachs am Auslass in Cruchten am 01.06.18 104
Abb. 6.2.1-2: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 01.06.18 105
Abb. 6.2.1-3: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 01.06.18 106
Abb. 6.2.2-1: Oberflächenabflussganglinie der Merscher Straße am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 01.06.18 107

Abb. 6.2.2-2: Landesweit angefallene technische Einsätze je Stunde am 01.06.18 108
Abb. 6.2.2-3: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 01.06.18 109
Abb. 6.2.2-4: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 01.06.18 110
Abb. 6.2.3-1: Oberflächenabflussganglinie des Scheerbachs am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 01.06.18 111
Abb. 6.2.3-2: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 01.06.18 112
Abb. 6.2.3-3: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 01.06.18 113
Abb. 6.2.3-4: Oberflächenabflussganglinie des RoGeR dynamo-Modells am Auslass des Scheerbachs in der Ortsmitte am 01.06.18 114
Abb. 6.2.3-5: Mit RoGeR dynamo modellierte maximale Wassertiefen im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 01.06.18 115
Abb. 6.2.3-6: Querschnitt durch die mit RoGeR dynamo modellierte Wassertiefe am Referenzpunkt in der Scheerbachstraße am 01.06.18 116
Abb. 6.3.1-1: Oberflächenabflussganglinie des Schrondweilerbachs am Auslass in Cruchten am 09.06.18 117
Abb. 6.3.1-2: Landesweit angefallene technische Einsätze je Stunde am 09.06.18 117
Abb. 6.3.2-1: Oberflächenabflussganglinie der Merscher Straße am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 09.06.18 118
Abb. 6.3.3-1: Oberflächenabflussganglinie des Scheerbachs am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 09.06.18 119
Abb. 6.3.3-2: Oberflächenabflussganglinie des RoGeR dynamo-Modells am Auslass des Scheerbachs in der Ortsmitte am 09.06.18 120
Abb. 6.3.3-3: Reinfiltration des Oberflächenabflusses im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 09.06.18 120
Abb. 6.3.3-4: Querschnitt durch die mit RoGeR dynamo modellierte Wassertiefe am Referenzpunkt in der Scheerbachstraße am 09.06.18 121
Abb. 6.3.3-5: Mit RoGeR dynamo modellierte maximale Wassertiefen im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 09.06.18 122
Abb. 7.5-1: Mit RoGeR dynamo modellierte klassifizierte maximale Wassertiefen im Laufe der Sturzflut im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16 131

## Tabellen im Text


Tab. 3.3-1: Modellparameter je Rasterzelle (nach Steinbrich *et al*., 2016, S. 7) 27

Tab. 3.3-2: Datensätze zur Parametrisierung von RoGeR 27

Tab. 3.3.2-1: Makroporenausstattung nach Landnutzungsklasse (nach Steinbrich *et al*., 2016, S. 5) 36

Tab. 3.3.2-2: Kennwerte zur Berechnung der Trockenrisstiefe (nach Steinbrich, 2018) 38

Tab. 3.3.2-3: Durchlässigkeitsbeiwerte (Kf) für Lockergesteine (nach Hölting, 1992, S. 104) 40

Tab. 3.3.2-4: Durchlässigkeitsbeiwerte (Kf) für Gesteine (nach Appel & Habler, 2002, S. 61) 40

Tab. 3.3.2-5: Rauigkeitsbeiwerte nach Strickler je Landnutzungsklasse (nach Steinbrich *et al*., 2016, S. 5) 43

Tab. 5.1-1: Charakteristika der Niederschläge je Einzugsgebiet am 22.07.16 64

Tab. 5.2-1: Charakteristika der Niederschläge je Einzugsgebiet am 01.06.18 68

Tab. 5.3-1: Charakteristika der Niederschläge je Einzugsgebiet am 09.06.18 71

Tab. 6-1: Durchgeführte Analysen 73

Tab. 6.1.1-1: Kennwerte der Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses des Schrondweilerbachs am Auslass in Cruchten am 22.07.16 77

Tab. 6.1.2-1: Kennwerte der Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses in der Merscher Straße am Auslass in Larochette am 22.07.16 85

Tab. 6.1.3-1: Kennwerte der Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses des Scheerbachs am Auslass in Larochette am 22.07.16 92

Tab. 6.1.3-2: Kennwerte der Sensitivitätsanalyse des dynamischen Modells im Einzugsgebiet des Scheerbachs am Auslass in Larochette am 22.07.16 102

## Abbildungen im Anhang


Abb. Ah-1.2.1-1: Überschwemmungen, Schäden und unpassierbare Straßen in der Gemeinde Nommern (aus dem Abschlussbericht des 02.08.16 der Freiwilligen Feuerwehr Nommern) 143

Abb. Ah-6.1.1-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 22.07.16 144

Abb. Ah-6.1.2-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 22.07.16 144

Abb. Ah-6.1.3-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16 144

Abb. Ah-6.2.1-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 01.06.18 145

Abb. Ah-6.2.2-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 01.06.18 145

Abb. Ah-6.2.3-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 01.06.18 145

Abb. Ah-6.3.1-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 09.06.18 146

Abb. Ah-6.3.2-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 09.06.18 146

Abb. Ah-6.3.3-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 09.06.18 146


## Tabellen im Anhang


Tab. Ah-1: Verwendete Begriffe mit deren Abkürzungen, Symbolen und Einheiten 147

## Zusammenfassung

Sturzfluten entstehen infolge von konvektiven Starkregenereignissen und können Bäche, ebenso wie Straßen innerhalb von Minuten in reißende Ströme verwandeln. Dabei gehen sie oftmals mit extremen Schäden einher. Bei Starkregenereignissen werden die Abflusskomponenten Oberflächenabfluss, Sättigungsflächenabfluss, Zwischenabfluss und Tiefenperkolation in unterschiedlichem Maße aktiviert. Dabei gehen Sturzfluten stets aus einem komplexen Zusammenspiel vieler Faktoren hervor, die sich gegenseitig abmildern oder potenzieren können. Einige Modelle wurden bereits entwickelt, um Sturzfluten zu modellieren. Viele gehen aber mit starken Vereinfachungen einher und berücksichtigen nicht alle Abflusskomponenten. Zudem fehlen häufig Referenzdaten anhand derer Modelle validiert werden können, da Sturzfluten oftmals kleine, steile Einzugsgebiete betreffen, die nicht hydrometrisch überwacht werden. Das an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg entwickelte Niederschlags-Abflussmodell RoGeR (Runoff Generation Research Model) wird in dieser Arbeit auf drei Einzugsgebiete in Luxemburg angewandt. Das unkalibrierte Modell bildet sämtliche Abflussbildungsprozesse räumlich verteilt ab und kann skalenunabhängig genutzt werden. Geodaten der Topographie, Landnutzung, Geologie und insbesondere Pedologie werden genutzt, um das Modell zu parametrisieren. Niederschlagsradarbilder werden mit Hilfe von Niederschlagsmessungen an Bodenstationen angeeicht und als Modellinput genutzt. Einsatzdaten der Feuerwehr, Kartierungen der Überschwemmungsflächen und Rekonstruktionen der Pegel anhand von Bildern dienen als Referenz für die Modellierungen. Dabei interessiert die Modellierung der Ganglinien weniger, aus Mangel an vergleichbaren Messdaten, als vielmehr die räumliche Ausprägung der Fließpfade und Deckung dieser mit den Schadensmeldungen. Zwei bislang unerprobte Varianten des Modells, nämlich RoGeR Flow und RoGeR dynamo werden auf drei Niederschlagsereignisse angewandt. Insbesondere RoGeR dynamo ist in der Lage, beobachtete Wassertiefen gut zu modellieren, da es das NA-Modell RoGeR um ein 2D-hydraulisches Routing des Oberflächenabflusses ergänzt und dabei sowohl wasserstandsabhängig die Fließgeschwindigkeiten anpasst als auch Reinfiltration von Oberflächenabfluss erlaubt.

Stichwörter: Sturzflut, Starkregen, Niederschlags-Abflussmodellierung, 2D-hydraulische Modellierung, Abflussbildungsprozesse, RoGeR, RoGeR Flow, RoGeR dynamo

# 1 Einleitung

In den letzten Jahren haben Sturzfluten, also Überschwemmungen infolge von Starkregenereignissen, in Europa katastrophale Schäden verursacht und sind daher in den Fokus von Medien und Wissenschaft geraten.
Die Vereinten Nationen definieren Katastrophen als eine schwerwiegende Unterbrechung der Funktionen einer Gesellschaft, verbunden mit hohen menschlichen, materiellen, ökonomischen oder ökologischen Verlusten. Das Ausmaß übersteigt dabei die Selbsthilfefähigkeit der betroffenen Gesellschaft („UNISDR“, 2007).
Ein (Natur)Ereignis wird daher nur zur Katastrophe, wenn der Mensch in negativer Weise hiervon betroffen ist. Max Frisch brachte diesen Umstand mit folgender Aussage auf den Punkt: „Katastrophen kennt allein der Mensch, wenn er sie überlebt. Die Natur kennt keine Katastrophen“ (Jachs, 2011, S. 20).

Die Münchener Rückversicherung dokumentiert seit 1974 weltweit Naturkatastrophen in einer umfangreichen Datenbank. Unterteilt werden Naturgefahren in vier Kategorien:

- geophysikalische Ereignisse (Erdbeben, Vulkanausbrüche, Tsunamis, trockene Massenbewegungen),
- meteorologische Ereignisse (tropische Stürme, außertropische Zyklone, konvektive Stürme),
- hydrologische Ereignisse (Überschwemmungen, Massenbewegungen, nasse Massenbewegungen),
- klimatologische Ereignisse (Waldbrände, Extremtemperaturen, Dürren)

(*NatCatSERVICE - Naturkatastrophen-Knowhow für Risikomanagement und Forschung*, 2011, S. 1, 4).

Überschwemmungen wiederum können nach ihrer Ursache eingeteilt werden. Meerwasser kann als Sturm- oder Springflut zu Hochwasser führen. Auch Grundwasser kann unter spezifischen hydrologischen und morphologischen Voraussetzungen zu Überschwemmungen führen. Technische Infrastrukturen wie Staudämme, Kanäle und Deiche können brechen und beträchtliche Schäden verursachen. Fluviatile Überschwemmungen entlang von Flüssen sind auf einen Anstieg des Pegels infolge langanhaltender Regenfälle, starker Schneeschmelzen oder sogenannter „Rain on Snow“-Events zurückzuführen. Der Fokus dieser Arbeit wird allerdings auf den pluviatilen Hochwassern liegen, die durch Starkregenfälle ausgelöst werden (Kron, 2008).

Starkregenereignisse ergeben sich aus dem konvektiven Aufstieg von Luftmassen, was mit dem Abkühlen dieser verbunden ist. Dabei kondensiert der gasförmige Wasserdampf zu Wassertropfen, die dann niederschlagen. Konvektive Gewitterzellen führen zu regional begrenzten Niederschlägen mit teils sehr hohen Intensitäten, die ausschlaggebend sind für Sturzfluten.
Niederschläge können nach ihrer Intensität, der Dauerstufe, also der Zeitspanne vom Anfang bis zum Ende eines Niederschlagsereignisses, und ihrer Wiederkehrzeit charakterisiert werden. Der Deutsche Wetterdienst gibt Warnungen bei Starkregen in zwei Stufen heraus, ab denen mit Schäden zu rechnen ist:

- Regenmengen 15 bis 25 l/m² in 1 Stunde oder 20 bis 35 l/m² in 6 Stunden (Markante Wetterwarnung)
- Regenmengen > 25 l/m² in 1 Stunde oder > 35 l/m² in 6 Stunden (Unwetterwarnung)

(„Wetterlexikon - Starkregen“, o. J.).

Sturzfluten sind räumlich und zeitlich stark begrenzte Überschwemmungen aufgrund von zumeist kurzzeitigen Starkregenereignissen. Gekennzeichnet sind Sturzfluten durch einen plötzlichen, starken Anstieg der Wasserstände, der innerhalb weniger Minuten selbst kleinste Bäche zu reißenden Strömen anschwellen lässt. Bemerkenswert ist, dass Sturzfluten, entgegen fluviatilen Hochwassern nicht nur entlang von Fließgewässern auftreten, sondern überall vorkommen können. In der Ebene kann das Regenwasser nicht abfließen und führt zu Überschwemmungen. Es sammelt sich in Senken, Kellern und Tiefgaragen und fließt dort nur langsam wieder ab. In kleinen, steilen Einzugsgebieten bildet sich eine plötzliche Hochwasserwelle, die durch die hohen Fließgeschwindigkeiten äußerst energiereich ist. Die schnelle Konzentration in den Vorflutern ist bedingt durch das rasche oberflächliche Abfließen des Wassers. Maßgebliche Ursache ist die Übersteigung der Infiltrationsrate des Bodens durch die Niederschlagsintensität. Die Wassersättigung des Bodens spielt meist eine untergeordnete Rolle. Neben den enormen Wassermengen führen die starke Sedimentfracht, mitgerissene Bäume, Autos und sonstiges Treibgut in Siedlungen zu erheblichen Schäden (Patt & Jüpner, 2013, S. 562).

Das NatCatSERVICE-Tool der Münchener Rückversicherung erlaubt es, deren Katastrophendatenbank zu durchsuchen und diverse Statistiken zu Schadensereignissen weltweit zu extrahieren. Auf der Abbildung 1-1 sind die zwischen 1980 und 2017 in Europa erfassten Naturkatastrophen nach ihrer Häufigkeit, der Anzahl der Toten, der entstandenen Schäden und den versicherten Schäden aufgeschlüsselt.

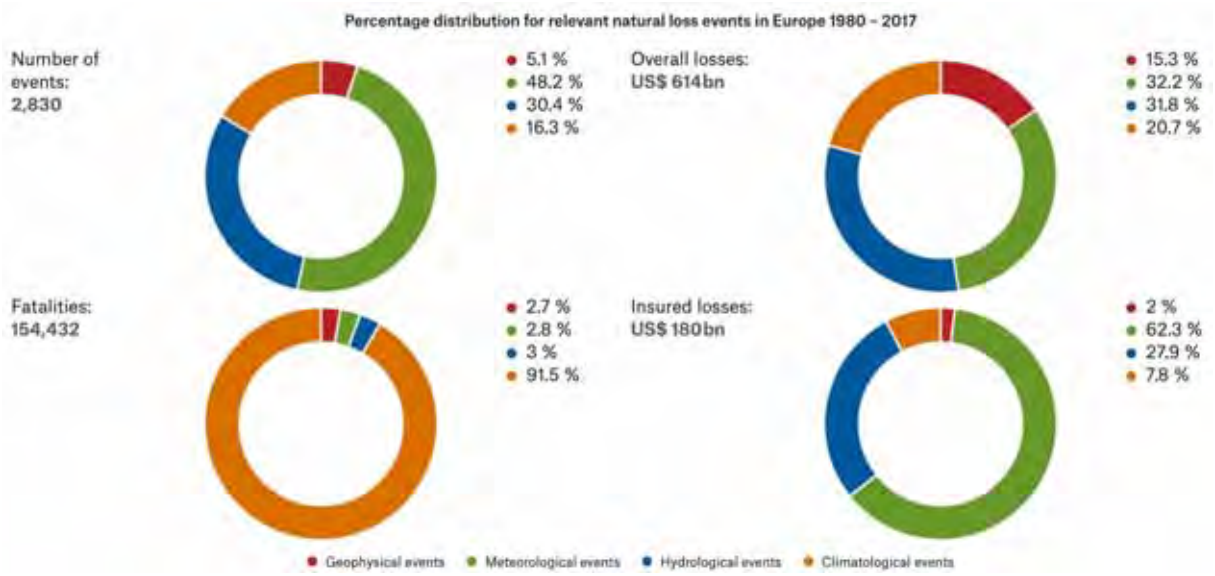



Abb. 1-1: Naturkatastrophen in Europa zwischen 1980 und 2017 („NatCatSERVICE - Katastrophen 1980-2017“, 2018)

Bezogen auf diese Zeitspanne stellten hydrologische Ereignisse 30,4 % der Naturkatastrophen in Europa dar. Trotz geringer Opferzahlen (3 % der bei Naturkatastrophen Getöteten), sind die finanziellen Schäden enorm. 31,8 % der Schäden durch Naturkatastrophen entstehen infolge von Überschwemmungen. Dies entspricht Schäden in Höhe von 195 Mrd. $ oder 172 Mrd. €. Versichert waren hingegen nur Schäden in Höhe von 50 Mrd. $ oder 44 Mrd. €. Somit wurde nur ein Viertel der Schäden durch Hochwasser und Überschwemmungen durch Versicherungen gedeckt, was diese Art der Schäden zu einer besonderen finanziellen Belastung für die Betroffenen macht.
Zum Vergleich, Sturmschäden beliefen sich auf eine Summe von 198 Mrd. $, wovon mehr als die Hälfte (112 Mrd. $) durch Versicherungen gedeckt wurde („NatCatSERVICE - Katastrophen 1980-2017“, 2018).

2016 entstanden in Deutschland Sachschäden in Höhe von 800 Mio. €, wovon ein Großteil auf Sturzfluten zurückzuführen war (Burghoff *et al.*, 2017, S. 30). Auch 2017 verursachten Unwetter versicherte Sachschäden in Höhe von 300 Mio. €. 60 Mio. € sind direkt auf Starkregen zurückzuführen, der Rest auf Sturm und Hagel. Hinzu kommen Schäden an Wohngebäuden in Höhe von 453 Mio. € (Burghoff *et al.*, 2018, S. 31).

Sturzfluten stellen somit eine bedeutende Gefahr für die Gesellschaft dar. Entsprechend gibt es im Bereich der Forschung, aber auch im Bevölkerungsschutz erhebliches Interesse daran, die Entstehung solcher Ereignisse besser zu verstehen und nach Möglichkeit aus Simulationen präventive und vorbereitende Maßnahmen abzuleiten.

Im Rahmen der Katastrophenprävention oder -vermeidung gilt es in einer Risikoanalyse besonders gefährdete Gebiete zu identifizieren, die Anzahl potentiell Betroffener zu ermitteln und mögliche Schäden abzuschätzen, so dass sich vorbeugende bauliche Maßnahmen, wie der Bau von Dämmen oder Wildbachverbauungen, und organisatorische Maßnahmen, wie Gefahrenzonenpläne mit Bauverboten, daraus ableiten lassen (Jachs, 2011, S. 132-136).
Da sich nicht sämtliche Risiken ausreichend reduzieren lassen, müssen Vorsorgemaßnahmen getroffen werden, um im Schadensfall bestmöglich auf diesen reagieren zu können. Insbesondere Frühwarnsysteme und geeignete Ausrüstung der Katastrophenhilfsdienste fallen unter den Bereich der Vorsorge (Jachs, 2011, S. 150 f.). Für die Rettungskräfte ist es auch wichtig zu wissen, wie sie überhaupt in das Katastrophengebiet kommen können, denn bei Sturzfluten können selbst Straßen sich in reißende Bäche verwandeln und Gebiete so von der Außenwelt abschneiden. Die Kenntnis über voraussichtlich befahrbare Straßen hilft dabei, schnell und sicher in das betroffene Gebiet zu kommen.

Sturzfluten gelten allerdings bis heute als sehr schwierig zu modellieren, da eine Vielzahl an Faktoren berücksichtigt werden müssen, um aussagekräftige Resultate zu erlangen (Braud *et al*., 2016, S. 2; Hapuarachchi *et al*., 2011, S. 2780; Steinbrich *et al*., 2015, S. 1).
Der Autor erlebte als Mitglied der Freiwilligen Feuerwehr zwei Sturzfluten in Luxemburg unmittelbar mit und dokumentierte die Schäden. Ziel dieser Arbeit soll es sein, das an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg entwickelte Niederschlags-Abflussmodell RoGeR (Runoff Generation Research Model) auf diese Ereignisse in drei Einzugsgebieten anzuwenden, um zu prüfen, inwiefern dieses vielversprechende Modell in der Lage ist, die dortigen Gegebenheiten zu replizieren. Ein drittes Starkregenereignis, das ebenfalls zu Sturzfluten führte, nicht aber in den betrachteten Einzugsgebieten, soll als Nullprobe dienen. Das Modell sollte in diesem Fall keine bedeutsamen Überschwemmungen simulieren.

Zunächst wird der aktuelle Stand der Forschung im Bereich der Abflussbildung und Sturzflutmodellierung präsentiert. Anschließend sollen die drei betrachteten Starkregenereignisse mit den daraus entstandenen Sturzfluten beschrieben werden, um zu verdeutlichen, wie sich solch zerstörerische Ereignisse reell darstellen. Danach folgt die genaue Beschreibung der Problemstellung und Zielsetzungen dieser Arbeit. Im Kapitel der Methoden und Vorgehensweise wird das Modell RoGeR im Detail erklärt und die Datenaufbereitung sowie Parametrisierung des Modells erläutert. Nach der Vorstellung der Einzugsgebiete mit ihren Gebietseigenschaften und den Niederschlagsereignissen werden die Resultate der Modellierung vorgestellt. Nach der Diskussion der Ergebnisse werden Schlussfolgerungen gezogen.

## 1.1 Stand der Forschung

Nachdem die Bedeutung im Bevölkerungsschutz aber auch die ökonomische Bedeutung von Sturzfluten hervorgehoben wurde, soll nun das Interesse der Wissenschaft an diesem Thema und deren aktueller Forschungsstand dargestellt werden. Insbesondere auf die Möglichkeiten der Modellierung der Sturzfluten soll eingegangen werden, um im Voraus eine angemessene Vorbereitung auf zukünftige Ereignisse unterstützen zu können.

Die Hochwasserentstehung kann in vier Phasen unterteilt werden. Durch den Niederschlag werden Abflussbildungsprozesse in Gang gesetzt. Anschließend kommt es zur Abflusskonzentration, gefolgt von Wellenablauf (Patt & Jüpner, 2013, S. 20).

### 1.1.1 Abflussbildungsprozesse

Durch Niederschlagsereignisse werden Abflussbildungsprozesse ausgelöst, deren Kenntnis und Berücksichtigung im Rahmen der Modellierung ausschlaggebend ist, um bestmögliche Resultate zu erzielen. Unterschieden werden hauptsächlich vier konzeptuelle Vorstellungen der Abflussbildungsprozesse (Scherrer *et al*., 2006, S. 908):

- Horton'scher Oberflächenabfluss
- Sättigungsflächenabfluss
- Zwischenabfluss
- Tiefenperkolation.

Die einzelnen Abflusskomponenten laufen unterschiedlich schnell ab. Oberflächenabfluss als Horton'scher Oberflächenabfluss und Sättigungsflächenabfluss, sowie schnelle Komponenten des Zwischenabflusses tragen direkt zum Hochwasserabfluss bei und werden als Direktabfluss bezeichnet. Der Gebietsrückhalt ist der Anteil des Niederschlags, der verzögert das Grundwasser erreicht, oder von der Erd- und Vegetationsoberfläche wieder verdunstet. Er umfasst die langsamen Komponenten des Zwischenabflusses und die Tiefenperkolation, aber auch die Interzeption. Der Abflussbeiwert ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen Direktabflussvolumen und dem Niederschlagsvolumen. Bei vollständigem Rückhalt ergibt sich ein Abflussbeiwert von 0, bei vollständigem Abfluss ein Wert von 1. Die exakte Abschätzung der Abflussbildung und des Abflussbeiwerts sind zentraler, jedoch komplexester Bestandteil der Niederschlags-Abflussmodellierung (Patt & Jüpner, 2013, S. 29, 31).

**Horton'scher Oberflächenabfluss**

Horton stellte bereits 1933 (1933, S. 446 f.) fest, dass auf die Bodenoberfläche treffender Niederschlag in zwei verschiedene Komponenten aufgeteilt werden könne, die unterschiedliche Wege im hydrologischen Zyklus einschlagen. So fließt ein Teil des Niederschlags oberflächlich zu den Vorflutern ab und gelangt schließlich in das Meer. Der andere Teil versickert im Boden, gelangt in das Grundwasser und gelangt dann in die Flüsse, bzw. evaporiert. Übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität des Bodens, so entsteht ein Infiltrationsüberschuss, der als Oberflächenabfluss abfließt (Horton, 1933, S. 454). Da Robert Horton dieses Konzept als Erster beschrieb, wird die Abflusskomponente gemeinhin Horton'scher Oberflächenabfluss, kurz HOA genannt. Das oberflächlich ablaufende Wasser bildet Rinnsale, fließt entlang des Reliefs ab und füllt Mulden (Patt & Jüpner, 2013, S. 19).

Die Bildung von Oberflächenabfluss hängt maßgeblich von der Intensität der Niederschläge und den Bodeneigenschaften, wie Vorfeuchte und Tongehalt, der ersten paar Zentimeter ab. Auch spielen die Hangneigung und der Grad der Vegetationsbedeckung bei der Entstehung des HOA eine Rolle (Scherrer *et al*., 2006, S. 908, 915). Heterogene Gebietseigenschaften führen dazu, dass die Entstehung von HOA räumlich variiert (Dunne *et al*., 1975, S. 306). Scherrer *et al.* (2006, S. 918) unterscheiden hauptsächlich drei Ursachen bei der Entstehung von HOA.

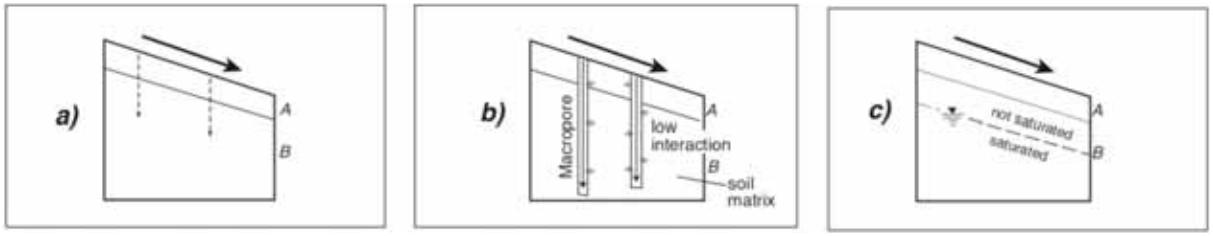



Abb. 1.1.1-1: Ursachen für die Entstehung von Horton'schem Oberflächenabfluss (aus Scherrer *et al*., 2006, S. 918)

Die Infiltration kann in makroporenarmen Böden zusätzlich durch einen schlecht drainierten A-Horizont oder oberen B-Horizont gehemmt sein. Ursachen hierfür können Versiegelungseffekte durch eine dichte Laubstreubedeckung des Bodens, eine Hydrophobizität des Humus durch organische Substanzen, oder ein hoher Benetzungswiderstand des Bodengefüges bei anhaltender Trockenheit, sowie Bodenverdichtung durch Weidetiere und Maschinen sein (a). Auch kann es trotz anfänglich starker Infiltration in Makroporen zur Bildung von HOA kommen, wenn die Bodenmatrix nur wenig Oberflächenwasser oder Wasser aus den Makroporen aufnimmt (b). Generell nur geringfügig permeable Böden fördern auch die Entstehung von HOA (c).

Bei wenig durchlässigen Böden und hohen Niederschlagsintensitäten infiltriert bereits kurz nach Niederschlagsbeginn kaum mehr Wasser; es bildet sich sogenannter absoluter HOA.

Verzögerter HOA bildet sich bei geringeren Niederschlagsintensitäten oder durchlässigeren Böden. Anfangs nehmen diese noch Niederschlag auf, doch mit zunehmender Bodenfeuchtigkeit sinkt die Infiltrationsrate, und es bildet sich zeitlich verzögerter Oberflächenabfluss. Temporärer HOA entsteht so lange, bis ein Infiltrationshemmnis, etwa der erhöhte Benetzungswiderstand der Bodenpartikel bei starker Austrocknung, überwunden ist (Scherrer, 1997, S. 27, 29).

**Sättigungsflächenabfluss**

Sättigungsflächenabfluss entsteht, wenn das gesamte Bodenprofil wassergesättigt ist. Fällt Niederschlag, kann dieser, unabhängig von der Intensität, nicht infiltrieren und läuft als Sättigungsflächenabfluss, kurz SFA, oberflächlich ab.

Eine zweite Form des Sättigungsflächenabflusses beschrieb Dunne (1975, S. 306) als *return flow*. Dabei tritt Zwischenabfluss nach einer kurzen Fließzeit aufgrund des in der Bodenmatrix hochanstehenden Wassers infolge von Wassersättigung wieder an die Oberfläche und fließt dort ab.

Gut durchlässige Böden, ein nah an der Oberfläche liegender Wasserspiegel, insbesondere in Gewässernähe, sowie das Fehlen lateraler Makroporen, die Hangwasser drainieren könnten, begünstigen die Entstehung von SFA (Scherrer, 1997, S. 117 f.).

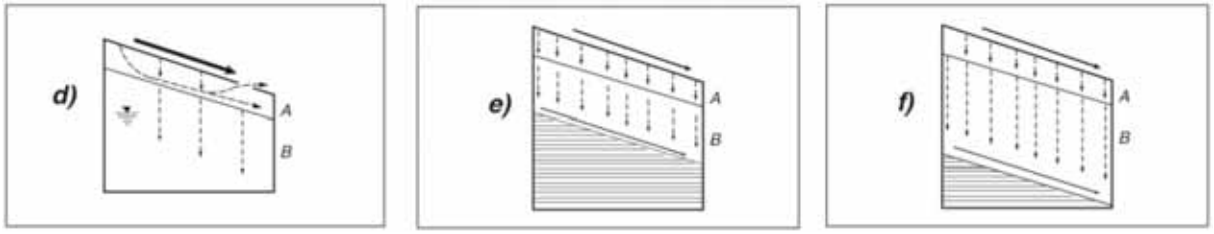



Abb. 1.1.1-2: Ursachen für die Entstehung von Sättigungsflächenabfluss (aus Scherrer *et al*., 2006, S. 918)

Auf flachen nahezu vollständig gesättigten Böden kommt es sehr schnell zur Bildung von Sättigungsflächenabfluss (d). Verzögerter SFA bildet sich auf flachen Böden mit hoher Infiltrationsrate. Das gesamte Porenvolumen ist in kurzer Zeit wassergesättigt und SFA entsteht (e). Bei langandauernden, advektiven Niederschlägen kann selbst das Porenvolumen tiefer, gut drainierter Böden vollständig aufgefüllt werden, so dass stark verzögerter SFA entstehen kann (f) (Scherrer *et al*., 2006, S. 918). Mit zunehmender Dauer der Niederschlagsereignisse wird die Entstehung von SFA gefördert, so dass dessen Bedeutung bei der Abflusskonzentration steigt (Dunne *et al*., 1975, S. 307).

**Zwischenabfluss**

Der Zwischenabfluss, kurz ZA, stellt die komplexeste Abflusskomponente dar und kann in mehrere Formen untergliedert werden. In der englischsprachigen Literatur gibt es eine Vielzahl von Begriffen für diese Abflusskomponente, wie *subsurface (storm)flow*, *subsurface runoff*, *lateral flow*, *interflow*, *transient water flow*, und *soil water flow*. Gemeint ist das laterale Fließen entlang des Gefälles in der Bodenmatrix, an der Grenzschicht zum Grundgestein, entlang von wenig durchlässigen Stauschichten und durch die Streuschicht (g). Insbesondere in humiden Gebieten mit steilem Relief und durchlässigen Böden stellt der Zwischenabfluss eine bedeutende Komponente bei der Abflussbildung dar (Weiler *et al.*, 2005, S. 1 f.).

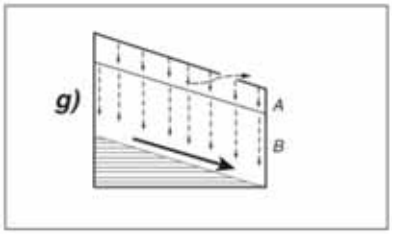



Abb. 1.1.1-3: Entstehung von Zwischenabfluss (aus Scherrer *et al.*, 2006, S. 918)

Niederschlagswasser, das in die Bodenmatrix eindringt, kann sich dort kapillar durch die Feinporen und Mesoporen bewegen, oder nichtkapillar die Makroporen durchfließen. Makroporen umfassen Wurzelröhren und Tiergänge, aber auch Schwundrisse infolge von Trockenheit.

Verzögerter langsamer Matrixfluss bezeichnet das Fließen in Mikro- und Mesoporen durch Kapillarspannung. Die Fließgeschwindigkeit hängt von der Durchlässigkeit des Bodens, die wiederum durch die Bodenart und Porosität beeinflusst ist, und der Bodenfeuchte ab. Bereits im Boden gespeichertes Wasser kann durch eine Veränderung des hydraulischen Gradienten infolge von zuströmendem lateralen Matrixfluss mit dem Vorfluter verbunden werden, wodurch es mobilisiert wird und am Abflussgeschehen beteiligt wird. Durchlässige Schichten über einer Stauschicht und das Vorhandensein präferentieller Fließwege, wie Makroporen und Bodenröhren, begünstigen diesen Prozess (Scherrer, 1997, S. 30; Weiler *et al.*, 2005, S. 4).

Präferentielles Fließen, auch schneller Zwischenabfluss oder Makroporenfluss genannt, erfolgt hangparallel oder vertikal nur durch Schwerkraft mit Fließgeschwindigkeiten bis 2 cm/s in Makroporen und Trockenrissen. Durchmesser und Kontinuität der Makroporen, sowie die Bodenfeuchtigkeit, die die Interaktion mit der umgebenden Matrix beeinflusst, und die Bodenbeschaffenheit bestimmen die Fließgeschwindigkeit. Makroporen entstehen durch Bioturbation, also Grabeaktivitäten von Bodenlebewesen wie Regenwürmern und Maulwürfen. Auch Wurzeln erzeugen Makroporen. Durch Erosion und Auswaschung können sie sich

aufweiten und zu größeren Netzwerken vereinen. Bei besonders langen, kontinuierlichen Makroporen spricht man von Bodenröhren. Hangparallele Makroporen können infiltrierendes Wasser sehr schnell zu den Vorflutern leiten. Diskontinuierliche Makroporen können durch infiltrierendes Wasser hydraulisch miteinander verbunden werden, so dass Makroporenfluss stattfinden kann (Scherrer, 1997, S. 30 f.; Weiler *et al*., 2005, S. 4 f.). Vertikale Makroporen wie Trockenrisse können infiltrierendes Wasser schnell in große Tiefen führen und umgehen dabei weitestgehend Perkolationsprozesse durch die Bodenmatrix (Scherrer *et al*., 2006, S. 918).

In der locker aufliegenden Streuschicht hangabwärts fließender oberflächennaher Abfluss, in der englischsprachigen Literatur *organic layer interflow* oder *biomat flow* genannt, stellt eine schnelle Zwischenabflusskomponente dar (Sidle *et al*., 2007, S. 3239). Insbesondere in Waldgebieten kann diese Abflusskomponente entscheidend bei der Abflussbildung während konvektiver Niederschlagsereignisse sein (Weiler & Mcdonnell, 2004, S. 5).

**Tiefenperkolation**

Tiefenperkolation, kurz TP, bezeichnet das Versickern von Wasser im Grundgestein, nachdem es das Bodengefüge durchsickert hat (h). Diese Abflusskomponente entsteht in gut drainierten Böden, ohne Stauschichten in der Bodenmatrix, die das Wasser bereits als Zwischenabfluss abfließen lassen könnten, und wenn das Grundgestein ausreichend porös oder von Rissen durchzogen ist, so dass auch an der Grenzschicht zum Boden keine Aufstauung des infiltrierenden Wassers stattfindet (Scherrer, 1997, S. 31).

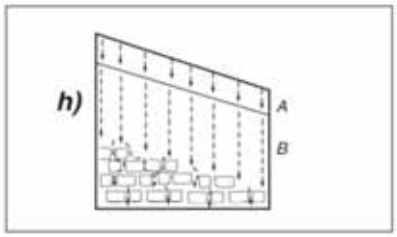



Abb. 1.1.1-4: Entstehung von Tiefenperkolation (aus Scherrer *et al*., 2006, S. 918)

Tiefenperkolation führt dazu, dass infiltrierendes Wasser aus der Matrix oder aus präferentiellen Fließwegen dem Grundwasser zugeführt wird oder in tieferen Schichten zwischengespeichert wird (Scherrer *et al*., 2006, S. 908).

### 1.1.2 Abflusskonzentration

Bei der Abflusskonzentration wird das Wasser der bei einem Niederschlagsereignis in der Fläche aktivierten Abflusskomponenten, sei es Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss oder Tiefenperkolation, zum nächstgelegenen Vorfluter geleitet. Die Gebietseigenschaften, wie Gefälle, Fließstrecke, Oberflächenrauigkeit, Bodeneigenschaften, sowie Form und Größe des Einzugsgebiets, bestimmen, wie sich die Abflusswelle entwickelt (Patt & Jüpner, 2013, S. 39).

### 1.1.3 Modellierung von Sturzfluten

Aus wissenschaftlicher Sicht sind Modelle interessant, denn sie erlauben es, hydrologische Prozesse besser zu untersuchen und damit zu verstehen, aber auch anhand von Referenzdaten auf Abläufe in unbeobachteten Gebieten zu schließen und Vorhersagen zu treffen. Schließlich ist es nicht möglich, überall alles zu jeder Zeit zu messen. Vorhersagen erlauben es, Gefahren zu identifizieren, Hochwasserschutzmaßnahmen zu planen, die Wasserqualität und -quantität zu erhalten, sowie sonstige wasserwirtschaftliche Maßnahmen durchzuführen (Beven, 2012, S. 1 f.).

Um präventive Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor Sturzfluten zu ermöglichen, oder zumindest Risikogebiete zu identifizieren, müssen demnach Sturzfluten mit geeigneten Modellen simuliert werden. Ziel ist dabei stets eine Hochwasserabschätzung. In Kombination mit Starkregenrisikodaten, wie beispielsweise denen des KOSTRA-DWD (Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD), die das Starkregenrisiko quantifizieren, indem Aussagen zu Niederschlagshöhen und -intensitäten in Abhängigkeit von der Dauerstufe und Wiederkehrzeit getroffen werden („KOSTRA-DWD“, 2019), ist es möglich, Sturzflutrisikokarten auszuarbeiten.

Ein Modell ist in der Wissenschaft ein auf die wesentlichen Merkmale und Prozesse reduziertes Abbild eines realen, zumeist komplexen Systems. Physikalische und mathematische Modelle sind in der Hydrologie und Hydraulik am geläufigsten. Während in physikalischen Modellen, z.B. hydraulischen Modellen, die physikalischen Gegebenheiten implementiert sind, beruhen mathematische, also numerische Modelle auf der Beschreibung von Prozessen in Form von Gleichungen.

Stoffliche und geometrische Systemparameter dienen als Eingangsgrößen für die Modelle. Häufig werden hier ebenso Vereinfachungen vorgenommen wie bei den vielfältigen, teils synchron ablaufenden Prozessen in einem realen System. Die Prozesse werden je nach Anwendungsfall und Zielsetzung in Modelle implementiert. Die Anfangsbedingungen bestimmen

den Systemzustand bei Modellstart (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2003, S. 13).

Zur Hochwasserabschätzung werden drei Verfahren angewandt: Extremwertstatistik, regionalhydrologische Ansätze und Niederschlags-Abflussmodelle (NA-Modelle).
In Gebieten mit ausreichend langen Messreihen des Abflusses können diese gut extremwertstatistisch ausgewertet werden, um Hochwasser abschätzen zu können. Unterschiedliche Entstehungsbedingungen und sich im Laufe des Abflussereignisses verändernde hydrologische Prozesse können mit dieser Methode nicht berücksichtigt werden (Spreafico & Viviroli, 2013, S. 47). Auch lässt sich die Extremwertstatistik nicht auf Sturzfluten anwenden, da die Gebiete in denen es zu Sturzfluten kommt, oftmals nicht hydrometrisch überwacht werden und die entsprechenden Messreihen fehlen (Steinbrich *et al.*, 2016, S. 1).
In ungemessenen Einzugsgebieten können regionalhydrologische Ansätze genutzt werden. Dabei werden Regionalisierungsverfahren angewandt, um aus vorhandenen Messungen auf hydrologische Größen in ungemessenen Gebieten zu schließen. Dazu werden variante und invariante, räumlich verteilte Gebietskenngrößen, wie Gebietscharakteristika, Gerinneeigenschaften, Bodenverhältnisse, Landnutzung und Niederschlagsdaten, genutzt (Barben *et al.*, 2001, S. 3). Regionalhydrologische Ansätze sollten nur in Einzugsgebieten von 10-500 $km^2$ Größe genutzt werden. In kleineren Einzugsgebieten sind sie nicht zu empfehlen (Spreafico & Viviroli, 2013, S. 47 f.).
Niederschlags-Abflussmodelle (NA-Modelle) transformieren den Niederschlag mathematisch in einen Abfluss unter Berücksichtigung der Gebietseigenschaften und der als relevant angesehenen und daher im Modell implementierten hydrologischen Prozesse. Mit NA-Modellen lässt sich so die Hochwasserganglinie berechnen (Barben *et al.*, 2001, S. 7; Spreafico & Viviroli, 2013, S. 48). Die Modelle benötigen Gebietseigenschaften und hoch aufgelöste Niederschlagsmessungen für die Parametrisierung und Abflussmessungen für die Kalibrierung. Die Datenaufbereitung gilt allgemein als sehr aufwändig. Sind keine Daten zur Kalibrierung verfügbar, müssen gegebenenfalls Modellparameter über Regionalisierung hergeleitet werden, was wiederum mit Unsicherheiten verbunden ist und den Einsatz eines NA-Modells verhindern kann (Barben *et al.*, 2001, S. 7; Gattermayr *et al.*, 2011, S. 87; Spreafico & Viviroli, 2013, S. 48).

Knapp *et al.* (1991, S. 5) unterteilen Niederschlags-Abflussmodelle nach ihren Eigenschaften in 4 Kategorien: 1) ereignisbezogene und kontinuierliche Modelle, 2) konzeptionelle und hydrodynamische Modelle, 3) räumlich undifferenzierte und räumlich verteilt parametrisierte Modelle, sowie 4) Modelle mit kalibrierten, physikalisch bestimmten oder empirisch abgeleiteten Parametern.

**1) Ereignisbezogene und kontinuierliche Modelle**

Ein einzelnes Niederschlagsereignis mit bestimmten Anfangsbedingungen der zeitlich variablen Eingangsparameter wird in einem ereignisbezogenen Modell durchgespielt, so dass das sich daraus ergebende spezifische Hochwasserereignis rekonstruiert und analysiert werden kann. Auch lassen sich mit solchen Modellen die Abflussganglinien bei verschiedenen Kombinationen aus Bemessungsniederschlägen und Anfangsbedingungen simulieren. Aussagen über die Wiederkehrzeit der simulierten Hochwasserereignisse sind jedoch durch die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten der Randbedingungen nicht möglich.

Bei Langzeitsimulationen werden hingegen lange Messreihen der Niederschläge, und ggf. auch der Temperatur und Strahlung, je nach Komplexität des Modells, als Modellinput genommen und eine kontinuierliche Abflussganglinie produziert. Da die meteorologischen Bedingungen kontinuierlich die Randbedingungen und den Ereignislauf bestimmen, entstehen realitätsnahe Ergebnisreihen, die wiederum extremwertstatistisch ausgewertet werden können (Barben *et al*., 2001, S. 7; Spreafico & Viviroli, 2013, S. 48).

**2) Konzeptionelle und hydrodynamische Modelle**

Black-Box-Modelle, auch Transfer-Modelle genannt, ignorieren jegliche physikalischen Prozesse und basieren nur auf dem statistischen Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluss, also dem Abflussbeiwert.

Konzeptionelle Modelle setzen sich nur aus wenigen, stark vereinfachten Abbildungen physikalischer Abläufe zusammen.

Hydrodynamische oder physikalische Modelle basieren auf dem physikalischen Verständnis der hydrologischen Abflussbildungsprozesse und versuchen diese bestmöglich abzubilden. Die physikalischen Gesetzmäßigkeiten können unabhängig vom Modell überprüft werden. Dennoch kommen hydrodynamische Modelle nicht vollständig um empirische Feststellungen herum (Knapp *et al*., 1991, S. 5).

**3) Räumlich undifferenzierte und räumlich verteilt parametrisierte Modelle**

Räumlich undifferenzierte Modelle mitteln den Niederschlag und sämtliche Gebietseigenschaften für das gesamte Einzugsgebiet, so dass räumliche Variabilität und Abflusseigenschaften unberücksichtigt bleiben. Indem das Untersuchungsgebiet möglichst klein gewählt wird, können undifferenzierte Modelle den räumlich verteilten angeglichen werden.

Heutzutage sind Geodaten weithin verfügbar, so dass räumlich verteilte Modelle die undifferenzierten verdrängt haben. Diese sind in der Lage, die räumliche Variabilität der Eingangsparameter zu berücksichtigen und können unterschiedlich ablaufende hydrologische Prozesse räumlich abbilden. Die Modelle lassen sich, abhängig von der Rastergröße der Geodaten, beliebig skalieren. Einzelne Modelle berechnen die hydrologischen Prozesse für Hydrotope, die durch eine bestimmte Kombination aus Landnutzung und Bodeneigenschaften geprägt sind. Je Hydrotoptyp werden die Berechnungen nur einmal durchgeführt und dann auf alle anderen Flächen des gleichen Hydrotops übertragen, was die Berechnungen beschleunigt (Knapp *et al*., 1991, S. 7 f.).

**4) Modelle mit kalibrierten, physikalisch bestimmten oder empirisch abgeleiteten Parametern**

Ziel einer jeden Modellierung ist, reelle Messwerte möglichst genau reproduzieren zu können. Hierzu können Parameter kalibriert, also derart angepasst werden, dass das Resultat dem Erhofften entspricht. Kalibrierte Parameter haben häufig kaum mehr eine physikalische Grundlage und sind spezifisch für ein Einzugsgebiet, was die Übertragbarkeit des Modells auf andere Einzugsgebiete erschwert.

Physikalisch bestimmte Parameter beruhen auf gemessenen Gebietseigenschaften. Zu einem gewissen Maß müssen diese Werte dennoch meistens angepasst werden, um ein optimales Ergebnis zu erreichen.

Empirische Parameter werden mittels Regressionsanalyse aus kalibrierten oder physikalisch bestimmten Parametern abgeleitet (Knapp *et al*., 1991, S. 8 f.). Koaxialdiagramm, Soil Conservation Service SCS-Verfahren, Lutz-Verfahren, Φ-Index-Verfahren und Horton-Verfahren wären Beispiele empirischer Parametrisierung von Abflussbildungsberechnungen (Patt & Jüpner, 2013, S. 31).

Hydrodynamisch-numerische oder hydraulische Modelle werden genutzt, um die Dynamik des abfließenden Wassers bei der Abflusskonzentration an der Erdoberfläche und schließlich im Gerinne darzustellen. Auch lässt sich mit solchen Modellen die Wasserspiegellage simulieren. Ein-, zwei- und dreidimensionale Modelle bilden die räumlich zeitlich variablen Fließprozesse

ab und geben Kenngrößen wie Abfluss und Fließgeschwindigkeit wieder. Eindimensionale Modelle geben Werte in einer Richtung als Querschnittsmittelwert durch das Gerinnebett wieder. Zweidimensionale Modelle geben die Werte in einer horizontalen oder vertikalen Ebene aus und liefern Mittelwerte senkrecht zu dieser Ebene. Dreidimensionale geben die Werte räumlich verteilt in allen drei Dimensionen an (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2003, S. 17 f.).

Eine Vielzahl verschiedener Modelle wurde im Laufe der Zeit zur Simulation von Sturzfluten entwickelt.

Dazu gehören räumlich undifferenzierte Modelle, wie das Sacramento soil moisture accounting model (SAC-SMA), das vom US National Weather Service genutzt wird, um sturzflut-gefährdete Gebiete auszuweisen (Hapuarachchi *et al*., 2011, S. 2774).

Jain *et al*. (2004) haben ein hydrodynamisches, räumlich verteiltes NA-Modell entwickelt, das ebenfalls gute Ergebnisse liefert. Als GIS-basiertes Modell gibt es neben einer Abflussganglinie auch die Fließpfade mit der Wassertiefe räumlich wieder. Die Übertragbarkeit auf andere Gebiete wird jedoch dadurch eingeschränkt, dass einzelne Parameter kalibriert wurden und dies für neue Gebiete wiederholt werden müsste.

Das von Lindström *et al.* (1997) zur Version HBV-96 weiterentwickelte HBV-Modell wurde von Kobold und Brilly (2006) erfolgreich in einem slowenischen Einzugsgebiet angewandt. Auch konnten sie die Tauglichkeit für Sturzflutvorhersagen feststellen.

Im Einzugsgebiet des Kamp in Österreich wird ein von Blöschl *et al.* (2008) entwickeltes räumlich verteiltes NA-Modell genutzt. Es kann mit einer Genauigkeit von ±10 % über 4 Stunden und ±30 % über 24 Stunden die Abflussganglinie simulieren.

Wicht und Osinska (2016) haben ein konzeptionelles räumlich verteiltes, stark GIS-basiertes Modell entwickelt, um in versiegeltem städtischen Gebiet besonders gefährdete Flächen zu identifizieren, indem die Wassertiefen simuliert werden. Dieses ignoriert sämtliche Abfluss-bildungsprozesse und beruht ausschließlich auf Niederschlagsdaten sowie einem hochauf-gelösten digitalen Geländemodell und den daraus abgeleiteten Gegebenheiten, wie z.B. der Fließrichtung.

Das an der Russian State Hydrometeorological University entwickelte konzeptionelle Modell MLCM3 (Multi-Layer Conceptual Model, 3. Generation) wurde in mehr als 50 Einzugs-gebieten getestet und zeigte mit dem SAC-SMA-Modell vergleichbare Ergebnisse bei der Nutzung von Niederschlagsradardaten. Pivovarova *et al.* (2018) schätzen die Eignung zur Sturzflutmodellierung als sehr gut ein.

Hapuarachchi *et al.* (2011, S. 2774) listen noch einige weitere Modelle, wie das von Borrell *et al.* 2006 entwickelte MARINE (Model of Anticipation of Runoff and INundations for Extreme events), das TREX (Two-dimensional, Runoff, Erosion and Export)-Modell aus dem Jahr 2007 von England *et al.*, oder das von Roo *et al.* 2000 entwickelte LISFLOOD-Modell. Alle haben sich als geeignet zur Modellierung von Sturzfluten herausgestellt.
Die Vielzahl der verschiedenen Modellieransätze zeigt aber auch, dass bislang kaum universell anwendbare, performante Lösungen gefunden wurden, die dabei alle Abflussbildungsprozesse berücksichtigen.

An der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg wurde daher das unkalibrierte, ereignisbasierte NA-Modell RoGeR (Runoff Generation Research Model) entwickelt. Dieses kann skalenunabhängig genutzt werden, bildet die Abflussbildungsprozesse zeitlich und räumlich hochaufgelöst ab und berücksichtigt alle relevanten Abflussbildungsprozesse, inklusive schnellem Zwischenabfluss entlang präferentieller Fließwege wie Makroporen und Trockenrisse (Steinbrich *et al.*, 2016, S. 1 f.). Im Kapitel 3.2 wird das Modell im Detail beschrieben.

## 1.2 Sturzfluten in Luxemburg

Nach der Modelltheorie sollen im Folgenden drei Sturzfluten, die 2016 und 2018 Teile des Landes Luxemburg getroffen haben, kurz beschrieben werden, um zu illustrieren, welches immense Schadenpotential solche Naturereignisse in sich bergen und womit die Betroffenen sowie Rettungskräfte konfrontiert waren. Zwar handelt es sich um ländliche Gegenden, doch waren die Schäden beträchtlich. In urbanen Gebieten könnten sie noch deutlich höher ausfallen.

### 1.2.1 Sturzflut des 22. Juli 2016

Freitags, den 22. Juli 2016 trafen heftige Regenfälle das Großherzogtum Luxemburg und sorgten in der betroffenen Region für schwere Sturzfluten. Lokal wurden Niederschlags-intensitäten von über 120 mm/h gemessen (Ganser, 2016). Insgesamt ging etwa ein Zehntel des Jahresniederschlags in ein paar Stunden nieder (Feist, 2016). Begleitet wurden die starken Regenfälle von Windgeschwindigkeiten zwischen 90 und 110 km/h („RTL.lu - Géigend Fiels-Iermsdref vu Wiedere besonnesch getraff“, 2016).

Im ganzen Land waren die Feuerwehren im Einsatz. Besonders schwer betroffen waren die Gemeinden Larochette, Ernztal, Reisdorf, Nommern und die Stadt Luxemburg. Einsatzkräfte mussten überschwemmte Keller auspumpen, durch Geröll und umgestürzte Bäume versperrte

Straßen frei räumen und zu logistischen Einsätzen ausrücken, um beispielsweise Teile der Bevölkerung mit warmen Decken auszustatten und ihnen eine Notunterkunft herzurichten.
Die Einsatzleitstelle, offiziell genannt „Central des secours d'urgence du 112", kurz CSU 112, disponierte etwa 300 Einsätze, der Großteil davon zwischen 20 und 23 Uhr.
Um 21:22 wurde die Einsatzleitstelle darüber informiert, dass mehrere Fahrzeuge von den Wassermassen mitgerissen wurden. Um sicherzustellen, dass keine Personen mehr an Bord waren, wurden Rettungsschwimmer alarmiert („RTL.lu - Géigend Fiels-Iermsdref vu Wiedere besonnesch getraff", 2016).

Die materiellen Schäden waren beträchtlich, da dutzende Keller überschwemmt wurden, wodurch ein Großteil des Inventars unbrauchbar wurde. Zwei Brücken stürzten ein und mehrere Straßen wurden zerstört, was die Zufahrt zum Katastrophengebiet einschränkte und die Aufräumarbeiten zusätzlich erschwerte (siehe Abb. Ah-1.2.1-1 im Anhang). Etwa siebzig Autos wurden zerstört und teilweise von den Fluten mitgerissen („RTL.lu - Géigend Fiels-Iermsdref vu Wiedere besonnesch getraff", 2016; „Wat geschitt ass, ass einfach onvirstellbar", 2016). Auf Grund von Kontaminationen der Trinkwasserquellen in der Gegend wurde die Nutzung des Leitungswassers untersagt und die luxemburgische Armee damit beauftragt, Trinkwasser an die Bevölkerung zu verteilen („Arméi am Asaz, Waasserverdeelung assuréiert", 2016). Trotz der hohen Schäden waren glücklicherweise keine Verletzten oder gar Toten zu beklagen.

In den ersten Tagen nach der Katastrophe stellte die Regierung Gelder in Höhe von 30 Mio. € für die Soforthilfe bereit. Nach einem Jahr waren 4 Mio. € tatsächlich investiert, und rund 30 Familien stellten Anträge für Finanzhilfen („RTL.lu - 1 Joer duerno ass d'Nuecht nach ëmmer an de Käpp vun de Leit", 2017). Bei diesen Summen handelt es sich einzig um nicht versicherte Schäden und Gelder zur Reparatur der Infrastruktur. Zusätzlich wurden Schäden in Höhe von 5 bis 10 Mio. € durch Versicherungen gedeckt („Assurancë komme fir Deel vum Schued op", 2016). Auch wurden Spendenaktionen initiiert, um den Betroffenen zu helfen („Hëllefsbereetschaft, Opraumaarbechten a Spendenopruff", 2016). Es wurden keine Quellen gefunden, die diese Beträge quantifizieren.

### 1.2.2 Sturzfluten des 1. und 9. Juni 2018

Am 1. Juni 2018 kam es erneut zu Sturzfluten in der Region Müllerthal. Zwischen 00:00 und 06:00 Uhr wurden in Waldbillig Niederschläge in Höhe von rund 100 mm gemessen, welche gegen 02.00 Uhr zu Sturzfluten führten.

150 Feuerwehrleute wurden in den ersten Stunden eingesetzt, und der Krisenstab traf gegen 03:00 zusammen, um die Einsätze zu koordinieren.

Auch bei dieser Sturzflut waren die materiellen Schäden wieder sehr hoch. Mehrere Hotels, Restaurants, Campingplätze und Keller wurden überschwemmt. Wiederum etliche Autos, darunter ein Mannschaftstransportwagen der Feuerwehr Berdorf wurden davongeschwemmt. Die Aufräumarbeiten zogen sich über Tage hin, so dass die erschöpften Rettungskräfte regelmäßig durch Kollegen aus dem ganzen Land abgelöst werden mussten. Zusätzlich unterstützte das Militär die Arbeiten.
Rettungsschwimmer mussten in der Nacht 18 Personen aus ihren Zelten auf dem Campingplatz in Müllerthal retten, da sie durch die Wassermassen des nahegelegenen, ausufernden Bachs eingeschlossen wurden. Das auslaufende Heizöl eines leckgeschlagenen Tanks musste mit einer Sperre auf dem Fluss „Sauer“ eingefangen werden, um weitere Umweltschäden zu verhindern. Einige Brücken stürzten ein, Hänge rutschten ab und Straßen wurden zerstört, was die Logistik im Einsatzgebiet erschwerte („Katastrophale Zustände nach sintflutartigem Regen“, 2018). Die Ortschaft Berdorf war nur mehr über eine einzige Zufahrtsstraße zu erreichen. Insbesondere die Reparaturmaßnahmen an den Verkehrswegen gestalteten sich schwierig und langwierig. Das Straßenbauamt ging stellenweise von Arbeiten aus, die sich über Monate bis zu einem Jahr hinziehen würden („Straßen im Müllerthal schlimm zugerichtet“, 2018).
Abermals wurden Trinkwasserquellen in Waldbillig, Bech, Berdorf und Beaufort kontaminiert, und Wasser in Flaschen wurde an die Bevölkerung verteilt („Straßen gesperrt - Trinkwasserversorgung gestört“, 2018). Dem Einsatzleiter der Feuerwehr und Arbeitskollegen des Autors Lieutenant-Colonel Paul Wirtz zufolge wurden Granaten aus dem Zweiten Weltkrieg freigelegt und mussten vom Kampfmittelräumdienst beseitigt werden (Wirtz, 2018).

Am 9. Juni 2018, eine Woche nach den verheerenden Überschwemmungen, kam es erneut zu Starkregenfällen im Zentrum und Osten des Landes.
Zwischen 19:00 und 22:00 Uhr gingen 500 Notrufe in der Einsatzleitstelle ein und führten zu 200 Einsätzen der Feuerwehren. In der Ortschaft Bissen im Zentrum des Landes standen 33 Häuser 1 bis 1,5 m tief unter Wasser. In der Region Müllerthal mit den Ortschaften Waldbillig, Haller und Müllerthal im Osten des Landes waren die gleichen Bewohner und Gebäude betroffen wie eine Woche zuvor, was die Schäden noch zusätzlich verstärkte (Bingenheimer, 2018).

Die Region Müllerthal – Kleine Luxemburger Schweiz – ist mit ihren vielen Wanderwegen und der speziellen Landschaft die bedeutendste Touristenregion des Landes. 150.000 Besucher wandern alleine den Müllerthal-Trail jedes Jahr. Da durch die Sturzfluten 30 % der Wanderwege und 100 kleine Holzbrücken zerstört wurden, Hotels zum Wiederaufbau schließen mussten und die Zufahrt in die Region auf Grund der beschädigten Straßen stark eingeschränkt war, waren die ökonomischen Auswirkungen beträchtlich („Schied Mëllerdall: Defi fir Touristesaison, déi an 3 Wochen ufänkt“, 2018).

Die Regierung stellte erneut 30 Mio. € als Soforthilfe bereit. Eine erste Schätzung zwei Wochen nach den Ereignissen bezifferte die Schäden vorläufig auf 4,6 Mio. €, Schäden an Privateigentum ausgeschlossen. 30 Betriebe, darunter Hotels, Restaurants, Campingplätze, Handwerker und Dienstleister fragten finanzielle Unterstützung an (Hermes, 2018). Die Schäden an Straßen werden mit 7,8 Mio. € beziffert („No den Iwwerschwemmungen - Acceleréiert Ausschreiwungen a Schaffen am Congé collectif“, 2018). Eine abschließende Bilanz gibt es allerdings zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht, da nach wie vor nicht alle Schäden behoben sind.

## 2 Problemstellung und Zielsetzung

Wie bereits beschrieben, ist aktuell das räumliche und zeitliche Auftreten von Sturzfluten nur schwer vorherzusagen und deren Auswirkungen auf Mensch und Infrastruktur schlecht im Voraus modellierbar.

Eine Möglichkeit zur performanten Simulation würde unter anderem im Katastrophenschutz einen deutlichen Mehrwert darstellen. So ließen sich Risikogebiete identifizieren, welche abhängig vom Risiko, in Form von Siedlungsverboten in die Bauleitpläne einfließen könnten. Bewohnte Gebiete und Kritische Infrastrukturen könnten durch Präventionsmaßnahmen, wie den Bau von Dämmen oder das Verlegen und Verbreitern von Bachläufen geschützt werden. Auf taktischer Ebene könnten Handlungen im Einsatzfall vorgeplant werden, so zum Beispiel die Anfahrt ins Einsatzgebiet unter Berücksichtigung vermutlich überschwemmter Straßen.

In Luxemburg kam es, wie bereits erwähnt, am 22. Juli 2016 unter anderem in den benachbarten Gemeinden Larochette und Nommern zu schweren Sturzfluten. Am 1. Juni 2018 wurde Larochette erneut von Überschwemmungen getroffen.
Der Autor erlebte als Mitglied der Freiwilligen Feuerwehr die beiden Ereignisse mit, beobachtete die Entwicklung der Überschwemmungen und war tagelang bei den Aufräumarbeiten im Katastrophengebiet beteiligt. Im Anschluss an die Ereignisse vom 22. Juli 2016 dokumentierte und kartierte er die Schäden und Ausdehnungen der Überschwemmungen für einen Abschlussbericht der Feuerwehr. Die so zufällig geschaffene umfangreiche Datengrundlage soll im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffen und verfeinert werden und dem Niederschlags-Abflussmodell RoGeR als Referenzdaten dienen.

Um als Referenz zu dienen, müssen die Sturzfluten, insbesondere in Bezug auf die Ausdehnung der Wasserflächen und Überschwemmungstiefen, rekonstruiert werden. Da es in den betroffenen Gebieten keine Messpegel entlang der Gerinne gibt, muss die Rekonstruktion anhand von Kartierungen, (Luft)bildern, Videos, Einsatzdaten der Feuerwehr und Augenzeugenberichten erfolgen.
Im ersten Schritt sollen Einsatzdaten der Einsatzleitstelle, gemeinhin bekannt als die 112, genutzt werden, um festzustellen wo genau Bürger auf die Hilfe der Feuerwehr in Bezug auf die Überschwemmungen angewiesen waren. Ergänzend werden Berichte der lokal zuständigen Einsatzleiter genutzt. Die Einsatzdaten können mit Hilfe der Adresse, beziehungsweise der dazugehörigen Koordinaten verortet werden. So ergibt sich eine erste qualitative Aussage über

die räumliche Ausdehnung der Überschwemmungen. Dabei handelt es sich um die binäre Information „Überschwemmung ja/nein“.
Im zweiten Schritt sollen die bestehenden Kartierungen weiter ergänzt und verfeinert werden, mit dem Ziel, die Ausdehnung der Überflutungen genauer einzugrenzen und um die Wassertiefe zu ergänzen. Maßgeblich dienen hierzu Fotos und Videos, die entweder die Überschwemmungen direkt oder im Gelände sichtbare Geschwemmsellinien dokumentieren, so dass die maximale Ausdehnung der Wasserflächen kartiert werden kann. Unter Verwendung von Augenzeugenberichten und Bildern kann punktuell die Wassertiefe ermittelt werden, indem vor Ort der Abstand vom Grund bis zu einem Referenzobjekt gemessen wird. Erkennt man beispielsweise auf einem Foto, dass das Wasser bis knapp unter die Fensterbank im Erdgeschoss eines Hauses reichte, so kann dies ausgemessen werden.
Je nach Datengrundlage wäre es möglich, die vorherigen Informationen in einem dritten Schritt um die zeitliche Komponente zu ergänzen, um so den räumlich-zeitlichen Verlauf der Überflutungen rekonstruieren zu können.

Ziele der Arbeit sollen eine retrospektive Ereignisanalyse in drei ausgewählten Einzugsgebieten sowie eine Modellevaluierung und -validierung sein. Die Modellevaluierung erfolgt dabei nicht nach der klassischen Methode des Abgleichens der simulierten Abflussganglinie mit den an einem Pegel gemessenen, sondern anhand der räumlichen Ausdehnung der modellierten und tatsächlich beobachteten Überschwemmungen. Dabei wird angenommen, dass eine korrekt modellierte Wassermenge sich räumlich so verteilt, wie dies während der Sturzfluten im Gelände zu beobachten war.

Zunächst sollen die für die Niederschlags-Abflussmodellierung mit RoGeR benötigten Daten gesammelt und so aufbereitet werden, dass eine Modellierung in den Untersuchungsgebieten möglich wird. Da bei Sturzfluten insbesondere der Oberflächenabfluss von Bedeutung ist, wird der Fokus auf diesem liegen, wenngleich RoGeR auch Zwischenabfluss und Tiefenperkolation zu modellieren vermag. Die erwähnten Sturzfluten sollen mit geeichten Niederschlagsmessungen der Starkregenereignisse mit RoGeR modelliert werden.

Die modellierten Spitzenabflüsse werden auf ihre Plausibilität geprüft, indem der Abfluss mittels der Fließformel nach Gauckler-Manning-Strickler nachgerechnet wird. Hierzu werden die kartierten Überschwemmungsflächen, die Wassertiefe, die Geländerauigkeit und die Hangneigung benötigt.

Da es sich bei RoGeR in seiner Basisversion um ein hydrologisches Modell handelt, müssen die modellierten Abflussmengen anschließend räumlich dargestellt werden, um einen Abgleich mit den Referenzdaten zu ermöglichen.
Hierzu sollen drei Ansätze verfolgt werden. Mit Hilfe eines SAGA-GIS-Tools wird der mit RoGeR modellierte Oberflächenabfluss dem Relief folgend geroutet und der im Laufe des Ereignisses über jedes einzelne Pixel geflossene Oberflächenabfluss akkumuliert, so dass Flächen, auf denen besonders viel Wasser abgeflossen ist, sichtbar werden. So lassen sich die räumlichen Strukturen des Abflussereignisses analysieren aber auch die räumlich korrekte Bildung von Oberflächenabfluss bewerten.
RoGeR Flow kann als Erweiterung von RoGeR angesehen werden und ist ein vereinfachtes 2D-hydraulisches Modell. Es routet den in der Basisversion von RoGeR für jeden Zeitschritt gebildeten Oberflächenabfluss entlang des Reliefs und stellt so das Abflussgeschehen räumlich dar. Es gibt die Überschwemmungsflächen und Wassertiefen für die einzelnen Zeitschritte aus. So werden Fließpfade sichtbar und die Wassertiefen können mit den Referenzdaten abgeglichen werden.
RoGeR dynamo kombiniert das ursprüngliche RoGeR mit einem 2D-hydraulischen Ansatz und berücksichtigt, dadurch dass Abflussbildung und räumliches Abfließen des Oberflächenabflusses zeitgleich modelliert werden, auch Reinfiltration von Oberflächenabfluss von einem Zeitschritt zum nächsten. Auch RoGeR dynamo gibt die Überschwemmungsflächen und Wassertiefen aus, was den Abgleich mit den Referenzdaten ermöglicht.

Es wird eine Modellierung mit einer Auflösung von einem Meter angestrebt, so dass kleinräumig auf der Skala einzelner Häuser die Genauigkeit der Simulation bewertet werden kann.

# 3 Methoden und Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden zunächst kurz die genutzten Programme erwähnt, um dann die Methodik zur Rekonstruktion der Überschwemmungen vorzustellen. Anschließend folgt eine Beschreibung des NA-Modells RoGeR sowie der Aufbereitung der Daten und des Vorgehens zur Parametrisierung der im Modell implementierten Teilprozesse. Abschließend werden die Ansätze der hydraulischen Modellierung erläutert.

## 3.1 Genutzte Software

Die Geodatenaufbereitung erfolgte mit ArcGIS in der Version 10.6.1 des Herstellers ESRI unter Windows 10. Auch wurde QGIS 2.14.8 unter macOS Mojave auf Grund einiger spezieller Tools genutzt. Die hydraulische Modellierung wurde in SAGA-GIS in der Version 2.1.0 unter Windows 10 durchgeführt. Numerische Daten, unter anderem die Einsatzdaten der Feuerwehr, wurden in RStudio 1.1.463 und in Excel 16.16.5 unter macOS Mojave verarbeitet. RoGeR kam in der Version 3 vom 27. November 2018 zum Einsatz. Die Version von RoGeR Flow datiert auf den 21.01.2019, RoGeR dynamo auf den 02.02.2019.

## 3.2 Niederschlags-Abflussmodell RoGeR

Das Niederschlags-Abflussmodell RoGeR (**R**un**o**ff **Ge**neration **R**esearch Model) wurde an der Professur für Hydrologie der Universität Freiburg im Rahmen der Ausarbeitung des Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg (WaBoA) entwickelt, um die Abflussbildungsprozesse bei Niederschlägen verschiedener Intensitäten und unterschiedlicher Vorfeuchtebedingungen simulieren zu können. Bis 2014 wurde das Modell DROGen genannt, was ausgeschrieben für **D**istributed **R**un**O**ff **Gen**eration Model steht (Steinbrich *et al.*, 2015, S. 1).

Das Modell simuliert die Abflusskonzentration der Abflusskomponenten Oberflächenabfluss, schneller und langsamer Zwischenabfluss sowie Tiefenperkolation mit dem Verfahren einer geomorphologischen Einheitsganglinie in einer räumlichen Auflösung von bis zu 1 x 1 m. Die Abflussbildungsprozesse können dynamisch mit einer zeitlichen Auflösung von bis zu einer Minute dargestellt werden. Die räumliche Auflösung der Modellierung wird durch die Auflösung der Eingangsdaten bestimmt. Die Auflösung der Niederschlagsreihe gibt die zeitliche Auflösung vor. Durch die hohe räumliche Auflösung kann das Modell sowohl auf Plotskala als auch in mesoskaligen Einzugsgebieten angewendet werden und arbeitet somit skalenübergreifend (Steinbrich *et al.*, 2015, S. 2).

Das Modell kann ohne Kalibrierung genutzt werden. Zur Parametrisierung werden räumlich verteilte Geodaten zur Landnutzung, Relief, Pedologie und Geologie in Form von Rasterdatensätzen benötigt. Expertenwissen der Abflussbildungsforschung fließt in Form tabellarischer Daten entweder direkt als sogenannte „Look-up“ Dateien oder durch Verknüpfung mit Geodaten in das Modell ein (Steinbrich *et al*., 2015, S. 2). Die Niederschlagsdaten können in Form von einzelnen Radarbildern für jeden Zeitschritt eingebunden werden. Sollten Radarbilder nur als Stunden- oder Tagesniederschlagssummen vorliegen, so können diese als Wichtungsraster eingebunden werden, um die räumliche Ausprägung der Niederschlagsintensitäten widerzuspiegeln. Dabei dient die Niederschlagsreihe einer Bodenmessstation im Untersuchungsgebiet, die als Textdatei eingebunden wird, als Referenz.

Abbildung 3.2-1 zeigt die Modellvorstellung der in RoGeR implementierten Abflussbildungs- und Infiltrationsprozesse.

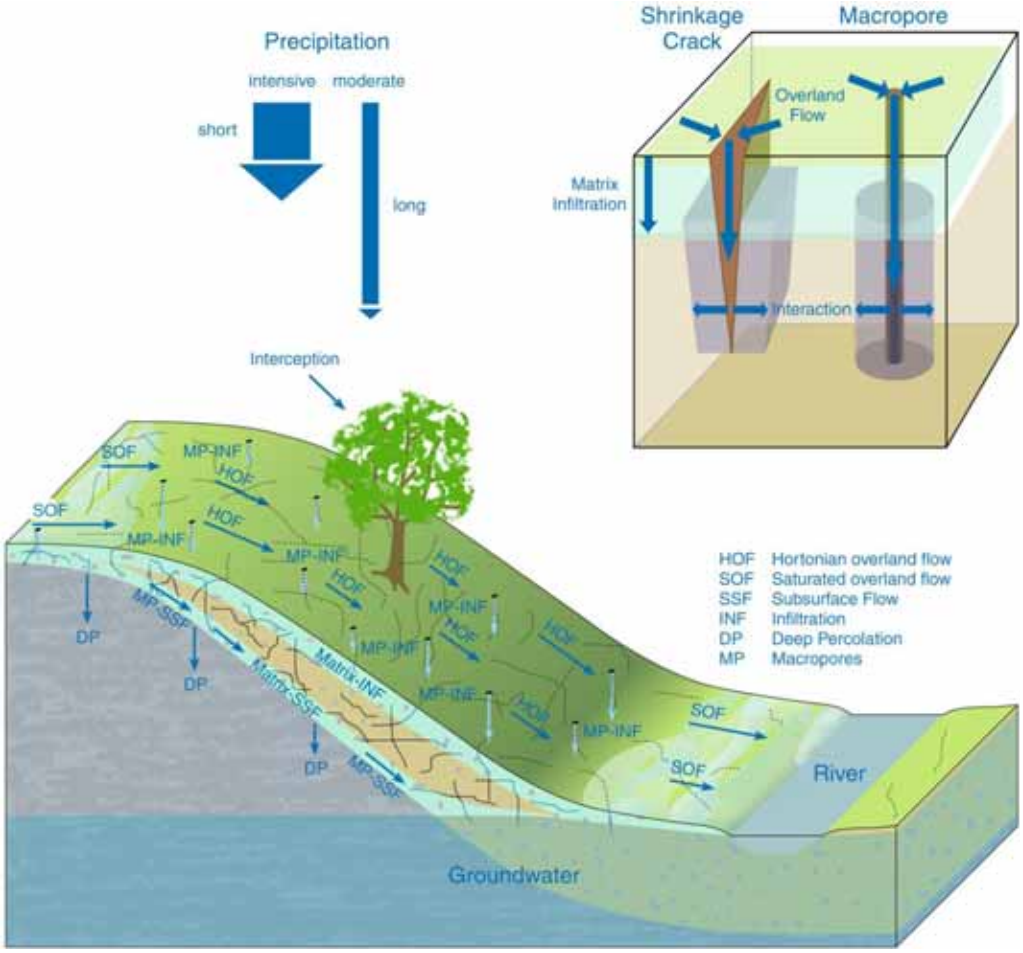



Abb. 3.2-1: Abflussbildungs- und Infiltrationsprozesse in RoGeR (aus Steinbrich *et al*., 2016, S. 3)

Zur Übersicht seien die Prozesse mitsamt ihrer auf der Abbildung 3.2-1 genutzten englischen Abkürzungen hier noch einmal aufgelistet:

- Interzeption
- Horton'scher Oberflächenabfluss (*HOF*)
- Sättigungsflächenabfluss (*SOF*)
- Matrixinfiltration (*Matrix-INF*)
- Matrixzwischenabfluss (*Matrix-SSF*)
- Makroporeninfiltration (*MP-INF*)
- Makroporenzwischenabfluss entlang präferentieller Fließwege (*MP-SSF*)
- Trockenrissinfiltration (*Shrinkage Crack-INF*)
- Auffüllung des Bodenspeichers (nicht abgebildet): nutzbare Feldkapazität (nFK) und Luftkapazität (LK)
- Tiefenperkolation (*DP*).

RoGeR beruht auf der im Folgenden beschriebenen Modellvorstellung. Trifft Niederschlag auf Vegetation, so wird, abhängig von der Art der Vegetation und der Jahreszeit, die wiederum den Grad der Belaubung bestimmt, ein Teil hiervon als Interzeption gespeichert und trägt nicht zur Abflussbildung bei. Interzeption bezeichnet die Bildung eines dünnen Wasserfilms an der Blattoberfläche.

Der restliche Niederschlag infiltriert oder läuft oberflächlich ab, je nach pedologischen Gegebenheiten, Vorfeuchtebedingungen, Versiegelungsgrad und Intensität der Niederschläge. Eine geringe Infiltrationskapazität des Bodens, hohe Niederschlagsintensitäten oder eine Kombination aus beiden Faktoren fördern das oberflächliche Abfließen, und es kommt zur Bildung von Horton'schem Oberflächenabfluss (HOA), der sich bildet, sobald die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität überschreitet.

Das infiltrierende Wasser bildet eine fortschreitende Sättigungsfront und sättigt den Boden von der Oberfläche in Richtung tieferer Schichten. Auch gelangt oberflächlich abfließendes Wasser über Makroporen und Trockenrisse in den Bodenspeicher und trägt zu dessen Sättigung bei.

Zunächst wird das Wasser in kleinen Poren zurückgehalten, die der Feldkapazität zuzuschreiben sind und Wasser entgegen der Schwerkraft halten können. Ist die Feldkapazität aufgefüllt, wird das Wasser über das freie drainierbare Porenvolumen in die Tiefe geleitet. Es erreicht entweder das Grundwasser oder trifft auf das Grundgestein. Abhängig von der hydraulischen Leitfähigkeit des Gesteins versickert das Wasser als Tiefenperkolation (TP) in der Tiefe oder staut sich auf und füllt das Porenvolumen des Bodens von unten her auf.

Das Wasser fließt in Hanglagen in diesen Schichten als Zwischenabfluss (ZA) ab. Man unterscheidet dabei stark verzögerten Zwischenabfluss durch die Bodenmatrix und schnellen Zwischenabfluss durch Makroporen.
Sättigungsflächenabfluss (SFA) bildet sich, wenn das gesamte Porenvolumen des Bodens wassergefüllt ist. Dieses Phänomen tritt insbesondere bei flachgründigen Böden mit darunterliegenden, impermeablen Gesteinschichten, wie Tonstein, flachem Gelände und bei hoch anstehendem Grundwasserspiegel in Gewässernähe auf (Steinbrich & Weiler, 2012).

Mit RoGeR können alle hochwasserrelevanten Abflusskomponenten modelliert und gezielt analysiert werden, sei es der bei konvektiven Starkregenniederschlägen dominante Oberflächenabfluss oder aber der Sättigungsflächen- und Zwischenabfluss bei advektivem, langanhaltenden Landregen (Steinbrich *et al*., 2015, S. 1).

RoGeR ist in Python 2.7.6 64 bit geschrieben und wird als unter Windows ausführbare EXE-Datei bereitgestellt. Es empfiehlt sich jedoch nicht, die Anwendungsdatei als solche zu starten, denn diese schließt sich blitzschnell selbstständig, sollte ein Fehler auftreten. Dadurch wird es fast unmöglich zu erfassen, in welcher Codezeile der Fehler aufgetaucht ist. Stattdessen empfiehlt es sich, das Programm aus der Powershell heraus zu starten, da diese auch im Falle eines Fehlers geöffnet bleibt, und so die Fehlersuche vereinfacht.
Das Modell wird über eine Steuerungsdatei im CSV-Format gesteuert. Diese Datei enthält die Pfade zu den Eingangsdatensätzen, setzt die Pfade für die Ergebnisdateien und kontrolliert einige Modelleinstellungen.
Die zur Modellierung benötigten Parameter müssen alle als Rasterdatensätze im Floating Binary Format (.flt) vorgehalten werden, um in RoGeR genutzt werden zu können. Dabei muss auf eine exakt gleiche räumliche Ausdehnung und Auflösung der Datensätze geachtet werden. In diesem Fall haben alle Rasterdatensätze genau die gleiche Dateigröße, was eine schnelle Qualitätskontrolle ermöglicht.
Die Niederschlagsreihe wird als Tabstopp separierte Textdatei eingebunden (*Handbuch RoGeR_WHM / urbanRoGeR V.7*, 2017).

## 3.3 Datenaufbereitung und Parametrisierung des Modells

RoGeR benötigt die in der folgenden Tabelle dargestellten ereignisunabhängigen, ereignisabhängigen und zeitschrittabhängigen Modellparameter, um für jede Rasterzelle des Einzugsgebiets die Abflusskomponenten berechnen zu können. Ereignisunabhängige Parameter bezeichnen zeitlich invariable Gebietseigenschaften; ereignisabhängig hingegen sind zeitlich variable Vorbedingungen, die zu Beginn der Starkregenereignisse herrschten (Steinbrich & Weiler, 2012). Tabelle 3.3-1 zeigt die Parameter des NA-Modells RoGeR auf.

Tab. 3.3-1: Modellparameter je Rasterzelle (nach Steinbrich *et al.*, 2016, S. 7)

| **Modellparameter** | **Einheit** |
|---|---|
| Ereignisunabhängig | |
| Landnutzung | (-) |
| Versiegelungsgrad | (-) |
| Hangneigung | (-) |
| Vertikale Makroporendichte | ($L^{-2}$) |
| Vertikale Makroporenlänge | (L) |
| Horizontale Makroporendichte | ($L^{-2}$) |
| Mittlerer Trockenrissabstand | (L) |
| Grundwasserflurabstand | (L) |
| Bodenmächtigkeit | (L) |
| Nutzbare Feldkapazität | (-) |
| Luftkapazität | (-) |
| Effektives Porenvolumen | (L) |
| Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit | ($LT^{-1}$) |
| Saugspannung an der Sättigungsfront | (L) |
| Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit unterhalb des Bodens | ($LT^{-1}$) |
| Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses | ($LT^{-1}$) |
| Fließgeschwindigkeit des schnellen präferentiellen Fließens | ($LT^{-1}$) |
| Fließgeschwindigkeit des langsamen Matrixflusses | ($LT^{-1}$) |
| Grundwasserfließgeschwindigkeit | ($LT^{-1}$) |
| Ereignisabhängig | |
| Interzeptionsspeicher | (L) |
| Freie nutzbare Feldkapazität | (-) |
| Freie Luftkapazität | (-) |
| Trockenrisstiefe | (L) |
| Zeitschrittabhängig | |
| Niederschlag | ($LT^{-1}$) |

Tabelle 3.3-2 listet die zur Parametrisierung des Modells genutzten Daten, inklusive deren Herkunft, der räumlichen bzw. zeitlichen Auflösung und deren Verwendung auf.

Tab. 3.3-2: Datensätze zur Parametrisierung von RoGeR

| **Datensatz** | **Auflösung** | **Verwendung** |
|---|---|---|
| **Gelände** | | |
| Digitales Geländemodell (DGM) [1] | 1 x 1m | Berechnung der Hangneigung, des Gewässernetzes, des Grundwasserflurabstands und der Einzugsgebiete |

| | | |
|---|---|---|
| **Landnutzung** | | |
| CORINE Landnutzung 2012 [2] | 100 x 100 m | Parametrisierung der Landnutzung, Interzeption, Makroporendichte, Fließgeschwindigkeiten und -zeiten |
| Digitaler Katasterplan [2] | 1: 5.000 | |
| Landwirtschaftliche Parzellen FLIK [2] | 1: 5.000 | |
| Vegetation [2] | 1: 5.000 | |
| Dauergrünland [3] | 1: 5.000 | |
| Solitärbäume [2] | 1: 5.000 | |
| Gebäude [2] | 1: 5.000 | Parametrisierung der Bodenversiegelung |
| Straßennetz [2] | 1: 5.000 | |
| **Gewässernetzmodellierung** | | |
| Gewässer [2] | 1: 5.000 | Abgleich des aus dem DGM abgeleiteten Gewässernetzes mit dem tatsächlich existenten Gewässernetz |
| **Pedologie** | | |
| Bodenart [4] | 20 x 20 m | Parametrisierung der Bodenart |
| Bodentiefe [4] | 20 x 20 m | Berechnung der Volumen der nFK und LK, Begrenzung der Bodentiefe durch das Grundwasser |
| Nutzbare Feldkapazität [4] | 20 x 20 m | Modellinput |
| Luftkapazität [4] | 20 x 20 m | |
| Skelettgehalt [4] | 20 x 20 m | Parametrisierung der Makroporendichte |
| Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit [4] | 20 x 20 m | Parametrisierung des ZA |
| Vorfeuchte modelliert mit LARSIM [5] | 1 x 1 km | Parametrisierung des freien Porenvolumens, Berechnung der aktuellen Trockenrisstiefe |
| **Geologie** | | |
| Geologische Karte Luxemburg [6] | 1 : 25.000 – 1 : 50.000 | Parametrisierung der hydraulischen Leitfähigkeit des Grundgesteins |
| **Niederschlag** | | |
| Niederschlagsmessungen [7] | 10 min / 1 h | Eichung der Daten des Niederschlagsradars, Modellinput |
| RADOLAN Niederschlagsradarbilder [8] | 1 x 1 km, 10 min | Berechnung des Niederschlagswichtungsrasters |

Datenherkunft:

[1] Administration de la Navigation Aérienne ANA (Luftfahrtverwaltung), frei verfügbar unter www.data.public.lu

[2] Administration du Cadastre et de la Topographie ACT (Katasteramt), frei verfügbar unter www.data.public.lu

[3] Landwirtschaftsgeoportal, frei zugänglich unter https://map.geoportail.lu/theme/agriculture

[4] Service de pédologie, Administration des Services Techniques de l'Agriculture ASTA (bodenkundlicher Dienst der Landwirtschaftsverwaltung)

[5] Service Hydrométrie, Administration de la Gestion de l'Eau AGE (Hydrometrie des Wasserwirtschafts-amts)

[6] Service géologique de l'Etat, Administration des Ponts et Chaussées PCH (geologischer Dienst der Straßenbauverwaltung)

[7] Agrarmeteorologisches Messnetz Luxemburg der Landwirtschaftsverwaltung, frei verfügbar unter www.agrimeteo.lu

[8] Deutscher Wetterdienst DWD, frei verfügbar unter www.dwd.de

### 3.3.1 Allgemeine Datenaufbereitung

Im Folgenden werden zunächst allgemeine Arbeitsschritte, die im Rahmen der Datenaufbereitung für RoGeR durchgeführt werden, vorgestellt. Im nächsten Abschnitt folgen dann die spezifischeren Parametrisierungen der im Modell berücksichtigten Teilprozesse.

#### Gelände

Das digitale Geländemodell der Luftfahrtverwaltung wurde mittels LiDAR (Light Detection And Ranging) -Technik erstellt und liegt landesweit in einer Auflösung von 1 x 1 m vor. Die einzelnen ein Quadratkilometer großen Kacheln des Untersuchungsgebiets werden zu einem Mosaik zusammengefügt und zur plastischeren Visualisierung wird ein Hillshade berechnet. Das Gefälle wird in Prozent Steigung berechnet.

#### Landnutzung

Zur Parametrisierung der Landnutzung benötigt RoGeR einen flächendeckenden Rasterdatensatz der Landnutzung, die mit Hilfe vorgegebener IDs kodiert wird. Hierzu werden mehrere Datensätze miteinander verschnitten, um die jeweils genausten Daten zu nutzen.

Als Grundlage dienen die CORINE (Coordination of Information on the Environment) Landnutzungsdaten von 2012 der European Environment Agency. Diese liegen flächendeckend in einer Auflösung von 100 x 100 m vor und werden im weiteren Verlauf ergänzt. Prinzipiell liegen die Vektordaten der digitalen topographischen Karte und des Katasterplans flächendeckend vor, jedoch ohne Topologie, weshalb im Detail kleinere Lücken bestehen. Um eine mögliche Fehlerquelle bei den Berechnungen in RoGeR durch NoData-Werte auszuschließen, werden die CORINE-Daten als Lückenfüller genutzt.

Grundsätzlich werden in jedem Datensatz die vorgegebenen RoGeR-IDs entsprechend der Landnutzungsart hinterlegt. Anschließend erfolgt ein Verschnitt eines ungenaueren und eines genaueren Datensatzes mittels Union. Flächen, die sich in beiden Datensätzen überlagern, erhalten so zwei RoGeR-IDs, so dass durch manuelles Abgleichen die jeweils passendere ID bestimmt und in eine weitere Spalte mit den endgültigen IDs geschrieben werden kann. IDs von Flächen, die nur in einem der zwei verschnittenen Datensätze eine ID hatten, werden übernommen. Dieser Vorgang wird so häufig wiederholt, bis alle Datensätze zusammengefügt worden sind.

Häufig findet sich die Landnutzungsart in guter Qualität im Katasterplan in den Parzellen hinterlegt. Die Angaben zur Art der Vegetation, insbesondere die der Wälder, also die Information, ob es sich um Laub-, Misch- oder Nadelwald handelt, sind allerdings in der digitalen topographischen Karte genauer hinterlegt. Um die Art der landwirtschaftlichen

Nutzflächen, Grünland und Ackerland, bestmöglich zu hinterlegen, wird das schlagbasierte Parzellenreferenzsystem mit seinen sogenannten FLIK-Parzellen der Landwirtschaftsverwaltung genutzt. Aus dem landwirtschaftlichen Geoportal wird die Karte zum Dauergrünlandstatut als Bild heruntergeladen. Diese zeigt sowohl Grünland als auch Ackerland auf. Nach der Georeferenzierung wird sie genutzt, um die Landnutzungsart der landwirtschaftlichen Flächen in den Datensatz der Landnutzung einzupflegen. Ein Datensatz der topographischen Karte enthält mehr als 5 m hohe Solitärbäume als Punkte. Nach einem Abgleich mit dem Luftbild aus dem Jahr 2018 wird entschieden, einen Puffer von 4 m um die Punkte anzulegen, so dass sich ein Kronendurchmesser von 8 m ergibt. Dies sollte als Näherungswert dienen, um größere Bäume der vielen Streuobstwiesen in der Region abzubilden. Die Bäume erhalten die RoGeR-ID 12, welche Laubbäume kodiert. Verkehrswege stehen als Linienvektor zur Verfügung. In der Dokumentation des Datensatzes sind Straßenbreiten angegeben, die genutzt werden, um einen Puffer um die Linien anzulegen. Abschließend werden Gebäude in den Landnutzungsdatensatz integriert.

#### Flächenversiegelung

In direktem Zusammenhang zur Landnutzung steht die Bodenversiegelung, weshalb diese aus dem Landnutzungsdatensatz abgeleitet werden kann. Durch bauliche Maßnahmen und Bodenverdichtung wird die Infiltrationskapazität des Bodens auf versiegelten Flächen reduziert, bzw. vollständig unterbunden, was die Entstehung von Oberflächenabfluss fördert. Die Intensität der Versiegelung kann als prozentualer Versiegelungsgrad angegeben werden. Gebäudeflächen müssen als vollständig versiegelt angesehen werden, wobei Verkehrsflächen differenzierter zu betrachten sind. Geteerte Straßen sind zu 100 % versiegelt, wohingegen ungeteerte Feldwege nur zu 20 % versiegelt sind. Für Trampelpfade und Wanderwege wird ein Versiegelungsgrad von 5 % angenommen. Der Versiegelungsgrad der Siedlungsfläche ausschließlich der Gebäude wird auf 10 % geschätzt, um Gartenhäuschen und Terrassen in Gärten zu berücksichtigen. Die Werte sind an die von Kern (2012) ermittelten Versiegelungsgrade für Baden-Württemberg angelehnt.

#### Gewässernetzmodellierung

Zur Modellierung benötigt RoGeR eine Maske des zu analysierenden Einzugsgebiets. Alle Zellen innerhalb des Einzugsgebiets werden mit 1 kodiert, alle anderen erhalten NoData-Werte. Zur Ableitung des Einzugsgebiets wird zunächst ein Gewässernetz mit Hilfe des zur Verfügung stehenden digitalen Geländemodells erstellt. Zunächst wird das DGM auf das rechteckige, großzügig bemessene Untersuchungsgebiet zugeschnitten, um die Datengröße zu reduzieren.

Anschließend werden Senken gefüllt und die Fließrichtung berechnet, um daraus die Flow-Accumulation abzuleiten. Das so entstandene Raster wird in zwei Klassen reklassifiziert, wobei Zellen bis zu einem Schwellenwert von 100.000 akkumulierten Quadratmetern als NoData klassifiziert werden. Höhere Werte erhalten den Wert 1 und bezeichnen Gewässerzellen. Die so modellierten Gewässerabschnitte werden mit denen der digitalen topographischen Karte abgeglichen und gegebenenfalls gekürzt bzw. gelöscht. Eine unbearbeitete Version wurde behalten, um im Hochwasserfall wasserführende Abschnitte als solche in RoGeR einfließen lassen zu können. An den Stellen, an denen RoGeR die Abflusskonzentration berechnen soll, wird jeweils ein Punkt gesetzt und mit Hilfe des Catchment Tools das Einzugsgebiet hierzu berechnet. Diese Datei dient dann als Maske zur Abgrenzung des Einzugsgebiets.

#### Grundwasserflurabstand

Aus dem DGM und dem erstellten Gewässernetz wird der Grundwasserflurabstand in QGIS mit Hilfe des SAGA-GIS-Tools „Vertical Distance to Channel Network“ abgeleitet (Olaya, 2004, S. 122 f.). Der berechnete Grundwasserspiegel berücksichtigt keine zeitliche Variationen des Grundwasserflurabstands und wird aus der Gewässersohle mit einem iterativen Interpolationsverfahren abgeleitet. Die Distanz zur Oberfläche ergibt den Grundwasserflurabstand (Steinbrich & Weiler, 2012). Im weiteren Verlauf wird der Grundwasserflurabstand genutzt, um im ufernahen Bereich die Bodentiefe und Makroporenlänge zu begrenzen.

### 3.3.2 Parametrisierung der Teilprozesse der Abflussbildung

Die Parametrisierung der in RoGeR implementierten Speicher, Infiltrations- und Abflussprozesse soll im Folgenden erläutert werden.

#### Interzeptionsspeicher und Muldenspeicher

Die Größe des Interzeptionsspeichers wird aus der Landnutzungsklasse und der Jahreszeit, zu der das zu untersuchende Niederschlagsereignis stattfand, abgeleitet. Im Laufe des Jahres verändert sich der Blattflächenindex je nach Vegetationstyp, was die Größe des Interzeptionsspeichers beeinflusst. Interzeption bezeichnet die Wassermenge, die an der Blattoberfläche gebunden wird. Das Wasser erreicht den Boden nicht, kann also nicht zur Abflussbildung beitragen und evaporiert direkt von der Blattoberfläche aus wieder. Im Modell füllt sich zuerst der Interzeptionsspeicher bei einem Niederschlagsereignis. Ist dieser vollständig gefüllt, trifft der restliche Niederschlag auf den Boden und kann zur Abflussbildung beitragen (Steinbrich & Weiler, 2012). Im Wasserhaushaltsmodell LARSIM nutzt Bremicker (2000, S. 10) den gleichen Ansatz.

Mulden, Gräben oder sonstige Strukturen können Niederschlag an der Erdoberfläche zurückhalten und speichern; man spricht vom Muldenspeicher. Erst wenn eine Mulde vollständig wassergefüllt ist, kann diese überlaufen und das überschüssige Wasser dem Relief weiter folgen und infiltrieren (*Handbuch RoGeR_WHM / urbanRoGeR V.7*, 2017, S. 5). Da keine Daten zu solchen Strukturen vorliegen, wird ein flächendeckendes Raster mit Nullwerten erstellt, das als Dummy für den Modelllauf dient.

**Matrixinfiltration und Bodenspeicher**

Der Boden besteht aus anorganischen Körnern und Partikeln, die aus physikalischer und chemischer Verwitterung des Grundgesteins entstanden sind, sowie aus dem organischen Humus. Die bodenbildenden Körner können nach ihrer Größe klassifiziert werden. Nach deutscher Nomenklatur sind Partikel bis zu einer Korngröße von 2 µm der Fraktion Ton zuzuschreiben. Korngrößen zwischen 2 µm und 63 µm werden als Schluff bezeichnet. Von 63 µm bis 2 mm spricht man von Sand. Darüber hinaus folgen Kies, Steine und Blöcke. Ton, Schluff und Sand mit einem Äquivalentdurchmesser von ≤ 2 mm bilden den Feinboden, größere Körner über 2 mm Äquivalentdurchmesser bilden den Grobboden. Je nachdem in welchem Verhältnis die einzelnen Korngrößen zueinander vorkommen, ergeben sich verschiedene Korngrößenverteilungen, die die physikalischen Eigenschaften des Bodens maßgeblich beeinflussen. Böden werden nach ihrer Korngrößenverteilung zu Bodenarten zusammengefasst. Häufig werden die Bodenarten in einem Dreieckskoordinatensystem mit den Korngrößen Ton, Schluff und Sand dargestellt (Blume *et al.*, 2010, S. 172 ff.). Abbildung 3.3.2-1 stellt die Klassifikation der Feinbodenarten gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung 5, kurz KA5, dar.

Eine detaillierte Karte der Bodenarten, die aus 2 Bodenproben je Hektar mittels Kriging-Verfahren interpoliert wurde, wurde von der Leiterin der Bodenkunde der Landwirtschaftsverwaltung, Frau Simone Marx und ihrem leitenden technischen Mitarbeiter Frank Flammang, freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Die nach der KA5 klassifizierten Bodenarten wurden um eine RoGeR-ID ergänzt, um die Daten im Modell nutzen zu können (Flammang, 2018; Professur für Hydrologie, o. J., S. 3).

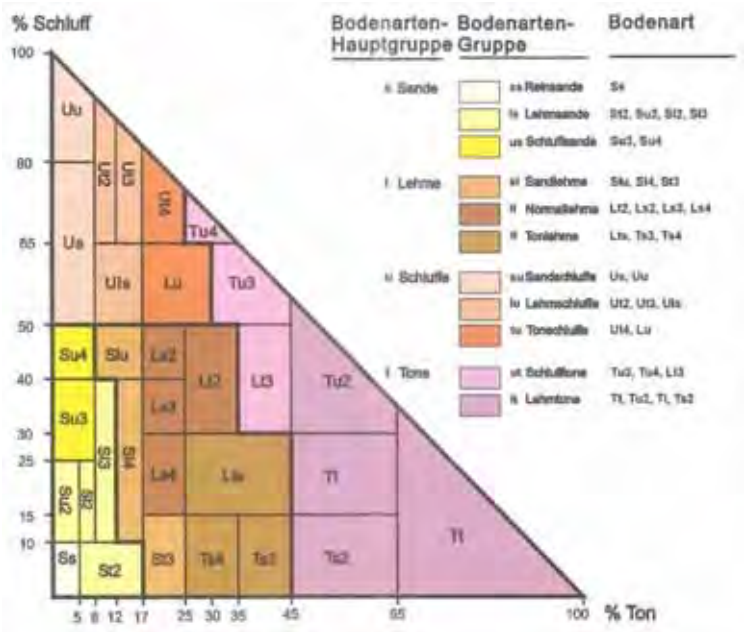



Abb. 3.3.2-1: Dreiecksdiagramm der Feinbodenarten nach der KA5
(aus Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005, S. 142)

Die Bodensubstanz fügt sich durch die unterschiedlichen Größen der Bestandteile zur Bodenmatrix bzw. zum Bodengefüge mit seinen verschieden großen und geformten Poren zusammen. Die Poren sind, abhängig von ihrer Größe und der Witterung, mit Bodenlösung, also Wasser und Bodenluft gefüllt (Blume *et al.*, 2010, S. 1). Körnungsbedingte Poren werden als Primärporen bezeichnet. Daneben gibt es Sekundärporen, wie spaltförmige Schrumpfungsrisse, Wurzelröhren und Tiergänge, die entstehen, wenn Bodentiere wie Ameisen, Regenwürmer und Maulwürfe den Boden durchmischen und lockern (Blume *et al.*, 2010, S. 180 f.). Die biologische Durchmischung des Bodens wird Bioturbation genannt (Blume *et al.*, 2010, S. 294). Mikroorganismen fördern die Verkittung der Bodensubstanz zu größeren Aggregaten (Blume *et al.*, 2010, S. 1).

Trifft Niederschlag auf den Boden, so kann er durch die Bodenporen in die Tiefe versickern. In RoGeR sind drei Arten der Infiltration von Niederschlag in den Boden implementiert, nämlich die Infiltration über die Bodenmatrix, Makroporen und Trockenrisse. An dieser Stelle sei an die Abbildung 3.2-1 erinnert, die die Infiltrationsprozesse illustriert. Der Modellvorstellung zufolge kommt es zunächst zu vertikaler Matrixinfiltration, wenn Niederschlag auf die Bodenoberfläche trifft. Die potentielle Matrixinfiltration für variable Niederschlagsintensitäten wird nach der von Peschke (1985) angepassten Green & Ampt (1911) -Methode berechnet (Badde *et al.*, 2018, S. 9):

$$I = (\theta s - \theta i) * \sqrt{2 * Ks * \frac{\Psi s}{\theta s - \theta i} * t}$$

- $I$: Matrixinfiltration [mm]
- $\theta s$: effektive Porenvolumen (Peff = nFK + LK)
- $\theta i$: Anfangsfüllung des Bodenspeichers (Vorfeuchte)
- $Ks$: gesättigte hydraulische Leitfähigkeit
- $\Psi s$: Saugspannung an der Sättigungsfront
- $t$: Zeit.

Das effektive Porenvolumen setzt sich zusammen aus dem Volumen der nutzbaren Feldkapazität nFK und dem frei drainierbaren Porenvolumen. Da diese Poren, anders als die kleineren Poren der nFK, kein Wasser entgegen der Schwerkraft halten können, sind sie prinzipiell luftgefüllt, weshalb dieses Porenvolumen auch Luftkapazität LK genannt wird (Professur für Hydrologie, o. J., S. 3).

Die Landwirtschaftsverwaltung stellte Rasterdaten zur Bodentiefe, nFK, LK und Ks bereit. Die Bodentiefe wurde mittels Random Forest aus 2116 Bodenprofilen, die sich über das ganze Land verteilen, berechnet (Flammang, 2018). Mit Hilfe des in QGIS berechneten Gewässerflurabstands wird im ufernahen, und damit grundwasserbeeinflussten Bereich um Fließgewässer die Bodentiefe auf Null reduziert. Der Boden ist an diesen Stellen bereits vollständig gesättigt, so dass kein freies Porenvolumen mehr besteht, das weiter infiltrierenden Niederschlag aufnehmen könnte. Die bereitgestellten Raster zur nFK und LK, jeweils in absoluten Volumen in mm, wurden anhand der Bodenart und der Tabelle 70 der KA5 abgeleitet (Flammang, 2018). In dieser Tabelle werden die Werte der nFK und LK als Volumenprozent angegeben. Die absoluten Werte in mm ergeben sich aus der Multiplikation dieser Werte mit der Bodentiefe in mm. Durch das Reduzieren der Bodentiefe im ufernahen Bereich kommt es zu Inkohärenzen in den Daten, da die absoluten Volumina nicht mehr mit der Bodentiefe übereinstimmen. Daher werden aus den bereitgestellten Daten zunächst die relativen Anteile der nFK und LK am Bodenvolumen berechnet, indem die Rasterdaten der nFK und LK durch die unbearbeitete Bodentiefe geteilt werden. In RoGeR ist eine Kontrollfunktion implementiert, die sicherstellt, dass die Summe aus relativer nFK und LK nicht über 70 % hinausgeht, da derart poröse Böden nicht natürlich vorkommen. Falls dem so ist, kommt es beim Modelldurchlauf zu einer Fehlermeldung. Da an wenigen Stellen tatsächlich derart unrealistische Werte in den Rasterdaten enthalten sind, wird der Höchstwert für beide Datensätze auf 35 % festgelegt, so dass maximal 70 % Porosität erreicht werden, sollten sich Stellen mit 35 % Porosität in beiden Layern überlagern. Hierbei handelt es sich um eine Annahme, denn die Anteile könnten auch ungleichmäßig auf nFK und LK verteilt sein, z.B. maximal 20 % nFK und 50 % LK. Aus den

korrigierten relativen Werten können dann wieder die absoluten Werte der nFK und LK mit Hilfe der grundwasserbeeinflussten Bodentiefe abgeleitet werden.

Die hydraulische Leitfähigkeit des gesättigten Bodens begrenzt die Infiltration durch die Bodenmatrix. Der bereitgestellte Layer zur gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit, abgeleitet aus der Tabelle 76 der KA5 (Flammang, 2018), wurde ebenfalls im grundwasserbeeinflussten Bereich auf 0 mm/h reduziert.

Zwischen der fortschreitenden Sättigungsfront und der noch ungesättigten Matrix bildet sich eine Saugspannung aus, die als treibende Kraft für die Matrixinfiltration dient. Während des Modelllaufs wird die Saugspannung an der Sättigungsfront aus einer Lookup-Tabelle abgerufen, die auf den Datensatz der Bodenart mit den dazugehörigen RoGeR-IDs zugreift. Ein eigener Rasterdatensatz ist für den Parameter Ks nicht nötig (Professur für Hydrologie, o. J., S. 3).

Zur Parametrisierung der Vorfeuchte, also der Füllung des Bodenspeichers zu Beginn der Niederschlagsereignisse, wird nur die Füllung der nFK berücksichtigt. Es wird angenommen, dass das frei drainierbare Porenvolumen seit dem letzten Niederschlagsereignis komplett entwässerte und somit luftgefüllt ist (Steinbrich & Weiler, 2012). Das Wasserwirtschaftsamt stellt zur Parametrisierung die mittels LARSIM (Bremicker, 2000) berechnete Füllung der nFK in einer Auflösung von 1 x 1 km bereit. RoGeR benötigt allerdings nicht die Füllung der nFK, sondern das verbleibende noch nicht wassergefüllte und somit freie nFK. Es ist nicht bekannt, auf welchen Bodendaten die mit LARSIM berechneten absoluten Werte der nFK und der gefüllten nFK basieren. Daher wird entschieden, die relative Füllung des Porenvolumens zu berechnen. Die relative Angabe in Volumenprozent gefüllte nFK lässt sich nun auf die für den Modelllauf korrigierten Werte der nFK übertragen. Die nFK abzüglich der gefüllten nFK ergibt dann die freie nFK zu Beginn der jeweiligen Niederschlagsereignisse. Die freie nutzbare Feldkapazität bildet zusammen mit der Luftkapazität den potentiell verfügbaren Bodenspeicher zu Beginn der Ereignisse.

#### Makroporeninfiltration

Tritt Matrixinfiltrationsüberschuss auf, so fließt dieser teilweise in die Makroporen, die eine besondere Bedeutung beim Infiltrationsvorgang einnehmen. Makroporen entstehen vor allem durch Bioturbation und Quellen und Schrumpfen von Tonböden infolge wechselnder Bodenfeuchte. Makroporen haben einen Durchmesser von mindestens 60 µm und sind geprägt durch eine starke Kontinuität. Durch ihren Anteil am Porenvolumen des Bodens und ihre vertikale Länge beeinflussen sie den Wasser- und Lufthaushalt des Bodens in besonderer Weise (Blume *et al*., 2010, S. 181). Da infiltrierendes Wasser den röhrenförmigen Makroporen besonders gut

folgen kann, wird die Makroporeninfiltration auch präferenzielles Fließen genannt (Blume *et al.*, 2010, S. 233).

Die potentielle Infiltration des Oberflächenabflusses in Makroporen wird über einen von Weiler (2001) beschriebenen Zusammenhang zwischen Makroporendichte und dem Anteil der in Makroporen entwässernde Flächen an der Gesamtfläche ermittelt. Die Interaktion zwischen Makroporenwand und Bodenmatrix bestimmt, wieviel Oberflächenabfluss tatsächlich in Makroporen fließt. Die radialsymmetrische Infiltration wird mittels einer angepassten, horizontalen Green-Ampt-Gleichung berechnet. Dafür wird ein fixer Durchmesser der Poren von 5 mm angenommen. Das Wasser infiltriert radialförmig in horizontaler Richtung in die Bodenmatrix und bildet eine fortschreitende Sättigungsfront aus. Da gleichzeitig von der Erdoberfläche Niederschlag in die Tiefe perkoliert und eine horizontal fortschreitende Sättigungsfront ausbildet, wird die aktive Makroporenlänge bei jedem Zeitschritt reduziert (Steinbrich *et al.*, 2016, S. 5).

Die Makroporendichte wird in RoGeR abhängig von der Landnutzung abgeschätzt. Unterschieden wird zwischen vertikaler und horizontaler Makroporendichte. Auch die Makroporenlänge wird nach Landnutzungsklasse abgeschätzt (Steinbrich & Weiler, 2012).

Tab. 3.3.2-1: Makroporenausstattung nach Landnutzungsklasse (nach Steinbrich *et al.*, 2016, S. 5)

| **Landnutzungsklasse** | **RoGeR-ID** | **vertikale MPDichte [MP/m$^2$]** | **vertikale MPLänge [cm]** | **horizontale MPDichte [MP/m$^2$]** |
|---|---|---|---|---|
| Teilweise oder ganz versiegelte Flächen (Siedlung, Industrie, Infrastruktur, ...) | 0 | 75 - 0 | 30 | 125 |
| Ackerland | 5 | 75 | 30 | 125 |
| Weinbauflächen | 6 | 75 | 50 | 125 |
| Obst- und Beerenobst | 7 | 100 | 50 | 125 |
| Grünland | 8 | 100 | 80 | 125 |
| Komplexe Parzellenstruktur | 9 | 100 | 30 | 125 |
| Laubwälder | 10 | 150 | 50 | 150 |
| Mischwälder | 11 | 150 | 50 | 150 |
| Nadelwälder | 12 | 150 | 30 | 150 |
| Feuchtflächen | 13 | 100 | 30 | 125 |
| Wasserfläche See | 14 | 0 | 0 | 0 |
| Wasserfläche Fluss | 20 | 0 | 0 | 0 |

Die Makroporendichte versiegelter und teilversiegelter Flächen wird abhängig vom Versiegelungsgrad parametrisiert. Waldflächen weisen eine besonders hohe Makroporendichte auf, da hier Bioturbation ungestört stattfinden kann und Bäume tief wurzeln können. Flachwurzelnden Nadelbäumen wird Rechnung getragen, indem im Vergleich zu Laub- und Mischwäldern eine geringere Makroporenlänge vorausgesetzt wird. Um den Effekt eines erhöhten

Skelettgehalts auf das präferentielle Fließen zu berücksichtigen, wird ein Zuschlag von 25 Makroporen/m$^2$ auf die hangparallel orientierten Makroporen bei einem Skelettgehalt zwischen 10 und 25 % berechnet. Bei einem Skelettgehalt zwischen 25 und 50 % gibt es einen Zuschlag von 50 Makroporen/m$^2$ (Steinbrich *et al.*, 2016, S. 5). Die Länge der vertikalen Makroporen wird, wie bereits für andere Datensätze beschrieben, in grundwasserbeeinflussten Bereichen begrenzt (Professur für Hydrologie, o. J., S. 5). Die Landwirtschaftsverwaltung stellt einen Datensatz mit dem Skelettgehalt des Bodens in Volumenprozent bereit, so dass diese Anpassungen getätigt werden können.

**Trockenrissinfiltration**

Infiltrationsüberschuss kann neben dem Fließen in Makroporen zudem über spaltförmige Trockenrisse spiegelsymmetrisch infiltrieren. Das Vorhandensein, die Anzahl und Tiefe der Trockenrisse ist abhängig vom Tongehalt und der Vorfeuchte des Bodens.

Einige Tonminerale wie Vermiculite und Smectite können durch Hydratation Wassermoleküle in ihrer Kristallstruktur einbauen aber auch wieder abgeben, so dass sie bei hohem Wassergehalt des Bodens aufquellen und unter trockenen Bedingungen schrumpfen. Je tonhaltiger die Böden, desto ausgeprägter ist das Phänomen des Quellens und Schrumpfens (Blume *et al.*, 2010, S. 17). Schrumpfungsrisse verlaufen senkrecht in die Tiefe und verbinden sich häufig zu Prismen oder Polyedern (Blume *et al.*, 2010, S. 190). Bindige Böden sind bis zu einem gewissen Wassergehalt plastisch verformbar, weshalb keine Risse entstehen können. Ab einem Matrixpotential von 500 hPa, der sogenannten Ausrollgrenze, beginnt die Rissbildung, bei 10.000 hPa, der Schrumpfungsgrenze, endet die Rissbildung. Zugleich erreichen die Trockenrisse ihre maximale Tiefe. Zwischen Anfang der Rissbildung und maximaler Ausprägung der Trockenrisse an der Schrumpfungsgrenze nimmt RoGeR eine lineare zeitliche Entwicklung der Risse an. Mit folgender Formel lässt sich die Trockenrisstiefe für gegebene Vorfeuchtebedingungen berechnen:

$$z_c = z_{max} * (A - \%nFK) * D^{-1}$$
$$z_{max} = (C - C_{min}) * F$$

- $z_c$: aktuelle Trockenrisstiefe [mm]
- $z_{max}$: maximale Trockenrisstiefe [mm]
- C: Tongehalt [%]
- $C_{min}$: minimaler Tongehalt [%]
- F: Zunahme der Trockenrisstiefe [mm] je 1% Tongehalt
- A: Anteil des Volumens an der nFK bei Ausrollgrenze [%]

- %nFK: aktuelle Vorfeuchte als prozentuale Füllung der nFK [%]
- D: Spanne von der Ausrollgrenze zur Schrumpfungsgrenze als prozentualer Anteil an der nFK [%].

Nachfolgende Tabelle wird genutzt, um die Ausrollgrenze und maximale Trockenrisstiefe den in den Untersuchungsgebieten vorkommenden Bodenarten zuzuordnen.

Tab. 3.3.2-2: Kennwerte zur Berechnung der Trockenrisstiefe (nach Steinbrich, 2018)

| **Bodenart nach KA5** | **RoGeR-ID** | **$z_{max}$ [mm]** | **A [%]** | **D [%]** |
|---|---|---|---|---|
| Ss | 17 | 0 | 40 | 37 |
| Su2 | 20 | 0 | 47 | 43 |
| Sl2 | 13 | 25 | 47 | 42 |
| Sl3 | 14 | 49 | 41 | 38 |
| St2 | 18 | 56 | 50 | 45 |
| Su3 | 21 | 7 | 50 | 45 |
| Su4 | 22 | 7 | 50 | 45 |
| Slu | 16 | 67 | 52 | 47 |
| Sl4 | 15 | 81 | 51 | 46 |
| St3 | 19 | 126 | 54 | 49 |
| Ls2 | 6 | 126 | 49 | 45 |
| Ls3 | 7 | 126 | 53 | 48 |
| Ls4 | 8 | 126 | 53 | 47 |
| Lt2 | 9 | 189 | 48 | 44 |
| Lts | 11 | 224 | 53 | 48 |
| Ts4 | 26 | 189 | 56 | 49 |
| Us | 32 | 7 | 52 | 48 |
| Ut2 | 33 | 49 | 55 | 50 |
| Ut3 | 34 | 81 | 56 | 51 |
| Uls | 31 | 67 | 55 | 49 |
| Ut4 | 35 | 126 | 57 | 51 |
| Lu | 12 | 144 | 55 | 49 |
| Lt3 | 10 | 259 | 54 | 48 |
| Tu3 | 29 | 231 | 59 | 52 |
| Tu4 | 30 | 175 | 57 | 51 |
| Tl | 23 | 364 | 60 | 53 |
| Tu2 | 28 | 343 | 60 | 53 |

Bei den angegebenen Werten der maximalen Trockenrisstiefe wird angenommen, dass der minimale Tongehalt 3 % beträgt und die Trockenrisslänge um 7 mm zunimmt bei einer Zunahme des Tongehalts von 1 %. Entsprechend beträgt die maximale Trockenrisstiefe 500 mm bei einem maximalen Tongehalt von 75 %. RoGeR nimmt einen mittleren Abstand der Trockenrisse zueinander von 20 cm an, was einer räumlichen Dichte von 10 m/m$^2$ entspricht (Steinbrich *et al.*, 2016, S. 6). Zur Berechnung der Trockenrisstiefe vor Ereignisbeginn werden die dargestellten Werte zusammen mit der in LARSIM berechneten relativen Füllung der nFK, also der Bodenfeuchte in Volumenprozent, genutzt. Wenn die aktuelle Bodenfeuchte über der Ausrollgrenze liegt, ergeben sich negative Werte für die Trockenrisstiefe. In diesem Fall wird

die Tiefe auf 0 mm gesetzt, da es durch die zu hohe Feuchtigkeit nicht zur Rissbildung kommen kann. Die Länge der Trockenrisse wird in ufernahen Bereichen entsprechend des Grundwasserflurabstands verringert.

Zur Quantifizierung der Trockenrissinfiltration dient wiederum eine modifizierte, horizontale Green-Ampt-Lösung. An beiden Wänden der spaltförmigen Trockenrisse entsteht eine Sättigungsfront, die sich horizontal ausbreitet. Analog zu den Makroporen wird die aktive Länge der Trockenrisse sukzessive reduziert, aufgrund der von oben nach unten durch das Bodenprofil fortschreitenden Sättigungsfront (Steinbrich *et al.*, 2016, S. 6). Zudem kommt es zu einer Sättigung des Porenvolumens zwischen den Makroporen und Trockenrissen.

#### Horton'scher Oberflächenabfluss

Der schlussendlich nach der Matrix-, Makroporen- und Trockenrissinfiltration verbleibende Infiltrationsüberschuss bildet den Horton'schen Oberflächenabfluss (Badde *et al.*, 2018, S. 10).

#### Tiefenperkolation

Der geologische Dienst der Straßenbauverwaltung stellt die geologische Karte des Landes Luxemburg zur Verfügung. Diese wird genutzt, um die hydraulische Leitfähigkeit des Gesteins und damit die potentiell mögliche maximale Tiefenperkolation zu parametrisieren. Diese bestimmt, ob das durch die Bodenmatrix infiltrierte Wasser sich beim Auftreffen auf das anstehende Gestein aufstaut, oder ob es durch Risse und Klüfte weiter in die Tiefe perkoliert. Klassischerweise wird die Wasserleitfähigkeit mit Hilfe der Darcy-Gleichung beschrieben, die angibt, wieviel Wasser je Zeitschritt durch den Fließquerschnitt fließt (Blume *et al.*, 2010, S. 229):

$$q = k * \frac{d\psi}{dl}$$

- q: Wassermenge
- k: substratspezifischer Proportionalitätskoeffizient
- $\psi$: antreibendes Potential
- $l$: Fließstrecke.

Zur hydraulischen Leitfähigkeit je nach Gestein gibt es kaum verlässliche Werte, da die Literaturwerte oftmals als Spannweiten über mehrere Zehnerpotenzen hinweg angegeben werden. Die Bildung eines arithmetischen bzw. harmonischen Mittels erlaubt keinen Vergleich der Werte, da diese immer noch zu sehr streuen.

Hölting (1992, S. 104) führt folgende Durchlässigkeitsbeiwerte (Kf) für Lockergesteine auf:

Tab. 3.3.2-3: Durchlässigkeitsbeiwerte (Kf) für Lockergesteine (nach Hölting, 1992, S. 104)

| Gestein | Kf Spannweite | Harm. Mittel | Arith. Mittel |
|---|---|---|---|
| Reiner Kies | $10^{-1}$ – $10^{-2}$ m/s | 65454,545 mm/h | 198000,000 mm/h |
| Grobkörniger Sand | ~ $10^{-3}$ m/s | 3600,000 mm/h | 3600,000 mm/h |
| Mittelkörniger Sand | $10^{-3}$ – $10^{-4}$ m/s | 654,545 mm/h | 1980,000 mm/h |
| Feinkörniger Sand | $10^{-4}$ – $10^{-5}$ m/s | 65,455 mm/h | 198,000 mm/h |
| Schluffiger Sand | $10^{-5}$ – $10^{-7}$ m/s | 0,713 mm/h | 18,180 mm/h |
| Toniger Schluff | $10^{-6}$ – $10^{-9}$ m/s | 0,007 mm/h | 1,802 mm/h |
| Ton | < $10^{-9}$ m/s | 0,004 mm/h | 0,004 mm/h |

Aus den Angaben in Metern pro Sekunde wird das harmonische und arithmetische Mittel in Millimetern pro Stunde berechnet, da die Werte in dieser Einheit in RoGeR eingegeben werden müssen. Beide Werte weichen stark voneinander ab.

Appel und Habler geben in ihrem Bericht zur Gebirgsdurchlässigkeit hingegen folgende Werte an:

Tab. 3.3.2-4: Durchlässigkeitsbeiwerte (Kf) für Gesteine (nach Appel & Habler, 2002, S. 61)

| Gestein | Median Kf | Median Kf | Mittelwert Kf | Mittelwert Kf |
|---|---|---|---|---|
| Gneis | 3,99 * $10^{-9}$ m/s | 0,01 mm/h | 9,68* $10^{-7}$ m/s | 3,48 mm/h |
| Granit | 3,15* $10^{-8}$ m/s | 0,11 mm/h | 1,86* $10^{-4}$ m/s | 669,60 mm/h |
| Tuff | 1,16* $10^{-8}$ m/s | 0,04 mm/h | 3,88* $10^{-6}$ m/s | 13,97 mm/h |
| Sandstein | 2,75* $10^{-7}$ m/s | 0,99 mm/h | 5,01* $10^{-5}$ m/s | 180,36 mm/h |
| Ton | 1,20* $10^{-6}$ m/s | 4,32 mm/h | 5,59* $10^{-6}$ m/s | 20,12 mm/h |
| Mergel | 6,67* $10^{-11}$ m/s | 0,00 mm/h | 7,62* $10^{-6}$ m/s | 27,43 mm/h |
| Kalkstein | 2,20* $10^{-7}$ m/s | 0,79 mm/h | 3,74* $10^{-5}$ m/s | 134,64 mm/h |
| Anhydrit | 1,96* $10^{-12}$ m/s | 0,00 mm/h | 5,02* $10^{-8}$ m/s | 0,18 mm/h |
| Steinsalz | 5,50* $10^{-14}$ m/s | 0,00 mm/h | 4,61* $10^{-12}$ m/s | 0,00 mm/h |

Dabei wurden im Rahmen der Entwicklung eines Auswahlverfahrens für Endlagerstandorte Gesteinsproben aus Tiefen von bis zu 1500 m untersucht. Es stellte sich heraus, dass die untersuchten Proben äußerst variable Merkmale aufwiesen, so dass allgemeingültige Aussagen nur eingeschränkt möglich sind und prinzipiell immer zusätzliche geowissenschaftliche Analysen im Untersuchungsgebiet durchzuführen sind, um gesicherte Aussagen treffen zu können (Appel & Habler, 2002, S. 202).

Letztendlich wird entschieden, Dummy-Werte einzusetzen, da keine eindeutigen Werte gefunden werden konnten und die Tiefenperkolation im Rahmen der Analyse von Sturzfluten vernachlässigbar ist. Die mergeligen Schichten des Mittleren Keupers km1 und km3 bekommen den Kf-Wert von 3 mm/h, die sandigeren Schichten des Mittleren Keupers km2s und des Unteren Lias li3 den Wert 6 mm/h und die sandigen Schichten den Unteren Lias li2 den Wert

9 mm/h. Trotz der Dummy-Werte wird versucht, die Parametrisierung methodisch korrekt durchzuführen. So wird zunächst im grundwasserbeeinflussten Bereich um die Fließgewässer mit Hilfe des berechneten Grundwasserflurabstands die hydraulische Leitfähigkeit auf 0 mm/h begrenzt.

Liegen die Kennwerte des Bodens getrennt nach Ober- und Unterboden vor, so ist es möglich zu bestimmen, ob sich Wasser an der Grenzfläche zwischen Ober- und Unterboden, statt an der Grenzfläche zum Grundgestein aufstaut. Dazu muss die hydraulische Leitfähigkeit des Gesteins größer sein als die des Unterbodens. Zudem muss die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Unterbodens kleiner als 5 mm/h sein und die Differenz der Durchlässigkeit zwischen Ober- und Unterboden größer als 5 mm/h sein (Professur für Hydrologie, o. J., S. 4). Da die zur Verfügung stehenden Daten keine Differenzierung zwischen Ober- und Unterboden hergeben, wird die Berechnung von Stauschichten im Boden übersprungen.

#### Zwischenabfluss

Zwischenabfluss entsteht im Bodengefüge an der Grenzschicht zum anstehenden Gestein, wenn die mehr Wasser durch den Boden perkoliert, als im Gestein in der gleichen Zeit versickern kann. Man spricht in diesem Fall vom Tiefenperkolationsüberschuss. Eine Stauschicht beginnt sich auf dem Gestein zu bilden und füllt das Bodenporenvolumen nach und nach von unten nach oben auf.

RoGeR teilt den lateralen Zwischenabfluss in eine stark verzögerte und eine schnelle Komponente auf. Der langsame Zwischenabfluss in der Bodenmatrix wird mittels Darcy-Gleichung für Abfluss unter gesättigten Bedingungen berechnet. Das Abflussvolumen hängt dabei vom Gefälle, der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens und der Mächtigkeit der Stauschicht ab (Steinbrich & Weiler, 2012).

Der schnelle Zwischenabfluss entlang präferentieller Fließwege hängt von der horizontalen Makroporendichte, der Vernetzung der Makroporen und dem Gefälle ab (Weiler & McDonnell, 2004). Mit zunehmender Tiefe nimmt die Lagerungsdichte des Bodens zu, so dass die Dichte und Vernetzung der Makroporen abnehmen, aufgrund abnehmender Anzahl an Wurzelröhren und verringerter Aktivität der Bodentiere. Die Fließzeiten des Zwischenabflusses verkürzen sich daher je oberflächennäher dieser stattfindet (Steinbrich *et al*., 2016, S. 6). Im Modell wird das Bodenprofil in 20 cm mächtige Abschnitte unterteilt, für die jeweils eine auf empirischen Daten aus Feldversuchen beruhende Funktion zwischen Gefälle und Fließgeschwindigkeit und entsprechend auch Abflussvolumen hinterlegt sind (Steinbrich & Weiler, 2012). RoGeR teilt den Tiefenperkolationsüberschuss anteilig auf den schnellen und langsamen Zwischenabfluss auf, abhängig vom maximalen potentiellen Zwischenabfluss (Steinbrich *et al*., 2016, S. 7).

### Sättigungsflächenabfluss

Infiltriert mehr Wasser in den Boden, als durch Zwischenabfluss und Tiefenperkolation abgeführt werden, so sättigt sich das gesamte Porenvolumen des Bodenprofils bis das Wasser oberflächlich abfließt. Man spricht vom Sättigungsflächenabfluss. Besonders in Gewässernähe mit hoch anstehendem Grundwasserspiegel verfügt der Boden nur noch über wenig freies, ungesättigtes Porenvolumen, weshalb es in diesen Bereichen besonders schnell zur Bildung von Sättigungsflächenabfluss kommt. Aus diesem Grund wird die Bodentiefe mittels des in QGIS berechneten Grundwasserflurabstands reduziert (Steinbrich *et al.*, 2016, S. 7).

### Abflusskonzentration

RoGeR wurde entwickelt, um die räumlich zeitliche Abflussbildung zu quantifizieren. Da im Normalfall nicht die Abflussbildung, sondern die Abflusskonzentration gemessen wird, bietet es sich an, die einzelnen Abflusskomponenten dem natürlichen Relief folgend zu einem Messpegel zu routen und die modellierte Abflussganglinie mit der gemessenen zu vergleichen. In der Basisversion nutzt RoGeR hierzu keine komplexe hydraulische Modellierung, sondern stützt sich auf GIS-berechnete Fließzeiten des Abflusses einer jeden Rasterzelle zum Pegel. So kann für die einzelnen Abflusskomponenten und den Gesamtabfluss eine Einheitsganglinie berechnet werden.

Zur Bestimmung der Fließzeit, die der Oberflächenabfluss, also Horton'scher Oberflächenabfluss und Sättigungsflächenabfluss, bis zum Erreichen des Pegels benötigt, wird ein Fließzeitengrid berechnet. Dafür wird zunächst die Fließgeschwindigkeit des oberflächlich ablaufenden Wassers berechnet. Für den Oberflächenabfluss wird eine 1 mm dünne laminar fließende Wasserschicht angenommen. Für Fließgewässer wird eine konstante Geschwindigkeit von 3 m/s angenommen, um die hohen Fließgeschwindigkeiten bei Hochwasserereignissen widerzuspiegeln. Wasser in stehenden Gewässern bewegt sich hingegen nur mit 0,01 m/s fort. Alle anderen Fließgeschwindigkeiten werden abhängig von der Landnutzung nach Manning-Strickler berechnet (Steinbrich *et al.*, 2016, S. 7). Untenstehende Tabelle gibt die RoGeR Landnutzungs-IDs mit ihren entsprechenden Rauigkeitsbeiwerten nach Strickler wieder.

Tab. 3.3.2-5: Rauigkeitsbeiwerte nach Strickler je Landnutzungsklasse (nach Steinbrich *et al.*, 2016, S. 5)

| **Landnutzungsklasse** | **RoGeR-ID** | **K-Wert [$m^{1/3}/s$]** |
|---|---|---|
| Teilweise oder ganz versiegelte Flächen (Siedlung, Industrie, Infrastruktur, ...) | 0 | 75 |
| Ackerland | 5 | 30 |
| Weinbauflächen | 6 | 30 |
| Obst- und Beerenobst | 7 | 20 |
| Grünland | 8 | 20 |
| Komplexe Parzellenstruktur | 9 | 25 |
| Laubwälder | 10 | 20 |
| Mischwälder | 11 | 20 |
| Nadelwälder | 12 | 30 |
| Feuchtflächen | 13 | 100 |
| Wasserfläche See | 14 | 100 |
| Wasserfläche Fluss | 20 | 100 |

Die Fließgeschwindigkeit ergibt sich nach Manning-Strickler aus:

$$V = k * 0{,}01 * \sqrt{i}$$

- k: Rauigkeitsbeiwert nach Strickler [$m^{1/3}/s$]
- i: Gefälle [m/m].

Anschließend wird aus der Fließgeschwindigkeit die Fließzeit je Meter in Zehntelsekunden berechnet und diese Werte reklassifiziert, so dass sich ein Raster ergibt, das die Fließzeit des Oberflächenabflusses an jedem Pixel im Einzugsgebiet zum Pegel wiedergibt.

Da in dieser Arbeit der Fokus auf dem bei Sturzfluten relevanten Oberflächenabfluss liegen soll, wird das Fließzeitengrid des Oberflächenabflusses zugleich als Dummy für den Zwischenabfluss und die Tiefenperkolation angenommen. Hierbei handelt es sich um eine Vereinfachung, die zur Folge hat, dass die Abflussganglinien dieser Abflusskomponenten nicht naturgetreu abgebildet werden können. Sie werden daher im weiteren Verlauf auch nicht weiter betrachtet.

### 3.3.3 Niederschlag

In der Umgebung zu den untersuchten Einzugsgebieten der Gemeinden Nommern und Larochette befinden sich acht Pluviometer. An diesen acht auf Abbildung 3.3.3-1 dargestellten Stationen liegen stündliche Niederschlagssummen vor (ASTA, 2018a).

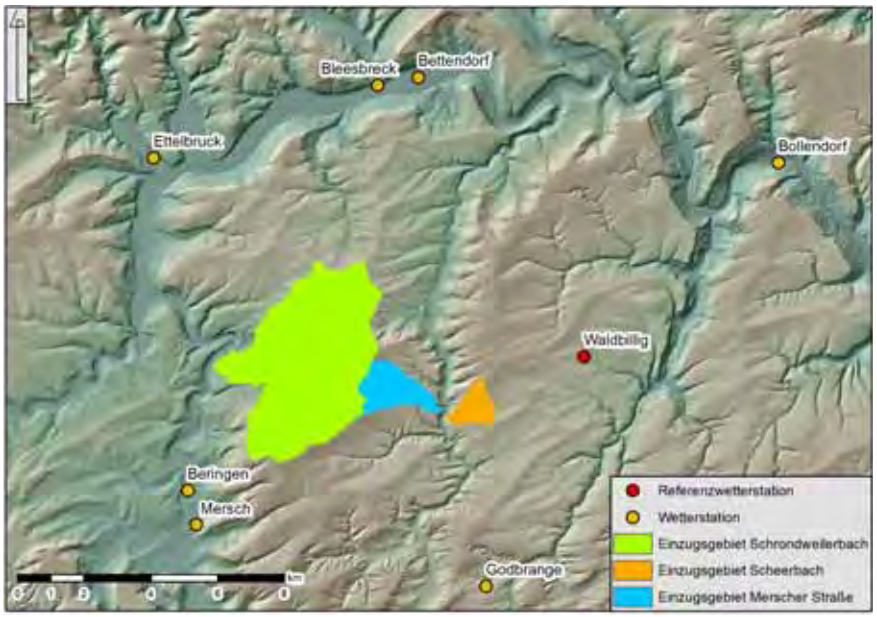



Abb. 3.3.3-1: Lage der Wetterstationen um die Einzugsgebiete

Die Station in Waldbillig dient als Referenz, da zum einen die Daten in einer höheren zeitlichen Auflösung, nämlich als 10-Minutenwerte vorliegen (ASTA, 2018b). Zum anderen befand sich diese Station im Zentrum der Gewitterzelle während der drei untersuchten Starkniederschlagsereignisse, so dass eine hohe Repräsentativität der Daten angenommen werden kann.

Um die räumliche Ausprägung der Niederschlagsereignisse möglichst genau abzubilden, wird das RW-Produkt mit stündlichen Niederschlagssummen des Niederschlagsradars RADOLAN (Radar-Online-Aneichung) des Deutschen Wetterdienstes genutzt. Die frei verfügbaren Radarbilder werden flächendeckend mit 17 Wetterradaren erstellt und an punktuell gemessenen Niederschlagssummen der Bodenstationen geeicht. Mit dem Radar werden die von den Hydrometeoren in der Atmosphäre reflektierten Signale gemessen, nicht aber der bodennahe Niederschlag direkt. Die Reflektivitätswerte müssen daher in Niederschlagswerte umgerechnet werden, indem sie anhand von Niederschlagsmessungen am Boden geeicht werden. Diese Methodik verbindet die Vorteile der hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung der Radardaten mit der Messgenauigkeit des Bodenmessnetzes. Die Bilder erstrecken sich nicht nur über die Bundesrepublik Deutschland, sondern über die Grenzen hinaus, wodurch das gesamte Großherzogtum Luxemburg mit abgedeckt wird. Das Radar, welches Luxemburg abdeckt, befindet sich 30 km nordöstlich von Larochette in Neuheilenbach (Faber *et al.*, 2018,

S. 9). Mit einer Auflösung von 1 x 1 km bilden die Daten selbst kleine Gewitterzellen sehr genau ab (DWD, 2019).

Die RW-Rasterdatensätze liegen in einer wenig geläufigen polarstereographischen Projektion vor, so dass die Daten zunächst in das in Luxemburg übliche LUREF (EPSG: 2169) -Referenzsystem umprojiziert werden müssen. Anschließend wird aus den stündlich vorliegenden Niederschlagssummenbildern die Niederschlagssumme für das gesamte Starkregenereignis berechnet, um die räumliche Ausprägung der Gewitterzellen widerzuspiegeln. Da die so berechneten Gesamtniederschlagssummen nicht mit den tatsächlich an der Referenzstation in Waldbillig gemessenen übereinstimmen, sondern bei allen drei Niederschlagsereignissen der tatsächliche Niederschlag unterschätzt wird, wird das erstellte Niederschlagsraster anhand der Niederschlagsmessungen an der Bodenstation nochmals geeicht. Danach wird aus dem Niederschlagssummenraster ein Wichtungsraster berechnet, wobei der Wert des Pixels, in dem die Referenzstation Waldbillig liegt, auf Grund der Eichung 100 % entspricht; alle anderen Pixelwerte berechnen sich verhältnismäßig zu diesem. In RoGeR wird eine Tabstopp separierte Textdatei mit den 10-minütlich vorliegenden Niederschlagswerten eingelesen und dann mittels des Wichtungsgrids für jeden Zeitschritt in räumlich verteilten Niederschlag umgerechnet.

Die Methode des Wichtungsrasters in Kombination mit einer numerischen Niederschlagsreihe in 10-Minutenschritten wurde gewählt, um eine möglichst hohe zeitliche Auflösung zu erreichen. RoGeR kann auch Niederschlagsraster für jeden Zeitschritt einlesen. Da die frei verfügbaren RADOLAN-Daten nur als Stundensummen vorliegen, wäre die zeitliche Auflösung allerdings um den Faktor 6 geringer als mit der gewählten Methode. Da die Gewitterzellen bei allen drei Starkniederschlagsereignissen zudem extrem stationär waren, kann von einer guten Abbildung der räumlich zeitlichen Verteilung der Niederschläge ausgegangen werden.

Um den minimalen, maximalen und mittleren Niederschlag, sowie das gesamte Niederschlagsvolumen in den Einzugsgebieten zu bemessen, wird das Radarbild des kumulierten Niederschlags mit einer Auflösung von 1 x 1 km auf eine Auflösung von 1 x 1 m resampled. Mit dem „Zonal Statistics“-Tool aus der Toolbox „Zonal“ der ArcGIS-Erweiterung „Spatial Analyst“ können je Einzugsgebiet die statistischen Kenngrößen ermittelt und sämtliche Pixelwerte im Einzugsgebiet aufaddiert werden, um die Volumen des Gebietsniederschlags zu berechnen. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um eine grobe Abschätzung handelt. Der Niederschlag ist räumlich kontinuierlich verteilt und wird durch die Erfassung und Darstellung in Pixelform als diskreter Wert wiedergegeben. Zwangsläufig kommt es durch die grobe Auflösung zu Fehlern.

## 3.4 Visualisierung des Oberflächenabflusses und hydraulische Modellierung

Da RoGeR anhand von Schadensmeldungen und dokumentierten Überschwemmungstiefen und -flächen validiert werden soll, muss der modellierte Oberflächenabfluss räumlich dargestellt werden.

Zur einfachen qualitativen Visualisierung des Oberflächenabflusses wird der beim gesamten Niederschlagsereignis gebildete Oberflächenabfluss, ausgegeben als „OA_Ges_total.flt“, mit einem Routingverfahren in SAGA-GIS dem Relief folgend zum Pegel geleitet. Zunächst werden hierfür das DGM aufbereitet und die im Landnutzungslayer eingepflegten Gebäude implementiert. Hierzu wird die Geländehöhe an bebauten Stellen um 5 m angehoben, so dass die Häuser im Routingverfahren als Hindernisse erscheinen und das abfließende Wasser herumgeleitet werden muss. Anschließend wird das um Gebäude angereicherte DGM in SAGA-GIS geladen und das Tool „Sink Drainage Route Tool“ der Terrain Analysis-Preprocessing Toolbox darauf angewandt, um im weiteren Verlauf Probleme mit in Senken endenden Strömen zu vermeiden. Abschließend wird das DGM, das Sinkdirectionsraster und der gesamt gebildete Oberflächenabfluss als Wichtungsgrid im Tool „Catchment Area (Parallel) der Terrain Analysis-Hydrology Toolbox verarbeitet. Das Resultat ist ein Raster mit den kumulierten Oberflächenabflussvolumen, die im Laufe des Routings über jeden einzelnen Pixel geflossen sind. Nach einer Klassifizierung der Ergebnisse lassen sich so qualitative Aussagen darüber treffen, wo und in welche Richtung besonders viel Abfluss geflossen ist. Da es sich um kumulierte Summen handelt, lassen sich die Werte nur bedingt quantitativ interpretieren.

Eine genauere hydraulische Modellierung der abfließenden Wassermengen erfolgt mit den RoGeR Varianten „RoGeR Flow“ und „RoGeR dynamo“.
RoGeR Flow kann als Erweiterung des NA-Modells RoGeR angesehen werden. Zunächst wird RoGeR durchlaufen gelassen. Dabei wird für jeden Zeitschritt eine Rasterdatei mit dem zu dem Zeitpunkt gebildeten Oberflächenabfluss ausgegeben. Diese Dateien werden in RoGeR Flow für jeden Zeitschritt anhand des DGMs und der Fließrichtung entlang des Reliefs geroutet. Das Modell gibt einem zeitschrittbasiert die aktuelle Wassertiefe, sowie abschließend die maximale beim Durchlauf ermittelte Wassertiefe aus. Diese Wassertiefen können dann mit den Schadensmeldungen und Beobachtungen der Überschwemmungen abgeglichen werden. Zu beachten ist, dass bei diesem Modell keine Reinfiltrationsprozesse des Oberflächenabflusses berücksichtigt werden.

RoGeR dynamo stellt ein kombiniertes dynamisches Modell dar, in dem die NA-Modellierung der Basisversion von RoGeR um eine 2D-hydraulische Modellierung ergänzt wird. Es berechnet für jeden Zeitschritt die Abflussbildung und routet zugleich den Oberflächenabfluss entlang des Reliefs. Dabei werden jeweils alle im Modell implementierten Prozesse durchgerechnet. Durch das gleichzeitige Quantifizieren der Abflusskomponenten und das Routing des Abflusses kann auch die Reinfiltration von Oberflächenabfluss berücksichtigt werden. Auch das dynamische Modell gibt je Zeitschritt die Wassertiefe und abschließend die maximale Wassertiefe aus.

## 3.5 Rekonstruktion der Überschwemmungen

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Rekonstruktion der Überschwemmungen anhand von Kartierungen des Autors, Fotos und Videos, Einsatzdaten, Augenzeugenberichten und Messungen im Gelände.

Die Einsatzdaten der Einsatzleitstelle der Feuerwehr wurden dem Autor nach der Freigabe des damaligen Chefs der Leitstelle Lieutenant-Colonel Christopher Schuh vom Datenpfleger Bartosz Chylinski freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Die Daten werden zunächst in RStudio gefiltert, um alle Einsätze zu extrahieren, die mit den Überschwemmungen zu tun haben. Im Einsatzleitsystem werden alle Notrufe des Landes mit allen nötigen Informationen zur Art des Notfalls, der vorgefundenen Lage und der Adresse eingegeben und je nach Art und Umfang die benötigten Rettungskräfte alarmiert. Die Leitstelle stellte die Rohdaten vom 22.-26. Juli 2016, sowie vom 01.-13. Juni 2018 zur Verfügung, was 10.342 Einträgen mit Informationen in 32 Spalten, beziehungsweise 43.105 Einträgen entspricht. Herausgefiltert werden alle Übungen, Infomeldungen, Tests und weitere in diesem Kontext nicht benötigten Alarmierungen. Anschließend werden alle technischen Einsätze und solche, die unter „Diverses“ eingeordnet sind, extrahiert. Das Auslesen der Einsatzstichwörter, Codes, die Aufschluss über die Art des Einsatzes geben, bestätigt, dass nur mehr Einsätze zurückbehalten wurden, die höchstwahrscheinlich einen Bezug zu den Überschwemmungen haben. „T1“ fasst kleinere technische Einsätze, wie das Auspumpen überschwemmter Keller zusammen. „G1“ und „G2“ stehen für Gefahrgutunfälle der Kategorie 1 und 2 und sind beispielsweise auf auslaufendes Heizöl durch Aufschwemmen und anschließendes Umkippen eines Heizöltanks zurückzuführen. Die abschließende Bestätigung, dass es sich bei den herausgefilterten Einsätzen auch tatsächlich um überschwemmungsbezogene handelt, erfolgt durch Verorten der Einsätze im GIS. Einsätze im Großraum der bekannten Katastrophengebiete werden als überschwemmungsbedingt angesehen. Der als „EINSATZ_INFO“ in den Einsatzdaten hinter-

legte Sachverhalt ermöglicht es, nach der Georeferenzierung das Lagebild punktuell zu verfeinern.

Der Datenexport enthält sämtliche im Einsatzleitsystem dokumentierten Einsätze mit kritischen Details, wie Adresse, Koordinaten, alarmierte Einsatzmittel und vorgefundene Lage. Aus Datenschutzgründen sind auf der beiliegenden Daten-DVD selbstverständlich nur geschwärzte Daten abgespeichert, die aber zusammen mit dem beigefügten Skript lauffähig sind.

Der maximale Wasserstand war im Gelände direkt nach den Überschwemmungen durch Geschwemmsellinien und niedergedrückte Feldfrüchte gut sichtbar. Durch Abschreiten der Distanz bis hin zum eigentlichen Gerinnebett konnte die Ausdehnung zu beiden Seiten der Wasserläufe im Feld erfasst werden. In ArcGIS wurden die Flächen zunächst als Polygone digitalisiert. Da diese Flächen aber über keine Höheninformation verfügen, kann nicht ohne weiteres eine Differenz zum darunterliegenden DMG berechnet werden, um die Wassertiefe zu bestimmen. Daher wurde eine Methode entwickelt, um auch ein in der Z-Achse, also in der Höhe, verortetes Polygon zu erstellen. Abbildung 3.5-1 stellt die einzelnen Schritte dieser Methode dar. Zunächst werden die Polygone der Überschwemmungsflächen (a) in Linien-Features umgewandelt (b) und daraus Punkte im Abstand von 5 m generiert. Das „Extract Values to Points“-Tool wird genutzt, um die Höheninformation des DGMs auf die Punkte zu übertragen (c). Mit Hilfe einer Inverse-Distance-Weighted-Interpolation zwischen den Punkten kann ein höhenreferenziertes Polygon der Wasserfläche berechnet werden, welches dem natürlichen Gefälle des Gerinnes folgt (d). Die Differenz zwischen diesem und dem darunterliegenden DGM ergibt die Wassertiefe (e).

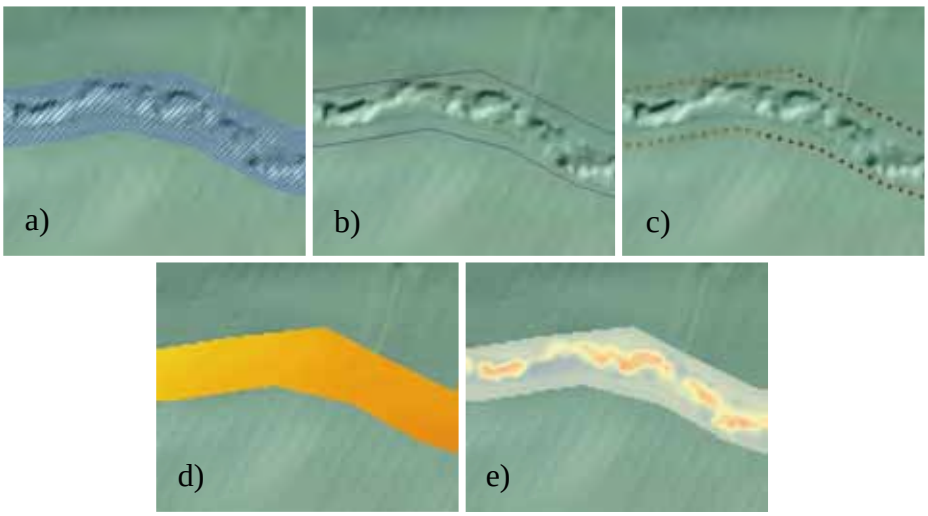



Abb. 3.5-1: Berechnung der Wassertiefe

Punktuell gemessene Wassertiefen, beispielsweise in Kellern oder an Hauswänden, dienen der Validierung der Berechnung.

Die rekonstruierten Wassertiefen und Überschwemmungsflächen ermöglichen eine Berechnung des Spitzenabflusses mit Hilfe der Gauckler-Manning-Strickler-Fließformel (GMS-Formel) und der Querschnittsfläche der überschwemmten Fläche. Zunächst wird mit der Gauckler-Manning-Strickler-Fließformel die mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers berechnet:

$$v_m = k_{St} * R^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}}$$

- $v_m$: mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
- $k_{St}$: Rauigkeitsbeiwert nach Strickler [$m^{1/3}/s$]
- R: hydraulischer Radius [m]
- I: Fließgefälle [m/m].

Anschließend kann aus der mittleren Fließgeschwindigkeit und der Querschnittsfläche der Überschwemmungsfläche der Abfluss berechnet werden:

$$Q = v_m * A$$

- Q: Abfluss [$m^3/s$]
- $v_m$: mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
- A: Querschnittsfläche [$m^2$].

Der berechnete Abfluss wird genutzt, um die mit RoGeR modellierten Spitzenabflüsse auf ihre Plausibilität zu prüfen (Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2002, S. 20).

# 4 Beschreibung der Einzugsgebiete

Abb. 4-1: Lage der Einzugsgebiete

Die drei Einzugsgebiete Schrondweilerbach, Merscher Straße und Scheerbach befinden sich im Zentrum des Großherzogtums Luxemburg am westlichen Rand der Region Müllerthal und wurden mit Hilfe des Catchment-Tools und der Fließrichtung aus dem zur Verfügung stehenden DGM abgeleitet.

Das Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs umfasst mit seiner Größe von 17,8 km$^2$ einen Großteil der Fläche der Gemeinde Nommern.

Da es bei den Starkregenereignissen zu Schadensmeldungen in der Merscher Straße in Larochette kam, wurde auch um diese ein virtuelles 2,3 km$^2$ großes Einzugsgebiet bestimmt.

Ein perennierendes oder intermittierendes Gerinne gibt es in dem Tal, das die Merscher Straße hochführt, eigentlich nicht.

Das 1,1 km$^2$ große Einzugsgebiet des Scheerbachs liegt zum Großteil auf dem Gemeindegebiet der Gemeinde Heffingen und mündet in der Ortschaft Larochette.

Das Klima in Luxemburg, und damit auch in den Einzugsgebieten, ist gemäßigt mit einer mittleren Temperatur von 0,2°C im Januar und 18,2°C im Juli. Die über das Jahr gemittelte Temperatur beträgt 9,3°C. Die geringsten Monatsniederschläge sind im April zu verzeichnen (58,2 mm), die höchsten im Oktober (86,8 mm) („Meteolux.lu Normales et extrêmes“, 2019). Die Hauptwindrichtung ist Westsüdwest und Südwest, weshalb atlantische Meereswinde das Klima prägen. Wind aus nordöstlicher Richtung ist ebenfalls nicht unüblich („Windstatistiken Luxemburg“, 2019). Der jährliche Niederschlag bemisst sich auf 896,9 mm. Im Sommer sorgen konvektive Niederschläge und Gewitter für erhöhten Niederschlag, während im Herbst und Winter advektive Niederschläge überwiegen. Hohe Niederschlagsintensitäten kommen nur in 0,9 % aller Niederschlagsereignisse vor. 85 % der Niederschlagsereignisse weisen eine geringere Intensität als 10 mm/h auf (Kooijman *et al.*, 2018, S. 179).

Alle drei ländlich geprägten Einzugsgebiete sollen im Folgenden im Hinblick auf die Gebietseigenschaften kurz vorgestellt werden.

## 4.1 Schrondweilerbach

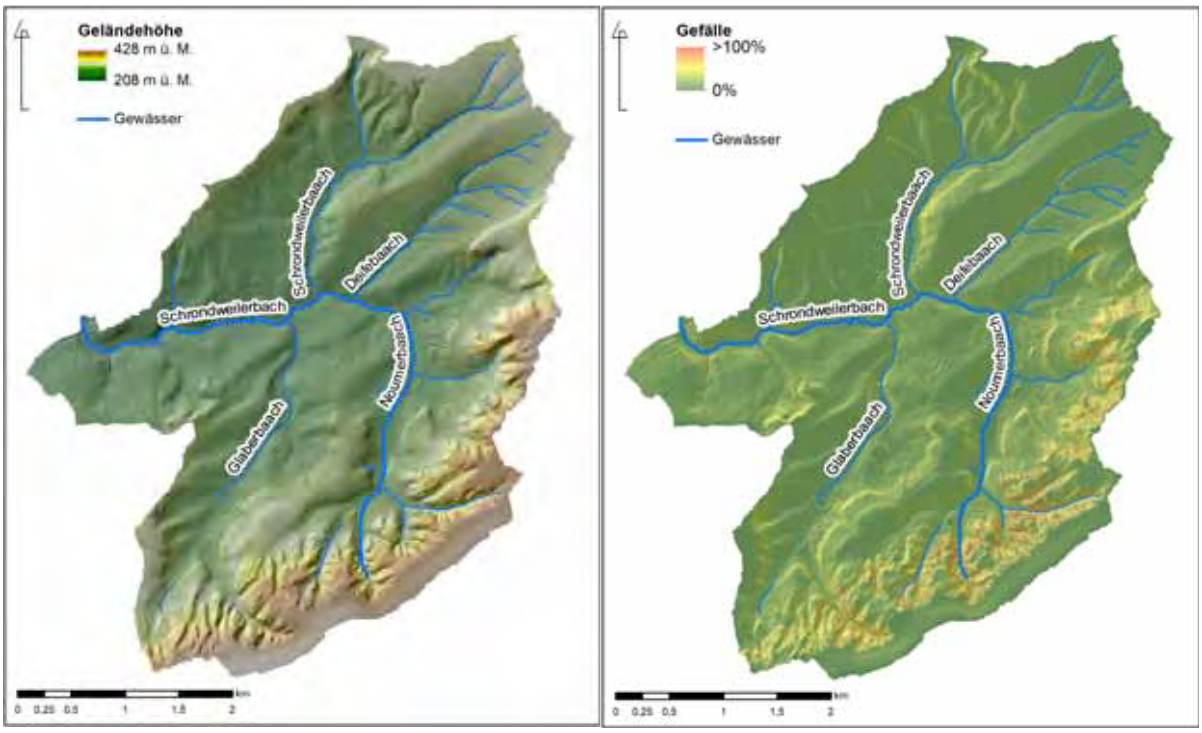



Abb. 4.1-1: Geländehöhe und Gefälle des Einzugsgebiets Schrondweilerbach

Das Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs wird durch die flachen Kuppen des Mittleren Keupers und die steilen Abbruchkanten des Unteren Lias am südlichen und südöstlichen Rand geprägt. Die höchste Stelle im Einzugsgebiet liegt 428 m über dem Meerespiegel (Referenzpegel Amsterdam des LUREF-Koordinatensystems (Administration du cadastre et de la topographie, o. J.)), die tiefste Stelle am Auslass in Cruchten liegt auf 208 m ü. M.. Die Höhendifferenz beträgt 220 m. Die größten Hangneigungen finden sich an den Felswänden des Luxemburger Sandsteins. Das mittlere Gefälle im Einzugsgebiet beträgt 15 %.

Der Nommernbach, oder auf luxemburgisch „*Noumerbaach*“, entspringt am Hang des Luxemburger Sandsteins, fließt dann Richtung Norden und dreht hinter der Ortschaft Nommern nach Westen ein. Neben ein paar Rinnsalen fließt der Deifebach kurz vor der Ortschaft Schrondweiler in den Nommernbach. In Schrondweiler mündet der Nommernbach in den Schrondweilerbach, der aus dem nördlichen Teil des Einzugsgebiets kommt. Kurz hinter Schrondweiler mündet der Glaberbach in den Schrondweilerbach, der in Cruchten in die Alzette mündet. Von Nommern bis Cruchten wird auf 6,5 km Länge eine Höhendifferenz von etwa 80 m überwunden. Das Flussbett des Schrondweilerbachs ist größtenteils naturbelassen, 2-3 m

breit und führt etwa knietief Wasser. An ein paar Stellen fließt der Bach in einem gemauerten Bett. An diesen Stellen führte früher die Bahnlinie der längst verschwundenen historischen Schmalspurbahn, genannt „*Jhangeli*“, besonders nah am Ufer vorbei, so dass dieses befestigt werden musste, um Rutschungen zu verhindern. Es gibt keinen Messpegel am Schrondweilerbach, der als Referenz genutzt werden könnte. In der Nähe von Ettelbrück fließt die Alzette in die Sauer, die wiederum bei Wasserbillig in die Mosel entwässert. Der Großteil des Gewässernetzes des Landes gehört zum Einzugsgebiet der Sauer, die ein wichtiges Teileinzugsgebiet der Mosel, und damit auch des Rheins, darstellt (Pfister *et al*., 2004, S. 136).

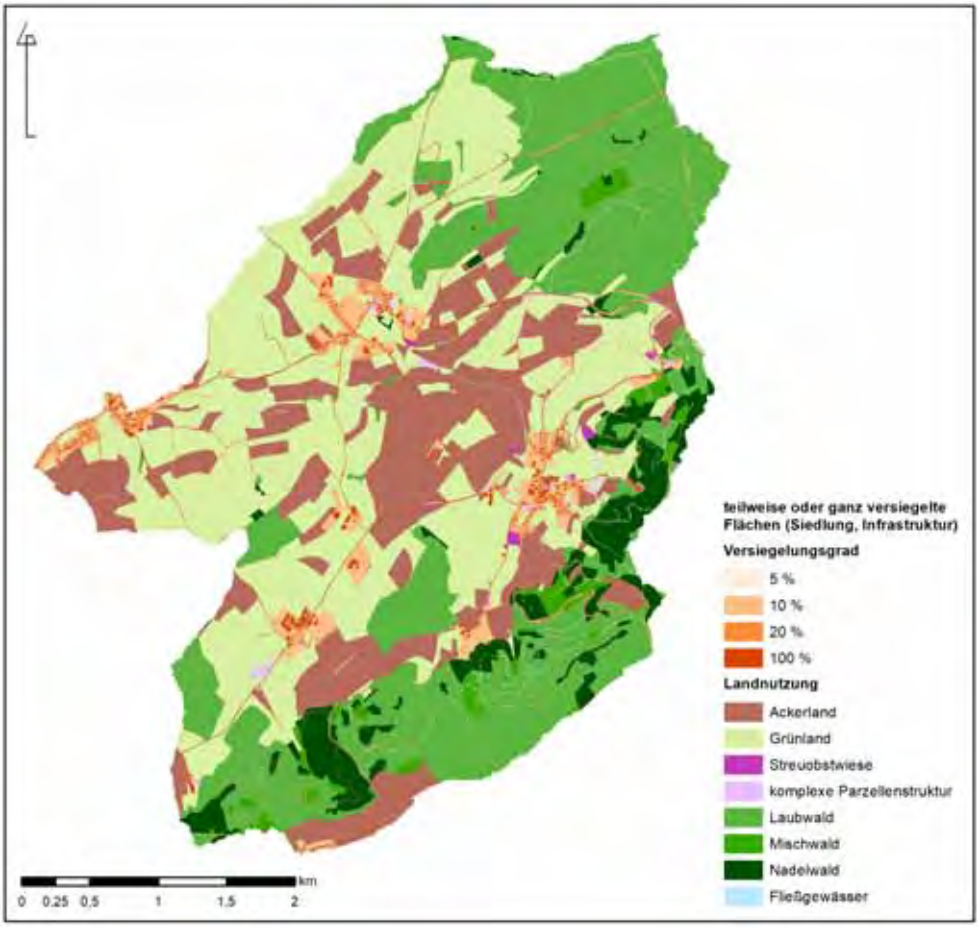



Abb. 4.1-2: Landnutzung und Versiegelungsgrad im Einzugsgebiet Schrondweilerbach

Landwirtschaftlich genutzte Flächen prägen das Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs. Rund 20 % der Flächen entfallen auf Ackerland, 35 % auf Grünland. Laubwälder sind mit 30 % die bedeutendste Waldart. Mischwälder gibt es auf 2 % der Fläche, Nadelwälder auf 6 %. 7 % der Fläche sind teilweise bis vollständig versiegelt. Hierunter fallen Siedlungsflächen mit ihren Häusern und Infrastrukturflächen wie Verkehrswege. Häuser und geteerte Straßen gelten als vollständig versiegelte Flächen. Befestigte Feldwege weisen einen Versiegelungsgrad von 20 % auf. Unbefestigte Wege wie Forst- und Wanderwege sind zu 5 % versiegelt. Für Siedlungsflächen abzüglich der Häuser, wie Spielplätze und Gärten wird ein Versiegelungsgrad

von 10 % angenommen, um versiegelnd wirkende Strukturen wie Gartenhäuschen und Terrassen zu berücksichtigen.

Streuobstwiesen, sogenannte komplexe Parzellenstrukturen und Fließgewässer stellen nur Promilleanteile der Fläche dar.

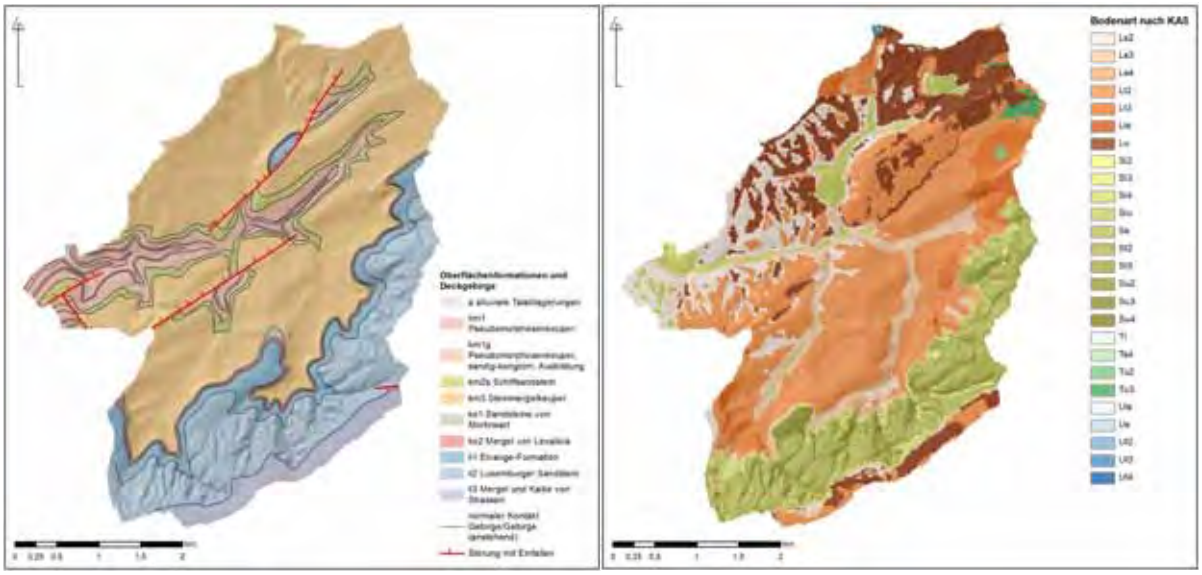



Abb. 4.1-3: Geologie und Pedologie des Einzugsgebiets Schrondweilerbach

Das Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs befindet sich am Rande einer Schichtstufe. Zwei Hauptgesteinsformationen prägen das Gebiet, nämlich der Mittlere Keuper mit seinen Unterteilungen in Pseudomorphosenkeuper (km1), Pseudomorphosenkeuper mit sandig-konglomeratiger Ausprägung (km1g), Schilfsandstein (km2s) und Steinmergelkeuper (km3), sowie der Untere Lias, der in die Elvange-Formation (li1), den Luxemburger Sandstein (li2) und die Mergel und Kalke von Strassen (li3) unterteilt wird. Die prädominierenden Schichten des Steinmergelkeupers bestehen aus horizontal geschichteten, bunten Mergeln mit dünnen, maximal 5 cm starken Dolomitschichten. Die Gesamtmächtigkeit des km3 beträgt 40-60 m. Oberflächennahe, verwitterte Schichten weisen eine schwere Textur auf und enthalten 50-60 % Ton (Kooijman *et al*., 2018, S. 179). Durch den hohen Tongehalt sind die Schichten nur wenig bis sehr wenig durchlässig (Faber *et al*., 2018, S. 7). Der Luxemburger Sandstein besteht aus gut sortierten, gerundeten, kalkverkitteten Quarzkörnern mit vereinzelten Toneinlagerungen. Vereinzelt tritt eine Konglomeratfazies aus sandigen Schichten mit Kieseln und Brekzien auf. In den oberen Metern ist das Karbonat der Sandsteinmatrix zumeist ausgewaschen, so dass ein sehr poröses Gestein mit geringem pH (< 4) zurückgeblieben ist (Kooijman *et al*., 2018, S. 110). Der Luxemburger Sandstein ist 60-80 m mächtig (Kooijman *et al*., 2018, S. 5) und steht in den Nommerlayen als 10-20 m hohe Felswände an. Er bildet mit der liegenden Elvange-Formation die Schichtstufe zum Keuper. Durch den Wechsel der Wasserleitfähigkeit der

Gesteinsschichten entspringen an der Schichtstufe mehrere Quellen, die zur Trinkwasserproduktion gefasst werden.

Auf dem Keuper haben sich schwere Lehme mit verschiedenen Ausprägungen von sandig über schluffig zu tonig ausgebildet. Wegen des hohen Tonanteils neigen die Böden zu starkem Quellen und Schrumpfen. Charakteristisch ist ein abrupter Texturwechsel zwischen Ober- und Unterboden. Dieser fördert die Entstehung von Zwischenabfluss, wodurch Tonminerale hangabwärts an der Schicht zwischen schluffigem Oberboden und tonigem Unterboden verlagert werden. Die Böden weisen einen hohen Anteil an Makroporen auf, auf Grund ausgeprägter Quell- und Schrumpfprozesse sowie Bioturbation (Kooijman *et al*., 2018, S. 177). Die Böden auf Keuper werden im Einzugsgebiet vor allem landwirtschaftlich als Wiesen und Weiden sowie als Äcker genutzt. Im nordöstlichen Teil des Einzugsgebiets kommen Wälder auf diesen Böden vor. Entlang der Bachläufe lassen sich sandigere Lehme feststellen, die auf den Eintrag von erodiertem Material des Luxemburger Sandsteins zurückzuführen sind (Faber *et al*., 2018, S. 7).

Auf dem Luxemburger Sandstein sind sandige Böden mit nur wenig biologischer Aktivität, insbesondere unter Buchenbeständen, entstanden (Kooijman *et al*., 2018, S. 35). Die Böden sind auf Grund des groben Substrats sehr pöros und können entsprechend viel Wasser aufnehmen. Stellenweise sind die Böden jedoch flachgründig und können nur wenig Wasser aufnehmen. Zudem kommen tonige Zwischenhorizonte vor, die die Wasserleitfähigkeit stark einschränken (Faber *et al*., 2018, S. 7). Nach Kooijman (2018, S. 35) stellte Jungerius 1980 fest, dass besonders unter Buchenbeständen häufig in 50-70 cm Tiefe eine besonders kompakte Schicht, genannt „*fragipan*“, auftritt. Diese verhindert das Tiefenwachstum der Wurzeln und wirkt zugleich als Stauschicht. Die Ursache dieser Schicht ist bislang unbekannt, allerdings fördert sie die Entstehung von Zwischenabfluss und Sättigungsflächenabfluss. Die Böden des Luxemburger Sandsteins sind im Einzugsgebiet ausnahmslos bewaldet.

Am südöstlichen Rand des Einzugsgebiets stehen die Mergel und Kalke von Strassen an. Auf diesen haben sich ebenfalls schwere lehmige Böden mit geringer Durchlässigkeit entwickelt. Wasser infiltriert nur langsam, und es kann zur Bildung von Sättigungsflächenabfluss kommen (Faber *et al*., 2018, S. 7).

## 4.2 Merscher Straße

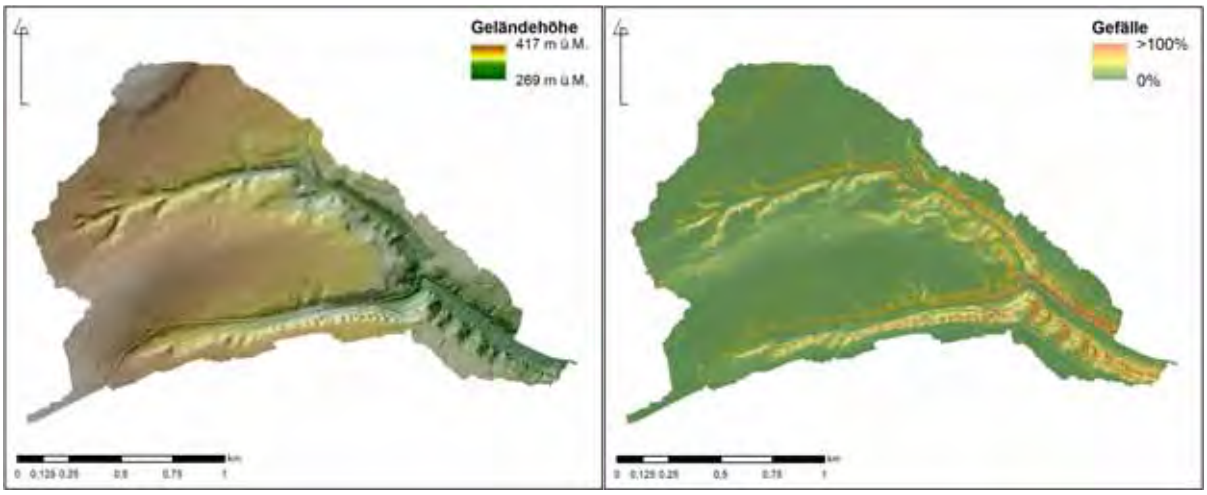



Abb. 4.2-1: Geländehöhe und Gefälle des Einzugsgebiets Merscher Straße

Das virtuelle Einzugsgebiet Merscher Straße erstreckt sich auf 2,3 km$^2$ auf einer Höhe zwischen 269 m ü. M. im Ortskern von Larochette am östlichen Ende und 417 m ü. M. am nördlichen und südwestlichen Rand. Die Höhendifferenz beträgt somit 148 m. Kurz hinter den letzten Häusern teilt sich das Tal in zwei Seitentäler auf. Durch beide Täler führt eine Straße hoch, die nördliche führt nach Schrondweiler, die südliche ist namensgebend für die Straße innerorts und führt nach Mersch. Zwischen beiden Tälern befindet sich ein schwach ausgeprägter Rücken, der leicht nach Osten und jeweils zu den Tälern einfällt. Im Bereich der Ortschaft fällt das Gelände stark ein. Auch stehen hier 10-15 m hohe Felswände des Luxemburger Sandsteins an. Das mittlere Gefälle beträgt 16 %.

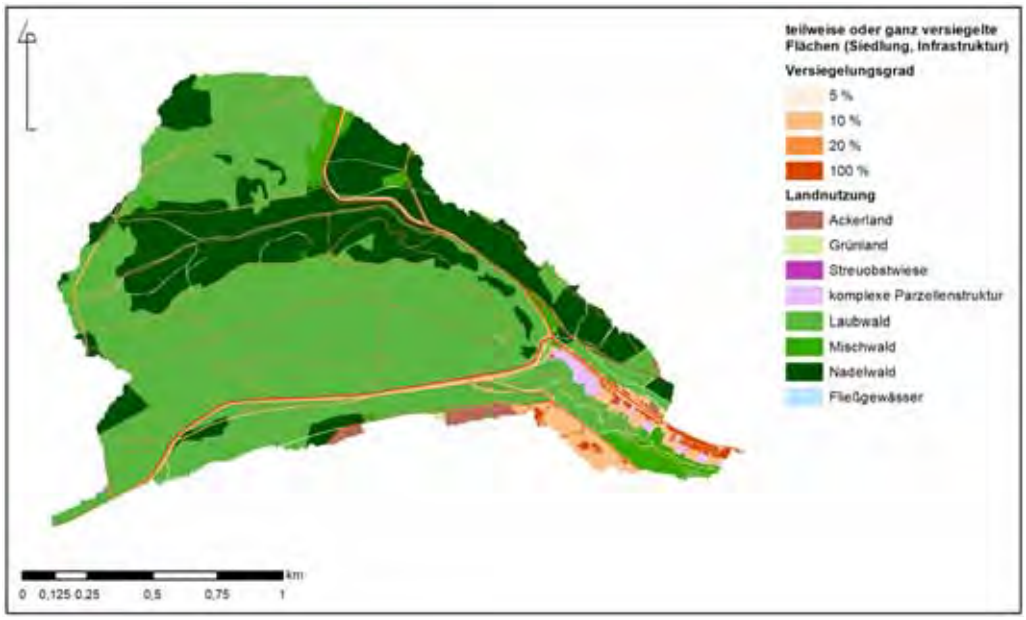



Abb. 4.2-2: Landnutzung und Versiegelungsgrad im Einzugsgebiet Merscher Straße

Das Einzugsgebiet ist nahezu vollständig bewaldet. Insgesamt macht Wald 88 % der Fläche aus. 59 % entfallen auf Laubwald, 3 % auf Mischwald und 26 % auf Nadelwald. Ackerland und

komplexe Parzellenstrukuren stellen jeweils 1 % der Landoberfläche im Gebiet dar. 10 % der Fläche ist bebautes Gebiet.

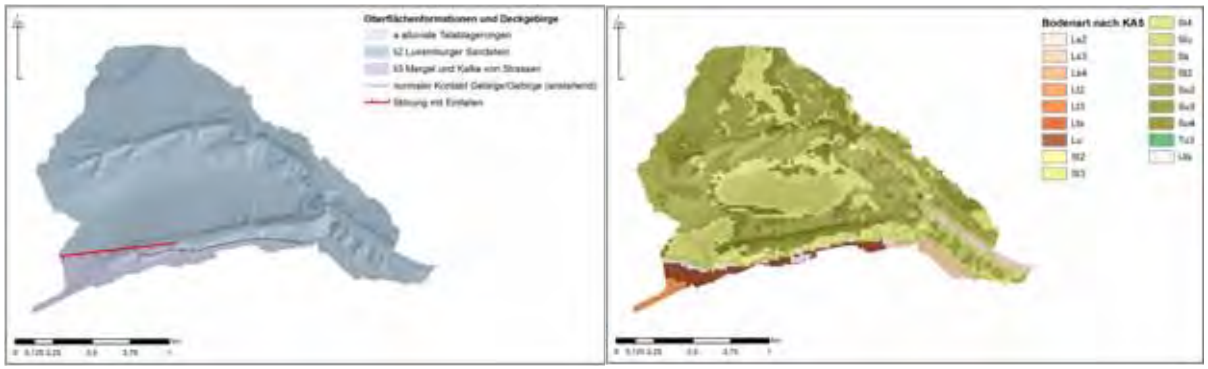



Abb. 4.2-3: Geologie und Pedologie des Einzugsgebiets Merscher Straße

Die Gesteine des Unteren Lias mit den Schichten des Luxemburger Sandsteins (li2) und den Mergeln und Kalken von Strassen (li3) charakterisieren das Einzugsgebiet. Am Auslass am südöstlichen Ende des Einzugsgebiets kommen alluviale Talablagerungen auf Grund der Weißen Ernz, die durch den Ort führt, vor.

Die Böden im Einzugsgebiet sind, bedingt durch das sandige Ausgangssubstrat, schluffige bis lehmige Sande mit hohen Porenvolumen, aber sehr variablen Tiefen. Diese reichen von einigen Zentimetern bis zu 125 cm. Am südlichen Rand des Einzugsgebiets stehen die Mergel und Kalke von Strassen an. Auf diesen haben sich schwere lehmige Böden mit geringer Durchlässigkeit entwickelt.

## 4.3 Scheerbach

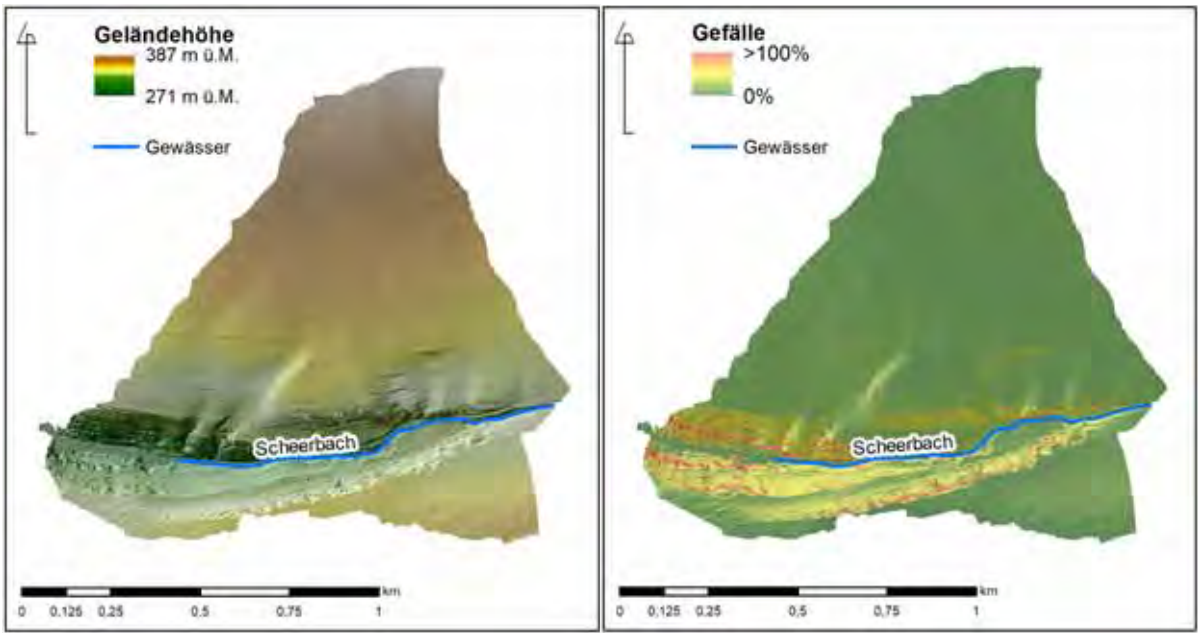



Abb. 4.3-1: Geländehöhe und Gefälle des Einzugsgebiets Scheerbach

Das Einzugsgebiet Scheerbach umfasst 1,1 km$^2$. Der mit 271 m ü. M. tiefste Punkt liegt am Auslass in der Ortschaft Larochette. Die höchste Stelle liegt auf 387 m ü. M. auf dem Plateau am nördlichen Rand des Einzugsgebiets, so dass die Höhendifferenz 116 m beträgt. Mit einem mittleren Gefälle von 15 % ist das Einzugsgebiet vergleichbar zu den beiden anderen. Von Osten nach Westen weitet sich das Tal des Scheerbachs, zugleich wird es aber immer steiler mit Felswänden im Bereich der Ortschaft. Nördlich über dem Scheerbach breitet sich ein flaches Plateau aus.

Der intermittierende Scheerbach wird kurz vor den ersten Häusern verdolt und fließt weiter unten im Ort in die Weiße Ernz. Diese wiederum fließt in Reisdorf in die Sauer („Geoportail.lu Thema: Wasser“, o. J.).

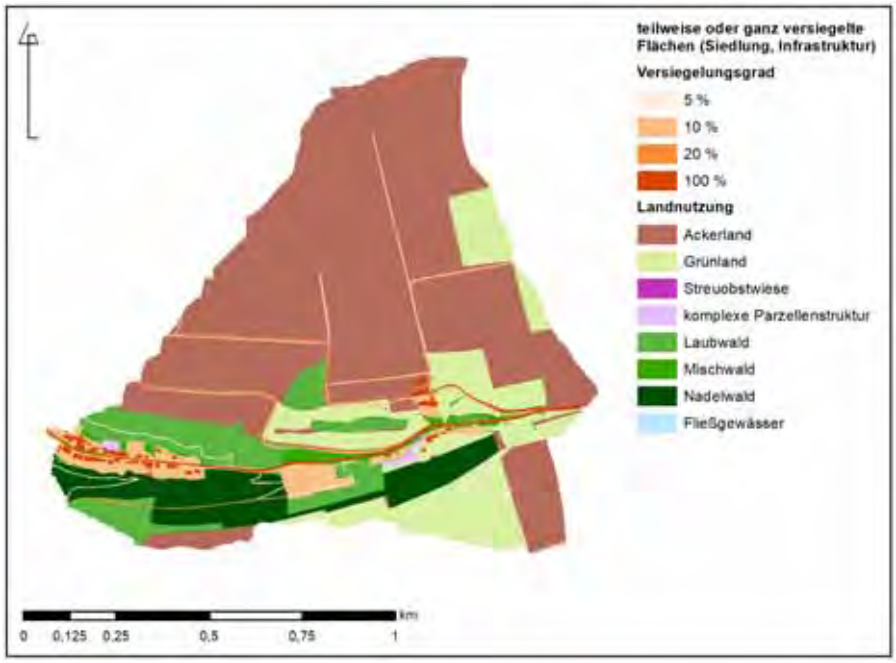



Abb. 4.3-2: Landnutzung und Versiegelungsgrad im Einzugsgebiet Scheerbach

Das Einzugsgebiet des Scheerbachs ist zu drei Viertel landwirtschaftlich geprägt. 57 % sind Ackerland, 16 % Grünland. Das steile Scheerbachtal ist größtenteils bewaldet. 9 % sind Laubwald, 1 % Mischwald und 8 % entfallen auf Nadelwald. 8 % der Flächen stellen versiegelte und teilversiegelte Flächen wie Bebauung und Verkehrswege dar. Insgesamt 1 % der Fläche entfällt auf Streuobstwiesen, komplexe Parzellenstrukturen und Fließgewässer.

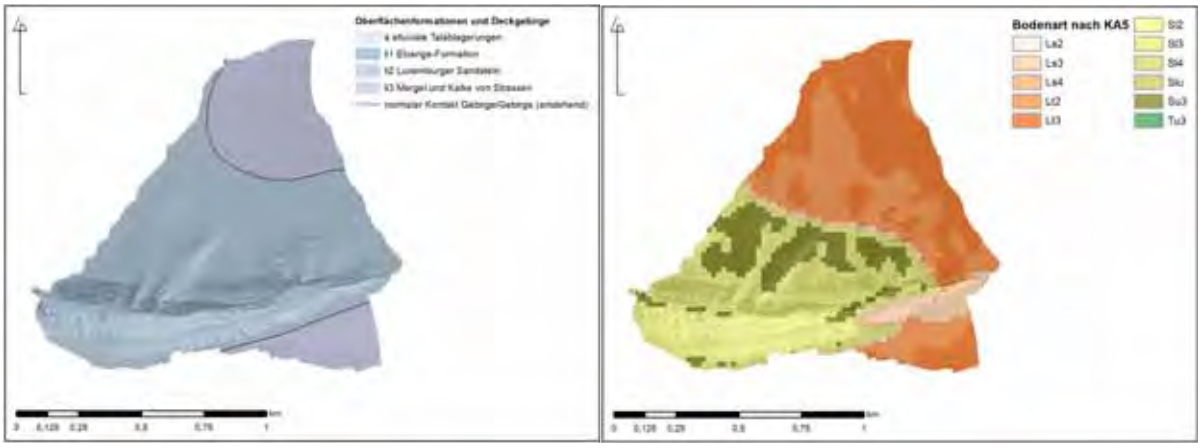



Abb. 4.3-3: Geologie und Pedologie des Einzugsgebiets Scheerbach

Das Einzugsgebiet ist geprägt durch die Geologie des Unteren Lias. Der Luxemburger Sandstein kommt im Scheerbachtal und am südlichen Rand des Plateaus vor. Weiter nördlich und am südöstlichen Rand des Einzugsgebiets stehen die Mergel und Kalke von Strassen an. Kurz vor dem Auslass im Ort kommen die Elvange-Formation und alluviale Talablagerungen vor.

Auf dem Luxemburger Sandstein sind Sandböden entstanden, die teilweise schwach lehmig ausgeprägt sind. Aus den Mergeln und Kalken haben sich bunte Lehme mit verschiedenen Korngrößenfraktionen von lehmigem Schluff bis sandigem Lehm (Ls2), über schwach sandigem Lehm bis sandigem Lehm (Ls3) zu sandigem Lehm (Ls4) entwickelt. Auch schwach sandiger Lehm (Lt2) und schwach toniger Lehm (Lt3) kommen vor. Man erkennt, dass sich die weichen Lehmböden durch Hangkriechen und Quell- und Schrumpfprozesse hangabwärts über das eigentliche Ausgangssubstrat hinweg bewegt haben.

# 5 Beschreibung der Niederschlagsereignisse

Im Rahmen dieser Arbeit soll nachvollzogen werden, ob RoGeR in der Lage ist, die Überschwemmungen in den drei vorgestellten Einzugsgebieten bei drei Starkregenereignissen zu reproduzieren. Im Folgenden sollen die Niederschlagsereignisse des 22. Juli 2016, des 1. Juni 2018 und des 9. Juni 2018 vorgestellt werden.

Beim Ereignis im Juli 2016 kam es in allen drei Einzugsgebieten zu erheblichen Schäden. Trotz noch höherer Niederschlagssummen beim Gewitter des 1. Juni 2018 kam es in den drei Einzugsgebieten zu deutlich geringeren Schäden. Das Ereignis des 9. Juni 2018 dient als Nullprobe. In keinem der Einzugsgebiete kam es zu Schadensmeldungen. Es sei allerdings erwähnt, dass es bei beiden Starkniederschlagsereignissen im Juni 2018 zu erheblichen Schäden in der Region um Waldbillig und Müllerthal kam, also nur etwa 5 km weiter östlich von Larochette.

## 5.1 Starkregenereignis des 22. Juli 2016

Die Niederschläge im Frühjahr 2016 lagen über dem langjährigen Mittel. Zwar war der März relativ trocken, doch hat es im April außergewöhnlich viel geregnet. In der ersten Maihälfte war es hingegen wieder sehr trocken. Die zweite Hälfte war geprägt durch starke und intensive Niederschläge. Auch im Juni und Juli setzte sich dieser Trend fort, so dass 70 %, bzw. 100 % mehr Niederschläge registriert wurden als in der Referenzperiode von 1981-2010. Entsprechend waren die Böden stark wassergesättigt zu Beginn des Starkregenereignisses des 22. Juli 2016. Instabile Luftmassen bewegten sich bereits die Tage vor dem verheerenden Ereignis über Luxemburg und führten immer wieder zu Gewittern.

Am 22. Juli zogen instabile, feuchte Luftmassen über die Großregion, wodurch es den ganzen Tag über zu kräftigen Gewittern mit hoher Blitzaktivität kam (Faber *et al.*, 2018, S. 14 f.). Die hohen Temperaturen zwischen 27 und 28°C begünstigten die Entstehung starker konvektiver Zellen (Mathias, 2017, S. 3). Durch sehr geringe Windgeschwindigkeiten in der oberen Troposphäre zogen die Gewitterzellen nur langsam voran. In Kombination mit orographischen Effekten führte dies dazu, dass es lokal innerhalb kürzester Zeit zu extremen Niederschlägen kam (Faber *et al.*, 2018, S. 15; Mathias, 2017, S. 4).

Zwischen 18:30 und 19:00 bildete sich nördlich von Vianden an der deutschen Grenze eine Gewitterzelle und zog nach Westen in das Landesinnere (a). Nahe Fouhren und Longsdorf bildete sich gegen 19:30 eine zweite Zelle. Zur gleichen Zeit bildete sich über Larochette eine dritte Konvektionszelle (b). Die Zellen verhielten sich quasi-stationär, wurden größer und vereinigten sich gegen 20:00 und 20:15, so dass sich um 20:20 eine große Gewitterzelle von Larochette über Nommern und Medernach bis nach Longsdorf erstreckte (c). Zudem

entwickelte sich bei Echternach eine weitere Zelle (d), die nach Westen zog und mit der quasi-stationären Zelle über Larochette zusammenstieß (e). Eine knappe Stunde später löste sich das Gewitter auf und die Regenfälle endeten (f). Durch die sehr hohen Niederschlagsintensitäten und das quasi-stationäre Verhalten der Gewitterzelle, was zu langandauernden Regenfällen an gleicher Stelle führte, kamen extreme Niederschlagsmengen in den untersuchten Einzugsgebieten zusammen (Mathias, 2017, S. 6).

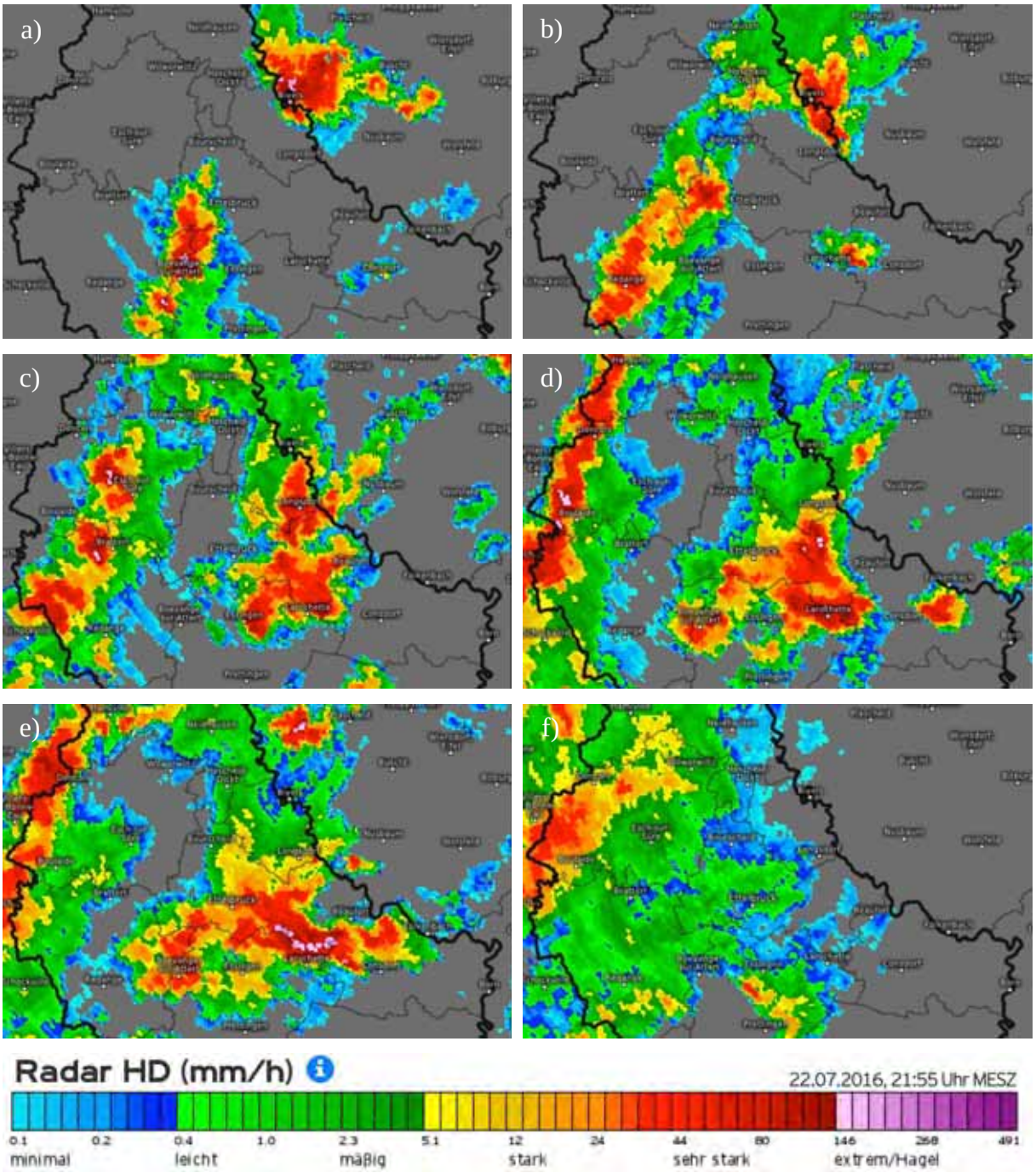



Abb. 5.1-1: Entwicklung des Starkniederschlagsereignisses des 22. Juli 2016 mit Niederschlagsintensitäten [mm/h] um 19:00 (a), 19:30 (b), 20:00 (c), 20:20 (d), 20:30 (e) und 21:30 (f) („Kachelmannwetter 22.07.16“, 2019)

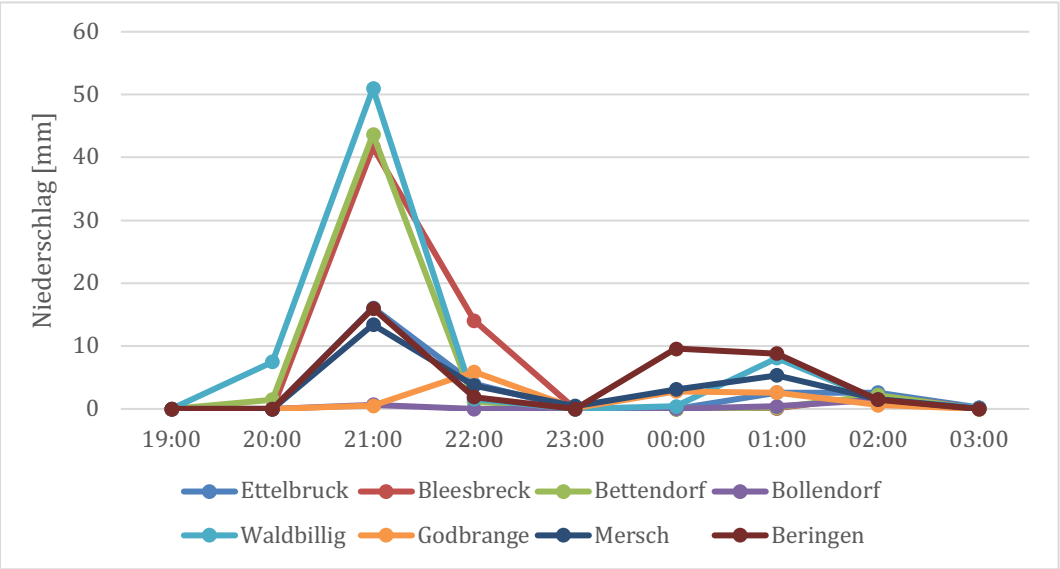



Abb. 5.1-2: Stündliche Niederschlagssummen an den Wetterstationen um die Einzugsgebiete am 22.07.16

Es liegen Niederschlagsreihen an acht Lambrecht 15188 Kippwagenniederschlagssensoren (Messgenauigkeit 0,1 mm) des agrarmeteorologischen Messnetzes der Landwirtschafts-verwaltung vor (Faber *et al*., 2018, S. 9). Obwohl sich die Stationen nur etwa 5 bis 10 Kilometer vom Mittelpunkt der Einzugsgebiete entfernt befinden, weichen die Niederschlagssummen um ein Vielfaches voneinander ab. Die Starkniederschlagsereignisse sind durch eine große räumliche Variabilität der Niederschlagsmengen geprägt. Während in Beringen und Mersch zwischen 20 und 21 Uhr 13,4 bzw. 16 mm Niederschlag fielen, wurden in Bettendorf, Bleesbreck und Waldbillig dreimal so hohe Werte erreicht.

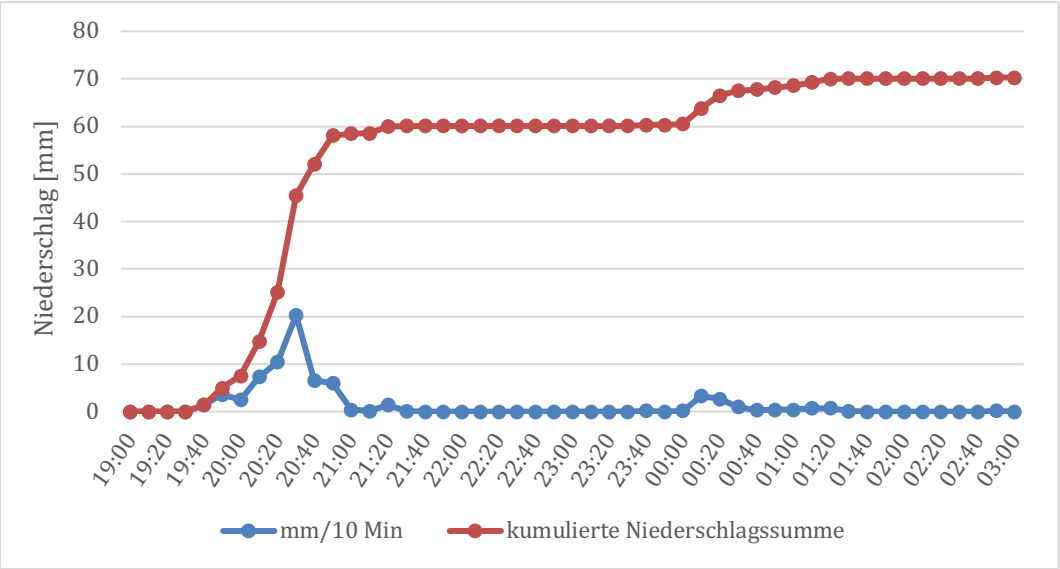



Abb. 5.1-3: Niederschlagssummen (10 min) und kumulierter Niederschlag an der Referenzstation am 22.07.16

Das Starkniederschlagsereignis begann gegen 20 Uhr und dauerte nur eine Stunde. Dabei wurden extreme Niederschlagsintensitäten von 20,3 mm Niederschlag in 10 Minuten an der Referenzstation in Waldbillig erfasst. Der sehr steile Verlauf der kumulierten Niederschlagssumme spiegelt die hohen Intensitäten wider.

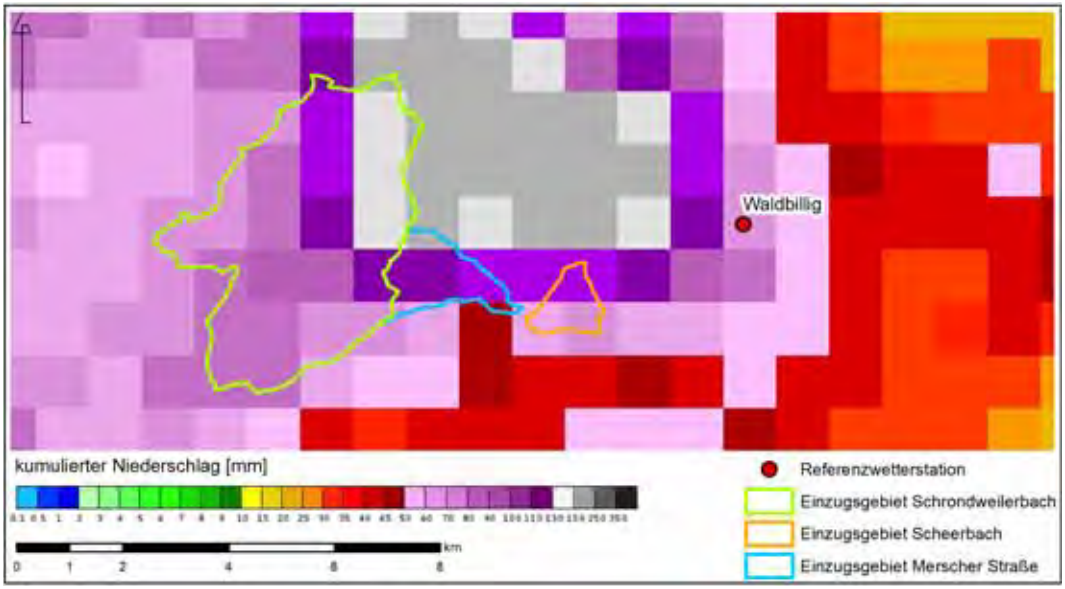



Abb. 5.1-4: Radarbild der Niederschlagssumme am 22.07.16

Auf dem Radarbild des im Laufe des Niederschlagsereignisses kumulierten Niederschlags wird ersichtlich, dass die Gebiete der höchsten Niederschläge der Gewitterzelle knapp östlich, bzw. nördlich der drei betrachteten Einzugsgebiete lagen. Da die Radardaten die Niederschläge um den Faktor 3,34 unterschätzten, wurden diese mittels der am Boden gemessenen Niederschläge geeicht.

Tab. 5.1-1: Charakteristika der Niederschläge je Einzugsgebiet am 22.07.16

| **Einzugsgebiet** | **Fläche [km²]** | **min N [mm]** | **max N [mm]** | **mittlerer N [mm]** | **Gebietsniederschlag [m³]** |
|---|---|---|---|---|---|
| Schrondweilerbach | 17,8 | 63,6 | 194,2 | 98,6 | 1.757.910 |
| Merscher Straße | 2,3 | 46,9 | 164,0 | 115,2 | 267.885 |
| Scheerbach | 1,1 | 67,0 | 107,1 | 83,4 | 95.412 |

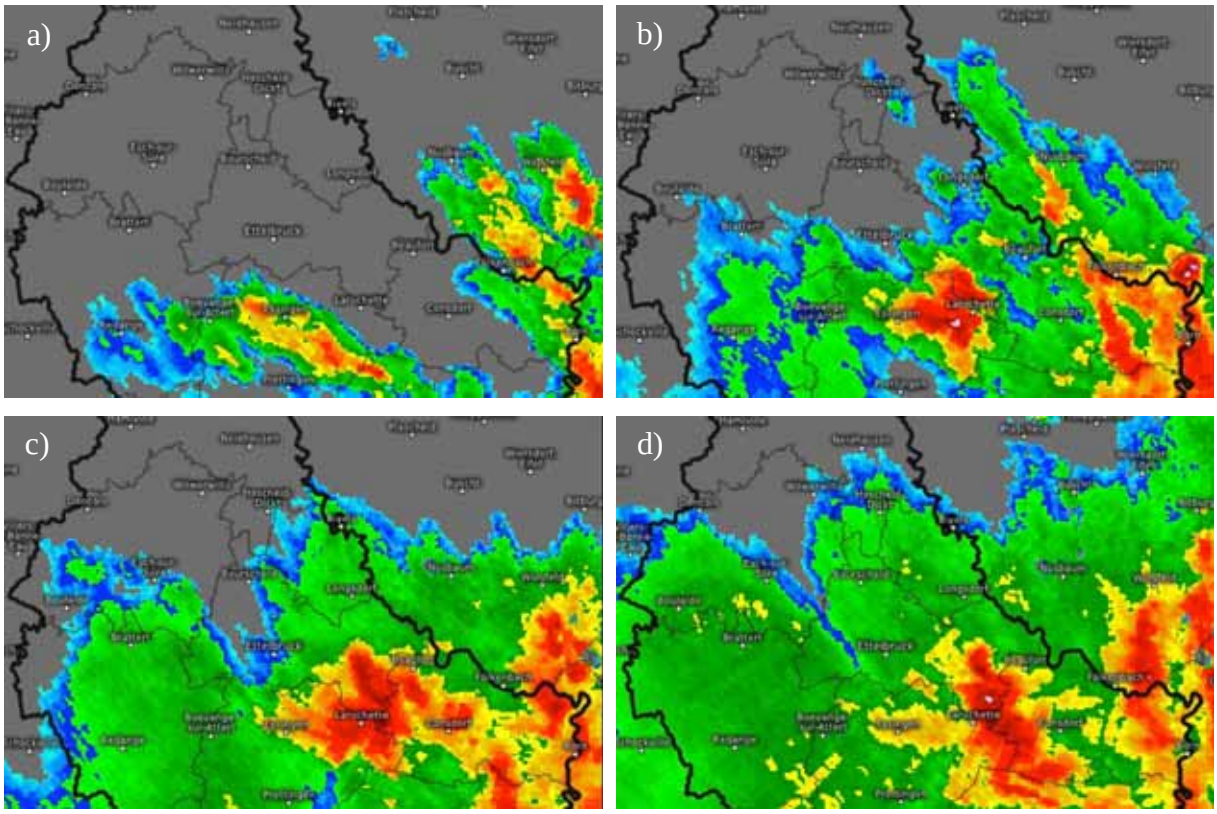
Innerhalb der Einzugsgebiete des Schrondweilerbachs und der Merscher Straße variieren die Niederschlagssummen um den Faktor drei. Im kleineren Einzugsgebiet des Scheerbachs war die Spreizung zwischen minimalem und maximalem Niederschlag geringer. Die mittleren Niederschläge dieses einen Ereignisses liegen über dem mittleren Monatsniederschlag von 71,0 mm („Meteolux.lu Normales et extrêmes“, 2019). Faber *et al.* (2018, S. 18 f.) führten eine extremwertstatistische Analyse des Ereignisses durch und fanden heraus, dass die Wiederkehrzeit der im Zentrum der Gewitterzelle gemessenen Niederschlagsintensitäten deutlich

hundert Jahre übersteigt. Claude Meisch des Wasserwirtschaftsamts erklärte dem Autor allerdings bei einem Treffen am 19.10. 2018, dass nach einer Reevaluierung der Extremwertstatistik nach den Ereignissen im Juni 2018, diese Einschätzung auf eine siebzigjährliche Wiederkehrzeit herunterkorrigiert werden kann (Meisch, 2018).

## 5.2 Starkregenereignis des 1. Juni 2018

In der Nacht des 1. Juni 2018 kam es ab 02:00 wiederum in der Region um Larochette, vor allem aber bei Waldbillig und Müllerthal, zu einem schweren Unwetter. Die jüngsten Ereignisse des Juni 2018 sind bislang in keiner Publikation beschrieben. Anhand der auf kachelmannwetter.com einsehbaren Radarbilder wird versucht, die Geschehnisse zu rekonstruieren.

Gegen 01:00 zieht eine Gewitterfront aus südöstlicher Richtung nach Nordwesten über die deutsch-luxemburgische Grenze. Zu dieser Zeit entsteht eine Gewitterzelle zwischen Godbrange und Cruchten (a). Die Zelle wird größer und stärker, so dass sie sich um 01:30 bis nach Larochette ausdehnt (b). Dabei verhält sie sich quasi-stationär. Gegen 01:45 verbindet sich diese Zelle mit der aus Südosten heranziehenden Gewitterfront (c). Ab etwa 02:00 verändert sich die Zelle nur mehr geringfügig und verbleibt stationär (d). Ab 02:30 lassen die Niederschlagsintensitäten um Larochette nach. Das Zentrum der Zelle verlagert sich nun nach Osten in die Region Müllerthal (e). Ab 03:00 erstreckt sich die Gewitterzelle von Consdorf über Beaufort nach Longsdorf (f) und verhält sich stationär bis zum Zeitpunkt des Auflösens zwischen 03:30 und 03:50.



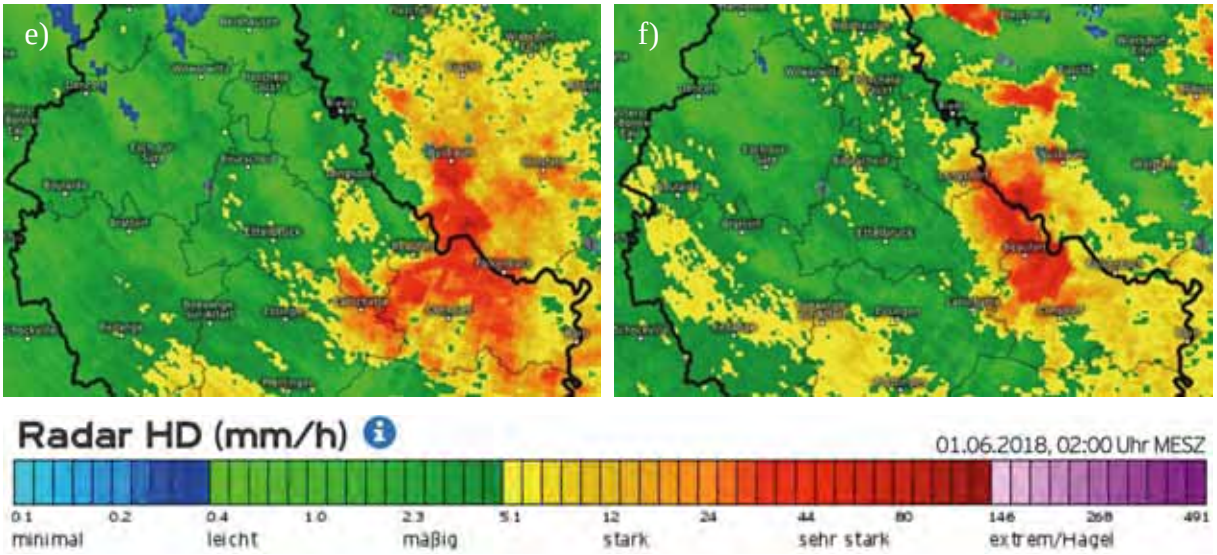



Abb. 5.2-1: Entwicklung des Starkniederschlagsereignisses des 1. Juni 2018 mit Niederschlagsintensitäten [mm/h] um 01:00 (a), 01:30 (b), 01:45 (c), 02:00 (d), 02:30 (e) und 03:00 (f) („Kachelmannwetter 01.06.18“, 2019)

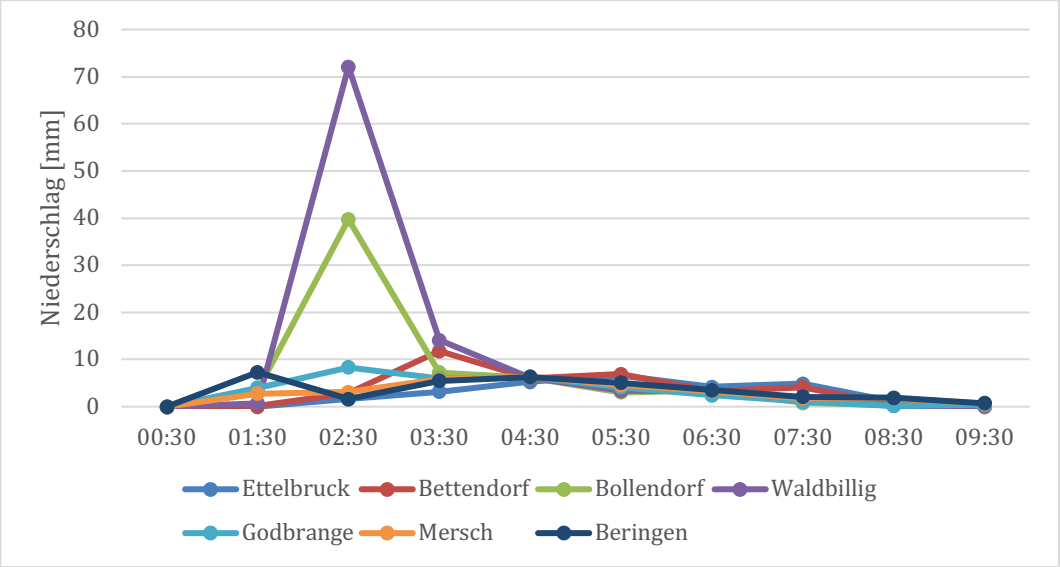



Abb. 5.2-2: Stündliche Niederschlagssummen an den Wetterstationen um die Einzugsgebiete am 01.06.18

Ähnlich wie beim ersten betrachteten Starkniederschlagsereignis ist die räumliche Variabilität der Niederschläge stark ausgeprägt. An der Station Bleesbreck standen bei diesem Ereignis keine Messdaten zur Verfügung. Die Uhrzeit der Bodenmessstation geht aus ungeklärten Gründen im Vergleich zu den Radarbildern eine halbe Stunde nach, so dass eine Korrektur durchgeführt wird. In Waldbillig wurde zwischen 01:30 und 02:30 eine maximale stündliche Niederschlagssumme von 72,1 mm gemessen. In Bollendorf waren es 39,8 mm, während an den anderen Stationen nur Werte von deutlich unter 10 mm erreicht wurden.

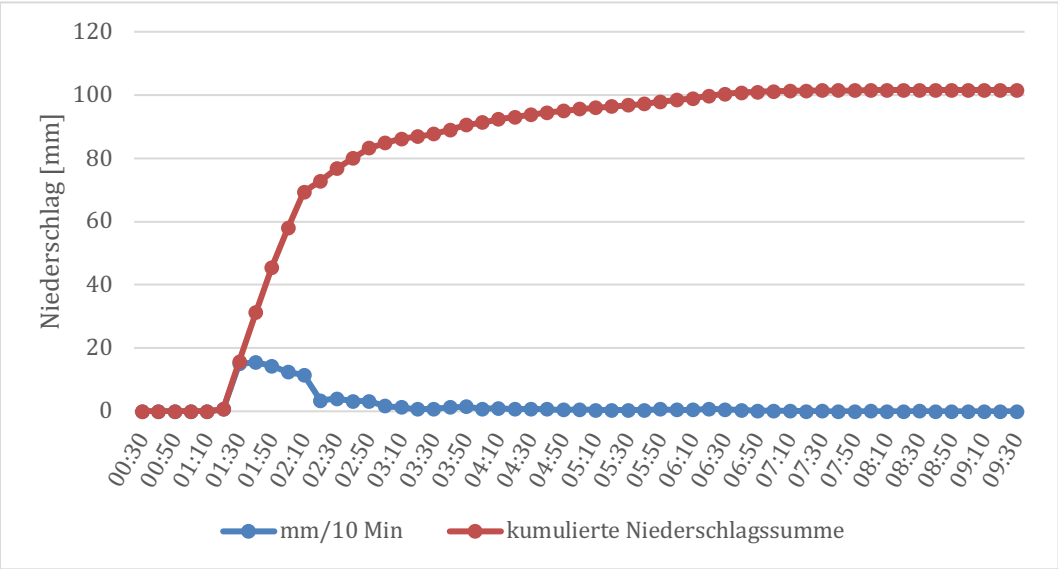



Abb. 5.2-3: Niederschlagssummen (10 min) und kumulierter Niederschlag an der Referenzstation am 01.06.18

Aus Abbildung 5.2-3 wird ersichtlich, dass sich sehr hohe Niederschlagsintensitäten über 40 Minuten erhalten haben. Um 01:30 wurde ein Spitzenwert von 15,7 mm Niederschlag in 10 Minuten registriert. Die Intensität nahm bis 02:10 langsam ab, lag aber zu dem Zeitpunkt immer noch bei 11,5 mm/10 min. Bis zu diesem Zeitpunkt hatten sich bereits 69,4 mm Regen akkumuliert. In den folgenden Stunden regnete es noch mit geringer Intensität stetig weiter, so dass bis 9:30 101,6 mm Niederschlag an der Referenzstation in Waldbillig fielen. Laut Claude Meisch des Wasserwirtschaftsamts stellt das Starkregenereignis des 1. Juni 2018 die neue Referenz eines hundertjährlichen Ereignisses dar (Meisch, 2018).

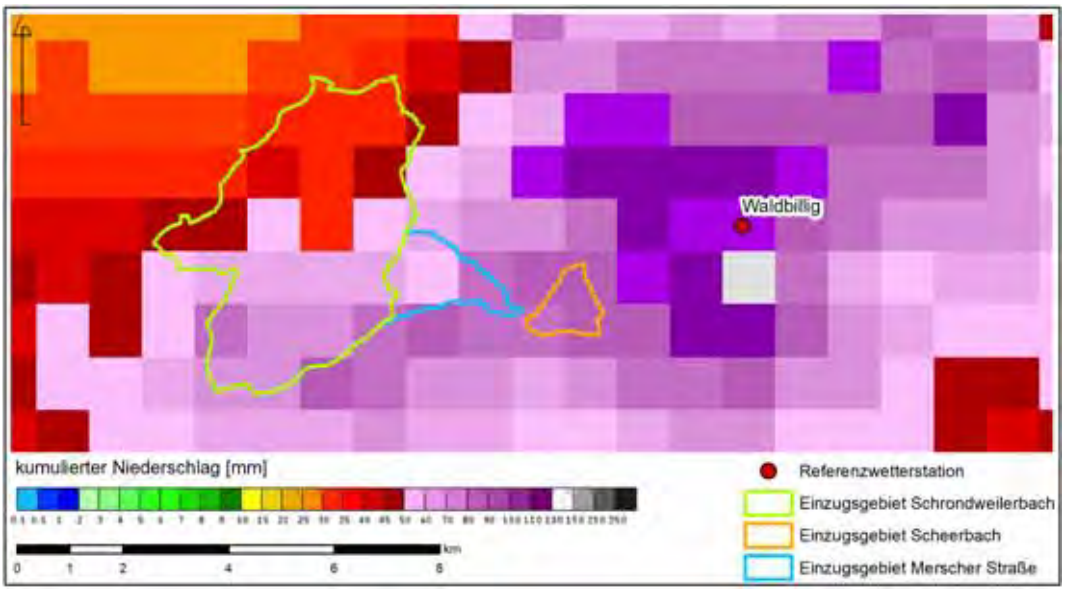



Abb. 5.2-4: Radarbild der Niederschlagssumme am 01.06.18

Auf dem Radarbild des im Laufe des Niederschlagsereignisses kumulierten Niederschlags wird ersichtlich, dass das Einzugsgebiet Scheerbach knapp westlich vom Zentrum der Gewitterzelle

lag. Auch in der Merscher Straße kam es zu hohen Niederschlägen. Das Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs lag am Rand der Zelle und wurde etwas weniger getroffen. Dies wird auch aus dem mittleren Gebietsniederschlag in der Tabelle 5.2-1 ersichtlich. Die Radardaten unterschätzen die Niederschläge um den Faktor 1,78, so dass diese mittels der am Boden gemessenen Niederschläge geeicht werden.

Tab. 5.2-1: Charakteristika der Niederschläge je Einzugsgebiet am 01.06.18

| Einzugsgebiet | Fläche [km$^2$] | min N [mm] | max N [mm] | mittlerer N [mm] | Gebietsniederschlag [m$^3$] |
|---|---|---|---|---|---|
| Schrondweilerbach | 17,8 | 31,1 | 98,0 | 55,7 | 993.270 |
| Merscher Straße | 2,3 | 53,4 | 98,0 | 70,0 | 161.678 |
| Scheerbach | 1,1 | 87,3 | 92,7 | 90,4 | 103.387 |

Die Gebietsniederschläge sind im Falle des Scheerbachs höher als beim Ereignis 2016. In den andern beiden Einzugsgebieten sind die Niederschläge jedoch deutlich geringer.

## 5.3 Starkregenereignis des 9. Juni 2018

Am Abend des 9. Juni 2018 zogen erneut schwere Gewitter über Luxemburg und verursachten Überschwemmungen. Besonders dramatisch war die Lage in Waldbillig und Müllerthal. Hier waren die gröbsten Aufräumarbeiten nach der Sturzflut eine Woche zuvor gerade abgeschlossen, als es zu erneuten Überschwemmungen kam. In den drei untersuchten Einzugsgebieten kam es trotz starken Regens nicht zu Überschwemmungen, weshalb das Ereignis als Nullprobe für die Simulation mit RoGeR genutzt wird.

Gegen 18:30 bildet sich östlich von Larochette eine Gewitterzelle (a). Innerhalb von Minuten wird sie größer und erstreckt sich um 19:00 bis nach Beaufort (b). Die Zelle bewegt sich nach Nordosten weg, doch folgt um 19:30 bereits die nächste Konvektionszelle (c). Um 20:00 erstreckt sich ein hochintensiver Zellenkomplex von Boevange über Larochette nach Beaufort (d). Bis 20:30 hat sich der Komplex von der Ost-West-Ausdehnung hin zu einer Nord-Süd-Ausdehnung entwickelt. Zu diesem Zeitpunkt sind die Niederschläge um Larochette und das Müllerthal nur noch marginal (e). Ab 21:00 folgen in der Region bis etwa 23:00 anhaltende Niederschläge mit geringer bis mittlerer Intensität (f) („Kachelmannwetter 09.06.18“, 2019).

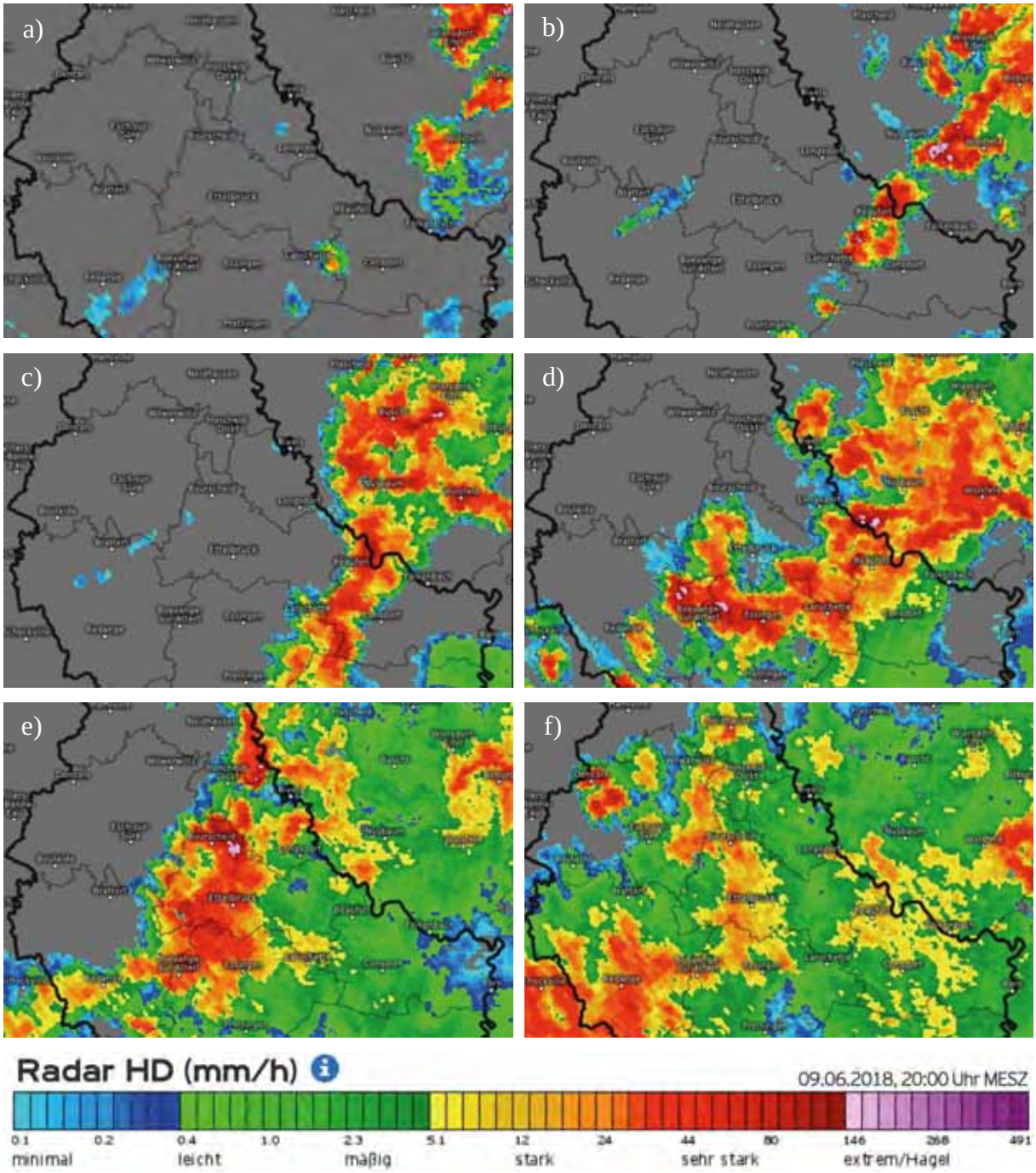



Abb. 5.3-1: Entwicklung des Starkniederschlagsereignisses des 9. Juni 2018 mit Niederschlagsintensitäten [mm/h] um 18:30 (a), 19:00 (b), 19:30 (c), 20:00 (d), 20:30 (e) und 21:00 (f) („Kachelmannwetter 09.06.18“, 2019)

An den Bodenmessstationen in Bollendorf und Godbrange wurden zwischen 18:30 und 19:30 Niederschläge in Höhe von rund 22 mm erfasst. An der Referenzstation in Waldbillig waren es zur gleichen Zeit 32,2 mm, während an den anderen Stationen um die Einzugsgebiete kaum Niederschlag gemessen wurde. Für die beiden Pluviometer in Ettelbrück und Bleesbreck liegen keine Messdaten vor. Die räumliche Variabilität ist auch bei diesem Ereignis wieder ausgeprägt.

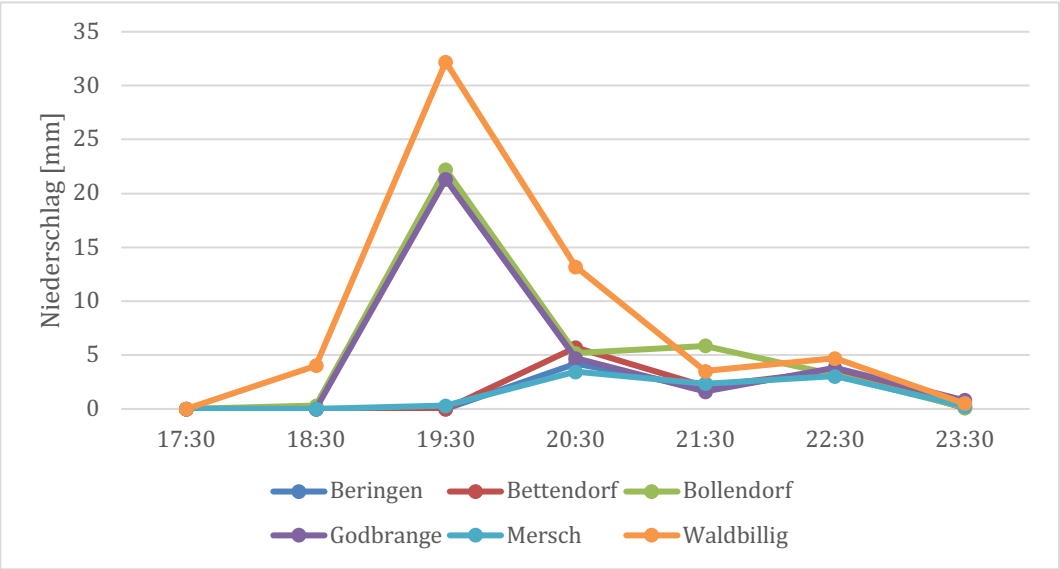



Abb. 5.3-2: Stündliche Niederschlagssummen an den Wetterstationen um die Einzugsgebiete am 09.06.18

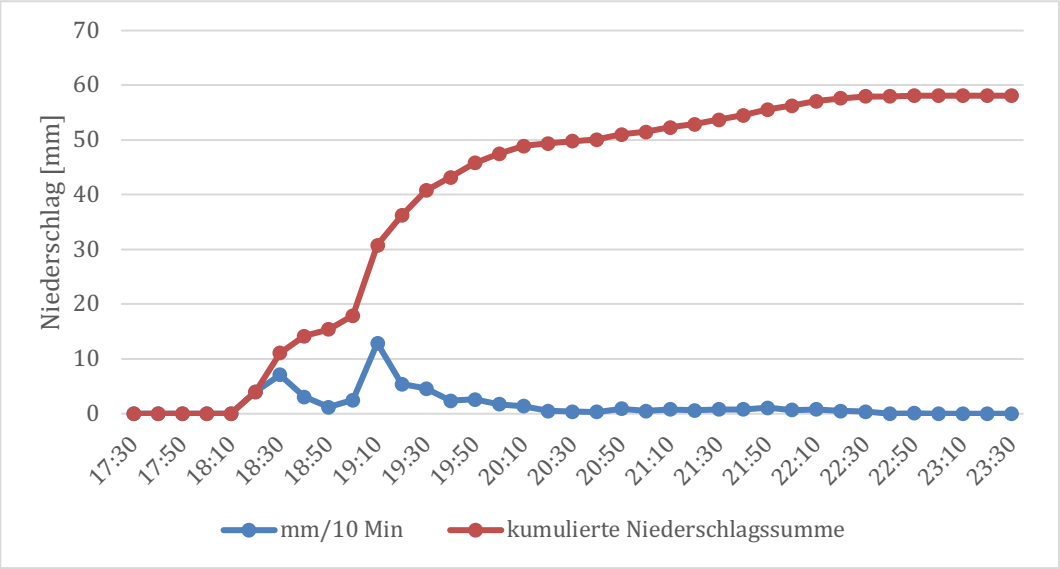



Abb. 5.3-3: Niederschlagssummen (10 min) und kumulierter Niederschlag an der Referenzstation am 09.06.18

Das Niederschlagsereignis wird geprägt durch zwei Spitzenintensitäten. Um 18:20 wird der erste Niederschlag in Waldbillig gemessen. Zwischen 18:20 und 18:30 wird eine erste Spitzenintensität von 7,1 mm/10 min erfasst. Die Intensität sinkt dann wieder, um zwischen 19:00 und 19:10 ein zweites absolutes Maximum von 12,9 mm/10 min zu erreichen. Anschließend sinken die Intensitäten, und es stellt sich ein bis 22:30 anhaltender Dauerregen ein. Durch das Absinken der Niederschlagsintensität zwischen 18:40 und 19:00 haben sich die Niederschlagsmengen weniger schnell akkumuliert. Die anschließende Erhöhung äußert sich in einem klaren Knick in der Akkumulationskurve.

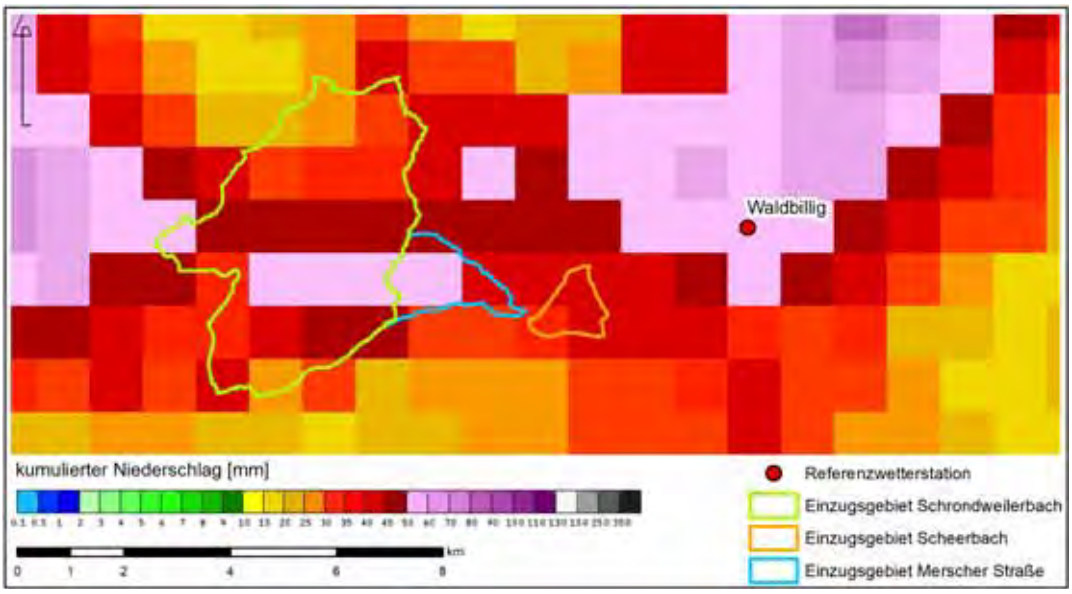



Abb. 5.3-4: Radarbild der Niederschlagssumme am 09.06.18

Waldbillig befand sich erneut im Bereich der höchsten Niederschlagssummen.

Tab. 5.3-1: Charakteristika der Niederschläge je Einzugsgebiet am 09.06.18

| **Einzugsgebiet** | **Fläche [km²]** | **min N [mm]** | **max N [mm]** | **mittlerer N [mm]** | **Gebietsniederschlag [m³]** |
|---|---|---|---|---|---|
| Schrondweilerbach | 17,8 | 22,1 | 56,7 | 41,8 | 744.796 |
| Merscher Straße | 2,3 | 33,2 | 55,3 | 48,6 | 113.037 |
| Scheerbach | 1,1 | 36,0 | 44,3 | 40,5 | 46.257 |

Der mittlere Gebietsniederschlag ist in den drei Einzugsgebieten etwa gleich hoch. Das Gesamtniederschlagsvolumen im Einzugsgebiet Schrondweilerbach entspricht 75 % dessen was eine Woche zuvor niederging. In der Merscher Straße waren es 70 % dessen und am Scheerbach 45 %.

# 6 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellierungen mit den verschiedenen Modellen und Ansätzen, jeweils nach Niederschlagsereignis und Einzugsgebiet aufgeschlüsselt, vorgestellt. Da nur der Oberflächenabfluss (OA), bestehend aus den beiden Abflusskomponenten HOF und SFA korrekt parametrisiert wurde, wird im weiteren Verlauf nur auf diesen eingegangen. Hierzu wird eine Gesamtabflussganglinie des Oberflächenabflusses aus der Summe von HOF und SFA berechnet.
Im Anhang befinden sich die Hydrographen der jeweils drei Einzugsgebiete und Niederschlagsereignisse mit allen Abflusskomponenten.

Da die Modellläufe allesamt sehr zeitaufwändig waren, war es nicht möglich, für alle drei Einzugsgebiete und alle drei Niederschlagsereignisse sämtliche Analysen durchzuführen. Die zur Verfügung stehende Rechenleistung war nur ausreichend, um RoGeR dynamo auf das Einzugsgebiet des Scheerbachs anzuwenden. Tabelle 6-1 gibt einen Überblick über die durchgeführten Analysen. Rot markiert sind die Einzugsgebiete, in denen es zu Überschwemmungen und Schäden kam.

Tab. 6-1: Durchgeführte Analysen

| | Einzugsgebiet | RoGeR | Sensitivitäts-analyse | GMS-Abfluss-berechnung | Kumulierter OA | RoGeR Flow | RoGeR dynamo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **22.07.2016** | Schrondweilerbach | x | x | x | x | | |
| | Merscher Straße | x | x | x | x | | |
| | Scheerbach | x | x | x | x | x | x |
| **01.06.2018** | Schrondweilerbach | x | | | x | | |
| | Merscher Straße | x | | | x | | |
| | Scheerbach | x | | | x | | x |
| **09.06.2018** | Schrondweilerbach | x | | | | | |
| | Merscher Straße | x | | | | | |
| | Scheerbach | x | | | | | x |

## 6.1 Modellierung des Starkregenereignisses am 22. Juli 2016

Das Starkregenereignis des 22. Juli 2016 löste in allen drei Einzugsgebieten Sturzfluten aus, die zu erheblichen Schäden führten.

### 6.1.1 Schrondweilerbach

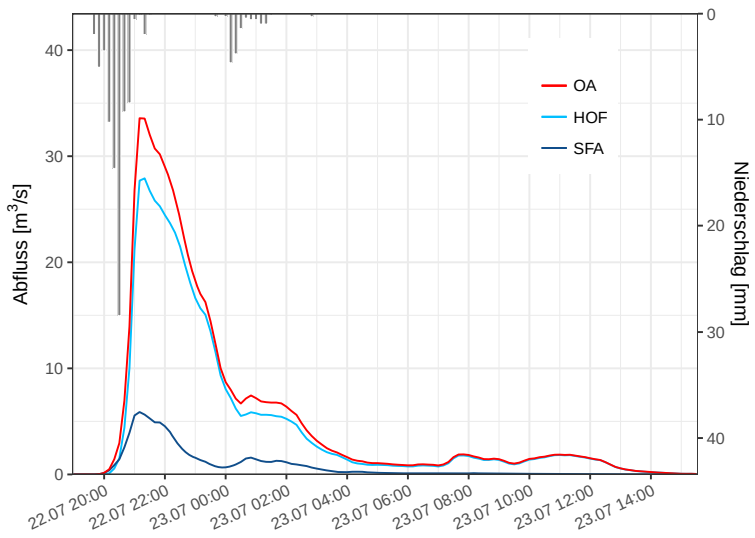



Abb. 6.1.1-1: Oberflächenabflussganglinie des Schrondweilerbachs am Auslass in Cruchten am 22.07.16

Das Niederschlagsereignis am 22. Juli 2016 begann gegen 19:40 und erreichte seine maximale Intensität um 20:30. Die Niederschlags-Abflussmodellierung mit RoGeR ergibt eine sehr schnelle und starke Abflussreaktion mit einem oberflächlichen Spitzenabfluss von 33,6 $m^3/s$ kurz nach 21:00. Um 20:00 beginnt das Abflussgeschehen und erreicht innerhalb von nur einer Stunde gegen 21:00 den maximalen Abfluss. Der Horton'sche Oberflächenabfluss dominiert das Abflussgeschehen, doch auch der Sättigungsflächenabfluss trägt zur Oberflächenabfluss-ganglinie bei. Da für den Makroporenfluss und die Tiefenperkolation Dummy-Werte angesetzt wurden, soll nicht weiter auf diese eingegangen werden. Der Hydrograph mit allen Abfluss-komponenten befindet sich, wie bereits erwähnt, im Anhang (Abb. Ah-6.1.1-1). Die geringen Niederschläge gegen Mitternacht verzögern das Abflachen des HOF und SFA leicht.

Neben den Daten des Hydrographen gibt RoGeR zudem eine Tabelle mit Mittelwerten für das Einzugsgebiet aus, anhand derer der Abflussbeiwert des Oberflächenabflusses ermittelt werden kann. Dabei wird der mittlere Oberflächenabfluss durch den mittleren Niederschlag geteilt. Die Werte werden auf eine Nachkommastelle gerundet, so dass es im Detail zu Rundungsfehlern kommen kann. Der Abflussbeiwert des Oberflächenabflusses ($\psi_{OA}$) liegt bei 22,7 %. 19,5 % entfallen auf HOF, 0,1 % auf SOF und 3,1 % wird auf Gewässeroberflächen gebildet. 77,3 % des auf die Erdoberfläche treffenden Niederschlags infiltriert. 58,1 % infiltrieren durch die Matrix, 15,9 % durch die Makroporen und 3,2 % durch die Trockenrisse. 0,6 % des Nieder-

schlags werden als Matrixzwischenabfluss aktiv, 3,9 % als präferentielles Fließen in Makroporen und 11,8 % versickern als Tiefenperkolation im Gestein. Die Werte des ZA und der TP sind jedoch kaum verlässlich, da diese Prozesse nicht korrekt parametrisiert sind. Somit werden sie im weiteren Verlauf nicht weiter erwähnt.

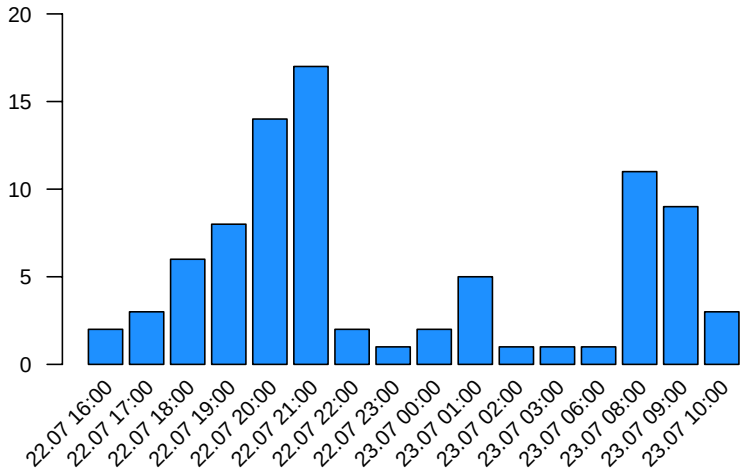



Abb. 6.1.1-2: Landesweit angefallene technische Einsätze je Stunde am 22.07.16

Betrachtet man die Anzahl der landesweit angefallenen technischen Einsätze der Feuerwehr (Abb. 6.1.1-2), so erkennt man, dass sich diese ähnlich zur modellierten Ganglinie verhalten. Dargestellt sind nur die Zeiträume, in denen es zu Einsätzen kam; daher fehlt beispielsweise der Zeitraum von 04:00 bis 05:00. Da es sich um landesweite Daten handelt, steigen die Einsatzzahlen schon ab 18:00 an, als die ersten Gewitterzellen über das Land ziehen. Eine Einzelbetrachtung der Einsatzzahlen in den Untersuchungsgebieten war kaum aussagekräftig, da hier zu wenig Einsätze anfielen. Auch liegen die gezeigten Zahlen deutlich unter den reell angefallenen Einsätzen, da nicht alle Einsätze über die Einsatzleitstelle disponiert und dort dokumentiert wurden. Der erneute Anstieg der Einsatzzahlen ab 08:00 am 23.07. erklärt sich dadurch, dass die Einsatzkräfte, die teils bis in die frühen Morgenstunden arbeiteten, dann wieder in den Einsatz gerufen wurden. Teilweise fielen den Anwohnern auch erst zu dem Zeitpunkt Schäden auf. Im Regelfall werden landesweit nur maximal 1-2 technische Einsätze pro Stunde gefahren, so dass die außergewöhnlichen überschwemmungsbedingten Einsätze den Kurvenverlauf stark prägen. Es wird angenommen, dass dieser Kurvenverlauf repräsentativ ist für das zeitliche Anfallen der Einsätze in den drei Untersuchungsgebieten.

Die lokale Freiwillige Feuerwehr der Gemeinde Nommern wurde um 20:23 zu ihrem ersten Einsatz aufgrund von Überschwemmungen in Nommern am Oberlauf des Schrondweilerbachs gerufen. Um 21:15 wurden Einsätze in Cruchten gemeldet, kurz vor der Stelle, die ausgewählt wurde, um den auf der vorherigen Seite gezeigten Hydrographen zu erstellen. Da die Einsatzleitstelle durch die extrem vielen parallelen Anrufe stark überfordert war, kann es sein, dass

Anwohner bereits früher Einsätze melden wollten. Zeitlich passen die Schadensmeldungen dennoch zur Abflussganglinie.

### Sensitivitätsanalyse

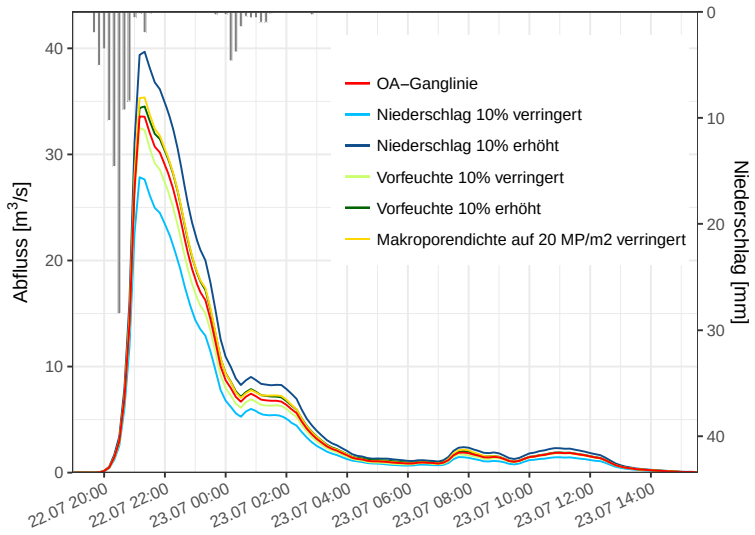



Abb. 6.1.1-3: Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses des Schrondweilerbachs am Auslass in Cruchten am 22.07.16

Um abschätzen zu können, wie die Ganglinie des Oberflächenabflusses auf Veränderungen der Eingangsparameter reagiert, werden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse fünf Parameter variiert. Hierzu werden jeweils die Niederschläge und die Vorfeuchtebedingungen um 10 % nach oben und unten korrigiert. Erwähnt sei, dass die Variation der Vorfeuchtebedingungen das freie, für Infiltration verfügbare Porenvolumen ebenso verändert, wie die an die Bodenfeuchte gebundene Trockenrisstiefe, die für die Szenarien der veränderten Bodenfeuchte ebenfalls angepasst wird. Auch wird die Makroporendichte auf Ackerflächen, ursprünglich im Modell mit 75 MP/m$^2$ parametrisiert, auf 20 MP/m$^2$ verringert, um die Reaktion des Modells auf stärker verdichtete Böden zu testen. Sämtliche Ergebnisse werden auf eine Dezimalstelle gerundet.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass der Spitzenabfluss im Bereich zwischen 27,9 und 39,7 m$^3$/s liegt. Der Abflussbeiwert variiert zwischen 20,2 und 25,1 %. Betrachtet man die Oberflächenabflussganglinie, so hat der Niederschlag den stärksten Effekt auf diese. Die Ganglinie reagiert allerdings nicht genau symmetrisch auf die Veränderung des Niederschlags und der Vorfeuchte um jeweils 10 % nach oben und nach unten. Der Einfluss der geringeren Makroporendichte ist etwas höher als der der erhöhten Vorfeuchte. Mit 5,3 % Erhöhung des Spitzenabflusses ist der Einfluss aber gering. Sämtliche Variationen der Eingangsparameter verändern nur die Höhe des Abflusses, nicht aber die Dynamik des Abflussgeschehens. Der Kurvenverlauf der Ganglinie bleibt stets gleich.

Tab. 6.1.1-1: Kennwerte der Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses des Schrondweilerbachs am Auslass in Cruchten am 22.07.16

| **Szenario** | **Prozentuale Veränderung des Spitzenabflusses [%]** | **Spitzenabfluss [m³/s]** | **Abflussbeiwert des OA ($\psi_{OA}$) [%]** |
|---|---|---|---|
| Unveränderte Eingangsdaten | / | 33,6 | 22,7 |
| Niederschlag 10% verringert | - 17,1 | 27,9 | 20,2 |
| Niederschlag 10% erhöht | + 18,2 | 39,7 | 25,1 |
| Vorfeuchte 10% verringert | - 3,2 | 32,5 | 21,4 |
| Vorfeuchte 10% erhöht | + 2,8 | 34,5 | 23,9 |
| MP-Dichte auf 20 MP/m² auf Ackerflächen verringert | + 5,3 | 35,4 | 24,0 |

### Vergleich modellierter Spitzenabfluss zu berechnetem Spitzenabfluss

Die mit RoGeR modellierten Werte des Oberflächenabflusses werden auf ihre Plausibilität geprüft, indem mit Hilfe der Gauckler-Manning-Strickler-Fließformel der Spitzenabfluss berechnet wird. Aus dem DGM wird ein Querschnittsprofil der überschwemmten Fläche abgeleitet. An der fotografierten Stelle stand das Wasser etwa 52 m breit und bis zu 2,2 m tief (Abb.6.1.1-4). Bei einer ermittelten Querschnittsfläche von etwa 49,7 m², einem Gefälle von 1,25 % und einem angenommenen Rauigkeitsbeiwert von 25 $m^{1/3}/s$, der dem eines Wildbachs mit grobem Geröll entspricht (Jirka & Lang, 2009, S. 24), ergibt sich eine mittlere Fließgeschwindigkeit von 2,7 m/s und ein Abflussvolumen von 132,6 m³/s. Mit 33,6 m³/s unterschätzt RoGeR den Abfluss deutlich. Die Eingangsparameter des Gefälles und des Rauigkeitsbeiwerts wurden nach oben und unten verändert, um einen Bereich zu identifizieren, in dem das Abflussvolumen gelegen haben könnte (Abb. 6.1.1-5). Die Wassertiefe wurde nur um 40 cm nach unten korrigiert, was das gesamte Querschnittsprofil verkleinert, da eher davon auszugehen ist, dass die Überschwemmungsflächen zu groß als zu klein eingeschätzt wurden. Die berechneten Abflüsse liegen aber in allen Fällen deutlich über den modellierten.

Abb. 6.1.1-4: Rekonstruktion des Querschnittsprofils der Wassersäule: oben Referenzbild mit Geschwemmsellinie und Blick Richtung Westen, aufgenommen am Schnittpunkt der blauen Linien am 26.07.2016; unten links das Querschnittsprofil abgeleitet aus dem DGM; unten rechts Position des Querschnittsprofils und der kartierten Überschwemmungsfläche des Schrondweilerbachs am 22.07.16

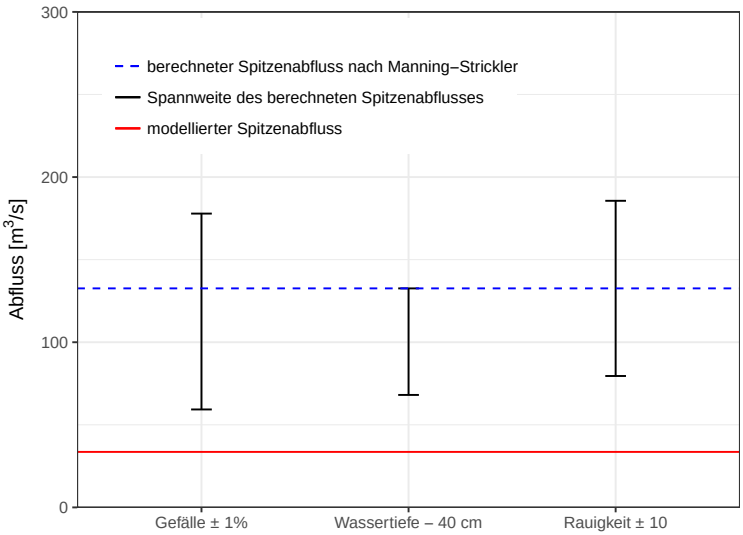



Abb. 6.1.1-5: Vergleich des modellierten Spitzenabflusses mit dem mit der GMS-Formel berechneten Spitzenabfluss für das Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 22.07.16

**Gebildeter Oberflächenabfluss**

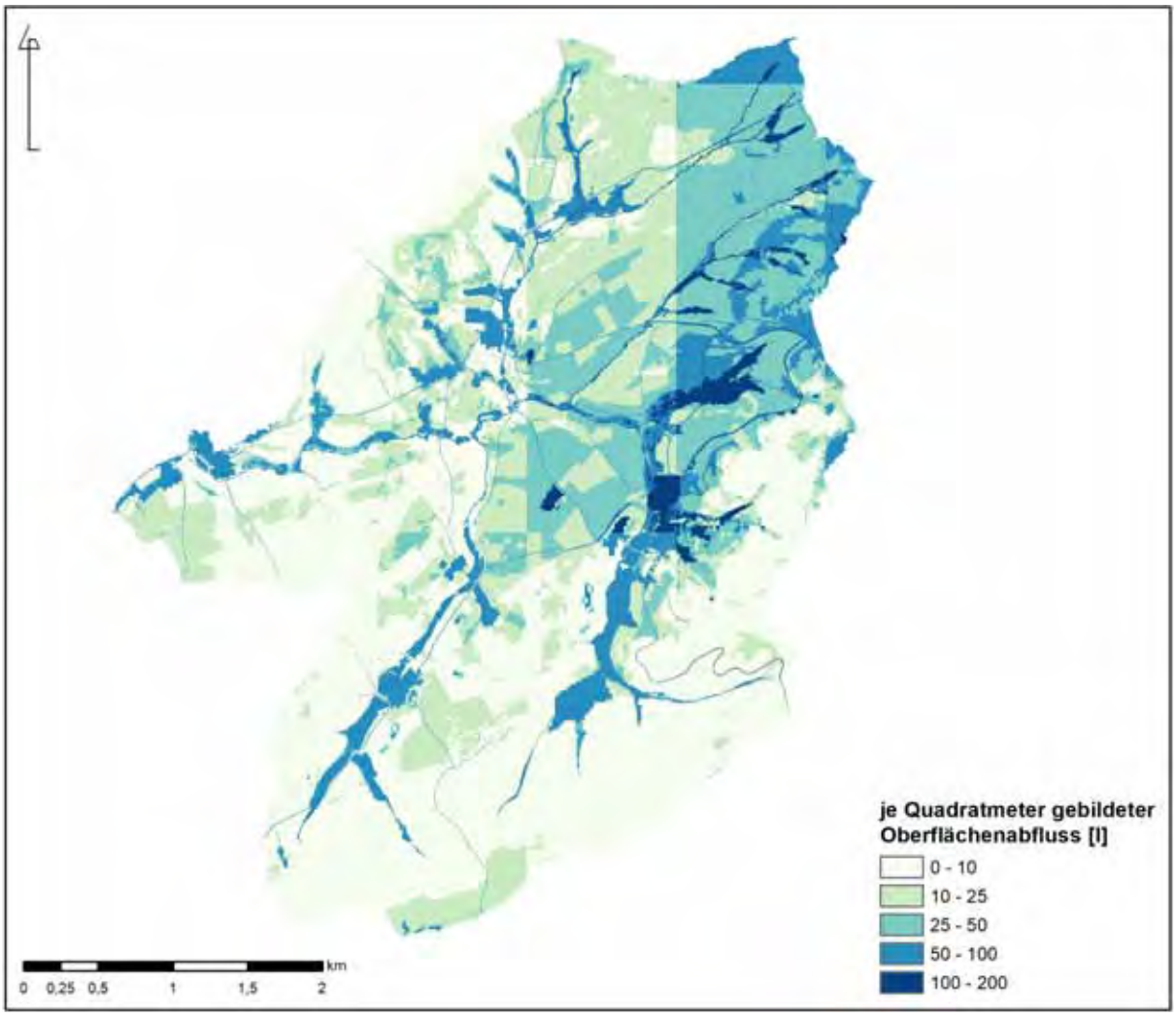



Abb. 6.1.1-6: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 22.07.16

RoGeR gibt für das Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs ein Raster des im Laufe des Niederschlagsereignisses gebildeten Oberflächenabflusses je Quadratmeter aus (Abb. 6.1.1-6). Auf versiegelten Flächen und in den grundwasserbeeinflussten Bereichen um die Bäche, also da wo die Böden nur eine sehr geringe bis gar keine Speicherkapazität haben, entstehen die höchsten Oberflächenabflussmengen je Quadratmeter. Vergleicht man die Abbildung 6.1.1-6 mit der Abbildung 4.1-2, erkennt man, dass auf Ackerflächen mehr Oberflächenabfluss gebildet wird als auf Wiesen. In den bewaldeten Gebieten am südlichen Rand des Einzugsgebiets wird kaum OA gebildet, in den Wäldern am nördlichen Rand hingegen schon, was der ungleichmäßigen Niederschlagsverteilung geschuldet ist. Die 1 Quadratkilometer großen Pixel des Niederschlagsrasters schlagen deutlich auf das Oberflächenabflussraster durch und hinterlassen gut sichtbare Grenzen in der oberen Hälfte des Einzugsgebiets. Allgemein nimmt der Oberflächenabfluss von Osten nach Westen ab. Insbesondere um die Ortschaft Nommern am Oberlauf des Bachs werden erhebliche Mengen OA gebildet.

**Kumulierter Oberflächenabfluss**

In SAGA-GIS wird das von RoGeR ausgegebene Raster des über das Niederschlagsereignis gebildeten Oberflächenabflusses (Abb. 6.1.1.-6) entlang des Reliefs geroutet und die Wassermengen, die über jedes Pixel strömen, aufsummiert. So ergibt sich ein Bild des kumulierten Oberflächenabflusses, das die Hauptfließpfade aufzeigt (Abb. 6.1.1-7). Auf Abbildung 6.1.1-7 sind nur hochwasserbedingte Einsätze der Feuerwehr dargestellt; alle sonstigen mit dem Unwetter verbundenen Einsätze, wie umgestürzte Bäume und die Bergung eines davongespülten Traktors sind ausgeblendet. Es sei erwähnt, dass nach der Modellierung keine nachträgliche Korrektur der Kartierungen durchgeführt wurde, um eine bessere Übereinstimmung zu erzielen. So sind insbesondere im Unterlauf des Schrondweilerbachs Abweichungen zwischen morphologisch überhaupt möglichen Überschwemmungsflächen und kartierten Überschwemmungsflächen festzustellen (Abb. 6.1.1-7 (e)).

Eine Aussage über die Wassertiefe mit der Methode ist prinzipiell nicht möglich, da es sich nicht um eine 2D-hydraulische Modellierung handelt. Auch sind die Fließpfade teilweise sehr schmal, da der gesamte Abfluss auf ein einziges Pixel geroutet wird, an dem dann aber erhebliche Wassermengen zusammenkommen. Letztendlich ist die Aussage eher qualitativer als quantitativer Natur. An Stellen, wo viel Wasser abgeflossen ist, kann man aber mit Überschwemmungen rechnen.

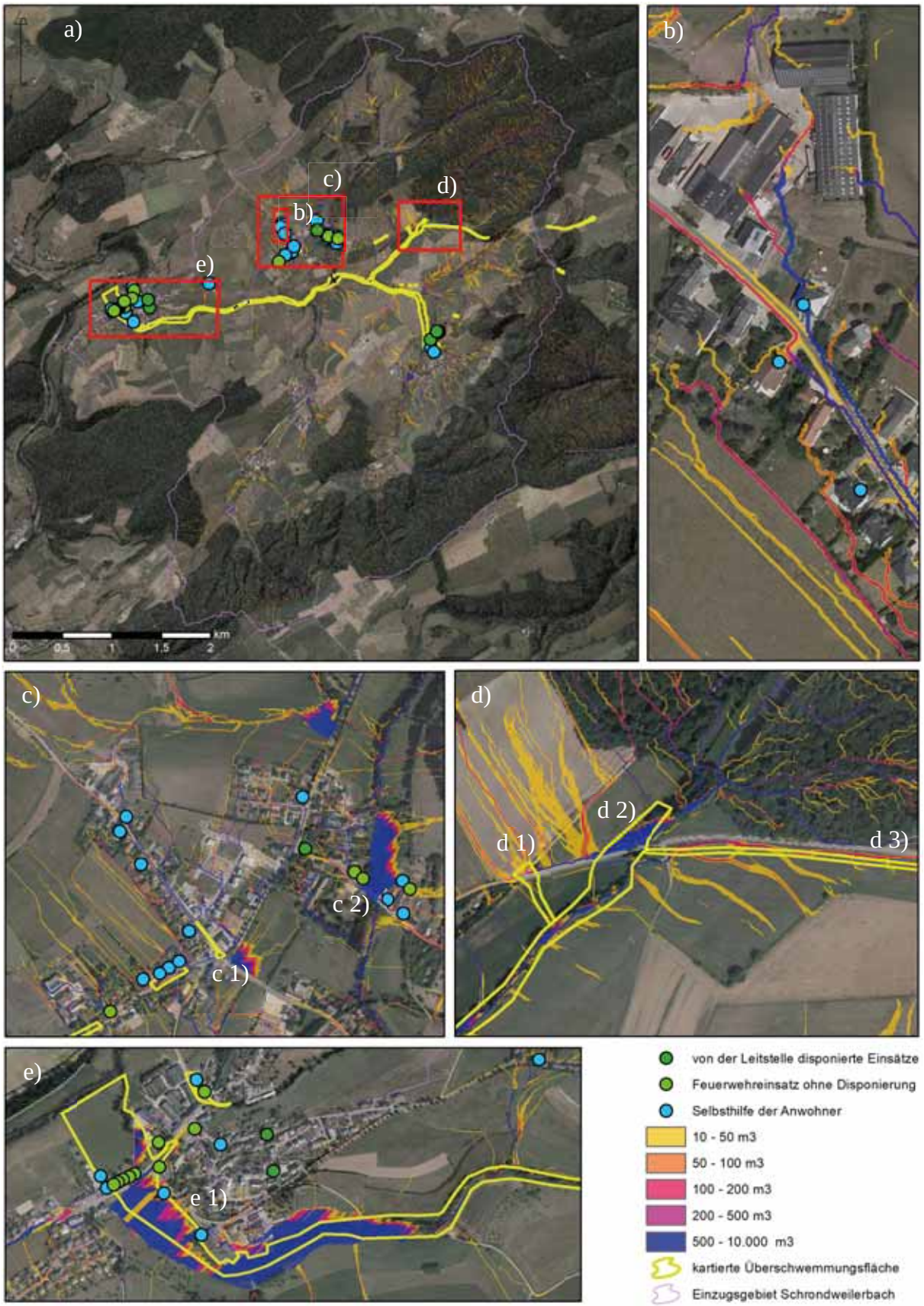



Abb. 6.1.1-7: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 22.07.16

Abb. 6.1.1-8: Fotos der Überschwemmungen im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 22.07.16

Abbildung 6.1.1-7 zeigt den kumulierten Oberflächenabfluss im gesamten Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs (a). Zusätzlich wurden vier Detailausschnitte ausgewählt, um die Genauigkeit der Modellierung zu illustrieren.

Auf Abbildung b) ist zu sehen, dass ein violett gekennzeichneter Wasserstrom die Straße hinunterfließt und in die Garageneinfahrt des Autors strömt. Tatsächlich kam es beim Starkregenereignis des 22. Juli 2016 erstmalig seit dem Bau des Hauses im Jahr 1992 zu einer Überschwemmung des Kellers.

Abbildung c) mit den dazugehörigen Fotos c 1) und c 2) der Abbildung 6.1.1-8 zeigen die Überschwemmungen in Schrondweiler und die damit einhergehenden Einsätze der Feuerwehr. Ein dunkelblauer Wasserstrom wird für die Ortsmitte (c 1) modelliert. An dieser Stelle stand das Wasser, wie auf Foto c 1) zu sehen ist, etwa 15-20 cm hoch und überschwemmte tiefergelegene Garagen. Die Anwohner halfen sich jedoch selber, da die Feuerwehr nicht genügend Kapazitäten hatte, um überall einzugreifen. Im alten Dorfkern kam es zu erheblichen Überschwemmungen, da der Schrondweilerbach an dieser Stelle unter einer Brücke durchgeführt wird. Der Querschnitt war nicht ausreichend, um die Wassermassen schnell genug abzuführen, so dass es zur Aufstauung kam. Das Wasser stand bis zu 4,5 m hoch, gemessen vom ursprünglichen Gewässergrund (Abb. 6.1.1-8: c 2)).

An Ausschnitt d) kann das Modell drei Fließpfade, die der Autor kartieren und fotografieren konnte, genau widerspiegeln. An d 1) floss Oberflächenabfluss, der nördlich auf den Feldern gebildet wurde, über die Straße und hinterließ eine gut sichtbare Schneise im Weizen. In der Senke an Punkt d 2) staute sich das Wasser auf, bis es schließlich auf einer Breite von etwa 70 m die Straße überströmte und das Weizenfeld platt drückte. An d 3) war ein 1,5-2 m breiter Fließpfad über die Wiese parallel zur Straße zu beobachten. Auch diesen bildet das Modell ab.

In Cruchten (e) wird der Schrondweilerbach abermals unter einer Straße durchgeführt. Auch hier kam es zu Verklausungen und dadurch bedingtem Rückstau.

Die komplette Wiese, auf e 1) und e 1‘) abgebildet, wurde bis zur Geländekante des Damms der ehemaligen Schmalspurbahn *Jhangeli* (gestrichelte rote Linie) überflutet. Die nordwestlich dieser Wiese liegenden Häuser wurden allesamt überschwemmt und bedurften der Hilfe der Feuerwehr, die vier Tage im Dauereinsatz war, um die gröbsten Schäden in der Gemeinde zu beseitigen.

Mit Hilfe des kumulierten Oberflächenabflusses lassen sich mit erstaunlicher Genauigkeit die Schadensmeldungen und Fließpfade abbilden, was darauf hinweist, dass RoGeR die Abflussbildungsprozesse räumlich verteilt korrekt darstellen kann.

### 6.1.2 Merscher Straße

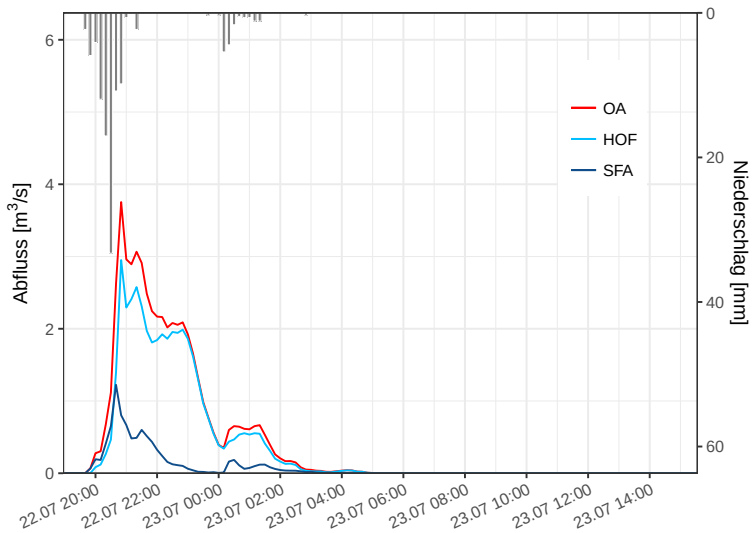



Abb. 6.1.2-1: Oberflächenabflussganglinie der Merscher Straße am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 22.07.16

Auch in Larochette in der Merscher Straße kam es ab 20:00 zu einer starken Abflusskonzentration. Um 20:25 wurde der Freiwilligen Feuerwehr in Larochette der erste Einsatz gemeldet. Für diesen Zeitpunkt gibt RoGeR einen Oberflächenabfluss von 1,1 $m^3/s$ an. Der maximale Oberflächenabfluss um 20:50 beträgt 3,8 $m^3/s$. Auf Abbildung Ah-6.1.2-1 im Anhang erkennt man, dass die Abflussganglinie stark von der Tiefenperkolation geprägt wird, die aber nicht zum Oberflächenabfluss beiträgt. Dies spricht für die getrennte Betrachtung des Oberflächenabflusses, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Der Oberflächenabflussbeiwert beträgt 12,0 %. 10 % des Oberflächenabflusses entfällt auf den HOA, 2,0 % des OA bildet sich auf Gewässeroberflächen. Der SFA spricht ebenso schnell an wie der HOF und trägt zu gut einem Viertel zur Abflussspitze um 20:50 bei. Der Anteil ist bedeutend höher als im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs, wo der SFA nur etwa ein Siebtel des Scheitelabflusses ausmacht.

88,0 % des Niederschlags infiltriert, davon 75,3 % als Matrixinfiltration, 12,6 % als Makroporeninfiltration und 0,1 % als Trockenrissinfiltration.

**Sensitivitätsanalyse**

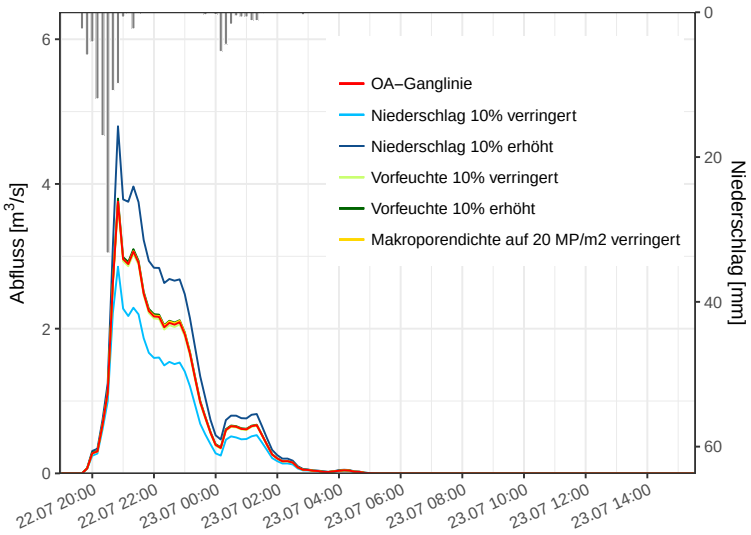



Abb. 6.1.2-2: Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses in der Merscher Straße am Auslass in Larochette am 22.07.16

Der Niederschlag hat wiederum den stärksten Effekt auf die Oberflächenabflussganglinie. Der Spitzenabfluss reagiert überproportional auf Veränderungen der Niederschlagsmengen, während eine verringerte Makroporendichte keinen Einfluss auf den Spitzenabfluss hat. Auch veränderte Vorfeuchtebedingungen haben im Einzugsgebiet der Merscher Straße keinen relevanten Einfluss auf den Oberflächenabfluss.

Tab. 6.1.2-1: Kennwerte der Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses in der Merscher Straße am Auslass in Larochette am 22.07.16

| **Szenario** | **Prozentuale Veränderung des Spitzenabflusses [%]** | **Spitzenabfluss [m³/s]** | **Abflussbeiwert des OA ($\psi_{OA}$) [%]** |
|---|---|---|---|
| Unveränderte Eingangsdaten | / | 3,8 | 12,0 |
| Niederschlag 10 % verringert | - 24,0 | 2,9 | 10,1 |
| Niederschlag 10 % erhöht | + 27,8 | 4,8 | 14,0 |
| Vorfeuchte 10 % verringert | - 1,0 | 3,7 | 11,9 |
| Vorfeuchte 10 % erhöht | + 1,2 | 3,8 | 12,2 |
| MP-Dichte auf 20 MP/m² auf Ackerflächen verringert | + 0,0 | 3,8 | 12,1 |

Der Spitzenabfluss liegt zwischen 2,9 und 4,8 m³/s bei Abflussbeiwerten des Oberflächenabflusses zwischen 10,1 und 14,0 %.

**Vergleich modellierter Spitzenabfluss zu berechnetem Spitzenabfluss**

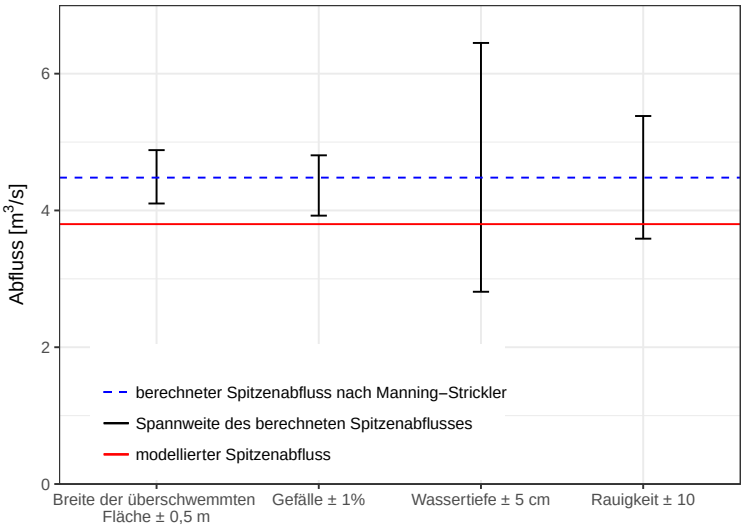



Abb. 6.1.2-3: Vergleich des modellierten Spitzenabflusses mit dem mit der GMS-Formel berechneten Spitzenabfluss für das Einzugsgebiet der Merscher Straße am 22.07.16

Um abschätzen zu können, ob die von RoGeR angegebenen Werte des Oberflächenabflusses realistisch sind, wird mit Hilfe der GMS-Fließformel der Spitzenabfluss berechnet. Der mit RoGeR berechnete Spitzenabfluss beträgt 3,8 $m^3/s$. Die Merscher Straße ist an der betrachteten Stelle von Hauswand zu Hauswand etwa 6 m breit. Das Wasser floss rund 20 cm hoch über die Straße. Der hydraulische Radius beträgt 0,187 m, die Querschnittsfläche 1,2 $m^2$. Aus dem DGM kann ein Gefälle von 5 % an dieser Stelle ausgelesen werden. Bei einem angenommenen Rauigkeitswert von 50 $m^{1/3}/s$, der ungleichmäßigen Betonflächen entspricht (Jirka & Lang, 2009, S. 24), ergibt sich eine Fließgeschwindigkeit von 3,7 m/s und ein Spitzenabfluss von 4,5 $m^3/s$. Die Eingangswerte der GMS-Formel werden allesamt nach oben und unten korrigiert, um den Einfluss dieser auf den berechneten Abfluss abzubilden und so den Bereich zu ermitteln, in dem sich der reelle Abfluss befunden haben wird. Die berechneten Spitzenabflüsse liegen recht nahe am modellierten Abfluss, wenn auch leicht darüber, abgesehen von den Fällen der herunterkorrigierten Wasserhöhe und Rauigkeit.

Aus den vier Parametern ließen sich noch eine Vielzahl von Mischvarianten berechnen, bzw. ein verringertes Gefälle mit einem zudem erhöhten Rauigkeitsbeiwert. Diese Mischvarianten würden die Spanne zwischen minimal und maximal möglichem Abfluss zusätzlich ausweiten.

**Gebildeter Oberflächenabfluss**

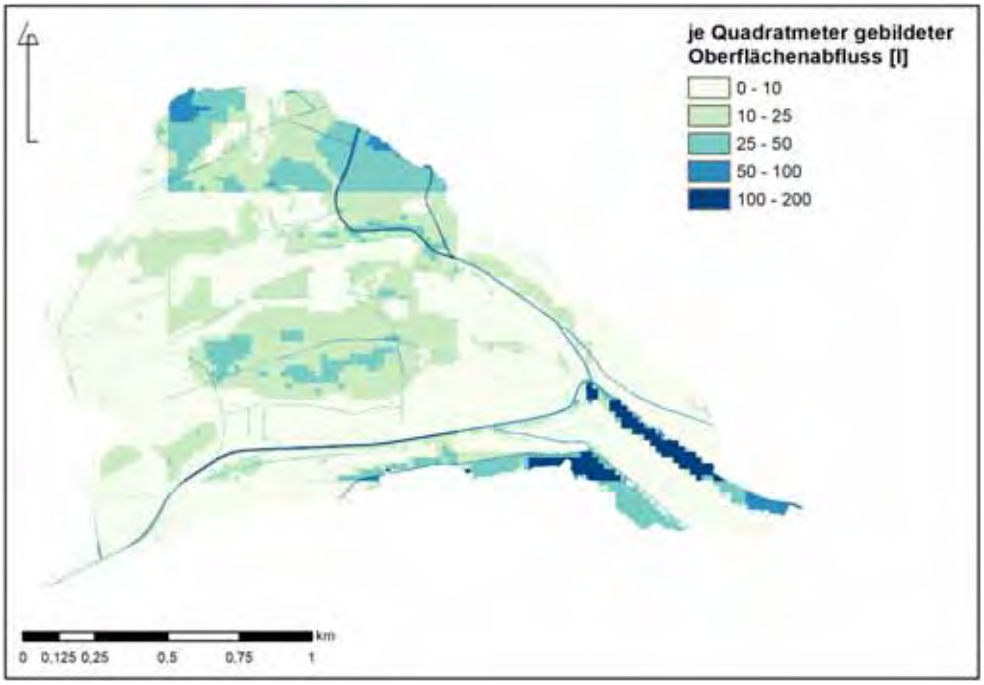



Abb. 6.1.2-4: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 22.07.16

Im größtenteils bewaldeten Einzugsgebiet der Merscher Straße wird nur in nennenswerten Mengen Oberflächenabfluss im Bereich der Ortschaft und auf den bodenversiegelnd wirkenden Straßen gebildet. Die Waldart hat keinen sichtbaren Einfluss auf die Menge des gebildeten OA (siehe Abb. 4.2-2). Im Vergleich zur Abbildung 4.2-3 spiegeln sich vielmehr die unterschiedlichen Bodenverhältnisse wider.

**Kumulierter Oberflächenabfluss**

Die auf Abbildung 6.1.2-5 dargestellten Fließpfade des kumulierten Oberflächenabflusses stimmen gut mit den Schadensmeldungen überein. Die Feuerwehreinsätze sind alle im Bereich der höchsten Abflussmengen zu verorten. Die stark wasserführenden Fließwege führen die Straßen hinunter in die Ortsmitte (a).

Anders als im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs, wo die Funkverbindung zur Einsatzleitstelle stark gestört war und die Einsätze deshalb mehrheitlich ohne Alarmierung abgearbeitet wurden, wurden die Einsätze in Larochette größtenteils über die Leitstelle disponiert. Zudem richtete die Feuerwehr in der Wache nach dem Einsatzstichwort „Unwetter“ eine Art lokale Leitstelle, ein sogenannter „*Poste fixe*“ ein. Hier wurden die Einsätze von der Einsatzleitstelle CSU 112 entgegengenommen, dokumentiert und die Einsatzkräfte dann nach Priorität per Funk zu den Einsätzen disponiert. Dieses Verfahren verhindert in Katastrophenfällen, dass die Einsatzkräfte zu jedem Einsatz einzeln per digitalem Meldeempfänger alarmiert werden müssen. Bei Unwetterlagen würde der Piepser andernfalls ständig Alarm geben, was dazu

führen könnte, dass man die Alarmierungen ignoriert und gegebenenfalls prioritäre Einsätze verpasst. Das Auslösen der Unwetteralarmierung hat allerdings zur Folge, dass die Einsätze nur mehr per Funk von der Leitstelle weitergegeben und nicht mehr in das Einsatzleitsystem eingegeben wurden. Die Koordinaten der Einsätze mussten daher aus der Einsatzdokumentation des *Poste fixe* der Feuerwehr Larochette abgeleitet werden, um ein möglichst vollständiges Lagebild zu erhalten.

Auf Abbildung b) wird ersichtlich, dass das Routing des Abflusses nicht ganz fehlerfrei ist. Trotz Einbeziehung der Option der „Sink directions“ mit der das Routing auch in Senken fortgeführt werden kann und kontinuierliche Fließpfade abgebildet werden sollten, endet der stark wasserführende Fließpfad, der die Straße hinunterführt bei b 1). Das Wasser wird aber die Straße komplett bis in die Ortsmitte überschwemmt haben.

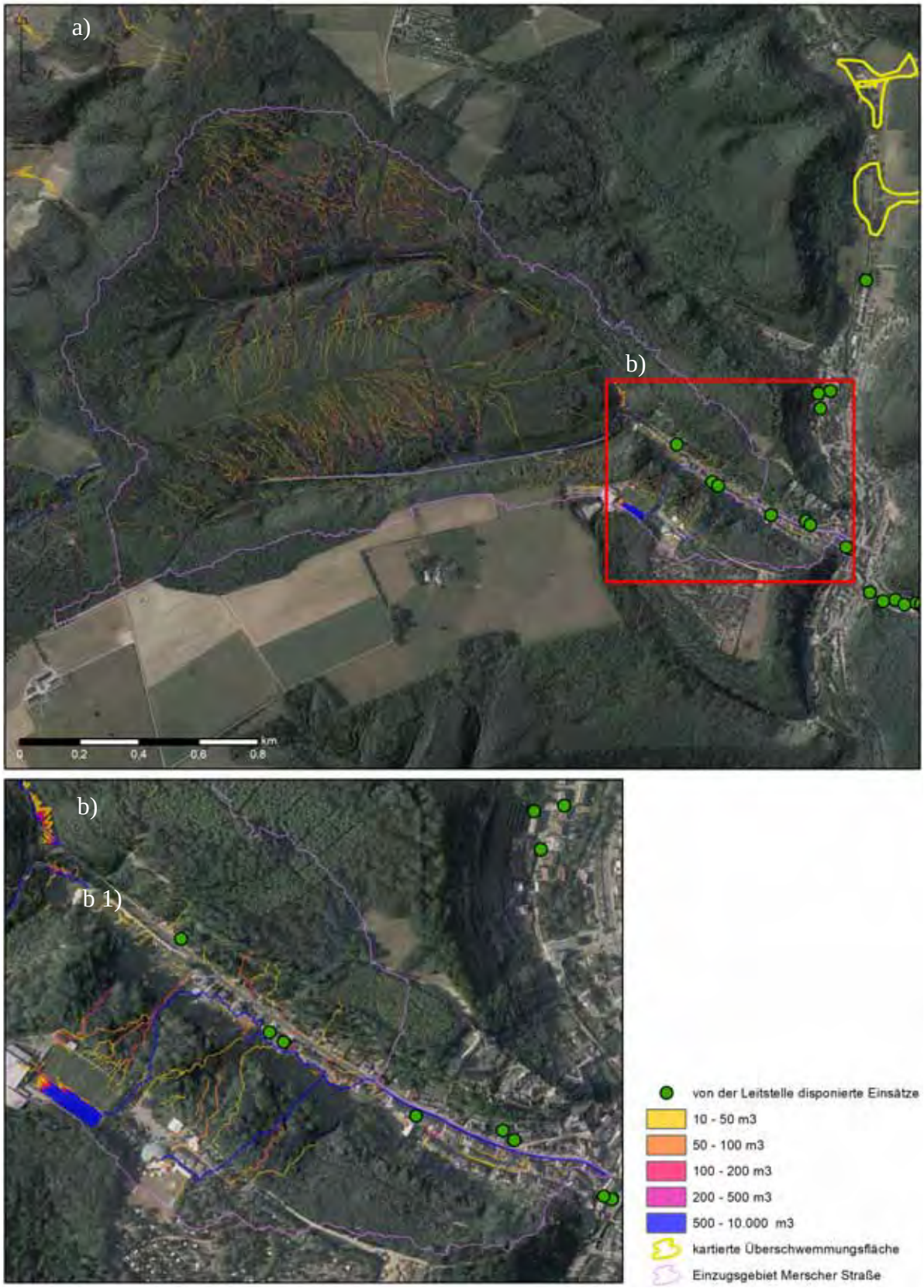



Abb. 6.1.2-5: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 22.07.16

An b 1) kam zudem ein bedeutsamer Wasserstrom aus der in nordöstlich ausgerichteter Rinne und sorgte für eine kleine Hangrutschung. Ausgehend von dem mit RoGeR modellierten OA kann dieser Fließpfad allerdings nicht abgebildet werden.

Abb. 6.1.2-6: Nicht abgebildeter bedeutsamer Fließweg in der Merscher Straße am 22.07.16

Abbildung 6.1.2-6 zeigt die Stelle vier Tage nach der Sturzflut. Zu dem Zeitpunkt war der Hang am Wasserspeicher wieder einigermaßen rekonstruiert und das Geschiebe aus der Straße geräumt.

### 6.1.3 Scheerbach

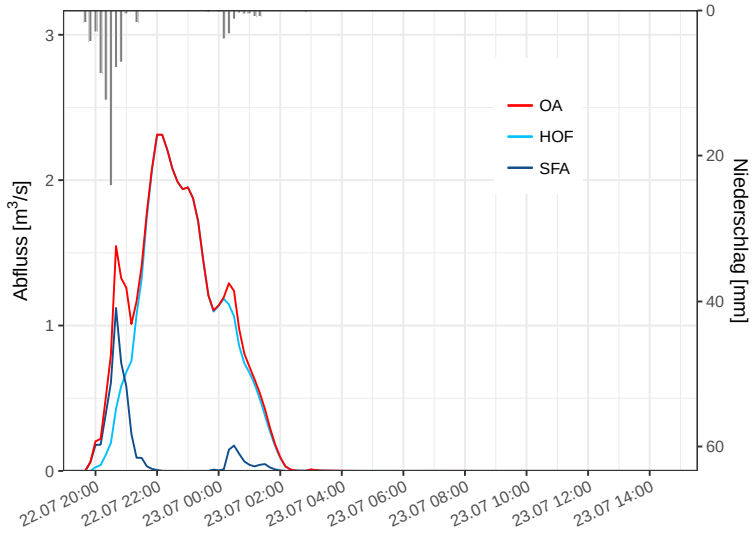



Abb. 6.1.3-1: Oberflächenabflussganglinie des Scheerbachs am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 22.07.16

Am Auslass des Scheerbachs tritt kurz vor 20:00 der erste Oberflächenabfluss auf und nimmt schnell zu. Interessanterweise führt der SFA zunächst zu einer Abflussspitze um 20:30. Der SFA versiegt danach wieder und der HOF führt zu einem Spitzenabfluss von 2,3 $m^3/s$ um 22:00. Im Vergleich zur Abflussganglinie der Merscher Straße dauert das Abflussgeschehen des

Scheerbachs länger und endet um 02:00. Die nach Mitternacht einsetzenden Regenfälle führen noch einmal zu einer kurzen Zunahme des bereits abnehmenden Oberflächenabflusses.

Um 21:28 wurde die Freiwillige Feuerwehr erstmalig zu einem Einsatz aufgrund von Überschwemmungen in der Rue Scheerbach, der Straße, die das Scheerbachtal hochführt, alarmiert. Der Oberflächenabfluss bemisst sich zu dem Zeitpunkt laut RoGeR auf 1,4 $m^3/s$. Ob es nicht allerdings schon deutlich früher zu Überschwemmungen im Einzugsgebiet des Scheerbachs kam, lässt sich nicht mehr rekonstruieren. Die Feuerwehr in Larochette arbeitete ab einem gewissen Zeitpunkt die Einsätze eigenständig ab, so dass vermutlich nicht alle Einsätze über die Einsatzleitstelle disponiert wurden, sondern die Einsatzkräfte direkt vor Ort von den Anwohnern um Hilfe gebeten wurden und eingriffen.

Im Einzugsgebiet des Scheerbachs infiltrieren im Mittel 71,2 % des Niederschlags. Die Matrixinfiltration macht einen Anteil von 63,6 % aus, die Makroporeninfiltration 7,6 % und die Trockenrissinfiltration weniger als 0,1 %. 28,8 % des Niederschlags laufen als OA ab. Davon entfallen 25,5 % auf den HOA und 3,2 % des OA wird auf Gewässeroberflächen gebildet. Im Gebietsmittel spielt der SFA mit weit unter 0,1 % kaum eine Rolle.

**Sensitivitätsanalyse**

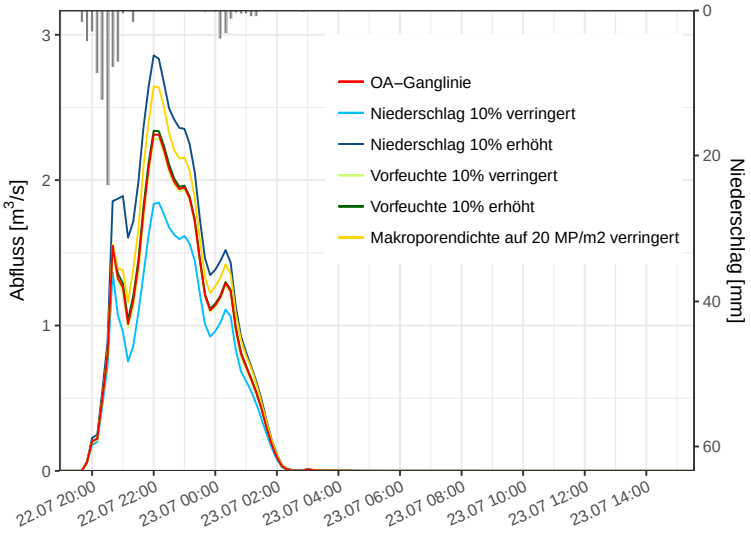



Abb. 6.1.3-2: Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses des Scheerbachs am Auslass in Larochette am 22.07.16

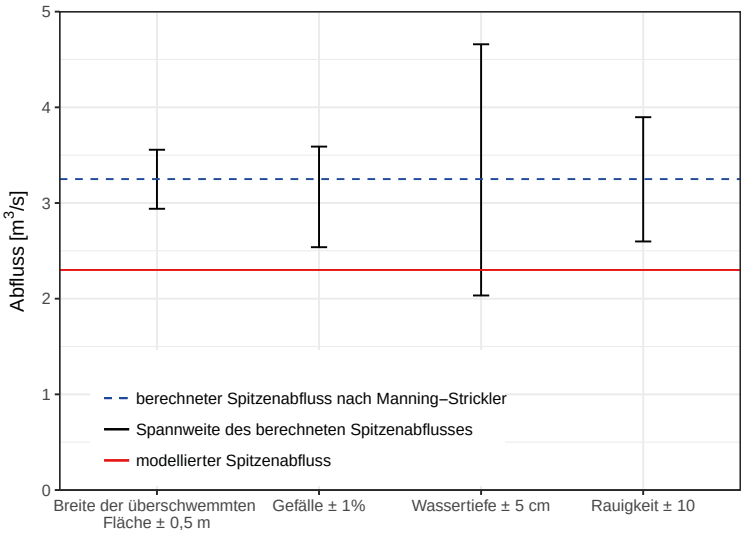
Auch für das Einzugsgebiet des Scheerbachs wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Wie in den zwei anderen Einzugsgebieten hat auch im Einzugsgebiet des Scheerbachs der Niederschlag den stärksten Einfluss auf den Oberflächenabfluss. Auf Veränderungen der Vorfeuchte reagiert das Modell in vergleichbarem Maße wie schon im Einzugsgebiet der Merscher Straße. Eine verringerte Makroporendichte führt allerdings zu einer deutlichen Erhöhung des Spitzenabflusses.

Tab. 6.1.3-1: Kennwerte der Sensitivitätsanalyse des Oberflächenabflusses des Scheerbachs am Auslass in Larochette am 22.07.16

| **Szenario** | **Prozentuale Veränderung des Spitzenabflusses [%]** | **Spitzenabfluss [m³/s]** | **Abflussbeiwert des OA ($\psi_{OA}$) [%]** |
|---|---|---|---|
| Unveränderte Eingangsdaten | / | 2,3 | 28,8 |
| Niederschlag 10 % verringert | - 20,2 | 1,8 | 26,1 |
| Niederschlag 10 % erhöht | + 23,5 | 2,9 | 32,5 |
| Vorfeuchte 10 % verringert | - 1,2 | 2,3 | 28,3 |
| Vorfeuchte 10 % erhöht | + 1,1 | 2,3 | 29,1 |
| MP-Dichte auf 20 MP/m² auf Ackerflächen verringert | + 14,3 | 2,6 | 32,0 |

Der Spitzenabfluss liegt zwischen 1,8 und 2,9 m³/s bei Abflussbeiwerten des Oberflächenabflusses zwischen 26,1 und 32,5 %.

### Vergleich modellierter Spitzenabfluss zu berechnetem Spitzenabfluss



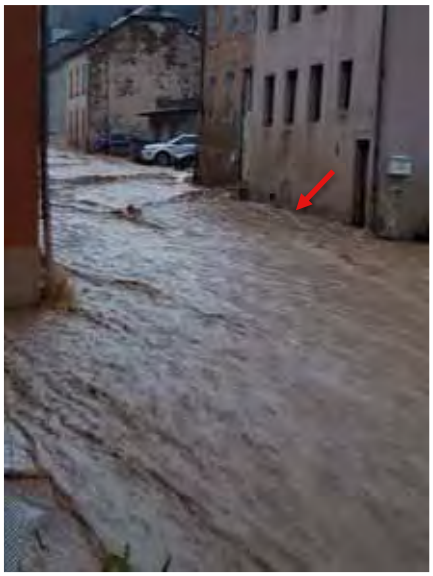



Abb. 6.1.3-3: Vergleich des modellierten Spitzenabflusses mit dem mit der GMS-Formel berechneten Spitzenabfluss für das Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16 (links), Foto der Überschwemmungen in der Rue Scheerbach (rechts)

Wiederum wird der Spitzenabfluss mit der GMS-Formel berechnet, um die Plausibilität der modellierten Ergebnisse zu prüfen, da keine Messdaten des Abflussereignisses vorliegen. Der mit RoGeR berechnete Spitzenabfluss beträgt 2,3 m³/s. An der oben abgebildeten Referenzstelle ist die Straße von Hauswand zu Hauswand 5,5 m breit. An dem runden Fenster links neben der Tür konnte eine Wassertiefe von 20 cm nachgemessen werden. Der hydraulische Radius beträgt 0,1864 m, die Querschnittsfläche 1,1 m². Aus dem DGM kann ein Gefälle von 3 % an dieser Stelle ausgelesen werden. Bei einem angenommenen Rauigkeitswert von

50 $m^{1/3}/s$, der ungleichmäßigen Betonflächen entspricht (Jirka & Lang, 2009, S. 24), ergibt sich eine Fließgeschwindigkeit von 3,0 m/s und ein Spitzenabfluss von 3,2 $m^3/s$.

Abgesehen vom Fall der nach unten korrigierten Wassertiefe, liegen die berechneten Abflusswerte über dem modellierten Wert.

### Gebildeter Oberflächenabfluss

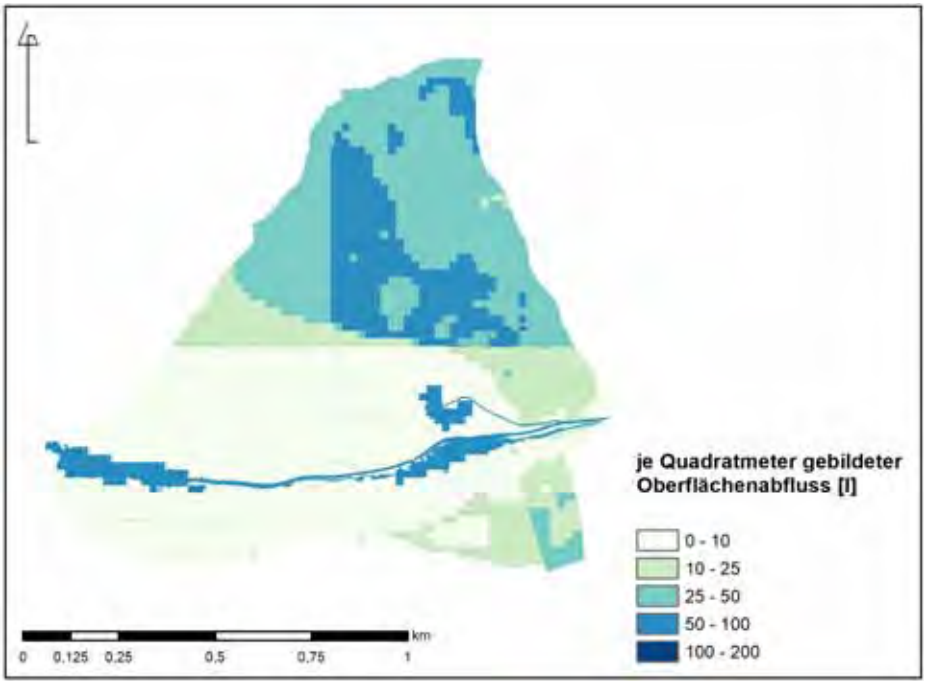



Abb. 6.1.3-4: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16

Im bewaldeten Teil des Einzugsgebiets des Scheerbachs wird kaum Oberflächenabfluss gebildet, was an der Interzeption, dem porösen Boden und dem, im Vergleich zur Nordhälfte des Gebiets, geringeren Niederschlag liegt (siehe Abb. 4.3-2 und Abb. 4.3-3). Auf den Straßen und im Bereich der Ortschaft entsteht allerdings viel OA. Auch auf den Feldern der nördlichen Gebietshälfte entstehen bedeutsame Mengen OA.

### Kumulierter Oberflächenabfluss

Beim Routing und Kumulieren des Oberflächenabflusses wird sichtbar, dass dieser flächig über die Äcker und Wiesen der Nordhälfte des Einzugsgebiets des Scheerbachs abläuft, sich dann zu einzelnen, größeren Wasserströmen zusammenfügt und in die Ortsmitte fließt.

Die Feuerwehreinsätze befinden sich alle im Bereich abgebildeter Fließpfade, allerdings sind diese nur von mittlerer Intensität. Das Routing ist abermals nicht fehlerfrei, weshalb der starke Wasserstrom, der das Tal in westliche Richtung hinabfließt, etwa in der Hälfte des Tals versiegt. Auch fließt das Wasser, das nordöstlich des rot markierten Kartenausschnitts gebildet wird,

nicht weiter in das Tal ab. Hätte das Routing fehlerfrei funktioniert, wären im Bereich der Schadensmeldungen vermutlich höhere Wassermengen dargestellt.

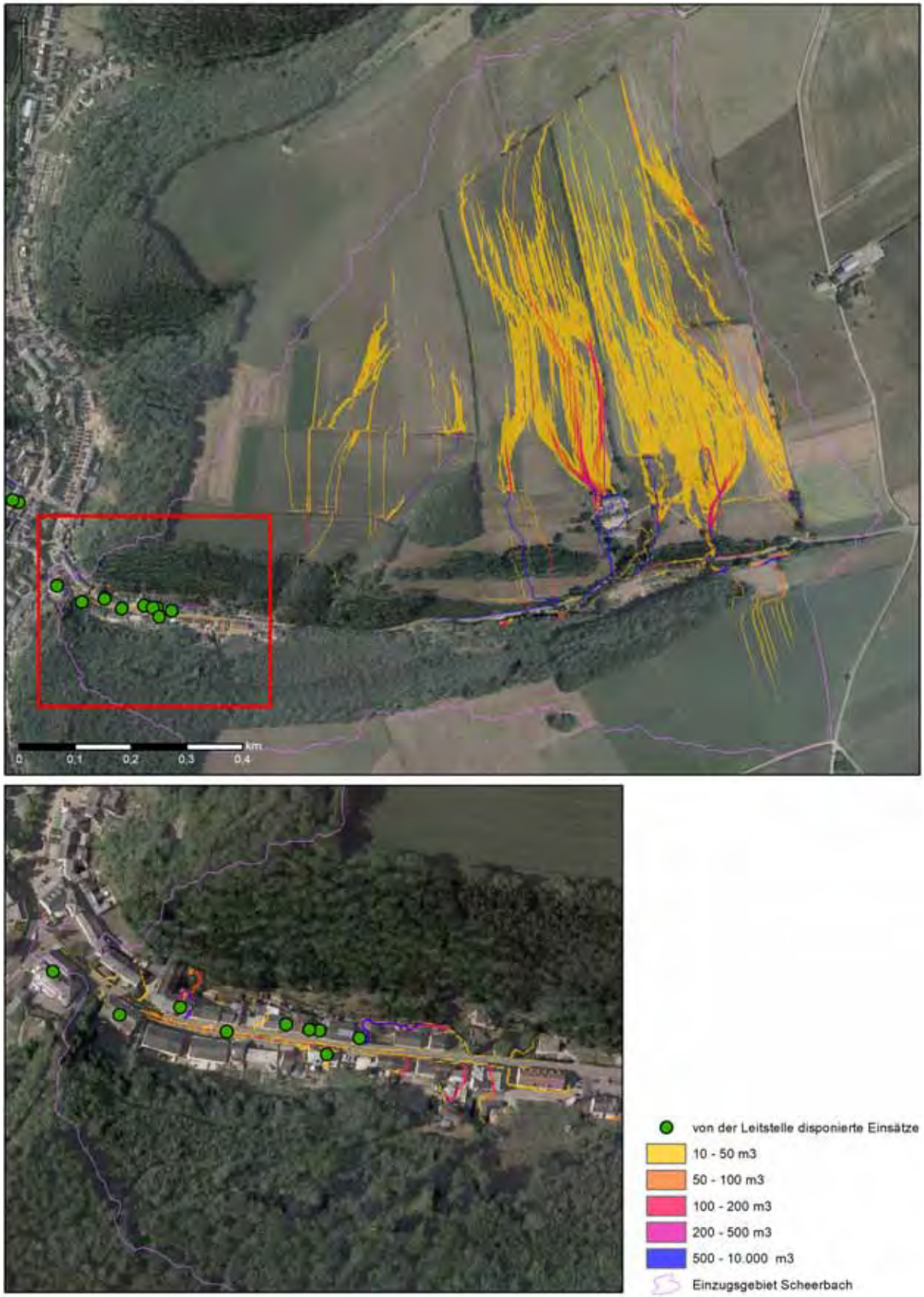



Abb. 6.1.3-5: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16

**RoGeR Flow**

Da das Einzugsgebiet des Scheerbachs mit 1,1 km² das kleinste der drei untersuchten Gebiete ist, sind die zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten ausreichend, um die zwei 2D-hydraulischen Modelle RoGeR Flow und RoGeR dynamo auf dieses anzuwenden.

RoGeR Flow stellt eine 2D-hydraulische Erweiterung des Niederschlags-Abflussmodells RoGeR dar, das den für jeden einzelnen Zeitschritt modellierten Oberflächenabfluss hydraulisch korrekt entlang des Reliefs routet und dabei auf der GMS-Formel zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit beruht. Neben dem DGM, der Versiegelung, der Fließrichtung und der zeitschrittbasierten OA-Raster werden die Rauigkeitsbeiwerte des Gebiets nach Strickler benötigt. Da nur die von RoGeR ausgegebenen OA-Raster nacheinander in das Modell eingelesen und das Wasser geroutet wird, kann Reinfiltration des abfließenden Wassers nicht modelliert werden.

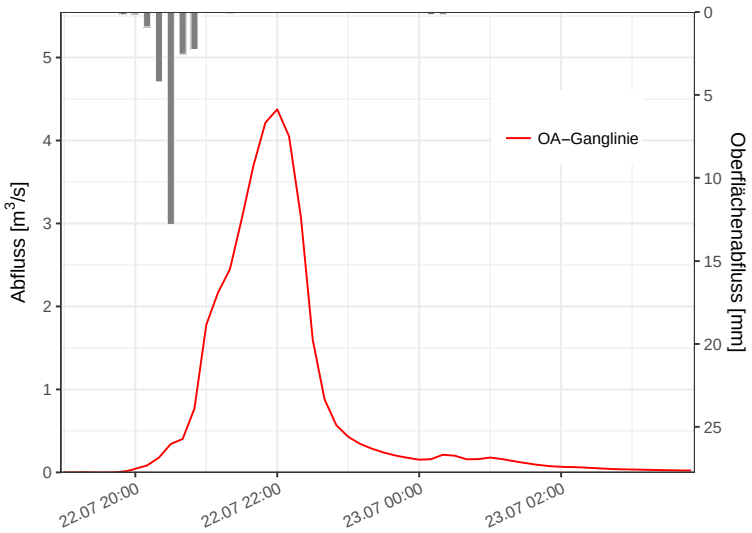



Abb. 6.1.3-6: Oberflächenabflussganglinie des RoGeR Flow-Modells am Auslass des Scheerbachs in der Ortsmitte am 22.07.16

Vergleicht man die Ganglinie des Oberflächenabflusses des RoGeR Flow-Modells mit der von RoGeR in seiner Basisversion (Abb. 6.1.3-1), so fällt ein deutlich höherer Spitzenabfluss um 22:00 auf. RoGeR Flow gibt 4,4 m³/s an, gegenüber 2,3 m³/s in RoGeR. Im Gegenzug verkürzt sich der Durchgang der Flutwelle deutlich. Der Oberflächenabfluss beginnt kurz nach 20:00 und steigert sich drastisch ab 20:30. Um 22:00 wird der Scheitelpunkt der Hochwasserwelle erreicht. Ab 23:00 ist nur noch geringer OA feststellbar. Laut der Basisversion von RoGeR endet der Oberflächenabfluss hingegen erst um 02:00.

RoGeR Flow gibt an, dass 84 % des Oberflächenabflusses am Auslass abgeflossen sind, die restlichen 16 % befinden sich zum Ende des Modelllaufs noch in Senken, aus denen das Wasser nicht abfließen kann.

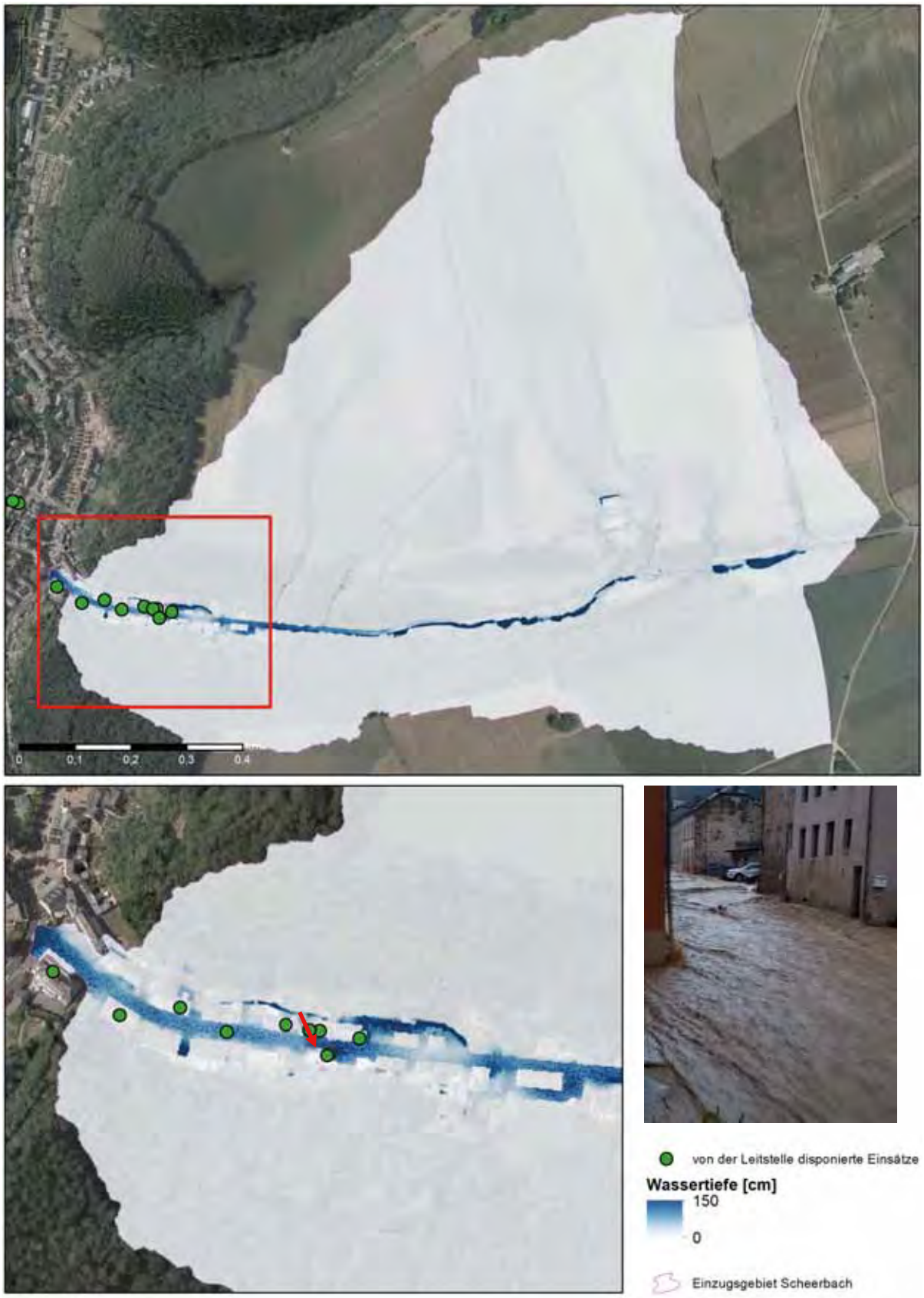



Abb. 6.1.3-7: Mit RoGeR Flow modellierte maximale Wassertiefen im Laufe der Sturzflut im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16

Die mit RoGeR Flow simulierten Fließpfade (Abb. 6.1.3-7) ähneln denen des kumulierten Oberflächenabflusses (Abb. 6.1.3-5). Allerdings fließt das Wasser entlang des Reliefs korrekt ab. Versiegende Wasserströme können keine festgestellt werden.

Im Oberlauf des Bachs sind die Wassertiefen in ein paar Senken besonders groß. Es wird aber darauf verzichtet, die Senken im DGM einzuschneiden, damit diese sich nicht auffüllen können, da aufgrund der großen Wassermengen, die sturzartig den Bach hinuntergeflossen sind, davon auszugehen ist, dass es zu Verklausungen mit Aufstauungen kam. Die Verdolung kurz vor den ersten Häusern war nicht ausreichend groß dimensioniert, um das Wasser abführen zu können, weshalb es über die Straße in die Ortschaft lief. Tatsächlich stellt das Modell das über die Straße ablaufende Wasser dar. Allerdings sind die angegebenen Wassertiefen deutlich zu hoch. An der mit dem roten Pfeil gekennzeichneten Stelle stand das Wasser etwa 20 cm hoch. Der Pfeil zeigt in die Blickrichtung des Fotos. RoGeR Flow gibt für diese Stelle eine maximale Wassertiefe von rund 150 cm an. Somit ist RoGeR Flow nur bedingt quantitativ aussagekräftig in Bezug auf die Wassertiefen. Eine qualitative Aussage zur Lage der Fließpfade und zu besonders betroffenen Flächen ist aber möglich.

**RoGeR dynamo**

RoGeR dynamo kombiniert das NA-Modell RoGeR mit einem 2D-hydraulischen Modell und bestimmt für jeden Zeitschritt die Abflussvolumen der einzelnen Abflussbildungsprozesse. Zugleich wird zeitschrittbasiert der Oberflächenabfluss entlang des Reliefs geroutet. Somit trifft pro Zeitschritt Niederschlag auf die Pixel, wo dieser im Boden versickern kann oder je nach Gegebenheit in einer der Abflusskomponenten wirksam wird. Neben dem Niederschlag kann aber auch lateral zufließender Oberflächenabfluss auf diesem Pixel versickern oder als OA weiter abfließen. Dieses Modell ist also in der Lage, Reinfiltration von oberflächlich abfließendem Wasser zu berücksichtigen.

Die Ganglinie des Oberflächenabflusses des dynamischen Modells unterscheidet sich bei gleichen Einstellungen in der Steuerdatei des Modells grundlegend von den Ganglinien des RoGeR und RoGeR Flow-Modells (Abb. 6.1.3-8).
Zum einen bilden sich zwei Flutwellen aus. Zum anderen ist der Spitzenabfluss um Größenordnungen kleiner. So gibt das dynamische Modell einen Maximalwert von 309,7 l/s um 23:40 an, im Vergleich zu 2,3 $m^3/s$ in RoGeR in der Basisversion. Der Beiwert des Oberflächenabflusses beträgt 2,0 %. 93,5 % des Niederschlags infiltrieren. 75,3 % des Wassers infiltrieren in die Bodenmatrix, 17,9 % in Makroporen und 0,3 % in Trockenrisse.

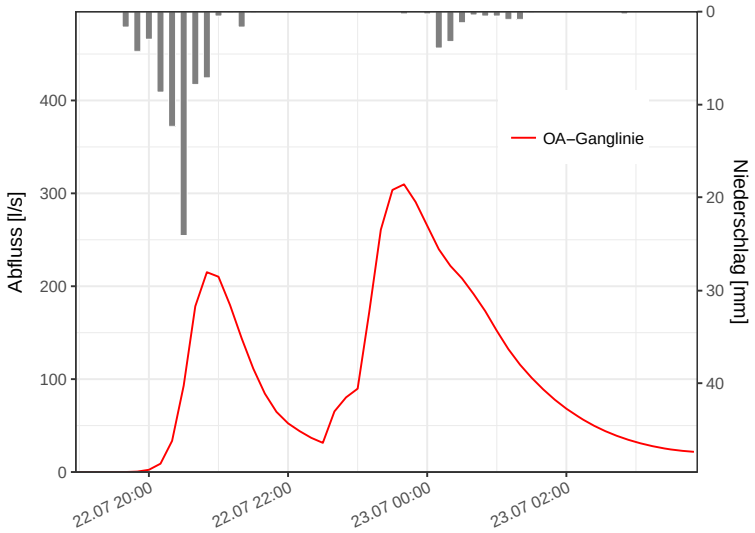



Abb. 6.1.3-8: Oberflächenabflussganglinie des RoGeR dynamo-Modells am Auslass des Scheerbachs in der Ortsmitte am 22.07.16

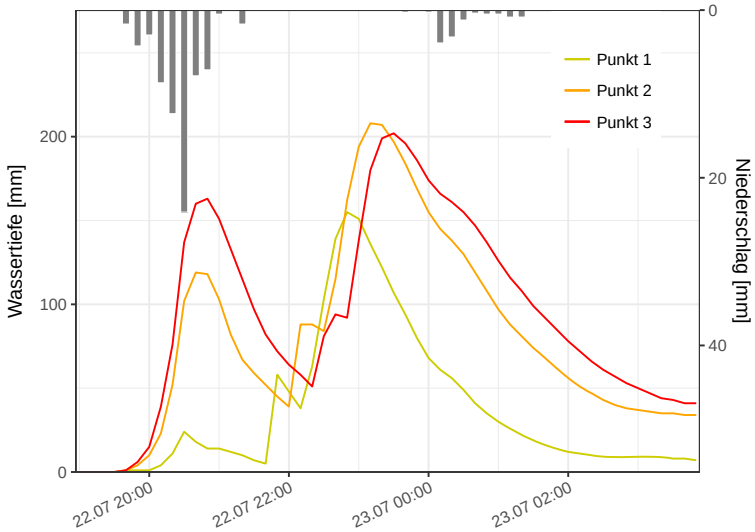



Abb. 6.1.3-9: Ganglinie der mit RoGeR dynamo modellierten Wassertiefe an 3 Punkten im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16

Da die mit RoGeR dynamo modellierten Abflussvolumen sich bedeutend von den mit RoGeR berechneten, und nach der Berechnung mit der GMS-Formel als plausibel eingeschätzt, unterscheiden, wird entschieden, die Wassertiefe an drei Punkten zu den einzelnen Zeitschritten auszulesen und daraus eine Ganglinie zu generieren. Die Punkte sind auf Abbildung 6.1.3-11 dargestellt. Die Ganglinien verlaufen mit Ausnahme des Punktes 1 ähnlich zur Ganglinie des Oberflächenabflusses (siehe Abb. 6.1.3-8). Die Wassertiefen entsprechen der erwarteten Größenordnung von 20 cm.

Auf Abbildung 6.1.3-10 ist zu sehen, dass sich ab 20:00 erster Oberflächenabfluss auf den versiegelten Flächen bildet. Um 20:30 fließen bereits große Wassermengen über die Wiesen und Felder im nördlichen Einzugsgebiet ab, und die Wasserhöhen steigen auf den versiegelten Flächen. Um 21:00 ist der erste Scheitelpunkt erreicht. Der OA erreicht am östlichen Ende des Einzugsgebiets den Scheerbach. Um 21:30 haben zwei Wasserströme den bewaldeten Nordhang durchflossen und treffen im Ortsausgang auf die Straße. Zu diesem Zeitpunkt wird die Feuerwehr zum ersten Einsatz in die Rue Scheerbach gerufen. Anschließend läuft der OA über die Felder weiter ab und versiegt allmählich. Die zweite Flutwelle gegen 23:30 wird durch das Wasser verursacht, das den Scheerbach hinunterfließt und in die Rue Scheerbach einläuft.

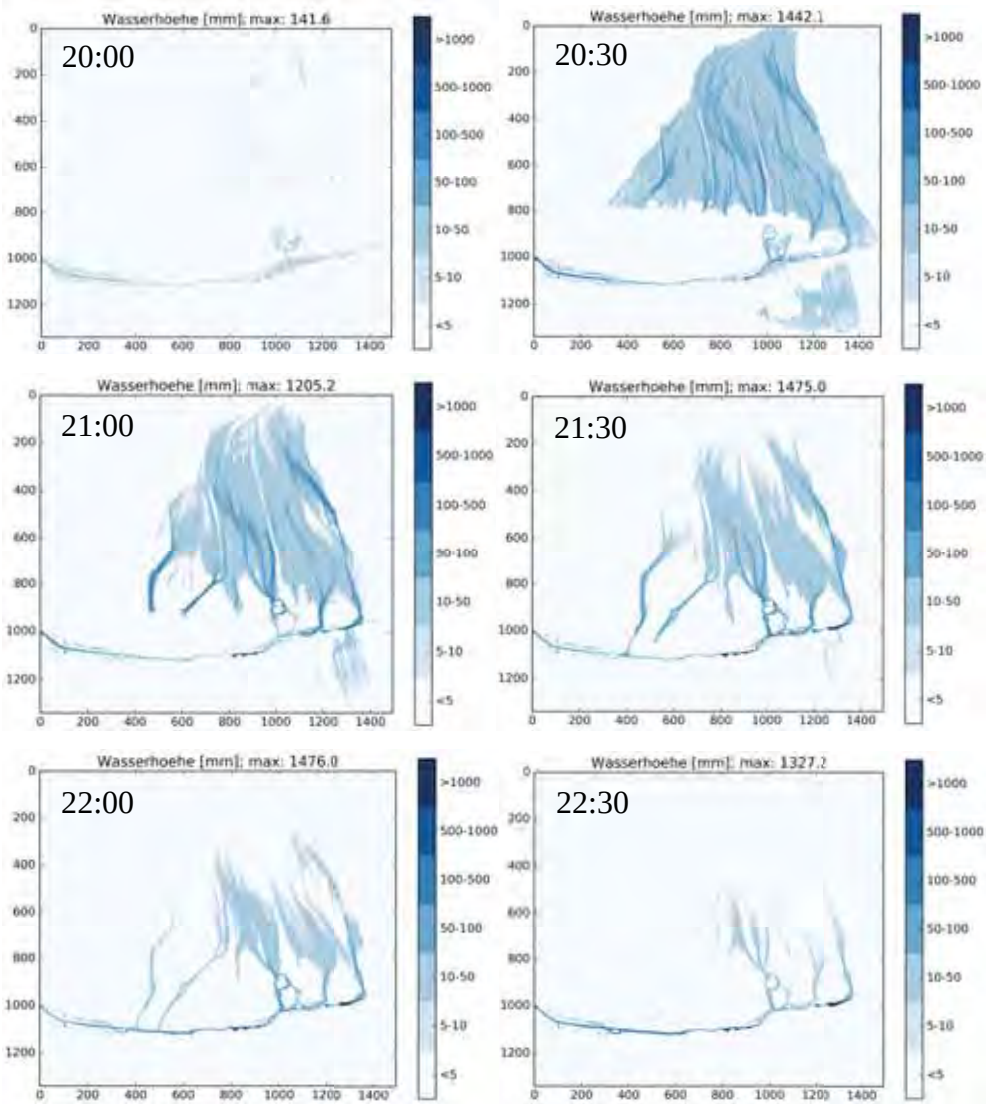



Abb. 6.1.3-10: Von RoGeR dynamo automatisch generierte Abbildungen der Wassertiefen zu einzelnen Zeitschritten am 22.07.16

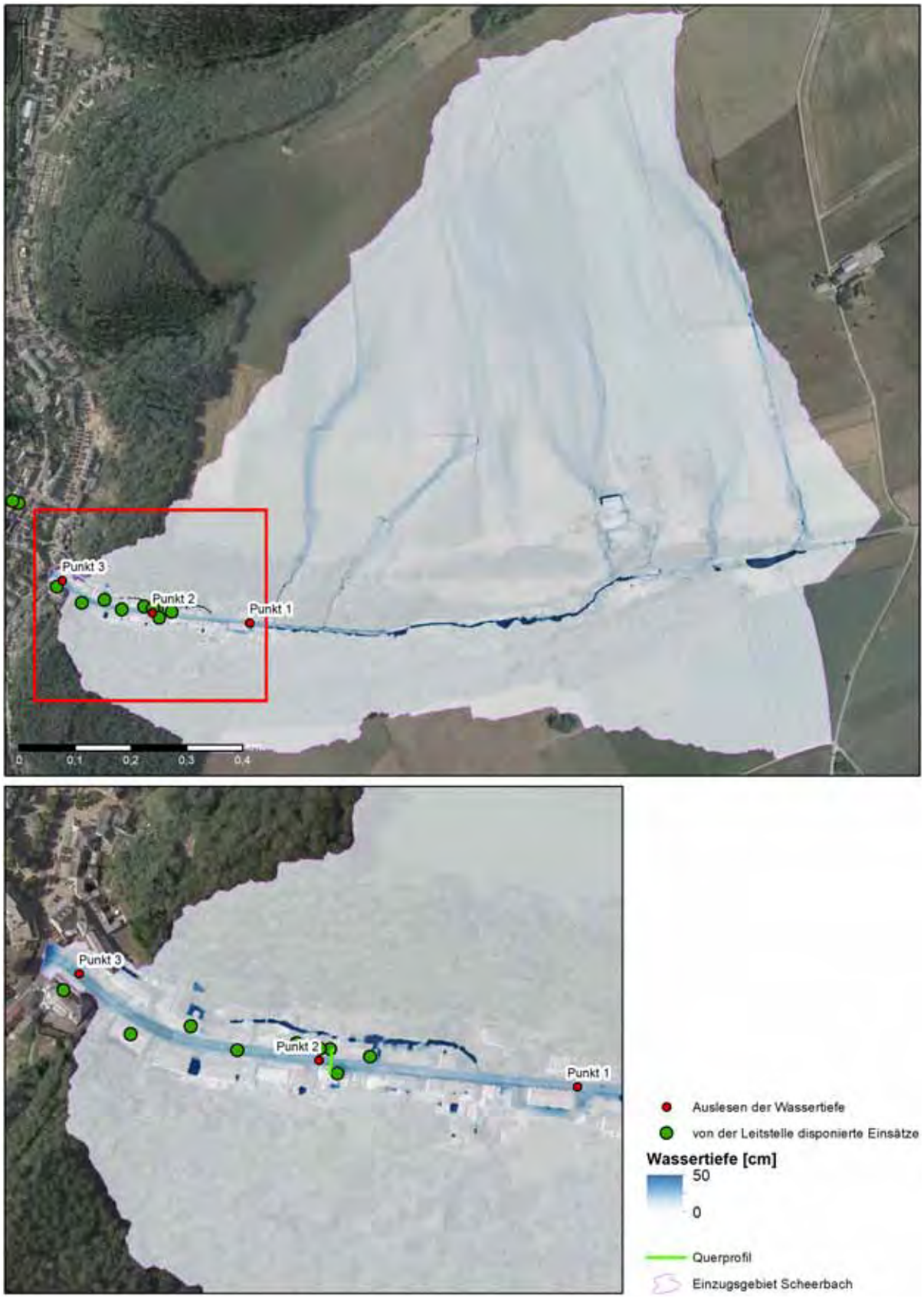



Abb. 6.1.3-11: Mit RoGeR dynamo modellierte maximale Wassertiefen im Laufe der Sturzflut im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16

Im Vergleich zu den mit RoGeR Flow modellierten Wassertiefen sind die mit dem dynamischen Modell simulierten Wassertiefen deutlich realistischer. So werden für die Referenzstelle Wassertiefen um 240 mm modelliert (Abb. 6.1.3-12).

Da das Modell keinen ganz ebenen Wasserspiegel wiedergibt, schwanken die Werte um ein paar Zentimeter nach oben und nach unten, je nachdem wo man die Werte ausliest.
Um dies zu illustrieren, wird ein Querprofil von Hausdach zu Hausdach durch das DGM gezogen, so dass man die 5,5 m breite, ebene Straße erkennt. Die Wassertiefe wird für eine etwas breitere Fläche modelliert. Man erkennt, dass auf der linken Straßenseite die Wassertiefe etwas geringer ist, was dem Knick im DGM geschuldet sein kann. Auf der rechten Straßenseite hingegen werden stellenweise bis zu 300 mm Wassertiefe modelliert, trotz ebenerdiger Straße.

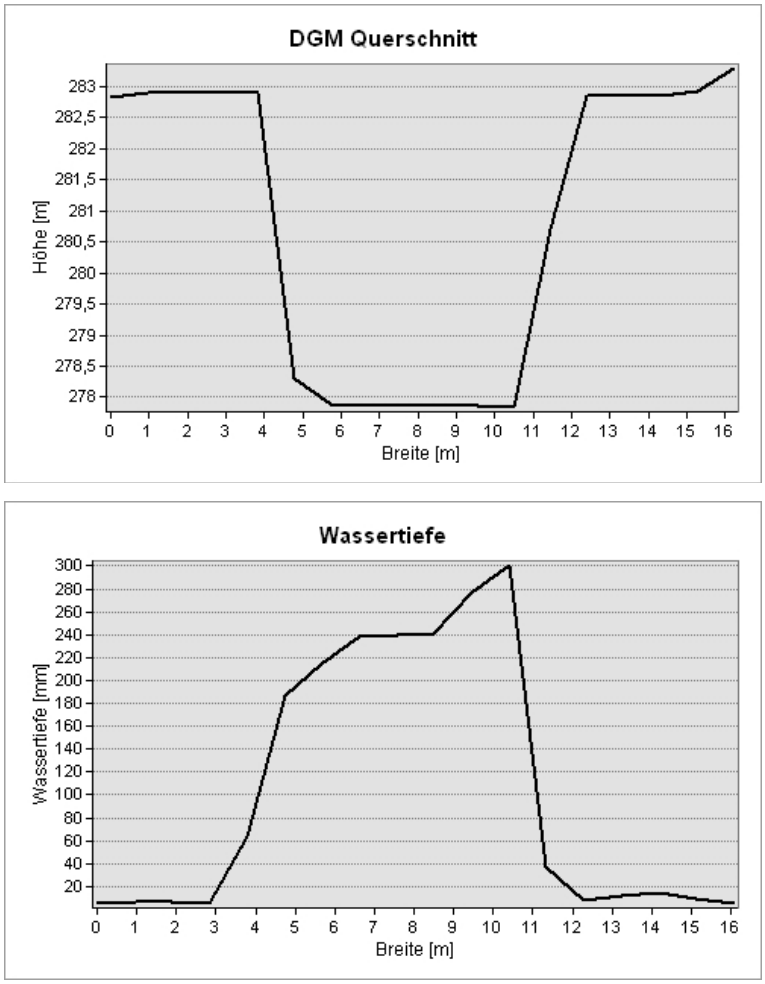



Abb. 6.1.3-12: Querschnitt durch das DGM und die mit RoGeR dynamo modellierte Wassertiefe am Referenzpunkt in der Scheerbachstraße am 22.07.16

Leitet man aus dem überschwemmten Querschnitt die Fläche grob ab, so ergibt sich eine Fläche von etwa 1,6 $m^2$. Nimmt man nun das gleiche Gefälle und die gleiche Rauigkeit an wie beim Punkt „Vergleich modellierter Spitzenabfluss zu berechnetem Spitzenabfluss“, so ergibt sich ein Abfluss von 5,4 $m^3/s$ bei einer mittleren Geschwindigkeit von 3,5 m/s. Dies bestätigt, dass

die vom Modell ausgegebenen Abflussvolumen nicht mit der modellierten Wasserhöhe übereinstimmen. Da aber die Wasserhöhen dem Erwartungswert entsprechen, scheint das Modell diesbezüglich zu funktionieren.

### Sensitivitätsanalyse

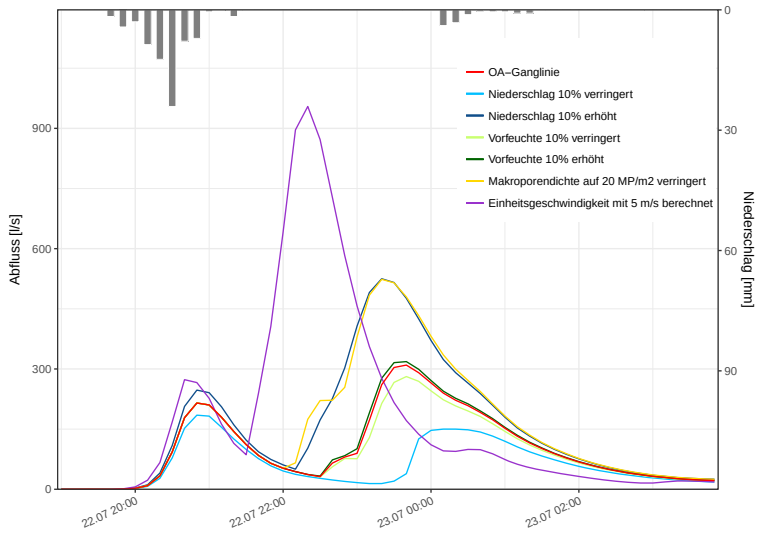



Abb. 6.1.3-13: Sensitivitätsanalyse des mit RoGeR dynamo modellierten Oberflächenabflusses am Auslass des Scheerbachs in der Ortsmitte am 22.07.16

Wie schon beim NA-Modell RoGeR wird auch für RoGeR dynamo eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, wenngleich die ausgegebenen Werte des Abflusses fragwürdig sind, wie eben dargelegt. Die Reaktion des Modells auf Veränderungen der Eingangsgrößen ist, unabhängig von den absoluten Abflusswerten, dennoch ersichtlich.

Tab. 6.1.3-2: Kennwerte der Sensitivitätsanalyse des dynamischen Modells im Einzugsgebiet des Scheerbachs am Auslass in Larochette am 22.07.16

| **Szenario** | **Prozentuale Veränderung des Spitzenabflusses [%]** | **Spitzenabfluss [l/s]** | **Abflussbeiwert des OA ($\psi_{OA}$) [%]** |
|---|---|---|---|
| Unveränderte Eingangsdaten | / | 309,7 | 2,0 |
| Niederschlag 10 % verringert | - 40,3 | 184,8 | 1,8 |
| Niederschlag 10 % erhöht | + 69,5 | 525,0 | 2,1 |
| Vorfeuchte 10 % verringert | - 9,2 | 281,1 | 1,8 |
| Vorfeuchte 10 % erhöht | + 2,8 | 318,4 | 2,0 |
| MP-Dichte auf 20 MP/m$^2$ auf Ackerflächen verringert | + 69,0 | 523,5 | 2,3 |
| Einheitsgeschwindigkeit auf 5 m/s erhöht | + 208,2 | 954,6 | 2,4 |

Die prozentualen Veränderungen des Spitzenabflusses weichen stark von denen aus RoGeR in seiner Basisversion ab (siehe Tab. 6.1.3-1). Führt eine Verringerung des Niederschlags um 10 % in RoGeR zu einer Abnahme des Spitzenabflusses von 20,2 %, so führt dies in RoGeR dynamo zu einem um 40,3 % verringerten Spitzenabfluss. Am stärksten beeinflusst die Veränderung der Einheitsgeschwindigkeit von 3 m/s, so wie in allen bisherigen Modellläufen angenommen, auf 5 m/s die Dynamik und das maximale Abflussvolumen. RoGeR setzt zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit auf die GMS-Fließformel. Hierzu wird zunächst ein Wasserstand von 1 m im ganzen Einzugsgebiet angenommen und dann in Kombination mit der Rauigkeit und dem Gefälle die Fließgeschwindigkeit berechnet, eine sogenannte Einheitsgeschwindigkeit. Bei jedem Zeitschritt wird die Einheitsgeschwindigkeit mit der Wassertiefe zu dem Zeitpunkt multipliziert und so die tatsächliche Fließgeschwindigkeit berechnet. Dieses Verfahren vermeidet, dass für jeden Zeitschritt die GMS-Fließformel erneut angewendet werden muss. Standardmäßig wird für die Einheitsgeschwindigkeit eine maximale Fließgeschwindigkeit von 3 m/s angenommen. Gibt die GMS-Formel also stellenweise höhere Fließgeschwindigkeiten aus, so werden diese auf 3 m/s reduziert (Leistert, 2019a). Die Veränderung dieser Beschränkung auf 5 m/s hat erhebliche Auswirkungen auf die Ganglinie.

## 6.2 Modellierung des Starkregenereignisses am 1. Juni 2018

Das Starkregenereignis des 1. Juni 2018 führte nur im Einzugsgebiet der Merscher Straße und des Scheerbachs zu Überschwemmungen, so dass die Anwohner auf die Hilfe der Feuerwehr angewiesen waren. In der nicht betrachteten Region des Müllerthals kam es bei diesem Ereignis allerdings zu enormen Schäden. Im Folgenden soll untersucht werden, ob RoGeR abbilden kann, wieso es in den untersuchten Einzugsgebieten nur zu geringen Schäden kam.

Da es zeitlich nicht möglich war, sämtliche im vorherigen Abschnitt präsentierten Untersuchungen auch auf dieses Ereignis anzuwenden, wurden nur die vielversprechendsten Ansätze weiterverfolgt, nämlich die NA-Modellierung mit RoGeR und darauf aufbauend die Kumulation des Oberflächenabflusses, sowie die Modellierung mit RoGeR dynamo im Einzugsgebiet des Scheerbachs.

### 6.2.1 Schrondweilerbach

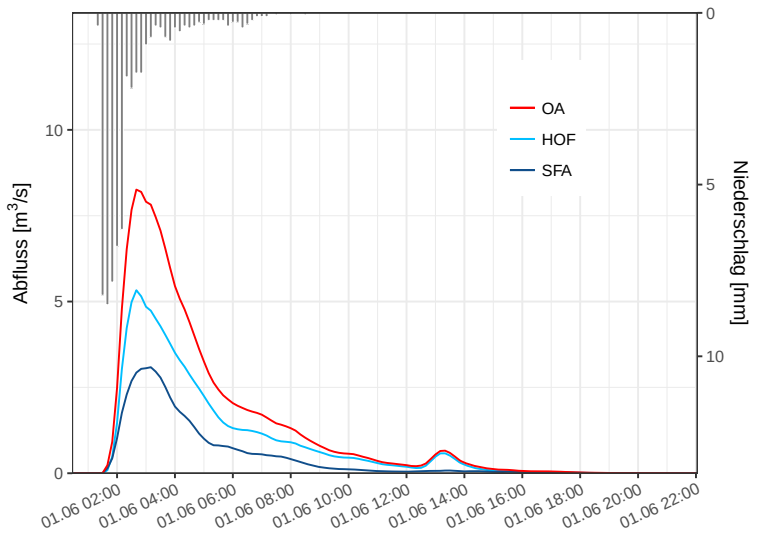



Abb. 6.2.1-1: Oberflächenabflussganglinie des Schrondweilerbachs am Auslass in Cruchten am 01.06.18

Das Starkregenereignis des 1. Juni 2018 begann gegen 01:30 und ist stark anfangsbetont. So werden die maximalen Niederschlagsintensitäten von gut 8 mm/10 min direkt am Anfang des Ereignisses erreicht. Innerhalb kürzester Zeit kommt es zur Bildung von Oberflächenabfluss. Der Spitzenabfluss beträgt um 02:40 8,3 $m^3/s$, wovon rund zwei Drittel auf HOA und ein Drittel auf SFA zurückzuführen sind. Zum Vergleich, beim Ereignis des 22. Juli 2016 lag der Spitzenabfluss laut Modell bei 33,4 $m^3/s$, der Berechnung mit der GMS-Formel zufolge gar sogar noch deutlich höher.

Waren es beim Ereignis 2016 nur 77,3 % des Niederschlags, der infiltrieren konnte, so sind es bei diesem Ereignis 89,6 %. Davon entfallen 83,1 % auf Matrixinfiltration, 6,2 % auf Makroporeninfiltration und 0,3 % auf Trockenrissinfiltration. Da der Boden der LARSIM-Simulation der Vorfeuchtebedingungen zufolge bereits vor dem Ereignis sehr feucht war, konnten sich keine Trockenrisse bilden, was den sehr geringen Anteil der Trockenrissinfiltration erklärt. 10,4 % des Niederschlags fließen als Oberflächenabfluss ab, davon 6,9 % als HOA, 0,3 % als SFA und 3,3 % wird auf Gewässeroberflächen gebildet.

Im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs waren keine überschwemmungsbedingten Schäden zu beklagen.

**Gebildeter Oberflächenabfluss**

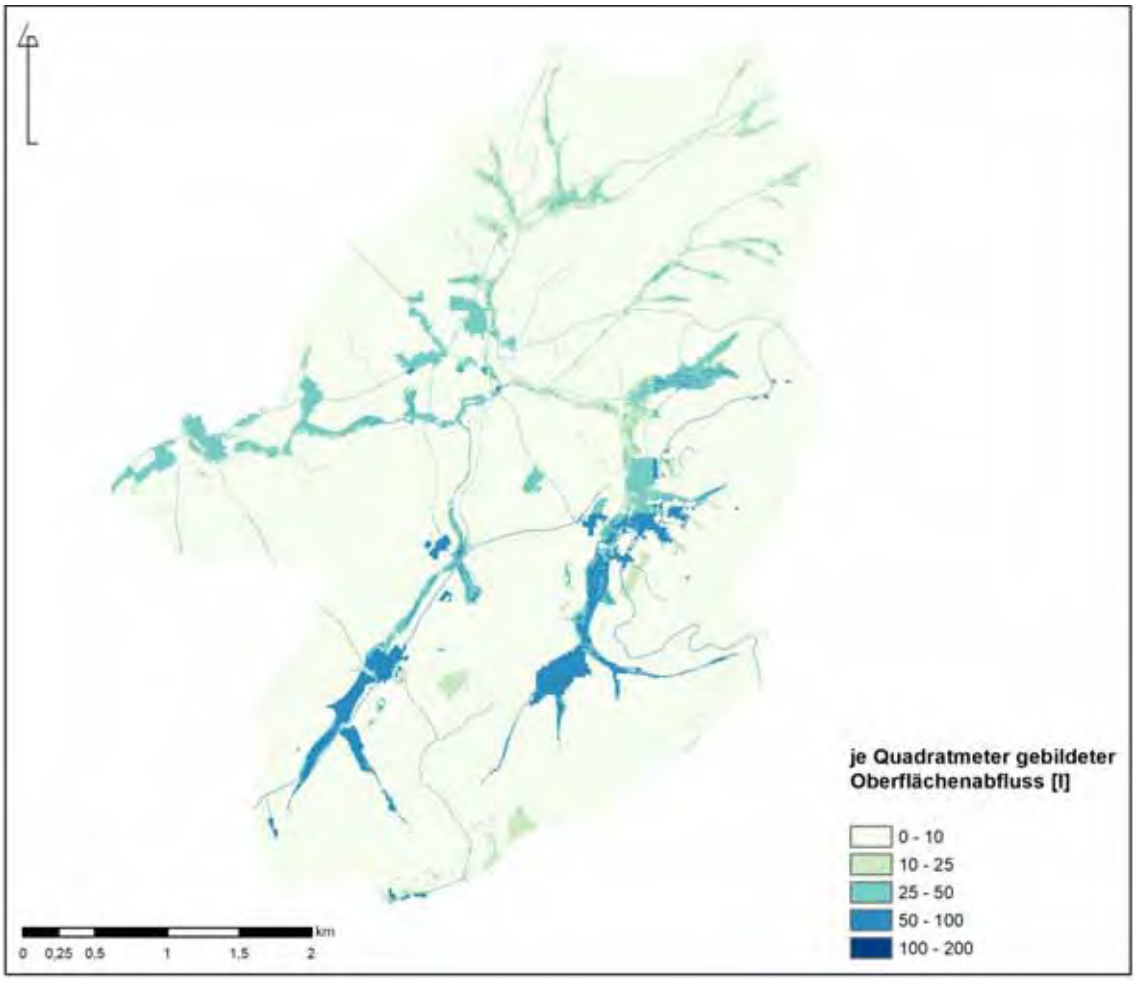



Abb. 6.2.1-2: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 01.06.18

Im Einzugsgebiet werden hauptsächlich zwischen 0 und 10 l Oberflächenabfluss je Quadratmeter gebildet. Nur auf versiegelten Flächen und in Gewässernähe liegen die Werte höher. Die Symbologie wird so gewählt, dass sie vergleichbar ist mit der Abbildung 6.1.1-5. Unterschiede in der OA-Bildung je nach Landnutzungsklasse Wald, Acker oder Wiese sind keine erkennbar.

**Kumulierter Oberflächenabfluss**

Abb. 6.2.1-3: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 01.06.18

Auf Abbildung 6.2.1-3 wird ersichtlich, dass im Vergleich zur Abbildung 6.1.1-7 deutlich weniger Fließpfade ausgebildet sind und diese insgesamt weniger Wasser abführen. Die großen, stark wasserführenden Flächen müssen als Artefakte betrachtet werden, denn diese Senken wurden im DGM aufgefüllt, damit das Wasser dem Gefälle folgend abfließen kann und nicht in diesen versiegt. Das Modell gibt wieder, dass bei diesem Ereignis kein Wasserstrom die Garageneinfahrt hinunterfließt und den Keller überschwemmt. Tatsächlich hat es hier keine Überschwemmung gegeben (b), was auf die korrekte räumliche und quantitative Modellierung der Abflussbildungsprozesse mit RoGeR hinweist.

### 6.2.2 Merscher Straße

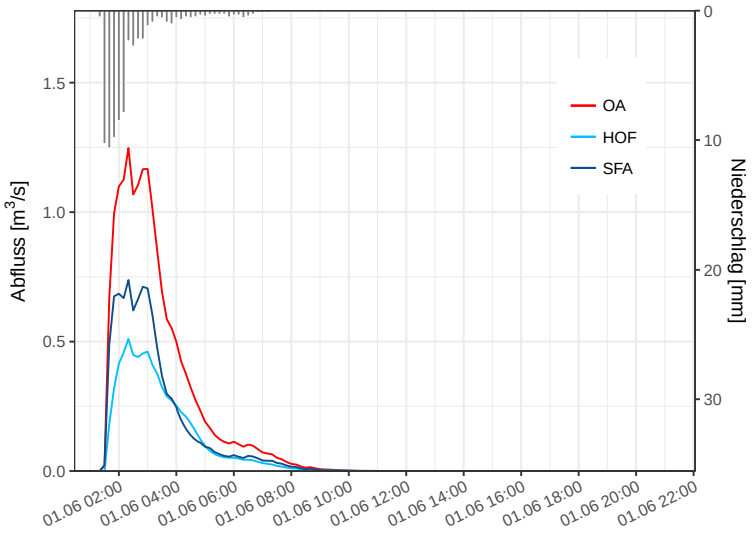



Abb. 6.2.2-1: Oberflächenabflussganglinie der Merscher Straße am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 01.06.18

Nach Einsetzen der Niederschläge um 01:30 kommt es sehr schnell zur Bildung von Oberflächenabfluss. Dieser erreicht um 02:20 den Maximalwert von 1,2 $m^3/s$.

93,3 % des Niederschlags infiltrieren, so dass nur 6,7 % als Oberflächenabfluss abfließen können. Das infiltrierende Wasser teilt sich auf auf Matrixinfiltration (90,1 %), Makroporen-infiltration (3,2 %) und Trockenrissinfiltration (> 0,1 %). Auch im Einzugsgebiet der Merscher Straße gibt es kaum Trockenrissinfiltration, da der Boden bereits zu Beginn der Niederschläge feucht war. Zudem neigen die sandigen Böden wenig zur Trockenrissbildung. 2,8 % des Niederschlags fließen als HOA ab, während 3,8 % zu OA in Fließgewässern wird. Gemittelt über das Einzugsgebiet spielt der SFA keine Rolle, wenngleich dieser über die Hälfte des Abflusses bei der Ganglinie ausmacht.

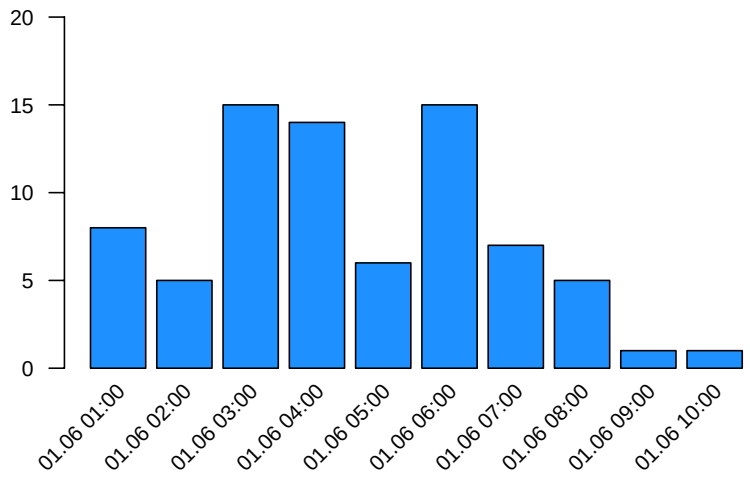



Abb. 6.2.2-2: Landesweit angefallene technische Einsätze je Stunde am 01.06.18

Die landesweit angefallenen technischen Einsätze je Stunde wirken im Vergleich zur Ganglinie etwas diffus. Ersichtlich ist aber, dass bereits ab 01:00 vermehrt Einsätze gemeldet wurden und diese zwischen 03:00 und 04:00 drastisch zunahmen.

Um 01:42 wurde die Feuerwehr zu einem Einsatz aufgrund eines überfluteten Kellers in die Merscher Straße gerufen. Zu diesem Zeitpunkt belief sich der Oberflächenabfluss auf knapp 1 $m^3/s$. Beim Ereignis 2016 wurde die Feuerwehr erstmalig in die Merscher Straße alarmiert, als der Abfluss etwa 1,4 $m^3/s$ betrug. Es scheint sich abzubilden, dass mit Schadensmeldungen zu rechnen ist, wenn der Abfluss im Bereich dieser Größenordnung liegt.

### Gebildeter Oberflächenabfluss

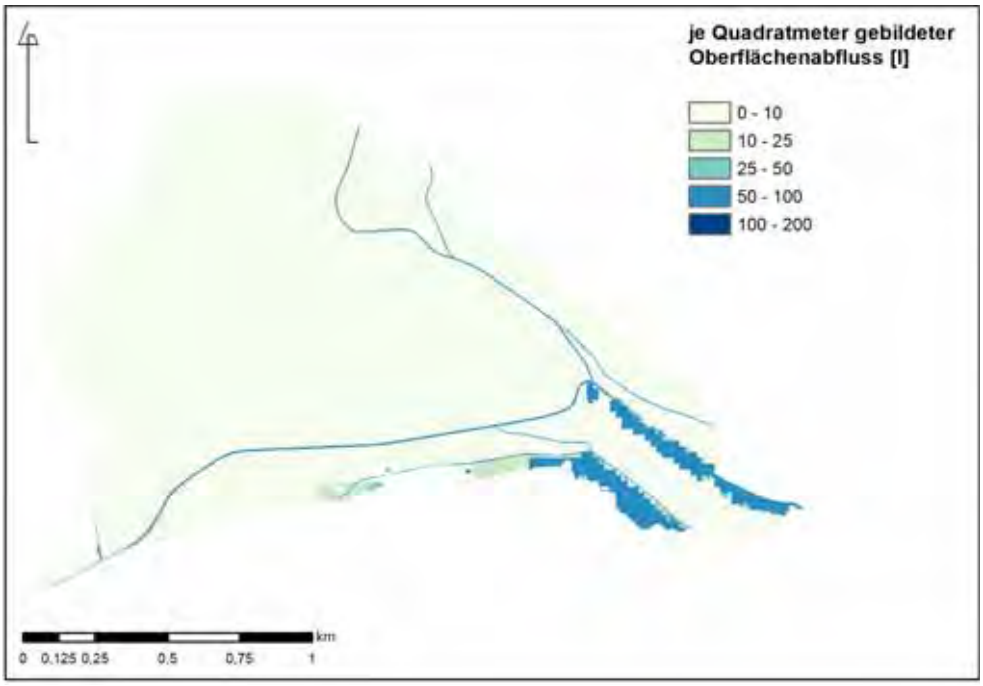



Abb. 6.2.2-3: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 01.06.18

Oberflächenabfluss wird nur auf versiegelten Flächen in nennenswerten Mengen gebildet. Im größtenteils bewaldeten Einzugsgebiet sind die Böden porös genug, um einen Großteil des auf die Oberfläche treffenden Niederschlags infiltrieren zu lassen.

### Kumulierter Oberflächenabfluss

Auf der Abbildung 6.2.2-4 auf der folgenden Seite wird wiederum ersichtlich, dass im Vergleich zum Ereignis 2016 deutlich weniger Fließpfade entstehen und diese weniger ausgeprägt sind. Auf der Abbildung ist der Wasserstrom, der zu einer Schadensmeldung in der Merscher Straße führte, allerdings nicht sichtbar. Die Einsatzstelle befindet sich nur wenige Meter von den Einsatzstellen im Jahr 2016 entfernt.

Abb. 6.2.2-4: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 01.06.18

### 6.2.3 Scheerbach

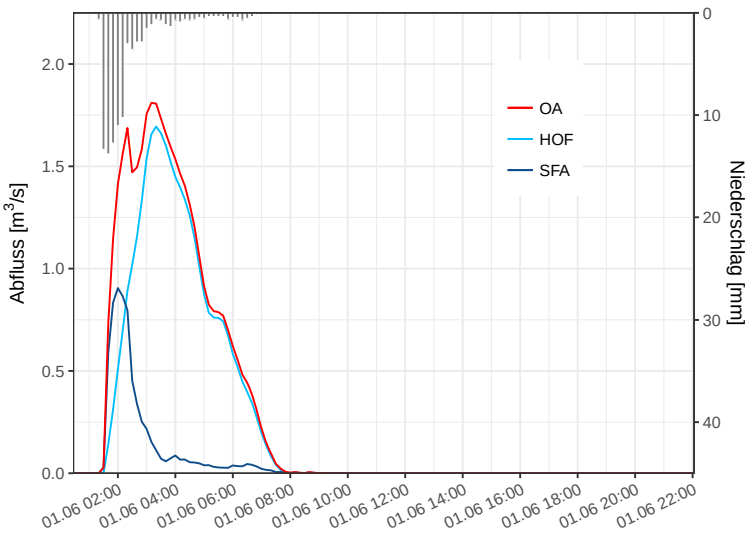



Abb. 6.2.3-1: Oberflächenabflussganglinie des Scheerbachs am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 01.06.18

Obwohl der Gebietsniederschlag über das gesamte Ereignis im Einzugsgebiet des Scheerbachs höher ist als beim Ereignis 2016, ist der Spitzenabfluss des Oberflächenabflusses mit 1,8 $m^3/s$ geringer. Beim vorangegangenen Ereignis lag der Spitzenabfluss bei 2,3 $m^3/s$. Die Niederschlagsintensität ist geringer, dafür ziehen sich die Niederschläge über einen längeren Zeitraum. 77,9 % des Niederschlags infiltriert (66,9 % Matrixinfiltration, 11,0 % Makroporeninfiltration, 0 % Trockenrissinfiltration). Im Vergleich zu den anderen Einzugsgebieten infiltriert in diesem anteilig am wenigsten Wasser. 22,1 % des Niederschlags fließt als Oberflächenabfluss ab (18,2 % HOA, > 0,1 % SFA, 3,9 % auf Gewässeroberflächen gebildeter OA).

In der Rue Scheerbach kam es zur Überschwemmung eines Kellers. Die Feuerwehr wurde allerdings erst um 06:09 zu diesem alarmiert. Möglicherweise haben die Anwohner den Schaden erst zu diesem Zeitpunkt bemerkt. Jedenfalls kann kein Zusammenhang mit der Ganglinie hergestellt werden, da nicht davon auszugehen ist, dass es erst zu dem Zeitpunkt zur Überschwemmung kam.

#### Gebildeter Oberflächenabfluss

An den bewaldeten Talhängen mit sandigen Böden wird kaum Oberflächenabfluss gebildet (Abb. 6.2.3-2). Auf den weniger porösen, ackerbaulich genutzten Lehmböden im Norden des Einzugsgebiets wird hingegen deutlich mehr OA gebildet. Ein Grenzverlauf ähnlich zu dem der auf Abbildung 4.3-3 dargestellten Bodenverhältnisse ist deutlich sichtbar. Auf der mittels Pfeils markierten Grünlandfläche wird weniger OA gebildet als auf den umgebenden Feldern, trotz gleicher Bodenverhältnisse.

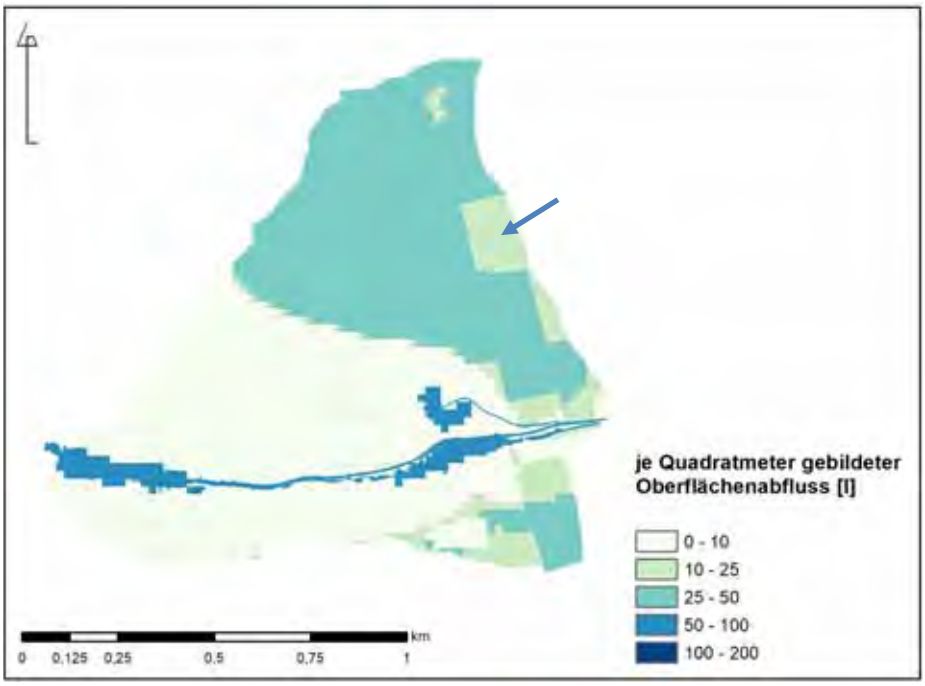



Abb. 6.2.3-2: Mit RoGeR modellierter je Quadratmeter gebildeter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 01.06.18

**Kumulierter Oberflächenabfluss**

Auf der Abbildung 6.2.3-3 des gerouteten und kumulierten Oberflächenabflusses sieht man, wie das Wasser die Straße hinunterfließt. Um das Haus mit dem überschwemmten Keller ist ein stark wasserführender Fließpfad zu erkennen. Allerdings bedeutet das Vorhandensein eines solchen Fließpfades nicht zwangsläufig, dass es zu Schadensmeldungen kommt. So ist ein ebenso starker Fließpfad etwas weiter östlich der Straße folgend zu erkennen. Hier wurden keine Schäden verursacht.

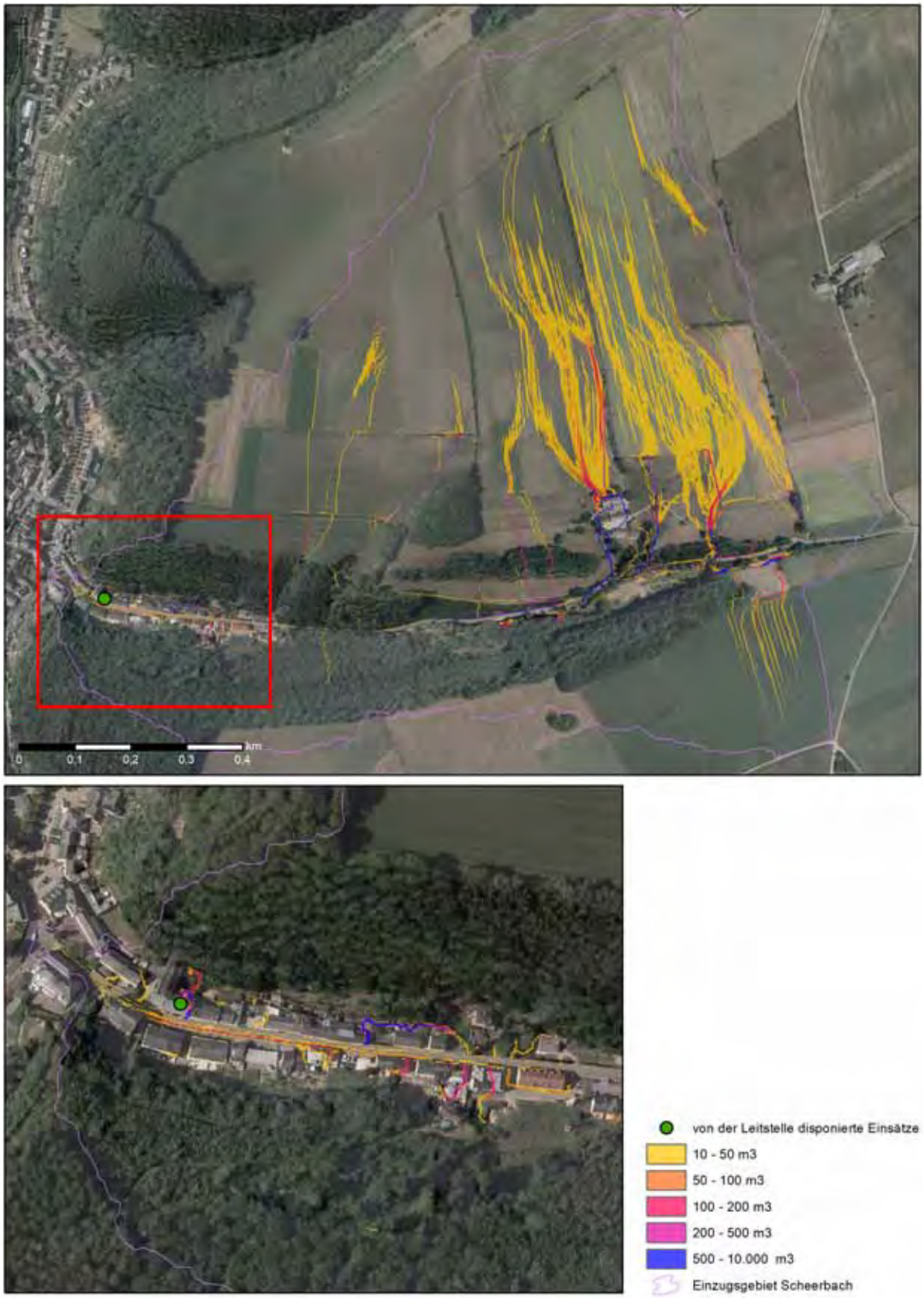



Abb. 6.2.3-3: Entlang des Reliefs gerouteter und kumulierter Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 01.06.18

**RoGeR dynamo**

Die dynamische Variante des RoGeR-Modells vermochte es beim Ereignis 2016 treffende Wassertiefen für das Einzugsgebiet des Scheerbachs zu simulieren. Aus diesem Grund wird das Modell auch auf das Ereignis des 1. Juni 2018 angewandt. Zwar stellte sich heraus, dass der angegebene Abfluss vermutlich fehlerbehaftet ist, doch lassen sich bei gleichen Modelleinstellungen dennoch relative Vergleiche durchführen.

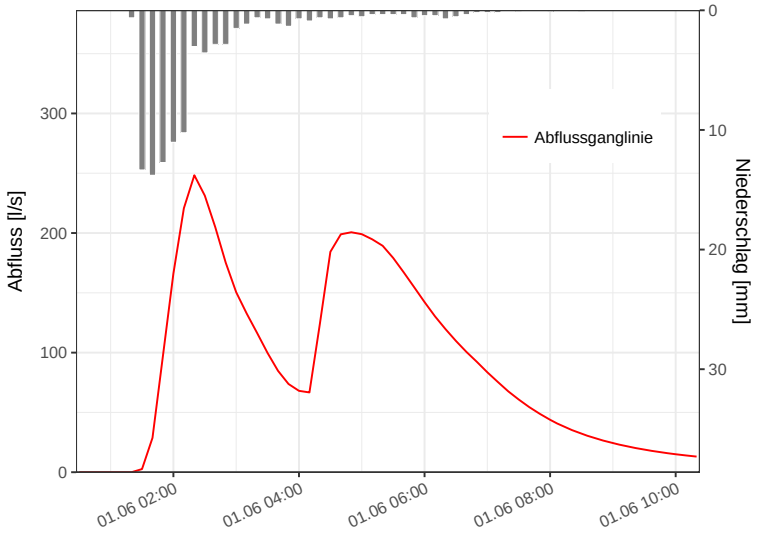



Abb. 6.2.3-4: Oberflächenabflussganglinie des RoGeR dynamo-Modells am Auslass des Scheerbachs in der Ortsmitte am 01.06.18

Mit Einsetzen der Regenfälle um 01:30 beginnt nur kurze Zeit später die Bildung von Oberflächenabfluss. Wie schon beim vorhergegangenen Ereignis bilden sich zwei Wellen aus. Die erste erreicht um 02:20 den maximalen Abfluss von 248 l/s, anschließend nimmt der Abfluss wieder ab, um um 04:50 erneut einen Spitzenwert von 200 l/s einzunehmen. Danach nimmt der Abfluss kontinuierlich ab. Inwieweit der Verlauf der Ganglinie passend modelliert ist, lässt sich aufgrund mangelnder Mess- und Referenzwerte nicht beurteilen. Zu beachten ist, dass zwecks Vergleichbarkeit die maximale Fließgeschwindigkeit auf 3 m/s beschränkt ist. Es zeigte sich allerdings, dass dieser Wert den Verlauf der Ganglinie entscheidend beeinflusst.

Die maximale modellierte Wassertiefe wird auf Abbildung 6.2.3-5 dargestellt. Im Vergleich zum Ereignis ist die modellierte Überschwemmungshöhe der Straße geringer, und dies trotz eines insgesamt höheren Gebietsniederschlags (siehe Tab. 5.1-1 und Tab. 5.2-1). Hinter dem Haus, zu dem die Feuerwehr gerufen wurde, um den Keller auszupumpen, ist eine große Wassertiefe von über 50 cm modelliert. Modellierung und tatsächliche Schadensmeldung passen an dieser Stelle überein. Auf der gegenüberliegenden Straßenseite wird allerdings eine ebenso große Wassertiefe modelliert, ohne dass es an dieser Stelle zu Schäden kam.

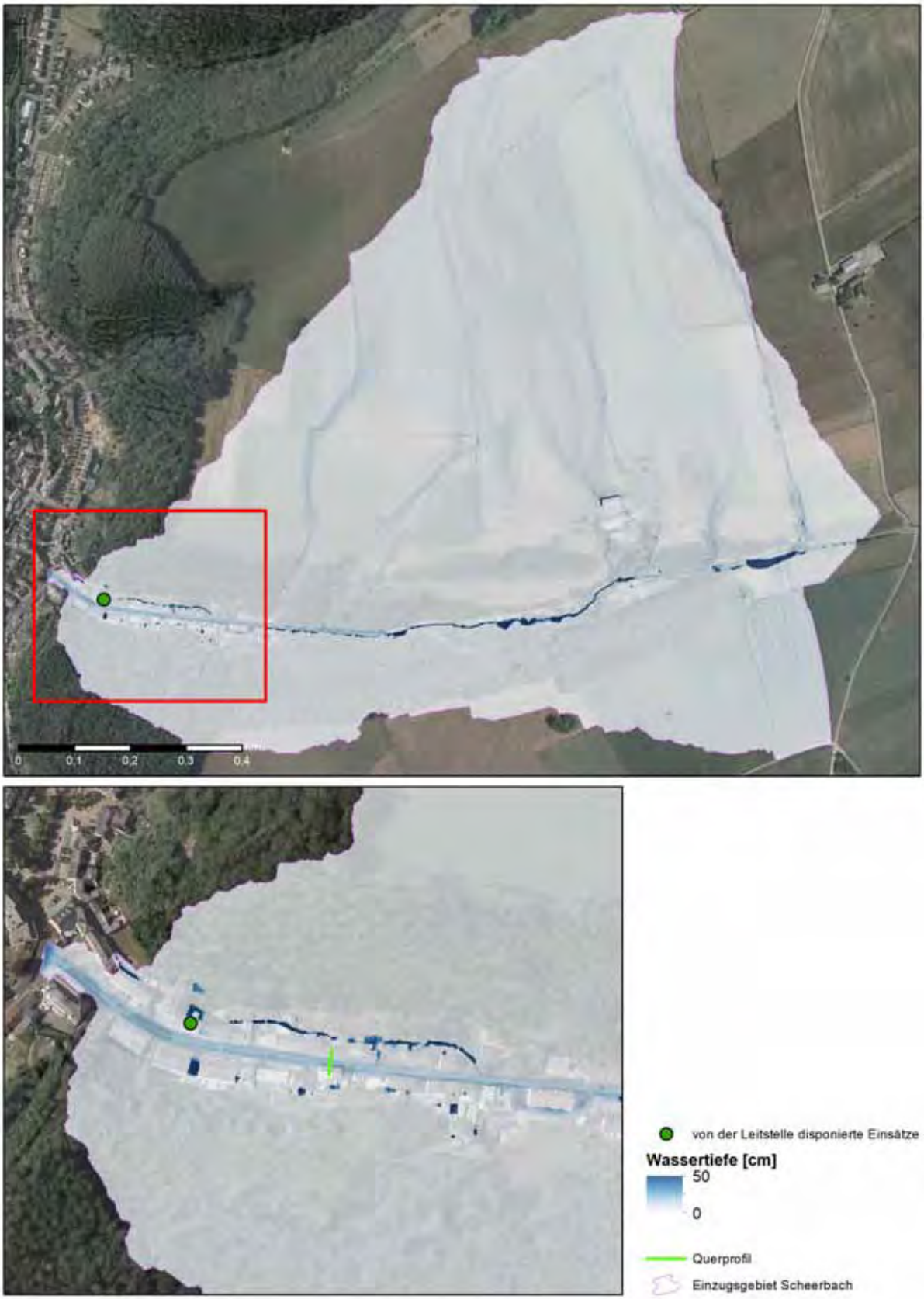



Abb. 6.2.3-5: Mit RoGeR dynamo modellierte maximale Wassertiefen im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 01.06.18

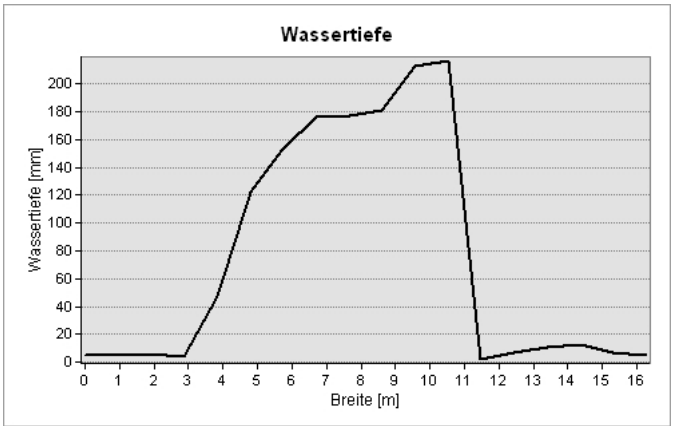



Abb. 6.2.3-6: Querschnitt durch die mit RoGeR dynamo modellierte Wassertiefe am Referenzpunkt in der Scheerbachstraße am 01.06.18

Auf dem Querprofil durch die modellierte Wassertiefe ist zu erkennen, dass diese etwa 180 mm beträgt. Die Wassertiefe ist somit 60 mm geringer als beim ersten untersuchten Ereignis (siehe Abb. 6.1.3-12). Dieser etwas geringere Wasserstand kann bereits dafür gesorgt haben, dass das Wasser sich keinen Weg in die Häuser bahnen konnte.

## 6.3 Modellierung des Starkregenereignisses am 9. Juni 2018

Nur eine Woche nachdem die gröbsten Schäden, vor allem in der Region des Müllerthals, beseitigt waren, kam es am Abend des 9. Juni erneut zu starken Regenfällen im gleichen Gebiet. Im Müllerthal kam es abermals zu schweren Überschwemmungen, so dass die Anwohner innerhalb einer Woche zweimal von einer Sturzflut getroffen wurden.

Die drei in dieser Arbeit betrachteten Einzugsgebiete lagen an den Ausläufern der Gewitterzelle, so dass in diesen keine Schäden zu beklagen waren. Das Niederschlagsereignis wird als Nullprobe genutzt. Die modellierten Abflüsse müssten allesamt weit unter denen der zwei vorangegangenen Ereignisse liegen. Das NA-Modell RoGeR wird auf die drei Einzugsgebiete angewandt, RoGeR dynamo nur auf das des Scheerbachs. In diesem Einzugsgebiet werden zudem die modellierten Wassertiefen betrachtet.

### 6.3.1 Schrondweilerbach

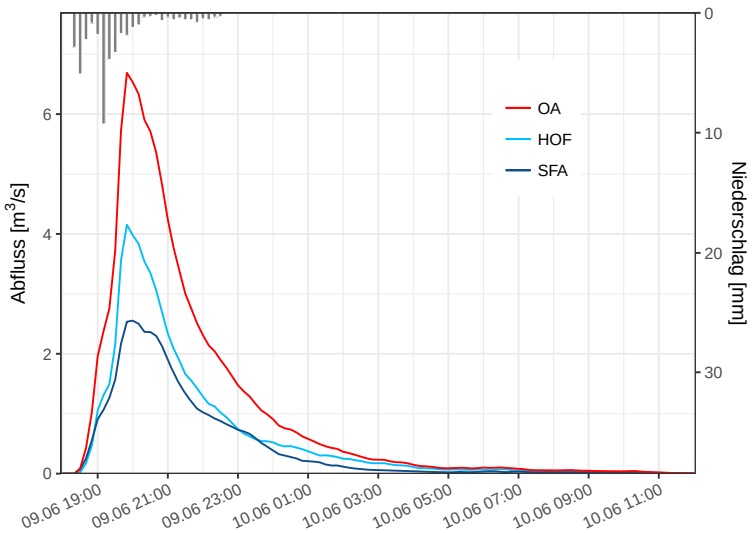



Abb. 6.3.1-1: Oberflächenabflussganglinie des Schrondweilerbachs am Auslass in Cruchten am 09.06.18

Das Starkregenereignis des 9. Juni 2018 begann um 18:20 und erreichte um 18:30 eine Niederschlagsintensität von 5 mm/10 min. Danach nahm die Intensität kurzzeitig ab, um um 19:10 den Spitzenwert von 9 mm/10 min zu erreichen. Schnell bildet sich Oberflächenabfluss, der sich etwa zu einem Drittel aus SFA und zu zwei Drittel aus HOF zusammensetzt. Der Spitzenabfluss von 6,7 $m^3/s$ wird um 19:50 erreicht. Im Vergleich zum Ereignis eine Woche zuvor ist der Gebietsniederschlag um 25 % geringer (siehe Tab. 5.2-1 und Tab 5.3-1); der Spitzenabfluss hingegen ist nur um 19 % geringer (siehe Abb. 6.2.1-1).

90,7 % des Niederschlags infiltrieren in den Boden, 88,7 % in die Matrix und 2,0 % in Makroporen. Trockenrisse sind keine ausgebildet, so dass keine Trockenrissinfiltration stattfindet. 9,3 % des Niederschlags fließen als Oberflächenabfluss ab, davon 5,4 % als HOA und 0,3 % als SFA. 3,7% des OA wird auf Gewässeroberflächen gebildet und fließt dort ab.

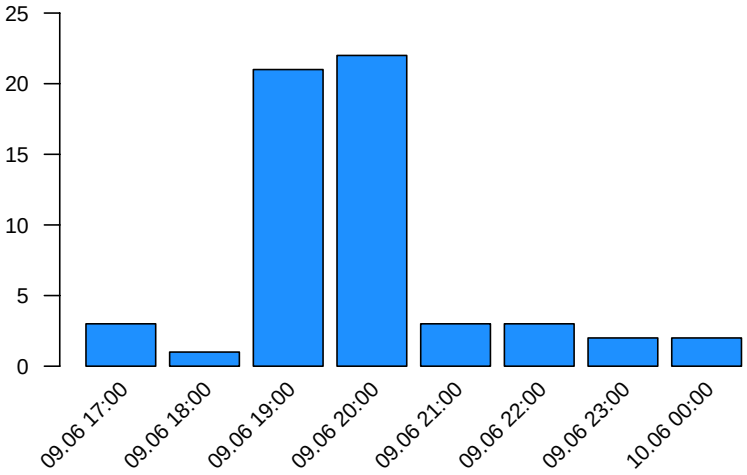



Abb. 6.3.1-2: Landesweit angefallene technische Einsätze je Stunde am 09.06.18

Obwohl keine Schadensmeldungen in den drei untersuchten Einzugsgebieten zu verorten waren, sei an dieser Stelle der zeitliche Verlauf der landesweit angefallenen technischen Einsätze abgebildet. Insbesondere die Schadensmeldungen im nahegelegenen Müllerthal prägen den zeitlichen Verlauf, der sich gut mit der Ganglinie deckt.

### 6.3.2 Merscher Straße

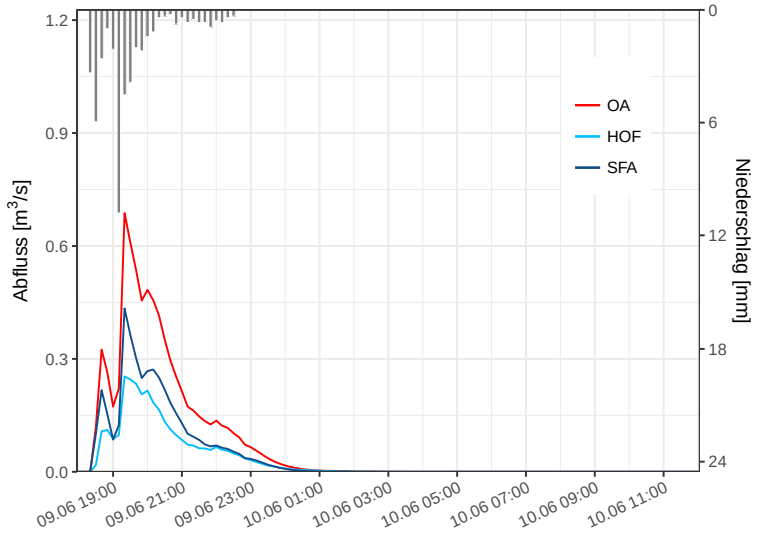



Abb. 6.3.2-1: Oberflächenabflussganglinie der Merscher Straße am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 09.06.18

Die Ganglinie im Einzugsgebiet der Merscher Straße ähnelt stark dem Verlauf der Niederschläge und folgt diesen mit einer Zeitverzögerung von nur 10 Minuten. Um 18:30 wird eine Niederschlagsintensität von 6 mm/10 min erfasst. Nur 10 Minuten später bildet sich die erste Abflussspitze von 0,32 $m^3/s$ aus. Um 19:10 führt die Niederschlagsintensität von 11 mm/10 min zu einem Spitzenabfluss von 0,68 $m^3/s$. Der Gebietsniederschlag ist 30 % geringer als beim Ereignis eine Woche zuvor (siehe Tab. 5.2-1 und Tab 5.3-1). Der Spitzenabfluss ist hingegen nur halb so hoch (siehe Abb. 6.2.2-1). Die sehr schnelle Reaktion der Ganglinie ist dem Umstand geschuldet, dass der Oberflächenabfluss nahezu ausschließlich auf den versiegelten Flächen gebildet wird und direkt über die Straße zum Auslass abfließen kann. 95,8 % des Niederschlags infiltrieren im Gebiet, davon 95,2 % als Matrixinfiltration und 0,6 % als Makroporeninfiltration. Da keine Trockenrisse ausgeprägt sind, kann kein Wasser in diese infiltrieren. 4,2 % des Niederschlags fließen als Oberflächenabfluss ab.

### 6.3.3 Scheerbach

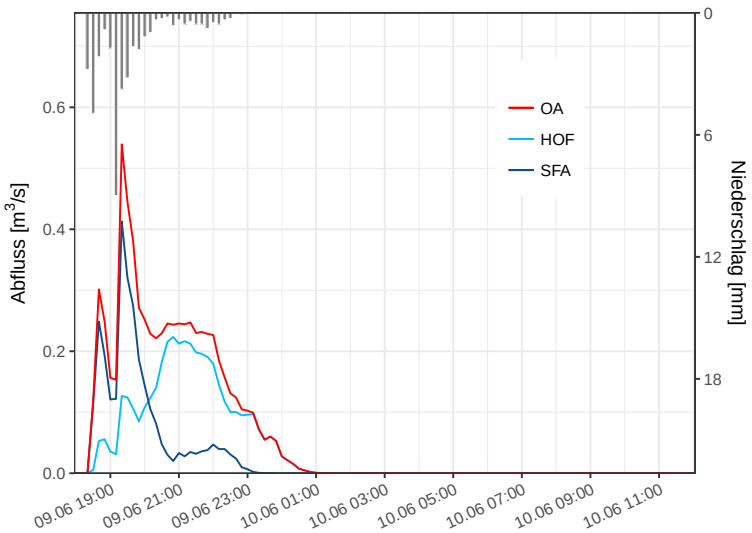



Abb. 6.3.3-1: Oberflächenabflussganglinie des Scheerbachs am Auslass in der Ortsmitte in Larochette am 09.06.18

Die Ganglinie des Oberflächenabflusses verhält sich im Einzugsgebiet des Scheerbachs analog zu der im Einzugsgebiet der Merscher Straße. Um 18:30 wird eine erste Intensitätsspitze des Niederschlags mit 5 mm/10 min erreicht. Es vergehen nur 10 Minuten bis sich ein Spitzenabfluss von 0,30 $m^3/s$ um 18:40 ausbildet. Eine Niederschlagsintensität von 9 mm/10 min wird um 19:10 registriert. Um 19:20 fließen 0,54 $m^3/s$ Oberflächenabfluss ab. Der Gebietsniederschlag ist halb so stark wie eine Woche zuvor (siehe Tab. 5.2-1 und Tab 5.3-1). Der Spitzenabfluss ist nur ein Drittel so hoch (siehe Abb. 6.2.3-1). 90,8 % des Niederschlags infiltrieren, sei es als Matrixinfiltration (86,3 %) oder als Makroporeninfiltration (4,5 %). Trockenrissinfiltration findet keine statt, da die Vorfeuchte des Bodens so hoch ist, dass keine Trockenrisse entstanden sind. 9,2 % des Niederschlagsvolumens fließen als Oberflächenabfluss ab. Widersprüchlich ist, dass der Sättigungsflächenabfluss die Ganglinie stark dominiert, der Mittelwerttabelle zufolge allerdings nur 0,01 % des im Einzugsgebiet gebildeten OA ausmacht.

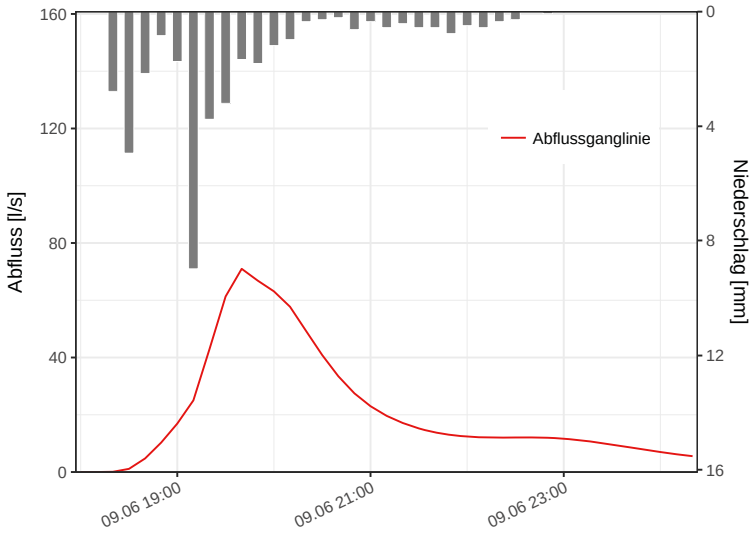



Abb. 6.3.3-2: Oberflächenabflussganglinie des RoGeR dynamo-Modells am Auslass des Scheerbachs in der Ortsmitte am 09.06.18

Die Ganglinie des dynamischen Modells unterscheidet sich deutlich von der des NA-Modells. Um 19:40 wird der Maximalwert des Abflusses von 71 l/s erreicht. Interessanterweise bildet die Ganglinie bei diesem Ereignis keine zwei Abflussspitzen aus. Stattdessen geht nur eine einzige Welle durch.

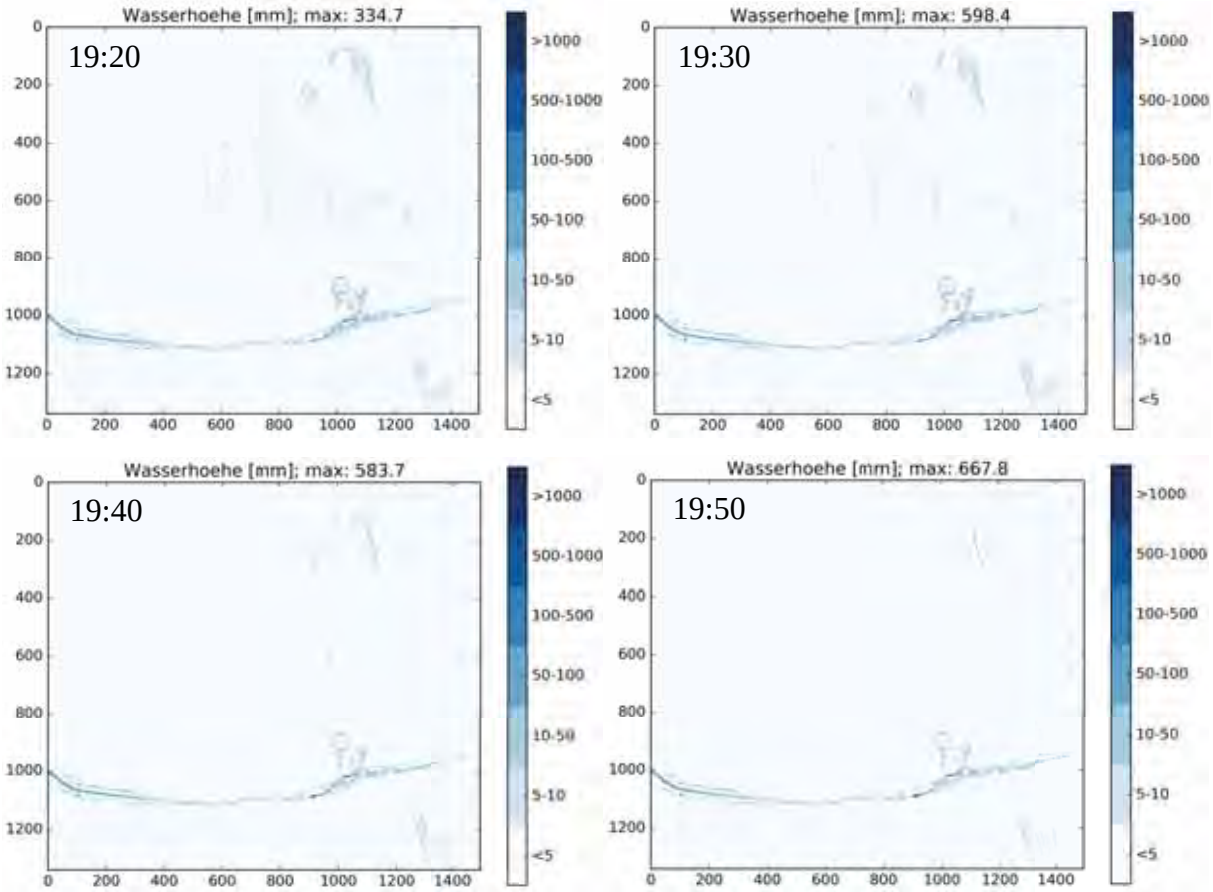



Abb. 6.3.3-3: Reinfiltration des Oberflächenabflusses im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 09.06.18

Bei diesem Ereignis wird auf den automatisch generierten Abbildungen der Wassertiefe zu jedem Zeitschritt gut ersichtlich, dass RoGeR dynamo in der Lage ist, Reinfiltration von Oberflächenabfluss zu berücksichtigen. Auf Abbildung 6.3.3-3 erkennt man, dass um 19:20 flächig OA auf den Feldern im nördlichen Einzugsgebiet gebildet wird. In den folgenden dreißig Minuten fließt dieser den Hang hinunter, wobei er in den Boden infiltriert. So ist um 19:50 kaum mehr OA in diesem Gebiet zu sehen.

Auf Abbildung 6.3.3-5 sieht man, dass im Einzugsgebiet nur geringe Wassertiefen modelliert werden. Nur im Gerinnebett des Scheerbachs steht das Wasser höher. Man beachte im Vergleich zu den vorangegangenen Abbildungen der Wassertiefe den von 50 auf 20 cm reduzierten Maximalwert. Diese Anpassung war nötig, um die Wassertiefen überhaupt sichtbar zu machen. Für die Straße wird eine Wassertiefe von etwa 65 mm modelliert (Abb. 6.3.3-4). Zum Vergleich, der flache Bordstein von der Fahrbahn zum Bürgersteig ist 40 mm hoch.

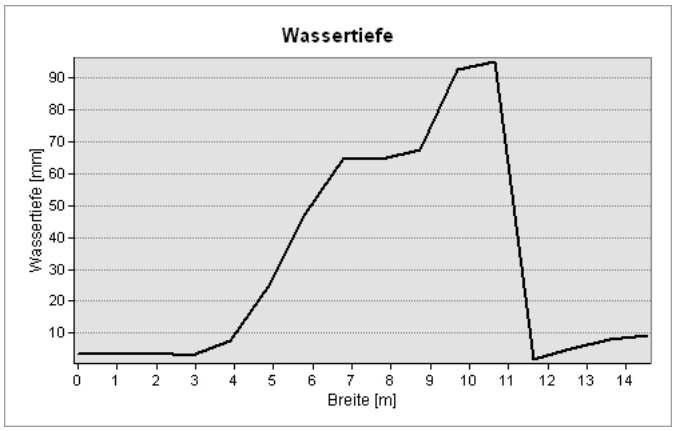



Abb. 6.3.3-4: Querschnitt durch die mit RoGeR dynamo modellierte Wassertiefe am Referenzpunkt in der Scheerbachstraße am 09.06.18

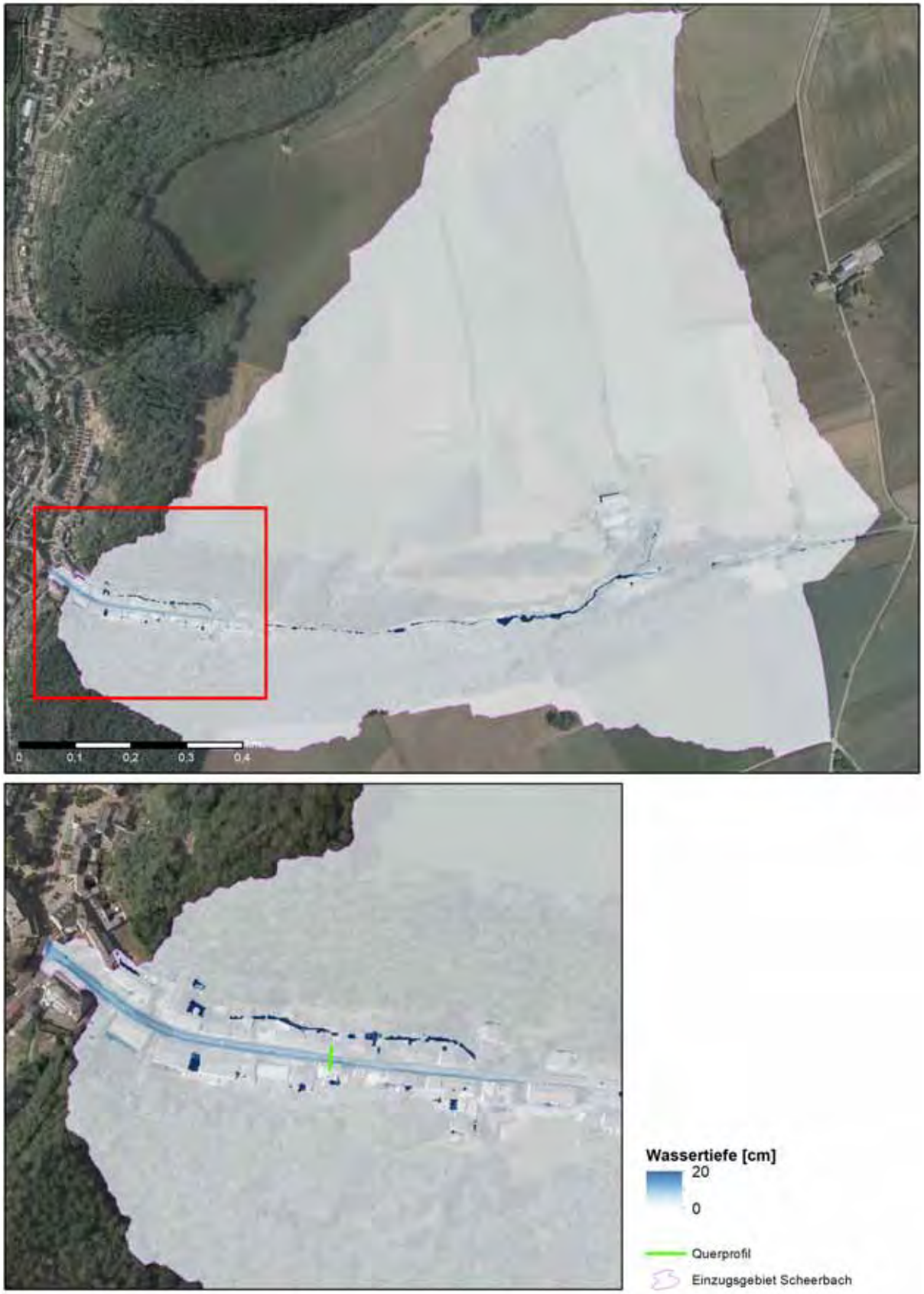



Abb. 6.3.3-5: Mit RoGeR dynamo modellierte maximale Wassertiefen im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 09.06.18

# 7 Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse diskutiert, interpretiert und hinsichtlich der anfänglich formulierten Zielsetzungen eingeordnet.

## 7.1 Diskussion der Parametrisierung

Die Qualität der Modellierung hängt maßgeblich von der Qualität der Parametrisierung der Teilprozesse bzw. der hierfür genutzten Daten ab.

Das genutzte LiDAR-DGM hat mit 1 x 1 m eine sehr hohe Auflösung, so dass alle hieraus abgeleiteten Daten wie Hangneigung, Gewässernetzmodellierung und letztendlich die Bestimmung der Fließpfade als sehr gut einzuschätzen sind. Im Detail können diese sehr hochaufgelösten Daten allerdings zu kleineren Problemen führen, da sämtliche Oberflächenstrukturen wie Vegetation und Gebäude aus dem digitalen Oberflächenmodell herausgerechnet werden müssen, so dass ein digitales Geländemodell entsteht. Bei bewaldeten Bachläufen, wie dem Schrondweilerbach, kann das dazu führen, dass das Gerinnebett nicht ganz naturgetreu abgebildet wird, was sich auch in Artefakten in den Bildern des akkumulierten OA widerspiegelt. So versiegen Fließpfade im Gerinnebett, obwohl Senken gefüllt wurden.

Die genutzten Landnutzungsdaten sind als sehr gut zu bewerten, zumal sie aufgrund von Ortskenntnis und dem Abgleich mit Luftbildern validiert werden konnten.

Die Bodendaten sind entscheidend für eine adäquate Modellierung der Infiltrations- und Abflussbildungsprozesse.
Die mittlere quadratische Abweichung des Tongehalts, der die Bodenart bestimmt, beträgt ± 9 %. Die Bodentiefe wird mit einem Fehlerbereich von ± 20 cm angegeben. Die Bodentiefe bestimmt zusammen mit der nFK und LK die Größe des Bodenspeichers. Die Saugspannungswerte liegen allerdings nur in einer geringen Verlässlichkeit vor, da die Werte bereits im Labor um den Faktor 10 voneinander abweichen können (Flammang, 2018).
Die Abflusskomponenten Zwischenabfluss und Tiefenperkolation wurden nicht vollständig parametrisiert und beruhten teilweise auf Dummy-Werten. Wie Weiler und McDonnell (2004, S. 5) zeigen konnten, stellt die Zwischenabflusskomponente des *organic layer interflow* insbesondere in Waldgebieten eine bedeutende Abflusskomponente bei Starkregenereignissen dar. Da diese Abflusskomponente sowohl auf Ebene der Bodeneigenschaften als auch durch die Nutzung des Fließzeitengrids des Oberflächenabflusses als Dummy nicht korrekt parametrisiert

wurde, kann diesem Effekt, insbesondere im größtenteils bewaldeten Einzugsgebiet der Merscher Straße nicht Rechnung getragen werden. Auch beschreiben Kooijman *et al*. (2018, S. 35, 177), dass die tonigen Lehmböden des Keupers häufig einen Texturwechsel zwischen Ober- und Unterboden aufweisen, der die Bildung von ZA begünstigt. Eine kompakte Stauschicht, genannt „*fragipan*“ führt auf Buchenstandorten mit sandigen Böden zur Bildung von ZA.

Zwar wurde dem Zwischenabfluss im Rahmen dieser Arbeit nur wenig Beachtung geschenkt, da er nicht in dem Maß zu Schäden führt, wie der Oberflächenabfluss dies vermag. Dennoch soll erwähnt sein, dass das präferentielle Fließen dafür sorgen kann, dass Wasser schnell in die Tiefe abgeführt werden kann, und dies bei weitgehender Umgehung der Perkolationsprozesse durch die Bodenmatrix (Scherrer *et al*., 2006, S. 918). Über Trockenrisse und Makroporen können so Schadstoffe in das Grundwasser gelangen und dieses verunreinigen. Die biogeochemisch aktive Zone der Bodenmatrix wird dabei umgangen, so dass keine Schadstofffixierung oder -abbau stattfinden kann (Baram *et al*., 2012, S. 166, 170). Bei Sturzfluten ist das abfließende Wasser häufig stark kontaminiert, sei es mit Heizöl aus aufgeschwemmten Tanks, Benzin, Abwasser, Fäkalien, Gülle, Dünger und sonstigen Schadstoffen. Aus Sicht des Boden- und Gewässerschutzes ist diese Abflusskomponente also durchaus relevant.

Die hydraulische Leitfähigkeit des Grundgesteins wurde nur mit Dummywerten parametrisiert. Kurz vor der Abgabefrist stieß der Autor noch auf Werte der hydraulischen Leitfähigkeit von Gestein im Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. Dort werden für Gipskeuper und Unterkeuper, sowie für Oberkeuper und oberer Mittelkeuper Leitfähigkeiten zwischen $3*10^{-5}$-$1*10^{-5}$ m/s angegeben. Leitfähigkeiten von $3*10^{-3}$-$1*10^{-3}$ m/s werden für alluviale Talablagerungen angegeben (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, 2012). Die in Luxemburg vorkommenden Liasformationen sind nicht gelistet. Die Werte hätten genutzt werden können, um die Leitfähigkeit des Grundgesteins zu parametrisieren, da diese einerseits die Tiefenperkolation steuert und andererseits die Bildung von Zwischenabfluss bei Ausbildung einer Stauschicht zwischen Bodenmatrix und Gestein beeinflusst.

Wie gezeigt werden konnte, hat der Niederschlag den größten Einfluss auf das Abflussgeschehen. Dies ist wenig verwunderlich, sorgt er doch dafür, dass sich überhaupt Abfluss bilden kann. Nun sind aber gerade die zur Verfügung stehenden Niederschlagsraster mit einer Auflösung von 1 x 1 km, neben den LARSIM-Feuchtigkeitsdaten, die am gröbsten aufgelösten Daten. Der Autor erinnert sich an ein Gespräch mit Kollegen der Feuerwehr aus Cruchten, wobei der Landwirt, der direkt am Auslass des Schrondweilerbachs wohnt, etwa 100 mm Regen

tags nach dem Starkregenereignis des 22. Juli 2016 in seinem Messbecher hatte. Ein weiterer Kollege, der nur 400 m Luftlinie von Erstgenanntem entfernt wohnt, hatte knapp die Hälfte gemessen. Dies verdeutlicht die erhebliche kleinräumliche Variabilität von Niederschlagsereignissen. Meteorologische Bodenmessnetze sind nicht ausreichend dicht, um kleinskalige konvektive Starkregenereignisse ausreichend zu erfassen. Radardaten können zu einer besseren räumlichen Erfassung der Niederschläge beitragen. Jedoch unterschätzt die Radaranalyse systematisch die Niederschlagsmengen gegenüber den Messungen an Bodenstationen. Dies ist unter anderem Dämpfungseffekten bei der Radarmessung, fehlerbehafteten Korrekturverfahren, sowie Falschechos z.B. durch Windkraftanlagen geschuldet (A. Becker *et al*., 2016, S. 17, 23, 41). Radardaten müssen deshalb mit Bodenmesswerten angeeicht werden. Borga (2008) schlägt Niederschlagsmessungen mit einer Auflösung von einer Messstation je Quadratkilometer oder noch feiner vor. Das aktuelle agrar- und hydrometeorologische Messnetz ist mit seinen 55 Stationen (Faber *et al*., 2018, S. 9) auf einer Fläche von 2586 $km^2$ allerdings weit von diesem Wert entfernt.

Zur Aneichung der Radardaten des 22. Juli 2016 musste ein Faktor von 3,34 angewandt werden, damit die Radarniederschlagssummen den am Boden gemessenen entsprachen. Faber *et al*. (2018, S. 15) mussten allerdings nur einen Korrekturfaktor von 1,51-2,11 je nach Betrachtungszeitraum anwenden. Während eines zufälligen Gesprächs Anfang März 2019 mit Feuerwehrkollegen Frank Minette des Luxembourg Institute of Science and Technology stellte sich heraus, dass die Messstation in Waldbillig sich zum Zeitpunkt des Starkregenereignisses im Juli 2016 etwa 2 km entfernt an einer anderen Stelle befand. Somit kann es sein, dass die Niederschläge um bis zu 30 % überschätzt wurden, was leider die Resultate der Modellläufe zu diesem Ereignis relativiert. Die Korrekturfaktoren von 1,78 für das Ereignis des 1. Juni 2018 und 1,38 für jenes vom 9. Juni 2018 reihen sich in die Werte von Faber *et al.* ein. Zu diesem Zeitpunkt stand die Messstation an der verorteten Stelle.

Eine präzisere Abbildung der Niederschlagsereignisse wäre durch die Nutzung von zeitschrittbasierten Radarbildern möglich gewesen. Diese hätten die Entwicklung der Gewitterzellen genauer abbilden können, als das genutzte Wichtungsraster dies vermochte. Da aber nur stündliche Radarbilder der Niederschlagssummen verfügbar waren für Starkregenereignisse, die kaum länger dauerten als eine Stunde, hätte deren Nutzung eine deutliche Verschlechterung der zeitlichen Auflösung bedeutet. Stattdessen wurde daher ein Wichtungsraster der Niederschlagsverteilung mit Bodenmesswerten in 10-minütlicher Auflösung genutzt.

Sturzfluten sind direkt auf Starkniederschlagsereignisse zurückzuführen. Bislang gibt es allerdings nur wenige gesicherte Erkenntnisse zur zukünftigen Entwicklung dieser Ereignisse. Über die Clausius-Clapeyron-Beziehung ist gewusst, dass wärmere Luftmassen, mit denen im Zuge des Klimawandels zu rechnen ist, größere Wassermengen aufnehmen können, was sich in höheren Niederschlagsmengen widerspiegeln kann (*Nationaler Klimareport 2016 - Klima - Gestern, heute und in der Zukunft*, 2016, S. I). Grieser und Beck (2002, S. 144 f.) stellten eine Zunahme der Starkniederschlagstage, -menge und -intensität von 1910 bis 2000 fest. Allerdings bezogen sich die Erkenntnisse auf länger andauernde Starkniederschläge wie sie im Winter vorkommen. Für kurzzeitige sommerliche Ereignisse waren die Trends diffus. Auch 14 Jahre später gibt es zur Entwicklung der Starkniederschläge kurzer Dauer, wie sie im Sommerhalbjahr in Mitteleuropa auftreten, wenig statistisch gesicherte Erkenntnisse. Anhaltspunkte für eine Zunahme der Niederschlagsintensität gibt es allerdings (P. Becker *et al.*, 2016, S. 6).

## 7.2 Diskussion der Referenzdaten

Die Ereignisse sollten dreistufig anhand von Einsatzdaten, Kartierungen und Bildmaterial rekonstruiert werden.

Das Verorten der im Einsatzleitsystem gespeicherten Einsätze funktionierte gut. Die punktuellen Informationen erlaubten den Abgleich mit den räumlichen Modellierungen der Fließpfade und Wassertiefen. Beim Ereignis im Juli 2016 fiel dem Autor allerdings auf, dass deutlich mehr Häuser überschwemmt wurden, als dies rein aus den Einsatzdaten ersichtlich wurde. Als die Regenfälle einsetzten, liefen extrem viele Anrufe zeitgleich in der Leitstelle auf, so dass diese überfordert war und nicht alle Anrufe entgegennehmen konnte. Hinzu kam, dass die Leitstelle erst im Juni, also nur kurz vor der Sturzflut, auf ein neues Einsatzleitsystem umstellte und noch nicht sämtliche Abläufe reibungslos liefen. In Zwischenzeit wurde eine Prozedur eingeführt, um in Katastrophenfällen die Leitstelle personell drastisch zu verstärken und so sämtliche Anrufe in kürzester Zeit entgegennehmen zu können.

Die Einsatzdaten erlaubten eine Ergänzung und Validierung der Kartierung der Überschwemmungen im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs. Eine Kartierung der Wasserflächen in den anderen beiden Einzugsgebieten erübrigte sich, da das Wasser ausschließlich die Straßen in den engen Tälern der Merscher Straße und der Rue Scheerbach hinunterlief. Dies hatte allerdings den Vorteil, dass das Wasser nur in einem recht gut bestimmbaren Querschnitt ablief, was die Berechnung des Abflusses mit der GMS-Formel ermöglichte.

Die räumlich-zeitliche Rekonstruktion der Ereignisse gestaltete sich schwieriger, da bei vielen Fotos der Zeitstempel fehlte. Zum nächtlich stattgefundenen Ereignis des 1. Juni 2018 gab es keine Fotos der Überschwemmungen in den untersuchten Gebieten. Das Einsatzaufkommen konnte allerdings zeitlich aufgeschlüsselt werden und deckte sich mit den modellierten Ganglinien.

Eine Rekonstruktion von Sturzfluten zum Zweck einer Postevent-Analyse bleibt aber dennoch schwierig. Es müssen möglichst viele Daten, sei es von der Feuerwehr, Augenzeugenberichte oder Bildmaterial ausgewertet werden, sofern sie denn überhaupt vorliegen, um ein möglichst genaues Verständnis der Abläufe zu erlangen. Direkte Abflussmessungen stellen nach wie vor die beste Referenz dar, sind aber bei Sturzfluten häufig kaum möglich, wenn die Wassermassen über Straßen durch Siedlungen abfließen.

## 7.3 Diskussion der Ergebnisse mit RoGeR

Im 17,8 km$^2$ großen Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs unterschätzt RoGeR den Abfluss bei der Sturzflut des 22. Juli 2016 etwa um den Faktor 4 im Vergleich zur Berechnung des Abflusses mit der GMS-Formel. Messwerte des Abflusses gibt es keine, so dass eine abschließende Bewertung nur bedingt möglich ist. Die modellierten Spitzenabflüsse in den deutlich kleineren Einzugsgebieten der Merscher Straße und des Scheerbachs kommen hingegen sehr nahe an die berechneten Wertebereiche des Spitzenabflusses heran. Leicht unterschätzt wird der Abfluss dennoch. Man sollte bedenken, dass der Niederschlag beim Ereignis des 22. Juli 2016 unter Umständen um bis zu 30 % überschätzt wurde. Modellierter und berechneter Abfluss könnten demnach weiter auseinander liegen, da bei Nutzung richtiger Niederschlagssummen die modellierten Abflüsse noch geringer ausfallen würden. Auch wurde nur der Oberflächenabfluss in dieser Arbeit betrachtet. Im größeren Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs mit seinem naturbelassenen Fließgewässer ist nicht auszuschließen, dass der Zwischenabfluss entscheidend zum Gesamtabfluss beiträgt. Aus den Abbildungen im Anhang mit sämtlichen Abflusskomponenten geht dies allerdings nicht hervor, da der Zwischenabfluss und die Tiefenperkolation nicht vollständig parametrisiert wurden. In den deutlich kleineren Einzugsgebieten der Merscher Straße und des Scheerbachs ist der Effekt des ZA und der TP am Gesamtabfluss als geringer einzuschätzen, da das Wasser ausschließlich über versiegelte Flächen strömte. Zwischenabfluss könnte an den versiegelten Flächen nicht wieder zu Tage treten und zum Oberflächenabfluss beitragen.

Der zeitliche Verlauf der Ganglinien deckt sich in allen Fällen mit dem der Schadensmeldungen. Auch die in den Einzugsgebieten zu den jeweiligen Niederschlagsereignissen

erstgemeldeten Einsätze passen zeitlich zu den Ganglinien des Oberflächenabflusses. Die Dynamik des Abflusses dürfte somit korrekt modelliert sein.
Das Routing und die Akkumulierung des Oberflächenabflusses machte bedeutende Fließpfade erkennbar. Deren Verlauf deckte sich mit den Schadensmeldungen, was für eine räumlich korrekte Modellierung der Abflussbildung spricht.

Steinbrich *et al.* (2016, S. 9-15) validierten das Modell anhand von Daten aus den Großberegnungsversuchen von Scherrer (1997) und mit Hilfe gemessener Überschwemmungen in mesoskaligen Einzugsgebieten. Bezüglich der Beregnungsversuche stellten sie fest, dass mit einer Ausnahme die Dynamik, aber auch die Mengenverhältnisse des Oberflächenabflusses und des Zwischenabflusses gut modelliert werden konnten. Der Zwischenabfluss wurde leicht überschätzt, was auf die schwierige Messung dieser Abflusskomponente zurückzuführen war. Sie wandten das Modell auf 33 Hochwasserereignisse in 13 mesoskaligen Einzugsgebieten in Baden-Württemberg an und erreichten in Bezug auf die Dynamik des Abflussereignisses, Abflussfülle und Abflussscheitel in 21 Fällen eine gute Übereinstimmung der Modellierung mit den Messwerten. 5 Ereignisse konnten mäßig gut repliziert werden, 7 Ergebnisse waren unbefriedigend. Die hohen Ungenauigkeiten der Niederschlagsmessung und die schwierig zu bestimmenden Vorfeuchtebedingungen stellen die größten Probleme bei der Modellierung dar. Zudem sind einige Prozesse nicht in RoGeR integriert, sei es aus Mangel an Daten oder fehlendem Prozessverständnis. Hydrophobe Bodeneigenschaften, die im Übrigen zu schlechten Resultaten bei der Modellierung eines Beregnungsversuchs führten, versiegelnd wirkende Bodenverschlämmung, ein schwankender Grundwasserspiegel und Rückhalt in Seen sind Beispiele für solche nicht in RoGeR implementierten Prozesse. Reinfiltration von Oberflächenabfluss kann mit dem Ansatz einer geomorphologischen Einheitsganglinie nicht abgebildet werden. Eine falsch eingeschätzte Speicherfähigkeit des Bodens oder fehlerhafte Saugspannungswerte des Gesteins können zu Fehlern in der Abflussmodellierung führen, insbesondere in Bezug auf den Zwischenabfluss.

Krier (2017, S. 76-82) wandte RoGeR auf zwei Einzugsgebiete in Luxemburg beim Starkregenereignis des 22. Juli 2016 an. Die Modellergebnisse im Einzugsgebiet des Wolfsbachs im Westen des Landes stimmten wenig mit den Messdaten überein. Sie stellte fest, dass die Makroporenausstattung des Bodens, die abhängig von der Landnutzung ist, in dem Gebiet einen erheblichen Einfluss auf die Modellergebnisse hat. So unterschieden sich die Resultate deutlich, je nachdem ob die Landnutzung mit CORINE-Daten oder anhand des Luftbilds parametrisiert wurde. Zudem scheint das Gewässernetz die Abflussdynamik zu beeinflussen. Auch könnten

die zur Bewirtschaftung der Wiesen und Felder angelegten Drainagen das Abflussgeschehen beeinflussen. Derartige Strukturen werden allerdings in RoGeR nicht abgebildet. Messfehler in Bezug auf die Referenzdaten des Abflusses und auf die räumliche Variabilität der Niederschlagsmengen können weitere Fehlerquellen darstellen. Die Modellergebnisse für das Einzugsgebiet des Tirelbachs, das nur wenige Kilometer nördlich von den in dieser Arbeit untersuchten Gebieten liegt, waren hingegen zufriedenstellend und plausibel.

## 7.4 Diskussion der Ergebnisse mit RoGeR Flow

Das 2D-hydraulische Routing des zu jedem Zeitschritt gebildeten Oberflächenabflusses mit RoGeR Flow ermöglicht es, die dominanten Fließpfade zu identifizieren. Die für jeden Zeitschritt ausgegebenen Abbildungen der Wassertiefe erlaubten es zudem, die Abflussgeschehen raumzeitlich zu betrachten.

Die Ergebnisse der Wassertiefenmodellierung in der Rue Scheerbach waren allerdings weit entfernt von den Beobachtungen. Modellierte Wasserstände von über 1 m stehen tatsächlichen Überschwemmungen von etwa 20 cm gegenüber. Nach einer ersten Anwendung des Modells auf das Einzugsgebiet des Scheerbachs beim Starkregenereignis des 22. Juli 2016 mit bescheidenen Resultaten, wurde daher entschieden, das Modell nicht weiter zu nutzen. Vergleicht man die Resultate aus RoGeR Flow und RoGeR dynamo allerdings rein qualitativ miteinander, ohne Berücksichtigung der absoluten Wassertiefen, so stellt man fest, dass beide Modelle die Fließpfade und deren Intensitäten ähnlich abbilden.

## 7.5 Diskussion der Ergebnisse mit RoGeR dynamo

RoGeR dynamo kombiniert das NA-Modell RoGeR mit einer 2D-hydraulischen Modellierung, die zeitschrittbasiert die sich in Abhängigkeit von der Wassertiefe verändernde Fließgeschwindigkeit und Reinfiltration von Oberflächenabfluss berücksichtigt.

Da das Modell sehr rechenintensiv ist, konnte es mit der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität (MacBook Pro 15“ 2018, 2,6 GHz 6-Core i7, 32 GB RAM) nur auf das kleinste der drei untersuchten Einzugsgebiete angewandt werden. Daher war ein Abgleich mit den aus den Kartierungen abgeleiteten Wassertiefen im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs nicht möglich. Zwar scheint es noch Probleme mit den ausgegebenen Werten des Abflusses zu geben, da diese nicht mit den aus den Wassertiefen und Querschnittsprofilen berechneten Scheitelabflüssen übereinstimmten, doch lagen die modellierten Wassertiefen sehr nahe an den Messwerten.

Beim Experimentieren mit dem Modell stellten sich zwei Parameter als äußerst sensibel heraus. Zum einen wird die Fließgeschwindigkeit als Einheitsfließgeschwindigkeit bei 1 m Wassertiefe für das gesamte Einzugsgebiet mit der GMS-Formel berechnet. Wird also für eine Stelle eine Fließgeschwindigkeit von 4 m/s bei 1 m Wassertiefe bei einem Schwellenwert von 3 m/s berechnet, so wird für diese Stelle der Wert auf 3 m/s reduziert. Das Modell berechnet je Zeitschritt die aktuelle Fließgeschwindigkeit des Wassers abhängig von der Wassertiefe zu dem Zeitpunkt verhältnismäßig zur Einheitsgeschwindigkeit. Dies birgt das Problem, dass an Stellen, wo die Einheitsgeschwindigkeit auf den Maximalwert reduziert werden muss, die Fließgeschwindigkeit bei Wasserständen unter 1 m fälschlicherweise reduziert wird. Die Festlegung der Maximalgeschwindigkeit hat daher einen entscheidenden Einfluss auf die gesamte Dynamik des Abflussgeschehens. Standardmäßig werden 3 m/s als Maximalgeschwindigkeit angenommen. Für steile Einzugsgebiete bei Wasserständen unter 1 m ist es vermutlich sinnvoll, diesen Wert deutlich anzuheben.
Zum anderen ist im Modell ein Faktor von 0,44 implementiert, um der radialen Ausbreitung des Wassers gerecht zu werden, da das Modell mit dem Multiple Flow Directions-Ansatz funktioniert. Zugleich sorgt der Faktor dafür, dass der Wasserspiegel möglichst eben abgebildet wird. Geringfügige Änderungen des Faktors haben Leistert (2019b) zufolge starke Auswirkungen auf die Abflussdynamik.
Die Werte der maximalen Fließgeschwindigkeit von 3 m/s und des Korrekturfaktors von 0,44 kamen infolge einer Validierung des Modells an den von Néelz und Pender (2010) aufgeführten Benchmarkingstest für 2D-hydraulische Modelle zustande (Leistert, 2019a).

RoGeR dynamo konnte die drei untersuchten Starkniederschlagsereignisse gut abbilden. Zwar sind, wie bereits erwähnt, beim ersten Ereignis zu hoch angesetzte Niederschläge genutzt worden. Möglicherweise kann eine Erhöhung der maximalen Fließgeschwindigkeit dies wieder ausgleichen, so dass dennoch eine korrekte Wassertiefe wiedergegeben wird. Beim zweiten Niederschlagsereignis waren die Niederschlagssummen höher als beim ersten, doch kam es zu geringeren Schäden. Tatsächlich gibt das Modell geringere Wassertiefen wieder. Beim dritten Ereignis werden Wassertiefen modelliert, die bis knapp über den flachen Bordstein der Straße reichen, was auch realistisch ist. Man sollte allerdings bedenken, dass keine Abwasserkanäle berücksichtigt wurden, die die Wassertiefe verringern könnten. Technisch wäre das Modell aber in der Lage, Verdolungen und Kanalisationen zu berücksichtigen, sofern es die entsprechende Datengrundlage gibt. Es sollte bedacht werden, dass bislang bei der Modellierung von Sturzfluten vor allem auf die korrekte Darstellung der Abflussbildung geachtet wird. Weitere Einflussfaktoren, wie sich durch Erosionsprozesse im Laufe der Ereignisse verändernde

Abflussbedingungen und Gerinnebetten, oder die das Schadenspotential potenzierende Geschiebefracht, sollten allerdings nicht aus den Augen gelassen werden.

Das extrem vielversprechende Modell RoGeR dynamo könnte genutzt werden, um Sturzflut-risiko- und Befahrbarkeitskarten auszuarbeiten. Exemplarisch sei eine solche Befahrbarkeits-karte untenstehend abgebildet (Abb. 7.5-1). Mioc *et al*. (2008, S. 233) schlagen dazu eine Klassifizierung der Wassertiefe in fünf Klassen vor. 0-10 cm Wassertiefe können mit einem gewöhnlichen PKW durchquert werden. Geländewagen können bis zu 20 cm Wassertiefe durchfahren, schwere LKW der Feuerwehr bis zu 0,5 m. Darüber hinaus sind Amphibien-fahrzeuge und Boote zu nutzen. Ab 1 m Wassertiefe wird auch die Befahrung mit Booten gefährlich. Grund dafür sind die oftmals hohen Fließgeschwindigkeiten im Falle von Sturz-fluten, so dass die Gefahr besteht, mit dem jeweiligen Fahrzeugtyp abzudriften. Die Klassen der Wassertiefen sind entsprechend konservativ gewählt, um kein Sicherheitsrisiko einzugehen. Moderne Geländewagen können nämlich deutlich tiefere Gewässer durchwaten, allerdings nur bei geringen Fließgeschwindigkeiten.

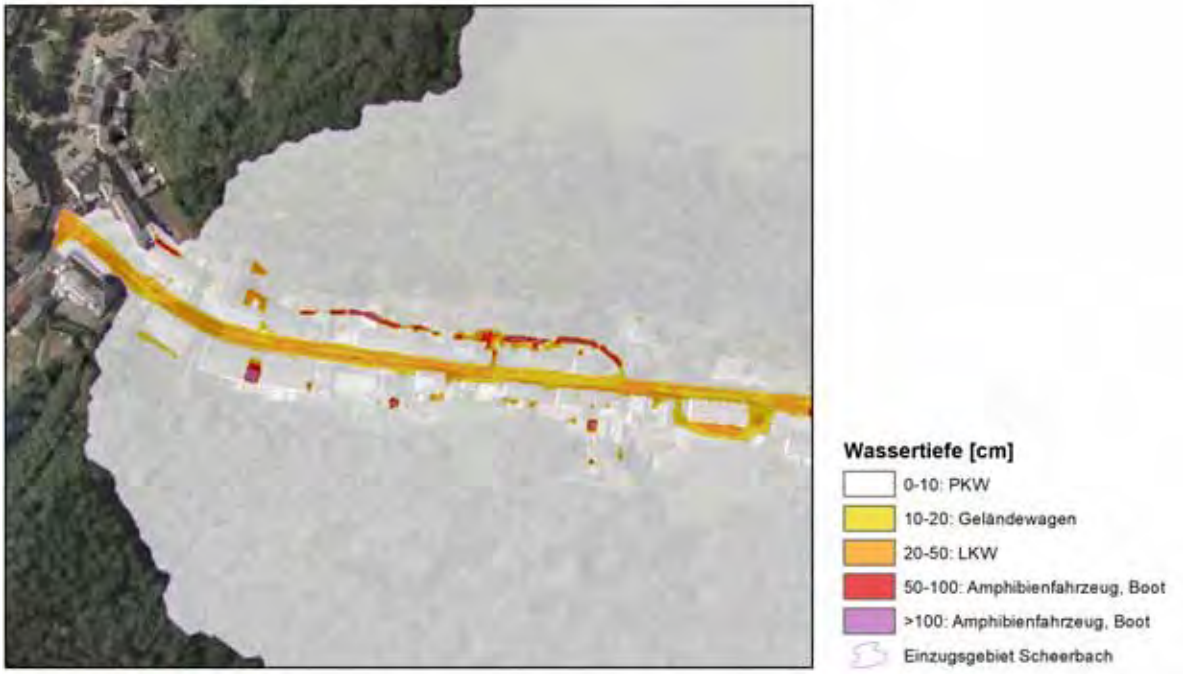



Abb. 7.5-1: Mit RoGeR dynamo modellierte klassifizierte maximale Wassertiefen im Laufe der Sturzflut im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16

# 8 Fazit

Bei Sturzfluten handelt es sich um hochdynamische Ereignisse, die infolge von Starkregenereignissen entstehen und innerhalb kürzester Zeit zu extremen Überschwemmungen und Schäden führen können. Oftmals treten sie in kleinen, steilen Einzugsgebieten mit nur unbedeutenden Bächen auf, die nicht hydrometrisch überwacht werden. Entsprechend schwierig sind retrospektive Analysen, wenn es kaum Messdaten gibt.
Wie gezeigt werden konnte, bietet die Auswertung von Einsatzdaten der Feuerwehr einen guten Ansatz zur Rekonstruktion der Ereignisse. Ein umfassendes Bild ergibt sich aber dennoch nicht, da nicht immer sämtliche Einsätze dokumentiert sind, sich die Anwohner selber helfen oder fehlende Zeitstempel von Fotos die genaue zeitliche Einordnung erschweren. In Zukunft sollte versucht werden, betroffene Gebiete systematisch zu kartieren, um die Fließpfade und Überschwemmungsflächen möglichst genau erfassen und abgrenzen zu können. Mit Drohnen aufgenommene Luftbilder können hierzu einen entscheidenden Beitrag leisten. Allerdings muss das Wetter unmittelbar nach einer Sturzflut dies erlauben. Die fortschreitenden Aufräumarbeiten verwischen ansonsten teilweise die Spuren. So gewonnene Referenzdaten können anschließend für Sturzflutmodellevaluierungen und -validierungen genutzt werden.

Die Modellierung von Sturzfluten ist nach wie vor anspruchsvoll, da sich diese Ereignisse nicht auf eine einzige Ursache reduzieren lassen, und es gilt eine Vielzahl unterschiedlichster Parameter und Prozesse zu implementieren. Viele der Faktoren sind unabhängig voneinander, so dass sie sich gegenseitig abmildern oder verstärken können. Beispielsweise sei ein hoher Niederschlag bei zugleich hoher Vorfeuchte des Bodens genannt, was zu starker Bildung von Oberflächenabfluss führen kann. Andererseits können auch hoher Niederschlag und eine geringe Vorfeuchte einhergehen, so dass sich die Effekte teilweise abmildern und weniger Oberflächenabfluss gebildet wird. Modellergebnisse unterliegen hohen Unsicherheiten, weshalb stets nur ein Wertebereich mit Sicherheit angegeben werden kann, der sich unter Umständen um ein Vielfaches nach oben und unten vom eigentlichen Wert erstrecken kann.

Das Niederschlags-Abflussmodell RoGeR konnte im Rahmen dieser Arbeit auf drei Starkniederschlagsereignisse in je drei Einzugsgebieten in Luxemburg angewandt werden. Die modellierten Ganglinien deckten sich zeitlich mit der Entwicklung der Einsatzzahlen der Feuerwehr. Die Scheitelabflüsse konnten allerdings nicht in allen Einzugsgebieten zufriedenstellend modelliert werden, wie ein Vergleich mit dem berechneten Spitzenabfluss zeigte. Die

Methodik des kumulierten Oberflächenabflusses ermöglichte räumlich verteilte detaillierte Aussagen zu Fließpfaden und zeugt von der räumlich korrekt modellierten Abflussbildung.

Erstmalig wurden zwei Erweiterungen bzw. Weiterentwicklungen des ursprünglichen NA-Modells RoGeR, nämlich RoGeR Flow und RoGeR dynamo, genutzt, um die Wassertiefen während der Sturzfluten im Einzugsgebiet des Scheerbachs zu modellieren und mit den Referenzdaten abzugleichen. RoGeR Flow überschätzte die reellen Wassertiefen erheblich. Im Gegensatz dazu lagen die mit RoGeR dynamo modellierten Wassertiefen sehr nahe an den tatsächlich beobachteten. Zwar gab es noch ein paar Ungereimtheiten innerhalb der Modellergebnisse, doch sollte die Entwicklung dieses vielversprechenden Modells fortgeführt werden, zumal es in der Lage ist, neben den vielen in RoGeR bereits implementierten Abfluss-bildungsprozessen, auch zeitlich variable Fließgeschwindigkeiten und Reinfiltration von Oberflächenabfluss zu berücksichtigen.

## Literatur


Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hrsg.) (5. Auflage.). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller).

Administration du cadastre et de la topographie (Hrsg.). (o. J.). Le système de coordonnées au Grand-Duché de Luxembourg. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://act.public.lu/fr/publications/documents-techniques/luref-details.pdf.

Appel, D. & Habler, W. (2002). *Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung*. Hannover: Arbeitkreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte AkEnd. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.bundestag.de/endlager-archiv/blob/388944/cd878ac9d5596883ec80ffdf23bea6f2/kmat_12-02-data.pdf.

Arméi am Asaz, Waasserverdeelung assuréiert. (25.07.2016). *RTL.lu*. Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.rtl.lu/news/national/936685.html.

Assurancë komme fir Deel vum Schued op. (02.08.2016). *RTL.lu.* Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.rtl.lu/news/national/a/939326.html/rss/www.rtl.lu/letzebuerg/939196.html.

ASTA. (10.10.2018a). Stationsdaten des agrarmeteorologischen Messnetzes Luxemburg. *agrimeteo.lu*. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: http://www.agrimeteo.lu/Internet/AM/inetcntrLUX.nsf/cuhome.xsp?src=A7F93O9JW0&p1=0SOVVK6Z3U&p3=T6A9V8D8W8&p4=6B0G8RP4G8.

ASTA. (10.10.2018b). Originaldaten des agrarmeteorologischen Messnetzes Luxemburg. *agrimeteo.lu*. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: http://www.agrimeteo.lu/Internet/AM/inetcntrLUX.nsf/cuhome.xsp?src=1RW229ZBRD&p1=Z93405J242&p3=9U7PNBOV92&p4=6B0G8RP4G8.

Badde, U., Bremicker, M., Demuth, N., Rieger, W., Haag, I. & Aigner, D. (14.03.2018). Grundlagen des dynamischen Infiltrationsmoduls zur verbesserten Simulation von Starkregenereignissen mit LARSIM. Gehalten auf dem Internationalen LARSIM-Anwenderworkshop 2018, Koblenz.

Baram, S., Kurtzman, D. & Dahan, O. (2012). Water percolation through a clayey vadose zone. *Journal of Hydrology*, *424–425*, 165–171. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.12.040.

Barben, M., Hodel, H.-P., Kleeberg, H.-B., Spreafico, M. & Weingartner, R. (2001). *Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwassereigenschaften - Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten*. No. I–19. (191 S.). Lelystad: Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes. Verfügbar unter: https://www.khr-chr.org/sites/default/files/chrpublications/rapport_i_-_19_0.pdf.

Becker, A., Hafer, M., Junghänel, T., Müller, H.-J., Sterker, C., Walawender, E., Weigl, E., Winterrath, T. (03.11.2016). Bewertung des Starkregenrisikos in Deutschland auf der Basis von Radardaten. Gehalten auf der 10. DWD Klimatagung, Offenbach am Main.

Becker, P., Becker, A., Dalelane, C., Deutschländer, T., Junghänel, T. & Walter, A. (2016). *Die Entwicklung von Starkniederschlägen in Deutschland - Plädoyer für eine differenzierte Betrachtung*. (S. 7). Deutscher Wetterdienst.

Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling - The Primer* (2.). Hoboken: Wiley-Blackwell.

Bingenheimer, V. (10.06.2018). Starkregen bringt Überschwemmungen im Zentrum und im Osten. *Wort.lu*. Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.wort.lu/de/lokales/starkregen-bringt-ueberschwemmungen-im-zentrum-und-im-osten-5b1cc51ec1097cee25b8ae5d.

Blöschl, G., Reszler, C. & Komma, J. (2008). A spatially distributed flash flood forecasting model. *Environmental Modelling & Software*, (23), 464–478. doi:10.1016/j.envsoft.2007.06.010.

Blume, H.-P., Brümmer, G. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R. Stahr, K., Wilke, B.-M. (2010). *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde* (16. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Borga, M., Gaume, E., Creutin, J. D. & Marchi, L. (2008). Surveying flash floods: gauging the ungauged extremes. *Hydrological Processes*, *22* (18), 3883–3885. doi:10.1002/hyp.7111.

Braud, I., Ayral, P.-A., Bouvier, C., Branger, F., Delrieu, G., Dramais, G., Le Coz, J., Leblois, E., Nord, G., Vandervaere, J.-P. (2016). Advances in flash floods understanding and modelling derived from the FloodScale project in South-East France. *E3S Web Conf.*, *7*. doi:10.1051/e3sconf/20160704005.

Bremicker, M. (2000). Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, *11*.

Burghoff, O., Jarosch, K. & Schult, J. (2017). *Naturgefahrenreport 2017 - Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer in Zahlen, Stimmen und Ereignissen*. Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.

Burghoff, O., Jarosch, K. & Schult, J. (2018). *Naturgefahrenreport 2018 - Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer*. Berlin: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.

Dunne, T., R. Moore, T. & H. Taylor, C. (1975). *Recognition and Prediction of Runoff-Producing Zones in Humid Regions* (Band 20).

DWD. (15.02.2019). Analysen radarbasierter stündlicher (RW) und täglicher (SF) Niederschlagshöhen. *dwd.de*. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/radolan/radolan.html.

Faber, O., Hostache, R., Iffly, J. F., Matgen, P., Minette, F., Pfister, L., Trebs, Y. (2018). *La crue éclair du 22 juillet 2016 dans la région de Larochette - Etude mécanistique et fréquentielle*. Belvaux: Luxembourg Institute of Science and Technology.

Feist, P. (05.08.2016). Das Ernztal ist überall. *Lëtzebuerger Land*. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: http://www.land.lu/page/article/328/9328/FRE/index.html.

Flammang, F. (09.11.2018). Descriptioncouches.xlsx.

Ganser, J. (12.10.2016). Überschwemmungen im Ernztal: Multiple Ursachen. *Wort.lu*. Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.wort.lu/de/lokales/ueberschwemmungen-im-ernztal-multiple-ursachen-57fdf52c5061e01abe83a32c.

Gattermayr, W., Kölbl, C., Krammer, C., Lorenz, P., Maracek, K., Mathis, C., Moser, J., Schatzl, R., Wiesenegger, H., Wimmer, M. (2011). *Leitfaden - Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten*. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VII3 - Wasserhaushalt.

Geoportail.lu Thema: Wasser. (o. J.). *Geoportail.lu*. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://map.geoportail.lu/theme/eau?lang=de&version=3&zoom=14&X=686912&Y=6412011&layers=749&opacities=1&bgLayer=basemap_2015_global&crosshair=false.

Grieser, J. & Beck, C. (2002). Extremniederschläge in Deutschland - Zufall oder Zeichen? *Klimastatusbericht 2002*, 141–150.

*Handbuch RoGeR_WHM / urbanRoGeR V.7*. (2017). Freiburg: Professur für Hydrologie.

Hapuarachchi, P., Wang, Q. & Pagano, T. (2011). *A review of advances in flash flood forecasting* (Band 25). doi:10.1002/hyp.8040.

Heber Green, W. & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, *4* (1), 1–24. doi:10.1017/S0021859600001441.

Hëllefsbereetschaft, Opraumaarbechten a Spendenopruff. (26.07.2016). *RTL.lu*. Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.rtl.lu/news/national/a/936844.html.

Hermes, S. (20.06.2018). Nach Unwettern: 4,6 Millionen Euro Schaden. *Wort.lu.* Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.wort.lu/de/lokales/nach-unwettern-4-6-millionen-euro-schaden-5b2a4b22c1097cee25b8b7ae.

Hölting, B. (1992). *Hydrogeologie - Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie* (4. Auflage). Stuttgart: Ferdinand Enke.

Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions of the American Geophysical Union*, *14* (1), 446–460.

Jachs, S. (2011). *Einführung in das Katastrophenmanagement* (1. Auflage). tredition GmbH.

Jirka, G. H. & Lang, C. (2009). *Einführung in die Gerinnehydraulik.* Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.

K. Jain, M., C. Kothyari, U. & G. Ranga Raju, K. (2004). *A GIS based distributed rainfall–runoff model* (Band 299). doi:10.1016/j.jhydrol.2004.04.024.

Kachelmannwetter 01.06.18. (19.02.2019). *Kachelmannwetter.com.* Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://kachelmannwetter.com/de/regenradar/diekirch/20180531-2300z.html.

Kachelmannwetter 09.06.18. (19.02.2019). *Kachelmannwetter.com.* Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://kachelmannwetter.com/de/regenradar/diekirch/20180609-1630z.html.

Kachelmannwetter 22.07.16. (19.02.2019). *Kachelmannwetter.com.* Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://kachelmannwetter.com/de/regenradar/diekirch/20160722-1930z.html.

Katastrophale Zustände nach sintflutartigem Regen. (01.06.2018). *Wort.lu.* Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.wort.lu/de/lokales/katastrophale-zustaende-nach-sintflutartigem-regen-5b10d747c1097cee25b8a5d4.

Kern, F.-J. (2012). Flächenversiegelung (Atlastafel 6.2). *Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg* (4. Auflage). Stuttgart.

Knapp, H., Durgunoglu, A. & Ortel, T. W. (1991). A review of rainfall-runoff modeling for stormwater management (SWS Contract Report). *Illinois State Water Survey, Hydrology Division*, (516), 92.

Kobold, M. & Brilly, M. (2006). *The use of HBV model for flash flood forecasting* (Band 6). doi:10.5194/nhess-6-407-2006.

Kooijman, A., Cammeraat, L. H. & Seijmonsbergen, A. (2018). *The Luxembourg Gutland Landscape*. doi:10.1007/978-3-319-65543-7.

KOSTRA-DWD. (21.02.2019). *dwd.de*. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/kostra_dwd_rasterwerte/kostra_dwd_rasterwerte.html.

Krier, R. (12.2017). *Einflussfaktoren auf Sturzfluten und deren Potential zur Modellierung*. Masterarbeit. Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Kron, W. (24.09.2008). Floods in Europe - From Weather Conditions to Insurance. Gehalten auf der 35th Annual GIRO Convention, Sorrento. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.google.lu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=2ahUKEwiDhKW0_c7gAhUF16QKHf7NCQkQFjAEegQIBRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.actuaries.org.uk%2Fdocuments%2Ffloods-europe-weather-conditions-insurance-slides&usg=AOvVaw2c6pLdiKN9LdtXXx75PZ6A.

Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg. (2012). Hydrogeologische Einheiten (Atlastafel 5.2). *Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg* (4. Auflage). Stuttgart.

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.). (2002). *Hydraulik naturnaher Fließgewässer Teil 1 - Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren* (Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie) (1. Auflage). Karlsruhe.

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.). (2003). *Hydraulik naturnaher Fließgewässer Teil 4 - Numerische Modelle zur Strömungssimulation* (Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie) (1. Auflage). Karlsruhe.

Leistert, H. (25.02.2019a). Telefonat: Einstellungen und Modellparameter in RoGeR dynamo.

Leistert, H. (13.03.2019b). Email-Austausch: RoGeR dynamo.

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. & Bergström, S. (1997). *Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model* (Band 201). doi:10.1016/S0022-1694(97)00041-3.

Mathias, L. (2017). *Synoptic analysis of the flash flood producing thunderstorms over the Vallée de l'Ernz in Luxembourg on 22 July 2016.* doi:10.13140/RG.2.2.14687.66729.

Meisch, C. (19.10.2018). Datenaustausch und Erkenntnisse zu den Sturzfluten 2016 und 2018.

Meteolux.lu Normales et extrêmes. (19.02.2019). *Meteolux.lu.* Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.meteolux.lu/fr/climat/normales-et-extremes/?lang=fr.

Mioc, D., Anton, F. & Liang, G. (2008). On-line Street Network Analysis for Flood Evacuation Planning. In S. Nayak & S. Zlatanova (Hrsg.), *Remote Sensing and GIS Technologies for Monitoring and Prediction of Disasters* (S. 219–242). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

NatCatSERVICE - Katastrophen 1980-2017. (22.12.2018). *natcatservice.munichre.com*. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://natcatservice.munichre.com/percentages/1?filter=eyJ5ZWFyRnJvbSI6MTk4MCwieWVhclRvIjoyMDE3LCJhcmVhSWRzIjpbOV19&type=1.

*NatCatSERVICE - Naturkatastrophen-Knowhow für Risikomanagement und Forschung*. (2011). München: Munich RE. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.munichre.com/site/touch-publications/get/documents_E349207378/mr/assetpool.shared/Documents/5_Touch/_Publications/302-06812_de_.pdf.

*Nationaler Klimareport 2016 - Klima - Gestern, heute und in der Zukunft.* No. 2. korrigierte Auflage. (2016). Offenbach am Main, Deutschland: Deutscher Wetterdienst.

Néelz, S. & Pender, G. (2010). *Benchmarking of 2D Hydraulic Modelling Packages*. Bristol: Environment Agency.

No den Iwwerschwemmungen - Acceleréiert Ausschreiwungen a Schaffen am Congé collectif. (21.06.2018). *RTL.lu.* Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: http://www.rtl.lu/letzebuerg/1198237.html.

Olaya, V. (2004). *A gentle introduction to SAGA GIS*. (The SAGA User Group e.V., Hrsg.) (Edition 1.1.). Göttingen.

Patt, H. & Jüpner, R. (Hrsg.). (2013). *Hochwasser-Handbuch - Auswirkungen und Schutz* (2. Auflage). Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.

Peschke, G. (1985). Zur Bildung und Berechnung von Regenabfluss. *Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden*, *34* (3), 195–200.

Pfister, L., Drogue, G., El Idrissi, A., Iffly, J. F. & Matgen, P. (2004). *Hydrological impacts of climate change at catchment scale: A case study in the Grand-Duchy of Luxembourg* (Band 2).

Pivovarova, I., Sokolova, D., Batyrov, A., Kuzmin, V., Ngoc Anh, T., Dang, D., Shemanaev, K. (2018). *Use of MLCM3 Software for Flash Flood Modeling and Forecasting* (Band 19). doi:10.12911/22998993/79419.

Professur für Hydrologie. (o. J.). Beschreibung zur Ableitung der Eingangsdatensätze für RoGeR.

RTL.lu - 1 Joer duerno ass d'Nuecht nach ëmmer an de Käpp vun de Leit. (14.07.2017). *RTL.lu.* Nachrichten. Zugriff am 17.1.2018. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: http://www.rtl.lu/letzebuerg/1056267.html#p90.

RTL.lu - Géigend Fiels-Iermsdref vu Wiedere besonnesch getraff. (25.07.2016). *RTL.lu*. Nachrichten. Zugriff am 17.1.2018. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: http://www.rtl.lu/letzebuerg/935365.html.

Scherrer, S. (1997). *Abflussbildung bei Starkniederschlägen - Identifikation von Abflussprozessen mittels künstlicher Niederschläge.* Doktorarbeit. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/1990-1999/147.pdf.

Scherrer, S., Naef, F., O. Faeh, A. & Cordery, I. (2006). *Formation of runoff at the hillslope scale during intense precipitation* (Band 3). doi:10.5194/hessd-3-2523-2006.

Schied Mëllerdall: Defi fir Touristesaison, déi an 3 Wochen ufänkt. (10.06.2018). *RTL.lu*. Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: http://www.rtl.lu/letzebuerg/1191613.html.

Sidle, R., Hirano, T., Gomi, T. & Terajima, T. (2007). *Hortonian overland flow from Japanese forest plantations - An aberration, the real thing, or something in between?* (Band 21). doi:10.1002/hyp.6876.

Spreafico, M. & Viviroli, D. (2013). *Ausgewählte Beiträge zur Abschätzung von Hochwasser und Feststofftransport in der Schweiz – Grundlagen, Methoden, Fallbeispiele*.

Steinbrich, A. (12.11.2018). bodenart_bk50_trockenrisse.dbf.

Steinbrich, A., Leistert, H. & Weiler, M. (2016). Model-based quantification of runoff generation processes at high spatial and temporal resolution. *Environmental Earth Sciences*, *75* (21), 1423. doi:10.1007/s12665-016-6234-9.

Steinbrich, A. & Weiler, M. (2012). Abflussbildung und Abflusskomponenten (Atlastafel 6.5). *Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg* (4. Auflage). Stuttgart.

Steinbrich, A., Weiler, M. & Leistert, H. (2015). *Alles RoGeR? Modellierung von Sturzfluten aufgrund von Starkniederschlägen. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*. doi:10.14617/for.hydrol.wasbew.35.15.

Straßen gesperrt - Trinkwasserversorgung gestört. (01.06.2018). *Wort.lu.* Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.wort.lu/de/lokales/strassen-gesperrt-trinkwasserversorgung-gestoert-5b1149fcc1097cee25b8a698.

Straßen im Müllerthal schlimm zugerichtet. (13.06.2018). *Essentiel.lu.* Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: http://www.lessentiel.lu/de/luxemburg/story/stra-en-im-mullerthal-schlimm-zugerichtet-20747108.

UNISDR. (30.08.2007). *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*. Terminology. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.unisdr.org/we/inform/terminology.

Wat geschitt ass, ass einfach onvirstellbar. (26.07.2016). *RTL.lu*. Nachrichten. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.rtl.lu/news/national/a/937123.html.

Weiler, M. (2001). Mechanisms controlling macropore flow during infiltration. Dye tracer experiments and simulations (Schriftenreihe des Instituts für Hydromechanik und Wasserwirtschaft der ETH Zürich), *7* (150).

Weiler, M. & McDonnell, J. (2004). *Virtual experiments: A new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology* (Band 285). doi:10.1016/S0022-1694(03)00271-3.

Weiler, M., McDonnell, J. J., Tromp-van Meerveld, I. & Uchida, T. (2005). Subsurface Stormflow. (M.G. Anderson, Hrsg.) *Encyclopedia of Hydrological Sciences.*

Wetterlexikon - Starkregen. (o. J.). *Deutscher Wetterdienst*. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Starkregen.html.

Wicht, M. & Osinska-Skotak, K. (2016). Identifying urban areas prone to flash floods using GIS - preliminary results. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, *2016*, 1–22. doi:10.5194/hess-2016-518.

Windstatistiken Luxemburg. (o. J.). *Windfinder.com*. Zuletzt aufgerufen am 21.03.19 unter: https://de.windfinder.com/windstatistics/luxemburg.

Wirtz, P. (04.06.2018). Gespräch: Granatenfund bei den Aufräumarbeiten.

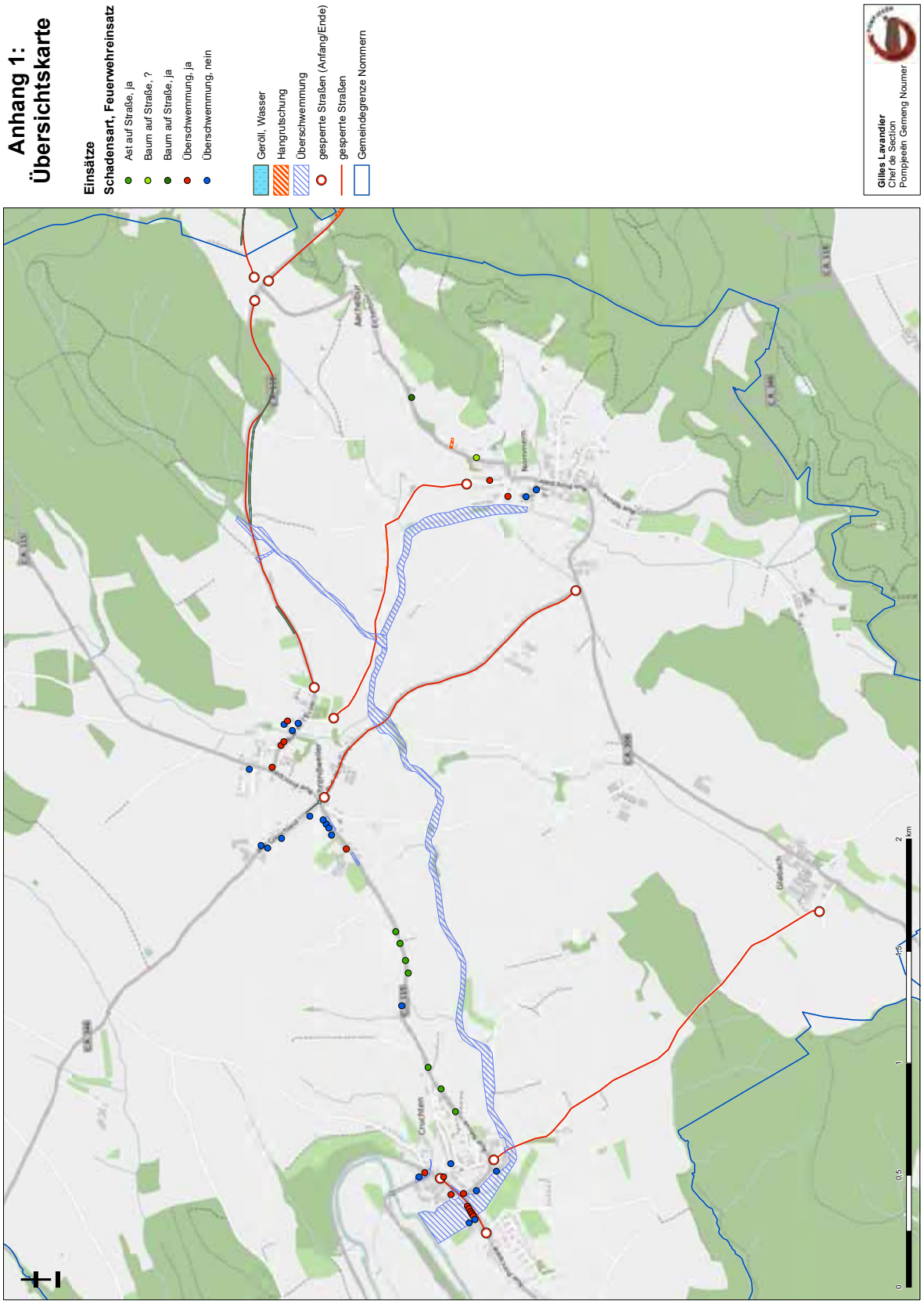



Abb. Ah-1.2.1-1: Überschwemmungen, Schäden und unpassierbare Straßen in der Gemeinde Nommern (aus dem Abschlussbericht des 02.08.16 der Freiwilligen Feuerwehr Nommern)

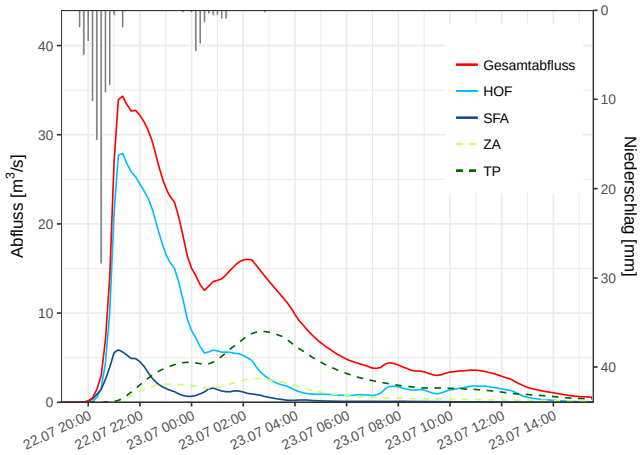



Abb. Ah-6.1.1-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 22.07.16

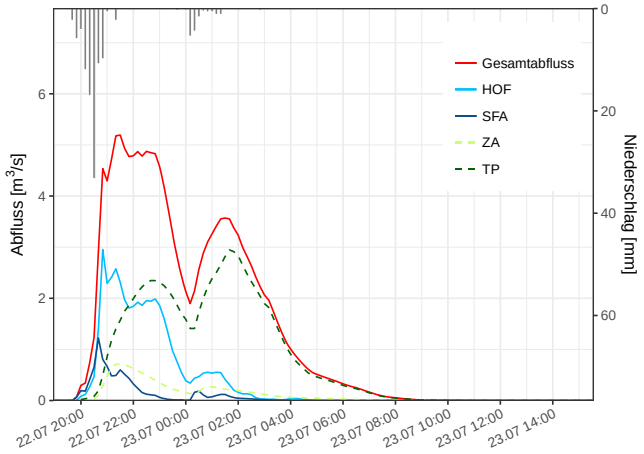



Abb. Ah-6.1.2-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 22.07.16

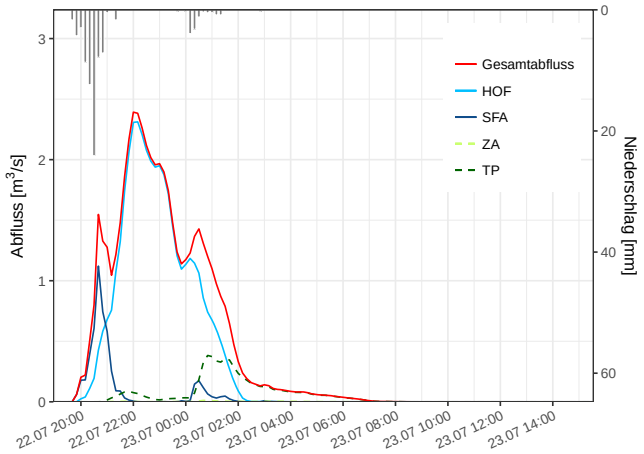



Abb. Ah-6.1.3-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 22.07.16

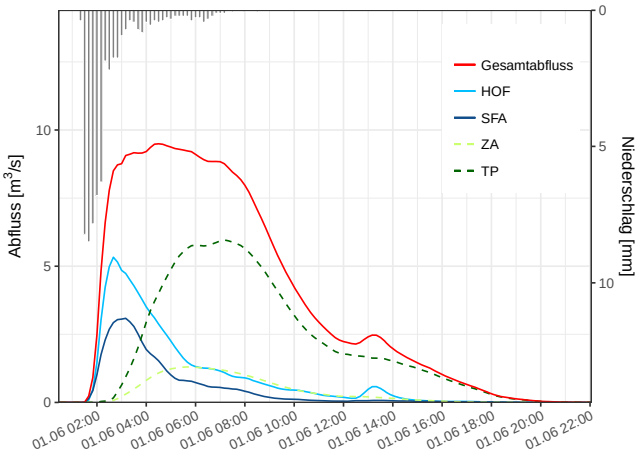



Abb. Ah-6.2.1-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 01.06.18

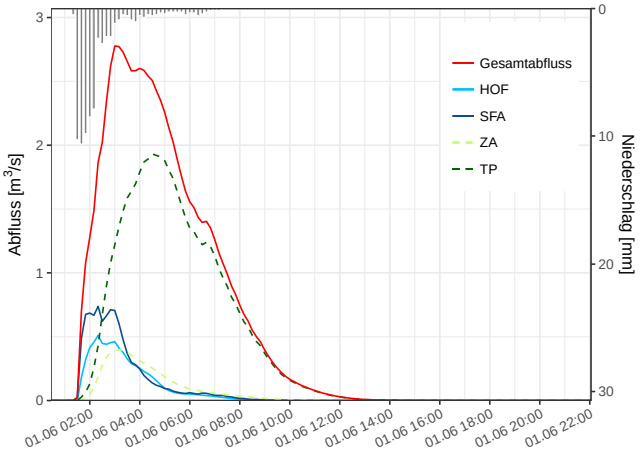



Abb. Ah-6.2.2-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 01.06.18

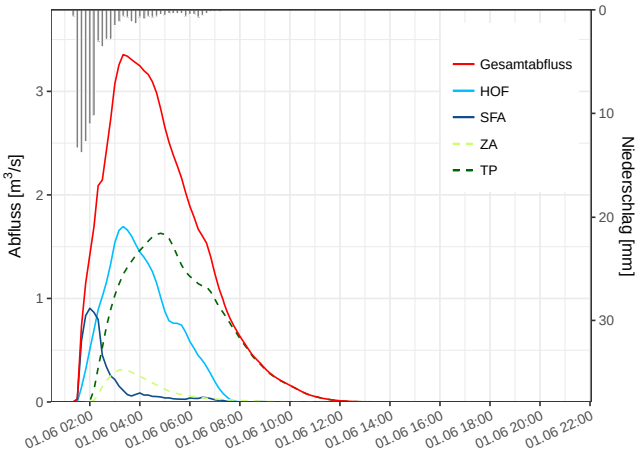



Abb. Ah-6.2.3-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 01.06.18

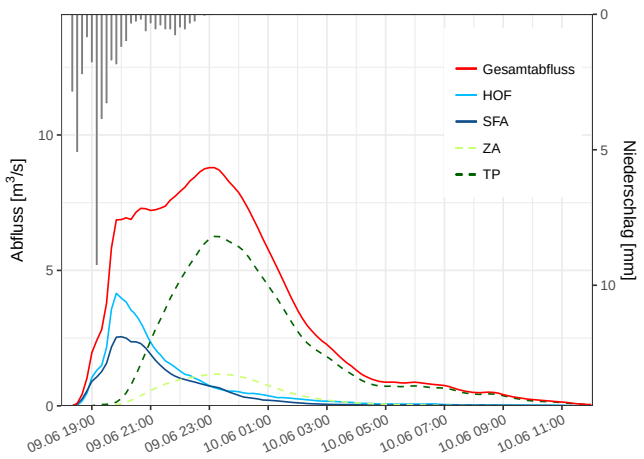



Abb. Ah-6.3.1-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Schrondweilerbachs am 09.06.18

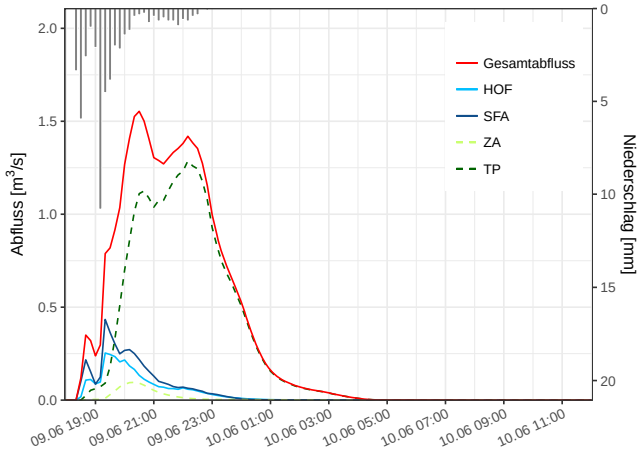



Abb. Ah-6.3.2-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet der Merscher Straße am 09.06.18

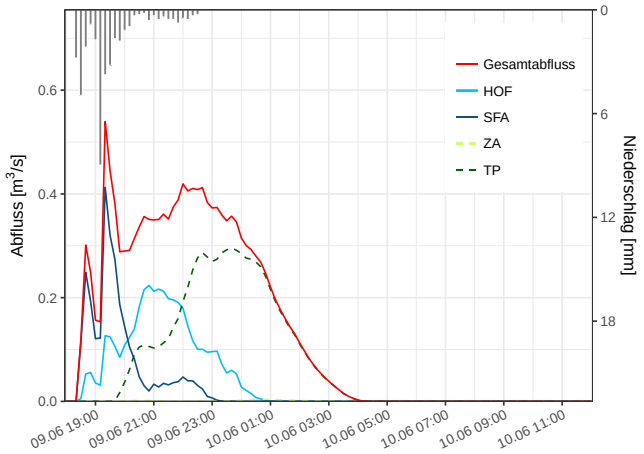



Abb. Ah-6.3.3-1: Ganglinien aller mit RoGeR modellierten Abflusskomponenten im Einzugsgebiet des Scheerbachs am 09.06.18

Tab. Ah-1: Verwendete Begriffe mit deren Abkürzungen, Symbolen und Einheiten

| **Begriff** | **Abkürzung / Symbol** | **Einheit** |
|---|---|---|
| 10-minütliche Niederschlagsintensität | | [mm/10min] |
| Abbildung | Abb. | |
| Abfluss | Q | [$m^3$/s], [l/s] |
| Administration de la Gestion de l‘Eau | AGE | |
| Administration de la Navigation Aérienne | ANA | |
| Administration des Ponts et Chaussées | PCH | |
| Administration des Services Techniques de l’Agriculture | ASTA | |
| Administration du Cadastre et de la Topographie | ACT | |
| aktuelle Trockenrisstiefe | $z_c$ | [mm] |
| aktuelle Vorfeuchte als prozentuale Füllung der nFK | %nFK | [%] |
| Anfangsfüllung des Bodenspeichers | $\theta i$ | |
| Anteil des Volumens an der nFK bei Ausrollgrenze | A | [%] |
| antreibendes Potential | $\psi$ | |
| beziehungsweise | bzw. | |
| Bodenart-ID | BA-ID | |
| Bodenkundliche Kartieranleitung 5 | KA5 | |
| Central des secours d’urgence du 112 | CSU 112 | |
| Comma-Separated Values | CSV | |
| Coordination of Information on the Environment | CORINE | |
| Corps grand-ducal d’incendie et de secours | CGDIS | |
| Deutscher Wetterdienst | DWD | |
| Digitales Geländemodell | DGM | |
| Distributed Runoff Generation Model | DROGen | |
| Durchlässigkeitsbeiwerte | Kf | |
| effektives Porenvolumen | Peff, $\theta s$ | [Vol.-%] |
| European Petroleum Survey Group | EPSG | |
| Flächenidentifikator | FLIK | |
| Fließgeschwindigkeit | v | [m/s] |
| Fließstrecke | l | |
| Floating Binary Format | .flt | |
| folgende | f. | |
| Gefälle | i | [m/m] |
| Geoinformationssystem | GIS | |
| gesättigte hydraulische Leitfähigkeit | Ks | |
| Horton’scher Oberflächenabfluss | HOA | |
| Infiltration | I | [mm] |

| | | |
|---|---|---|
| Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes | KOSTRA-DWD | |
| Large Area Runoff Simulation Model | LARSIM | |
| Light Detection And Ranging | LiDAR | |
| Liter pro Quadratmeter | | [l/m$^2$] |
| Luftkapazität | LK | [Vol.-%] |
| Luxembourg Institute of Science and Technology | LIST | |
| Luxembourg Reference Frame | LUREF | |
| Makropore | MP | |
| Matrixinfiltration | Matrix-INF | |
| maximale Trockenrisstiefe | $z_{max}$ | [mm] |
| Meter über Meeresspiegel | m ü. M. | |
| Milliarde | Mrd. | |
| Million | Mio. | |
| minimaler Tongehalt | $C_{min}$ | [%] |
| Model of Anticipation of Runoff and Inundations for Extreme events | MARINE | |
| Multi-Layer Conceptual Model, 3. Generation | MLCM3 | |
| Niederschlag | N | [mm] |
| Niederschlags-Abflussmodell | NA-Modell | |
| nutzbare Feldkapazität | nFK | [Vol.-%] |
| Oberflächenabfluss | OA | |
| ohne Jahr | o. J. | |
| Radar-Online-Aneichung | RADOLAN | |
| Rauigkeitsbeiwerte nach Strickler | K | [m$^{1/3}$/s] |
| Runoff Generation Research Model | RoGeR | |
| Sacramento soil moisture accounting model | SAC-SMA | |
| Sättigungsflächenabfluss | SFA | |
| Saugspannung an der Sättigungsfront | $\Psi s$ | |
| Spanne von der Ausrollgrenze zur Schrumpfungsgrenze als prozentualer Anteil an der nFK | D | [%] |
| stündliche Niederschlagsintensität | | [mm/h] |
| substratspezifischer Proportionalitätskoeffizient | k | |
| Tabelle | Tab. | |
| Tiefenperkolation | TP | |
| Tongehalt | C | [%] |
| Two-dimensional, Runoff, Erosion and Export | TREX | |
| Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg | WaBoA | |
| Wassermenge | q | |
| Zeit | t | |

| | | |
|---|---|---|
| zum Beispiel | z.B. | |
| Zunahme der Trockenrisstiefe je 1% Tongehalt | F | [mm] |
| Zwischenabfluss | ZA | |

## Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst zu haben. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommenen Inhalte als solche kenntlich gemacht. Die eingereichte Masterarbeit war oder ist weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens. Die elektronische Version der eingereichten Masterarbeit stimmt in Inhalt und Formatierung mit den auf Papier ausgedruckten Exemplaren überein.

Freiburg, den 29. März 2019 Gilles Armand François Lavandier