



David Neubauer, BSc

**Aufbau, Kalibrierung und Validierung eines hydrodynamischen Niederschlagsabflussmodells für das Einzugsgebiet Graz-Ziegelstraße**

**Design, calibration and validation of a hydrodynamic rainfall-runoff model for the catchment Graz-Ziegelstraße**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer:

Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Gruber

Dipl.-Ing. Dr. Gerald Krebs

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Roman Maier

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, Mai 2018



Kontakt:  
David Neubauer  
davidneubauer@gmx.at

## **EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG**

### ***AFFIDAVIT***

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used anything other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or contextually from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature



## **Danksagung**

Hiermit möchte ich mich herzlich bei allen Personen bedanken, die mich im Laufe meines Studiums an der TU Graz und beim Verfassen dieser Masterarbeit, in welcher Form auch immer, unterstützt haben.

Vorerst der Dank an die Betreuer und den mitbetreuenden Assistenten dieser Masterarbeit, Herrn Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Günter Gruber, Herrn Dipl.-Ing. Dr. Gerald Krebs und Herrn Dipl.-Ing. Roman Maier. Bei jeglichen Fragen zur Arbeit war bei ihnen immer schnell und unbürokratisch Hilfe zu erwarten.

Weiters möchte ich mich bei meinen ehemaligen Schul- und Studienkollegen Herrn Dipl.-Ing. Gernot Gsellmann, Herrn Dipl.-Ing. Steven Klinger und Herrn Dipl.-Ing. Markus Lesky für die langjährige Freundschaft sowie für die gemeinsam ehrgeizig vollzogene und trotzdem lustige Studienzeit bedanken.

Nicht zuletzt ein besonderes Dankschön an meine Mutter, meinen Vater und meine Großmutter, für die seelische und vor allem finanzielle Unterstützung während meiner gesamten Studienzeit.



## Kurzfassung

Einleitungen von gesammelten Niederschlagswässern aus Trennkanalisationen von Siedlungsgebieten in Oberflächengewässer bedeuten einerseits hydraulischen Stress, sind andererseits aber auch verantwortlich für einen beträchtlichen Anteil der Schadstoffe in den Gewässern. Um diese in Zukunft infolge des ansteigenden Versiegelungsgrades des Bodens größer werdenden Schadstoffeinträge minimieren oder verhindern zu können, ist es nötig, die Quellen und Herkunftsflächen der eingetragenen Stoffe zu kennen bzw. zu ermitteln. Befassten sich bisherige Überlegungen zu Maßnahmen meist mit Punktquellen, wie den Abläufen von Kläranlagen, sollen im Projekt TEMPEST, in welches diese Masterarbeit eingebettet ist, nun auch diffuse Quellen wie z. B. versiegelte Flächen u. a. im Einzugsgebiet Graz-Ziegelstraße untersucht werden.

Ein hydrodynamisches Niederschlags-Abfluss-Modell mit einer hohen Auflösung der Teilflächen soll es in Zukunft möglich machen, Schadstoffeinträge aufgrund der Nutzungs- und Oberflächenart der Teilflächen besser abschätzen zu können. Dafür wurde in dieser Masterarbeit der Grundstein gelegt. In einem ersten Schritt wurden die Oberflächen detailliert aufgenommen und mittels GIS digitalisiert, sowie das Einzugsgebiet (EG) der Niederschlagswasserkanalisation rund um die Grazer Ziegelstraße erstellt. Damit wurde in einem zweiten Schritt ein Niederschlags-Abfluss-Modell mit der Modellierungssoftware SWMM aufgebaut, sowie bezogen auf den Durchfluss am Auslass des Niederschlagswasserkanals, der infolge neun ausgewählter Regenereignisse im Zeitraum Juli bis Dezember 2017 auftrat, manuell kalibriert und mit 13 weiteren Ereignissen validiert.

Die Ergebnisse der manuellen Kalibrierung zeigten vorerst mit einer Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) von 0,49 und einer großen Streuung bei Betrachtung einzelner Regenereignisse eine insgesamt nur mittelmäßige Anpassung zwischen Messung und Simulation. Durch zeitliches Verschieben der Durchflussdaten wurde danach versucht, den Einfluss der Distanz zwischen Niederschlagsmessung und EG herauszufinden. Die besten Ergebnisse (NSE = 0,67) wurden dabei mit einer Verschiebung um vier Minuten erzielt, was bedeutet, dass der Niederschlag im Einzugsgebiet bei den betrachteten Ereignissen etwa vier Minuten später als an der 650 m vom EG entfernten Niederschlagsmessung auftrat. Die NSE der Validierung fiel von Anfang an mit einem Wert von 0,74 bei den zur Verfügung stehenden Ereignissen besser aus.

Das Modell kann somit betreffend die Quantität des Niederschlagsabflusses für eine wasserwirtschaftliche Maßnahmenplanung herangezogen werden. Zukünftig sollten allerdings dafür Niederschlagsmessungen direkt aus dem Einzugsgebiet verwendet werden. Für eine Abschätzung der Stofffrachten im Abfluss muss das Modell noch um einen Schmutzfrachtansatz erweitert und anhand der zurzeit noch erhobenen Schmutzstoffkonzentrationen kalibriert und validiert werden.



## Abstract

On the one hand discharges of collected stormwater from separate sewer networks of residential areas into surface waters mean hydraulic stress, and on the other hand they are also responsible for a considerable proportion of pollutants in receiving waters. In order to be able to minimize or prevent these in the future as a result of the increasing degree of sealing of the soil, it is necessary to know or determine the sources and areas of origin of the registered substances. While previous considerations on measures were mostly concerned with point sources, such as the effluents of wastewater treatment plants, the TEMPEST project, in which this work is embedded, will now also examine diffuse sources such as impervious areas in the catchment Graz-Ziegelstraße.

A hydrodynamic rainfall-runoff model with a high resolution of the fractional areas should allow to better estimate pollutant inputs due to the type of use and surface of the fractional areas in the future. The foundation stone for this was laid in this master thesis. In a first step, the surfaces were recorded in detail and digitized using GIS, and the catchment area of the stormwater drainage system around the Grazer Ziegelstraße was constructed. In a second step, a rainfall-runoff model with the SWMM modelling software was built up and manually calibrated and validated to the flow rate at the outlet of the stormwater network.

The results of the manual calibration showed an overall only mediocre fit between measurement and simulation with a Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) of 0.49 and a large dispersion when looking at individual rain events. The influence of the distance between precipitation measurement and catchment was then determined by shifting the flow rate data over time. The best results (NSE = 0.67) were obtained with a shift of four minutes, which means that precipitation in the catchment area occurred about four minutes later than at the precipitation measurement 650 m from the catchment. The NSE of the validation was better from the beginning with a value of 0.74 for the available events.

The model can thus be used for planning water management measures with regard to the quantity of stormwater runoff. In future, however, precipitation measurements directly from the catchment should be used for this purpose. For an estimation of the pollutant loads in the effluent, the model must be extended by a pollutant load approach and calibrated and validated on the basis of the pollutant concentrations still collected at present.



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
1.2	Motivation	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Zukünftige Herausforderungen in der Siedlungswasserwirtschaft	3
2.2	Niederschlagsabfluss	4
2.2.1	Abflussbildung im urbanen Raum	4
2.2.2	Qualität des Niederschlagswassers	5
2.2.3	Rechtliches	6
2.2.4	Folgen von Niederschlagsabfluss	6
2.3	Abflussmodelle	7
2.3.1	Prozesse	7
2.3.2	Ansätze für den Abflusstransport	7
2.3.3	Detaillierungsgrade	7
2.3.4	Datenbedarf	11
2.3.5	Ablauf einer Modellerstellung	12
2.3.6	Modellkalibrierung	12
2.3.7	Modellunsicherheiten	13
2.4	SWMM	14
2.4.1	Abflussberechnung	14
2.4.2	Evaporation	17
2.4.3	Infiltration	18
2.5	AFS und AFS <sub>fein</sub>	19
2.5.1	Definition	19
2.5.2	Bestimmung der AFS in Wasserproben	20
2.5.3	Rechtliche Grundlage in Österreich	20
2.5.4	Verhinderung von AFS	20
2.6	ArcMap (GIS)	21
2.7	Einzugsgebiet	21
2.7.1	Lage	21
2.7.2	Gelände	22
2.7.3	Niederschlagsentwässerung	22

Nutzungsarten im Einzugsgebiet.....	25
2.7.4 Verkehr .....	25
<b>3 Methodik.....</b>	<b>27</b>
3.1 Daten und deren Aufbereitung .....	27
3.1.1 Kanalisation .....	27
3.1.2 Erstellen des Einzugsgebiets .....	27
3.1.3 Oberflächen .....	28
3.1.4 Niederschlagsdaten .....	30
3.1.5 Abflussdaten .....	34
3.1.6 Bodenparameter .....	36
3.1.7 Klimadaten .....	38
3.2 Modellaufbau .....	40
3.2.1 Importieren der Daten .....	41
3.2.2 Flächenattribute festlegen.....	41
3.2.3 Simulationseinstellungen .....	42
3.3 Sensitivitätsanalyse .....	43
3.3.1 Kennzahlen der Anpassung.....	43
3.3.2 Parametervariationen.....	45
3.4 Kalibrierung .....	46
3.5 Validierung .....	47
<b>4 Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>49</b>
4.1 Oberflächen.....	49
4.2 Sensitivitätsanalyse .....	51
4.3 Kalibrierung .....	59
4.4 Validierung .....	64
4.5 Vergleich zu anderen Studien .....	66
<b>5 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>68</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>70</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>i</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Wasserhaushalt befestigter (undurchlässiger) und unbefestigter (durchlässiger) Flächen (Amt der NÖ Landesregierung, Gruppe Wasser, 2010).....	4
Abbildung 2-2: Prinzipieller Verlauf der Abflussbildung (Muschalla u. a., 2015).....	5
Abbildung 2-3: Räumliche Auflösung der Oberfläche (Muschalla u. a., 2015).....	8
Abbildung 2-4: Gebietsunterteilungen und Berechnungsweisen bei der Kanalnetzberechnung (ATV-DVWK, 2004).....	10
Abbildung 2-5: Abfluss in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung (Muschalla u. a., 2015) .....	11
Abbildung 2-6: Konzeptionelle Darstellung des Oberflächenabflusses (Rossman, 2015, mod.) .....	14
Abbildung 2-7: Idealisertes Teileinzugsgebiet für Oberflächenabfluss (EPA, 2016, mod.) .....	16
Abbildung 2-8: Luftbild Graz und Lage des Einzugsgebiets Graz-Ziegelstraße.....	21
Abbildung 2-9: Visualisierung der Geländehöhen im kanalisiertem Einzugsgebiet.....	22
Abbildung 2-10: NW-Kanal im Einzugsgebiet, der Stufenbach und das Rückhaltebecken (RHB) .....	23
Abbildung 2-11: Auslass des NW-Kanals in den Stufenbach.....	24
Abbildung 2-12: Messcontainer .....	24
Abbildung 2-13: Systemskizze POA Korrelations-Keilsensor (NIVUS, 2018).....	24
Abbildung 2-14: Einbauort im Kanal .....	24
Abbildung 2-15: Entnahmeschläuche im Kanal für die automatische Probenahme .....	25
Abbildung 2-16: Probenahmegerät "Liquiport 2010 CSP44" (Endress+Hauser, 2018).....	25
Abbildung 2-17: Straßen im und um das Einzugsgebiets.....	26
Abbildung 3-1: Teileinzugsgebiete.....	28
Abbildung 3-2: Beispielbild: Oberflächen - Nutzungsarten.....	29
Abbildung 3-3: Messstandorte .....	31
Abbildung 3-4: Vergleich von Niederschlagsdaten der beiden Niederschlagsmessstationen Prochaskagasse und St. Johann vom 2.8.2017 .....	32
Abbildung 3-5: Lücke in der Messung bei V4 (1.9.2017) .....	35
Abbildung 3-6: Sprung und Wertkonstanz bei K8 (22.10.2017) .....	35
Abbildung 3-7: K1 mit fehlerbehaftetem Abschnitt ab ca. 20 Uhr.....	36

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 3-8: k-Werte im Einzugsgebiet .....	37
Abbildung 3-9: Generelle Simulationseinstellungen .....	42
Abbildung 3-10: Simulationszeitschritte.....	42
Abbildung 4-1: Versiegelung +/- 20 % bei K7 (h <sub>N</sub> : 12,9 mm; i <sub>N</sub> : 0,34 mm/5min) .....	56
Abbildung 4-2: Geländeneigung +/- 5 % bei K7 (h <sub>N</sub> : 12,9 mm; i <sub>N</sub> : 0,34 mm/5min) .....	57
Abbildung 4-3: Infiltrationsparameter +/- eine Bodenklasse bei K1 (h <sub>N</sub> : 29,1 mm; i <sub>N</sub> : 0,69 mm/5min) .....	57
Abbildung 4-4: Oberflächenspeicher +/- 50 % bei K6 (h <sub>N</sub> : 13,2 mm; i <sub>N</sub> : 0,13 mm/5min) .....	58
Abbildung 4-5: Fließlänge +/- 50 % bei K7 (h <sub>N</sub> : 12,9 mm; i <sub>N</sub> : 0,34 mm/5min) .....	58
Abbildung 4-6: Rauigkeit +/- 50 % bei K7 (h <sub>N</sub> : 12,9 mm; i <sub>N</sub> : 0,34 mm/5min) .....	58
Abbildung 4-7: Kalibrierungsergebnis von K2 (h <sub>N</sub> : 23,7 mm; i <sub>N</sub> : 0,11 mm/5min) .....	60
Abbildung 4-8: Kalibrierungsergebnis von K9 (h <sub>N</sub> : 6,8 mm; i <sub>N</sub> : 0,10 mm/5min) .....	61
Abbildung 4-9: K7 mit Zeitversatz (h <sub>N</sub> : 12,9 mm; i <sub>N</sub> : 0,34 mm/5min) .....	63
Abbildung 4-10: K4 mit vier Minuten Zeitversatz (h <sub>N</sub> : 17,2 mm; i <sub>N</sub> : 0,32 mm/5min) .....	64
Abbildung 4-11: V8 (h <sub>N</sub> : 8,3 mm; i <sub>N</sub> : 0,02 mm/5min).....	65
Abbildung 4-12: V5 (h <sub>N</sub> : 15,5 mm; i <sub>N</sub> : 0,42 mm/5min).....	65

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Infiltrationsparameter verschiedener Bodenklassen (Rawls u. a., 1983) .....	19
Tabelle 2-2:	Seehöhe des Einzugsgebietes .....	22
Tabelle 3-1:	Vergleich von Niederschlagshöhen der Messstationen Prochaskagasse und Ziegelstraße .....	32
Tabelle 3-2:	Alle für die Kalibrierung und Validierung verwendbaren Niederschlagsereignisse .....	33
Tabelle 3-3:	Niederschlagsereignisse zur Kalibrierung (K1 - K9) und zur Validierung (V1 – V13) .....	34
Tabelle 3-4:	Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte für verschiedene Bodenarten (Krapfenbauer, 2006).....	37
Tabelle 3-5:	Bodenarten im Einzugsgebiet.....	38
Tabelle 3-6:	Beispiel der Aufbereitung der Temperaturdaten.....	39
Tabelle 3-7:	Beispiel von Temperaturdaten im einlesbaren Format (Tabstopp getrennt).....	40
Tabelle 3-8:	Durchschnittliche Windgeschwindigkeiten (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2018) .....	40
Tabelle 3-9:	Anfangswerte der Oberflächenparameter (Rossman, 2015; Krebs, 2016).....	41
Tabelle 3-10:	Parameterspannweiten für die Sensitivitätsanalysen .....	46
Tabelle 4-1:	Flächen und Prozentanteile der Nutzungsarten und Oberflächenarten.....	50
Tabelle 4-2:	Verteilung der Dachneigungen .....	51
Tabelle 4-3:	Verteilung der Gebäudebaujahre .....	51
Tabelle 4-4:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - Gesamt .....	52
Tabelle 4-5:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - K1 bis K5 .....	53
Tabelle 4-6:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – K6 bis K9.....	54
Tabelle 4-7:	Kennzahlen nach der Kalibrierung .....	59
Tabelle 4-8:	Kalibrierte Parameterwerte für die verschiedenen Oberflächenmaterialien .....	62
Tabelle 4-9:	Kennzahlen nach der Kalibrierung und zeitlicher Verschiebung der Durchflussdaten .....	62
Tabelle 4-10:	Kennzahlen der Validierung .....	64
Tabelle 4-11:	Kennzahlen der Validierung mit Zeitverschiebung um vier Minuten .....	66



## Abkürzungsverzeichnis

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
AFS <sub>fein</sub>	Feine Abfiltrierbare Stoffe
DGM	Digitales Geländemodell
ds	Oberflächenspeicher
EG	Einzugsgebiet
h <sub>N</sub>	Niederschlagshöhe
I	Versiegelung (Imperviousness)
i <sub>N</sub>	Niederschlagsintensität
i <sub>N,p</sub>	Spitzen-Niederschlagsintensität
n	Manning-Rauigkeit
NA	Niederschlagsabfluss
NSE	Nash-Sutcliffe-Effizienz
NW	Niederschlagswasser
OBS	Gemessener Durchfluss (Messung)
PFE	Spitzenabflussfehler (Peakflow Error)
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
RHB	Hochwasser-Rückhaltebecken
S	Geländeneigung (Slope)
VE	Volumenfehler (Volume Error)



# 1 Einleitung

Oberflächengewässer müssen laut der EU-Wasserrahmenrichtlinie (2000) einen guten ökologischen sowie chemischen Zustand aufweisen, wofür der Gehalt von Spurenstoffen ein Bewertungskriterium ist (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2000). Überlegungen zu möglichen Maßnahmen für eine Verbesserung des Zustandes bei Nichterreichen des gewünschten Gewässerzustandes befassten sich bislang meist mit punktuellen Quellen, wie etwa den Abflüssen kommunaler Kläranlagen (Clara u. a., 2018). Darüber hinaus sind auch diffuse Eintragspfade, beispielsweise von versiegelten oder nicht versiegelten Flächen, für den Eintrag in die Gewässer verantwortlich. Im Projekt SHTURM (Clara u. a., 2014) konnte nachgewiesen werden, dass vor allem Niederschlagswassereinleitungen aus Trennkanalisationen ein relevanter Eintragspfad von Schadstoffen wie z. B. Schwermetallen, Industriechemikalien oder Bioziden sind. Dies wird in der Studie damit begründet, dass diese Abwässer in Österreich zu einem großen Teil unbehandelt in Oberflächengewässer eingeleitet werden.

Das Anfang 2017 begonnene Forschungsprojekt TEMPEST, bei dem das österreichische Umweltbundesamt sowie Institute der TU Graz, TU Wien und des Landes Vorarlberg involviert sind, befasst sich unter anderem mit der Erfassung von Spurenstoffemissionen aus dem Kanalnetz. Mittels einer Stoffflussanalyse sollen die mit dem Niederschlagswasser in die Trennkanalisation gelangenden Stofffrachten und daraus die theoretische Konzentration ausgewählter Spurenstoffe im Abfluss abgeschätzt werden. Hierfür sollen die Auslässe der Niederschlagskanäle von Einzugsgebieten mit unterschiedlichen Merkmalen über einen Zeitraum von einem Jahr beprobt und chemisch analysiert werden, um die Ergebnisse der Stoffflussanalyse validieren zu können. Die Ergebnisse hieraus können in weiterer Folge für Modellierungsaufgaben auf Einzugsgebietsebene oder für wasserwirtschaftliche Maßnahmenplanungen herangezogen werden (Clara u. a., 2018).

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Als Teil des Projekts TEMPEST soll sich diese Masterarbeit mit einem der in Graz ausgewählten Einzugsgebiete mit Trennkanalisation befassen. Dieses befindet sich im Bezirk Andritz, im Bereich der Ziegelstraße. Da die Abwasserzusammensetzung unter anderem abhängig von der Nutzung der befestigten Flächen, der Art der Dächer, usw. ist (Clara u. a., 2014), soll ein hochaufgelöstes hydrodynamisches Niederschlags-Abfluss-Modell auf Basis selbst aufgenommener Oberflächendaten erstellt und in Bezug auf den seit Sommer 2017 im Auslass des NW-Kanals gemessenen Durchflusses manuell kalibriert und validiert werden. Dafür ist eine vorhergehende Begehung des Gebiets durchzuführen, bei der so-

## **Einleitung**

---

wohl die Oberflächenart und -beschaffenheit, als auch die Nutzungsart der Teilflächen bestimmt werden soll. Außerdem ist vor der Kalibrierung eine Sensitivitätsanalyse der Modellparameter durchzuführen.

Das Modell soll als Grundlage für eine folgende detaillierte Betrachtung der Schmutzfrachteinträge, hierbei vor allem der Abfiltrierbaren Stoffe (AFS), dienen, welche seit Oktober 2017 und noch bis Ende September 2018 für jedes beprobte Regenereignis erhoben werden. Feststoffe im Abwasser, vor allem der Anteil der feinen Feststoffe mit einer Korngröße zwischen  $0,45\ \mu\text{m}$  und  $63\ \mu\text{m}$ , können als Maß für die Belastung von Niederschlagsabflüssen dienen, da sie je nach Nutzungs- und Oberflächenart der Herkunftsfläche mehr oder weniger stark mit Schadstoffen wie z. B. Schwermetallen belastet sein können (Dierschke, 2014).

Durch die hohe Auflösung der Oberflächen soll es in weiterer Folge möglich sein, das Modell, ähnlich wie es in dieser Arbeit mit dem Niederschlagsabfluss geschieht, über die Oberflächenmaterialien und die Nutzungsart, also einem „quellorientierten Ansatz“ folgend, auf die gemessenen Schmutzfrachten zu kalibrieren. Dies würde bedeuten, dass man ausgewählte Spurenstoffe innerhalb eines Einzugsgebiets ihren Herkunftsbereichen zuordnen und darauf aufbauend gezielt Maßnahmen und Empfehlungen entwickeln könnte, um die Emission dieser zu verringern.

### **1.2 Motivation**

Viele im Zuge meines Studiums besuchten Lehrveranstaltungen behandelten Themen wie Hydrologie, Abwasserbehandlung, Gewässerökologie oder die Modellierung von Netzwerken. Der Gedanke, durch diese Masterarbeit all diese Themenbereiche zu verknüpfen, das erlernte Fachwissen weiter zu vertiefen und dann in einem Praxisfall anwenden zu können, motivierte mich, die Aufgabenstellung lösen zu wollen. Außerdem ist es interessant, bei einem großen Projekt wie TEMPEST einen kleinen Teil beitragen zu können, der in weiterer Folge hilft, diverse Vorgänge im Bereich des Niederschlagsabflusses besser zu verstehen und dadurch vielleicht einen Beitrag zur Schonung der Umwelt zu leisten.

## 2 Grundlagen

Die folgenden Unterkapitel sollen einen Überblick über allgemeine Themen und Herausforderungen in der Siedlungswasserwirtschaft sowie die in dieser Arbeit behandelten Themenbereiche, bezogen auf die im Einzugsgebiet Ziegelstraße vorhandene Niederschlagswasserkanalisation, geben.

### 2.1 Zukünftige Herausforderungen in der Siedlungswasserwirtschaft

Veränderungen des globalen Klimas, ob vom Menschen verursacht oder nicht, sind Fakt. Darunter fallen auch ein Anstieg warmer Temperaturextreme und ein Anstieg der Anzahl von Starkniederschlagsereignissen in etlichen Regionen. Diese extremeren Niederschläge und Abflüsse in vielen Wassereinzugsgebieten bilden höhere Überschwemmungsrisiken auf regionaler Ebene. Es ist wahrscheinlich, dass die Niederschläge in den mittleren Breiten der Nordhemisphäre seit 1901 zugenommen haben. (IPCC, 2014)

Diese Fakten bedeuten für die Siedlungswasserwirtschaft, dass sich die Wiederkehrzeit von Überflutungsereignissen verkürzen und es somit öfter zu Schäden infolge von aus der Kanalisation ausgetretenem Wasser kommen könnte. Auf diese Veränderungen im Klima und Niederschlag sollte man in der Planung und im Betrieb der wasserwirtschaftlichen Anlagen Rücksicht nehmen.

Eine weitere Herausforderung ist die zunehmende Versiegelung der Oberflächen, welche in Österreich zwischen 2001 und 2017 von 187 000 ha auf 230 000 ha gestiegen ist (Umweltbundesamt, 2018). Durch die Abdeckung des Bodens mit einer wasserundurchlässigen Schicht verliert dieser zu einem großen Teil seine natürlichen Funktionen der Aufnahme des Wassers durch Mulden oder Infiltration und der Verdunstung (Evaporation). Dadurch fließt das Niederschlagswasser rascher ab, die Überflutungsgefahr steigt und es kommt zu einer geringeren Grundwasserneubildung. (Amt der NÖ Landesregierung, Gruppe Wasser, 2010)

Abbildung 2-1 zeigt schemenhaft die Unterschiede im Wasserhaushalt zwischen befestigten undurchlässigen Flächen und unbefestigten durchlässigen Flächen.

# Grundlagen

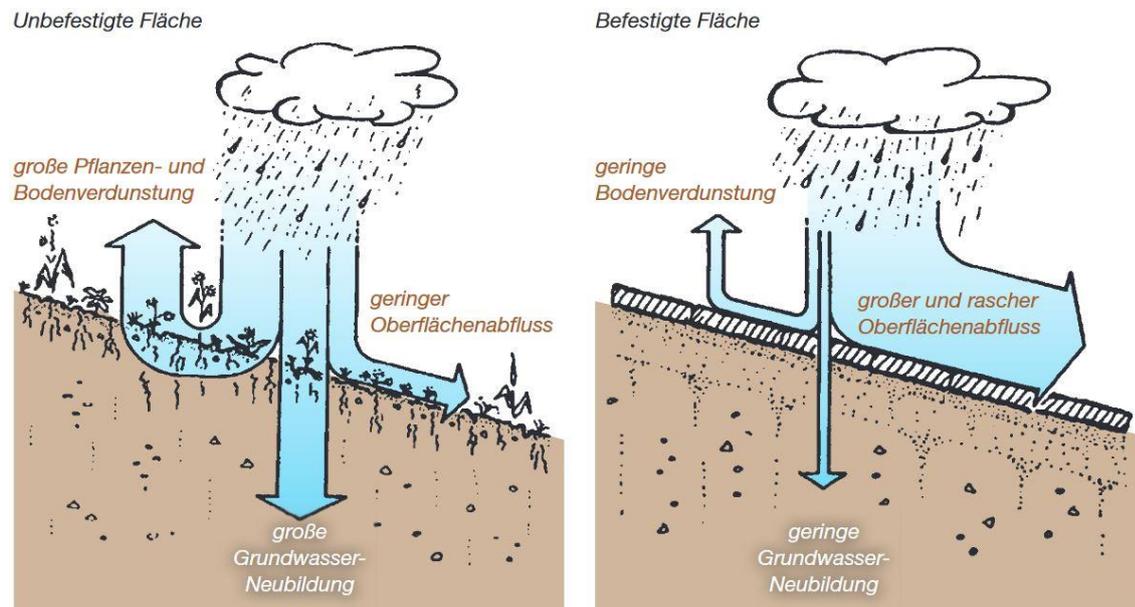


Abbildung 2-1: Wasserhaushalt befestigter (undurchlässiger) und unbefestigter (durchlässiger) Flächen (Amt der NÖ Landesregierung, Gruppe Wasser, 2010)

Durch den Anstieg des Versiegelungsgrads und die damit verbundenen größeren Abflussmengen wird es in Zukunft auch wichtig sein, die Herkunft der Inhaltsstoffe des Niederschlagsabflusses näher zu kennen und bestimmen zu können. Es ist bekannt, dass die Verunreinigung von Oberflächenwässern abhängig von der Lage, Beschaffenheit, Nutzung und Pflege der Entwässerungsflächen ist (Amt der Stmk. Landesregierung, 2012).

## 2.2 Niederschlagsabfluss

Der Abfluss des auf die Oberfläche gefallenen Niederschlags wird bezüglich Quantität und Qualität von der Bebauung und Versiegelung beeinflusst. Da ein natürlicher Oberflächenabfluss in besiedelten Gebieten nicht mehr erwünscht oder aufgrund der Bebauung nicht mehr möglich ist, werden Niederschlagswasserbewirtschaftungsanlagen zum Zwecke der Vermeidung, Benutzung, Versickerung oder Ableitung des Wassers errichtet. (OEWA, 2003)

### 2.2.1 Abflussbildung im urbanen Raum

Unter dem Begriff Abflussbildung versteht man die Vorgänge, die vom Auftreffen des Niederschlags auf eine Einzugsgebietsfläche bis zum Abfluss in den Kanal führen. Dazu zählen die Befeuchtung der Oberfläche, die Füllung von Mulden, die Verdunstung an der Oberfläche und die Versickerung in den Boden. Jene Anteile des Niederschlags, welche durch die genannten Prozesse nicht zum Abfluss gelangen, werden als Verluste bezeichnet (Abbildung 2-2). Aufgrund ihres unterschiedlichen Abflussverhaltens sind befestigte Flächen und nicht befestigte Flächen getrennt zu betrachten. Bei einer modellmäßigen Betrachtung des Abflusses im Kanalnetz sind nur Flächen zu berücksichtigen, die entweder direkt

oder indirekt am Kanal angeschlossen sind, oder bei denen ein oberirdischer Abfluss zum Eintritt in das Kanalnetz führt. Der Anteil nicht direkt angeschlossener undurchlässiger Teilflächen, deren Abfluss folglich nicht ins Kanalnetz gelangt, kann durch einen Abschlag pauschal abgeschätzt werden. Dieser liegt in innerstädtischen Gebieten bei null und reicht bei Gebieten mit aufgelöster Siedlungsstruktur bis zu 25 %. Eine zweite Möglichkeit ist die Berücksichtigung nicht abflusswirksamer Flächen indirekt über eine Änderung der Modellparameter. Nicht befestigte Flächen leisten in der Regel keinen Beitrag zum Abfluss in Kanalnetzen. Es sei denn diese weisen ein großes Gefälle, ausgeprägte Fließwege und kurze Fließzeiten auf. Genauere Rückschlüsse über den Abfluss der nicht befestigten Flächen liefert meist nur eine Ortsbegehung. (ATV-DVWK, 2004)

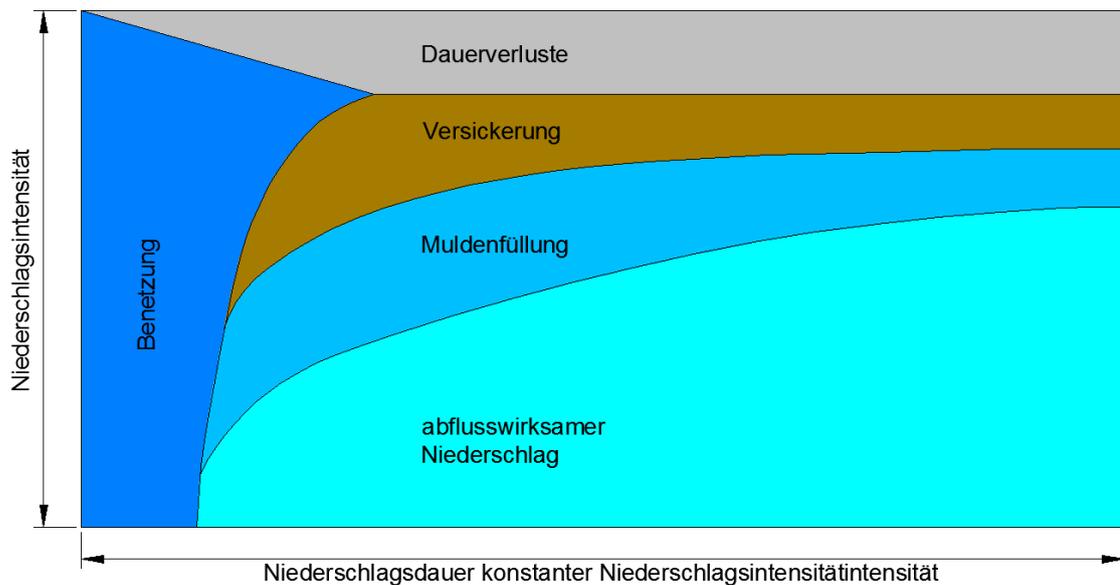


Abbildung 2-2: Prinzipieller Verlauf der Abflussbildung (Muschalla u. a., 2015)

### 2.2.2 Qualität des Niederschlagswassers

Neben der Quantität ist auch die Qualität der Niederschlagsabflüsse von zentraler Bedeutung. Die Inhaltsstoffe des Abflusses setzen sich unterteilt nach ihrer Herkunft aus mehreren Anteilen zusammen. Verunreinigungen können bereits vom Niederschlag in der Atmosphäre aufgenommen werden (Luftverschmutzung), von den Materialien der Entwässerungsflächen stammen (Straßenabrieb, Metalle von Dachdeckungen usw.) oder bei der Nutzung oder Pflege der Flächen entstehen (z. B. Reifenabrieb, Reinigung). Ein weiterer Anteil der Inhaltsstoffe ist das unbeeinflussbare Vorkommen von Stoffen wie z. B. Tierexkrementen. Unterteilt nach der Nutzungsart der Entwässerungsflächen kommen verschiedene Inhaltsstoffe in deren Abflüssen vor. Dachabflüsse beinhalten beispielsweise in Abhängigkeit der Dach- und Ableitungsmaterialien Feinstoffe und Metalle, aber auch im darauf gefallenem Niederschlag liegen bereits organische Verbindungen und Feinstoffe aus der Atmosphäre vor. Straßenabflüsse beinhalten aufgrund

## Grundlagen

---

von Verbrennungsrückständen (Mineralöle, Ruß), Bremsenabrieb (Metalle), Reifenabrieb (Gummi), Straßenabrieb (Feinstoffe, organische Verbindungen) usw. eine Vielzahl von Schadstoffen, die über den Abfluss in die Umwelt gelangen. Das von Wohnstraßen, Rad- und Gehwegen abfließende Wasser enthält aufgrund des Eintrags von Abfall, Laub, Tierexkrementen etc. eine höhere Konzentration von Grob-, Fein- und anderer Inhaltsstoffe als Dachabflüsse. (Amt der Stmk. Landesregierung, 2012)

### 2.2.3 Rechtliches

Nicht oder nur gering verunreinigtes Niederschlagswasser soll möglichst rasch wieder dem natürlichen Wasserkreislauf zurückgegeben werden. Diesen beiden Kategorien entspricht laut Definition Niederschlagswasser, welches geringer verschmutzt ist als der Ablauf einer Kläranlage bzw. welches keine anthropogenen Verunreinigungen aus Abschwemmungen von Flächen in Siedlungsgebieten oder von stark frequentierten Verkehrsflächen enthält. (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1996)

Würde die Einleitung von Niederschlagswasser eine mehr als geringfügige Veränderung der Wasserbeschaffenheit bedeuten, ist dieses davor nach dem Stand der Technik zu reinigen, sodass die Erhaltung der ökologischen Funktionsfähigkeit des Fließgewässers gewährleistet werden kann. (Bundeskanzleramt der Republik Österreich, 1959; Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1996)

### 2.2.4 Folgen von Niederschlagsabfluss

Die Auswirkungen von anthropogen beeinflussten Niederschlagswassereinleitungen in Fließgewässern sind eine hydraulische sowie eine stoffliche Belastung. Vor allem eine stoßartige Einleitung aus der Kanalisation in ein kleines Fließgewässer kann die natürlichen Strömungsbedingungen innerhalb kurzer Zeit verändern. Diese Art der Belastung kann zu einer Verdriftung der Fließgewässerorganismen oder zu einer großflächigen Bewegung der Gewässersohle führen und bedeutet daher einen erheblichen Eingriff in die Gewässerökologie. Die stoffliche Belastung aufgrund einer Niederschlagswassereinleitung beläuft sich auf die Möglichkeiten einer Sauerstoffzehrung, einer akuten oder chronischen Toxizität, eines Nährstoffeintrages und einer kurz- oder langfristigen Beeinträchtigung durch Feststoffe bzw. Abfiltrierbarer Stoffe. (OEWAV, 2003)

Auch bei einer Versickerung des Niederschlagswassers kann es in Form einer Erhöhung der Konzentrationen von Schadstoffen zu negativen Auswirkungen auf das Grundwasser kommen. Ein Teil der Inhaltsstoffe des Sickerwassers wird durch verschiedene Prozesse wie z. B. Filtration im Boden über dem Grundwasser zurückgehalten bzw. abgebaut. Stoffe wie z. B. Chlorid oder einige Pestizide können jedoch schwer im Boden zurückgehalten werden und gelangen daher zu einem wesentlichen Teil ins Grundwasser. (OEWAV, 2003)

## 2.3 Abflussmodelle

Niederschlags-Abfluss-Modelle (NA-Modelle) dienen der Simulation eines durch Niederschlag zu Stande gekommenen Abflusses auf der Oberfläche und in der Kanalisation. Sie haben eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten für verschiedenste Problemstellungen im Bereich der Entwässerungssysteme in der Siedlungswasserwirtschaft. Bei einer Niederschlagswasserkanalisation können sie z. B. für eine Untersuchung von Überstauereignissen bei Regenwetter, einer Analyse von vorhandenen hydraulischen Reserven im System oder einer frachtbasierten Analyse von Schadstoffeinträgen in die Fließgewässer herangezogen werden. (Muschalla u. a., 2015)

### 2.3.1 Prozesse

In NA-Modellen werden die Komponenten Oberflächenabfluss (Hydrologie) und Abflusstransport im Entwässerungssystem (Hydraulik) unterschieden. Der Oberflächenabfluss beschreibt dabei den Vorgang vom Auftreffen der Belastung in Form von Niederschlag auf die Oberfläche bis zum Eintritt des Wassers in das Kanalnetz. Der Oberflächenabfluss teilt sich in den Vorgang der Abflussbildung und der Abflusskonzentration. Die Abflussbildung beantwortet die Frage, welcher Anteil des gefallenen Niederschlags abflusswirksam wird und welcher nicht (effektiver Niederschlag), während die Abflusskonzentration Auskunft über die Abflussganglinie des effektiven Niederschlags gibt. (Muschalla u. a., 2015)

### 2.3.2 Ansätze für den Abflusstransport

Beim Abflusstransport, welcher die Abflussvorgänge im Kanalnetz beschreibt, können zwei verschiedene Ansätze unterschieden werden:

- Hydrologische Ansätze
- Hydrodynamische Ansätze

Der Prozess des Oberflächenabflusses wird bei beiden Ansätzen ident behandelt, die Unterschiede ergeben sich in der Berechnung des Abflusstransports. Hydrologische Modelle greifen auf empirische Übertragungsfunktionen zurück, welche auf einer Kombination aus der Kontinuitätsbedingung und der Speicherbeziehung basieren. Hydrodynamische Transportmodelle hingegen beruhen nicht auf empirischen Übertragungsfunktionen, sondern auf der Lösung der von de Saint-Venant abgeleiteten partiellen, nichtlinearen Differentialgleichung. (Muschalla u. a., 2015)

Auf diese Berechnung wird im Kapitel 2.4 näher eingegangen.

### 2.3.3 Detaillierungsgrade

Die im Modell abgebildeten Oberflächen lassen sich mit verschiedensten Auflösungen integrieren. Eine mögliche Unterscheidung in vier Ebenen zeigt Abbildung 2-3.

# Grundlagen

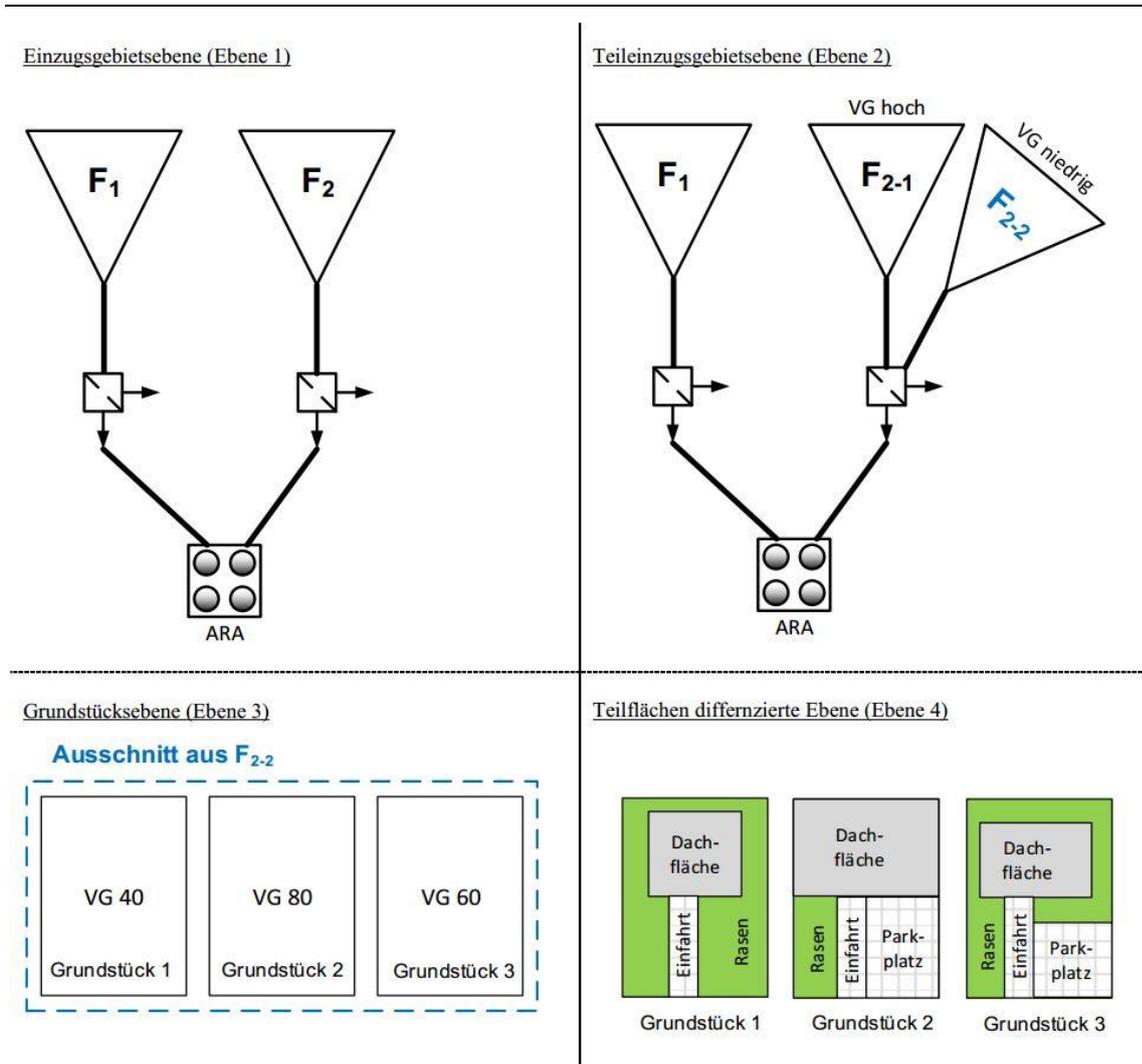


Abbildung 2-3: Räumliche Auflösung der Oberfläche (Muschalla u. a., 2015)

Bei einer Betrachtung auf Einzugsgebietsebene ignoriert man die Sammler des Kanals und modelliert die Fließvorgänge der Oberfläche und des Kanalnetzes, die zu einem Entlastungsbauwerk führen, gemeinsam. Bei der Betrachtung auf Teileinzugsgebietsebene werden nur Hauptsammler abgebildet und die Einzugsgebiete nach verschiedenen Kriterien grob in homogene Teileinzugsgebiete unterteilt. Die Betrachtung auf Grundstücksebene bedeutet eine Abbildung der verschiedenen Grundstücks- oder Haltungsflächen, wobei die unterschiedlichen Versiegelungsgrade (VG) der einzelnen Flächen berücksichtigt werden. Die teilflächendifferenzierte Ebene ist die detaillierteste Betrachtungsebene. Hierbei werden einzelne Grundstücke in weitere homogene Teilflächen wie z. B. Dachflächen, Hauseinfahrten, Parkplätze etc. unterteilt. Somit werden die Vereinfachungen bei der Modellierung der Flächen auf ein Minimum reduziert. Diese Form der Betrachtung bringt den Vorteil, dass die Daten direkt aus einem Geographischen Informationssystem (GIS) bezogen werden können, und auch Änderungen einfach, simultan im GIS und im Modell umgesetzt werden können. (Muschalla u. a., 2015)

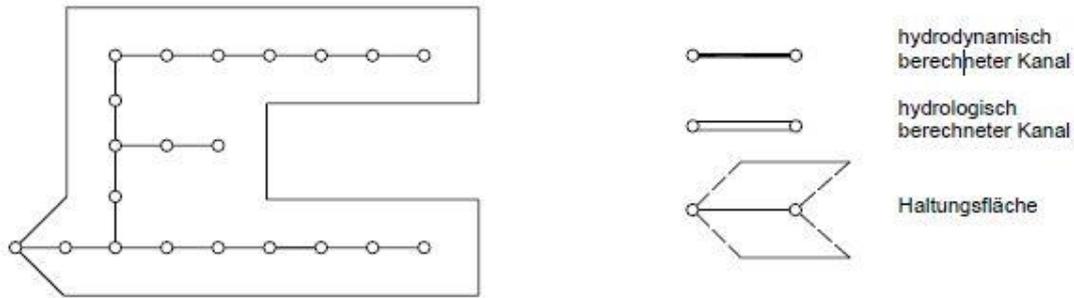
Auch bei der Modellierung des Kanalnetzes lassen sich, wie in Abbildung 2-4 zu sehen, verschiedene Stufen der Abstraktion unterscheiden:

- Hydrologisch / konzeptionell
- Grobnetz (Hauptsammler)
- Feinnetz (Haltungen)

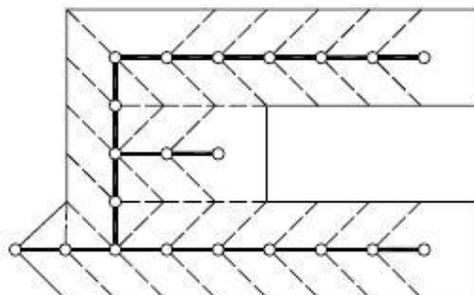
Während in der größten Stufe die Oberfläche und das Kanalnetz gemeinsam betrachtet werden und eine hydrologische Modellierung erfolgt, werden beim Grobnetz nur die Hauptsammler dargestellt und dabei hydrologisch oder hydrodynamisch berechnet. Die detaillierteste Abbildung erfolgt in der Stufe des Feinnetzes, wobei Haupt- und Nebensammler abgebildet werden und in der Regel eine hydrodynamische Berechnung erfolgt. (Muschalla u. a., 2015)

# Grundlagen

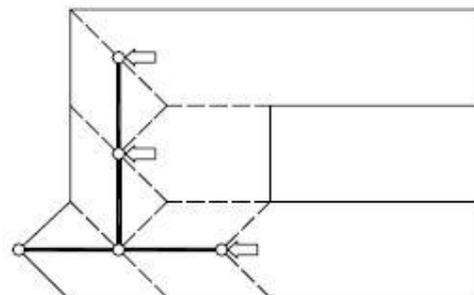
## Prinzipskizze des Kanalnetzes



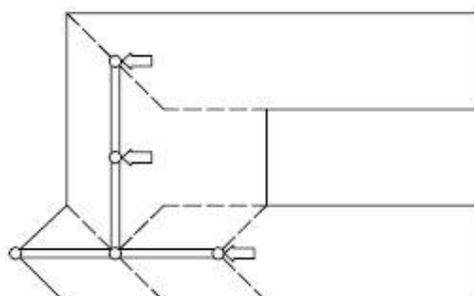
## Feinnetz hydrodynamisch



## Grobnetz hydrodynamisch Teilgebiete hydrologisch



## Grobnetz hydrologisch Teilgebiete hydrologisch



## Gesamtgebiet hydrologisch



Abbildung 2-4: Gebietsunterteilungen und Berechnungsweisen bei der Kanalnetzberechnung (ATV-DVWK, 2004)

Auch die zeitliche Auflösung von Niederschlags- und Abflussdaten lässt verschiedene Ansätze zu. Es lässt sich zwischen Tages-, Stunden- und Minutenwerten unterscheiden. Um keine Details über die Dynamik im Niederschlagsgeschehen, und damit in weiterer Folge im simulierten Abflussgeschehen zu verlieren, ist eine 1-minütige Auflösung für die meisten Aufgabenstellungen sinnvoll. (Muschalla u. a., 2015)

Abbildung 2-5 zeigt die unterschiedlichen Kurvenverläufe eines Abflusses in Folge zeitlicher Auflösungen von einer, fünf, oder fünfzehn Minuten.

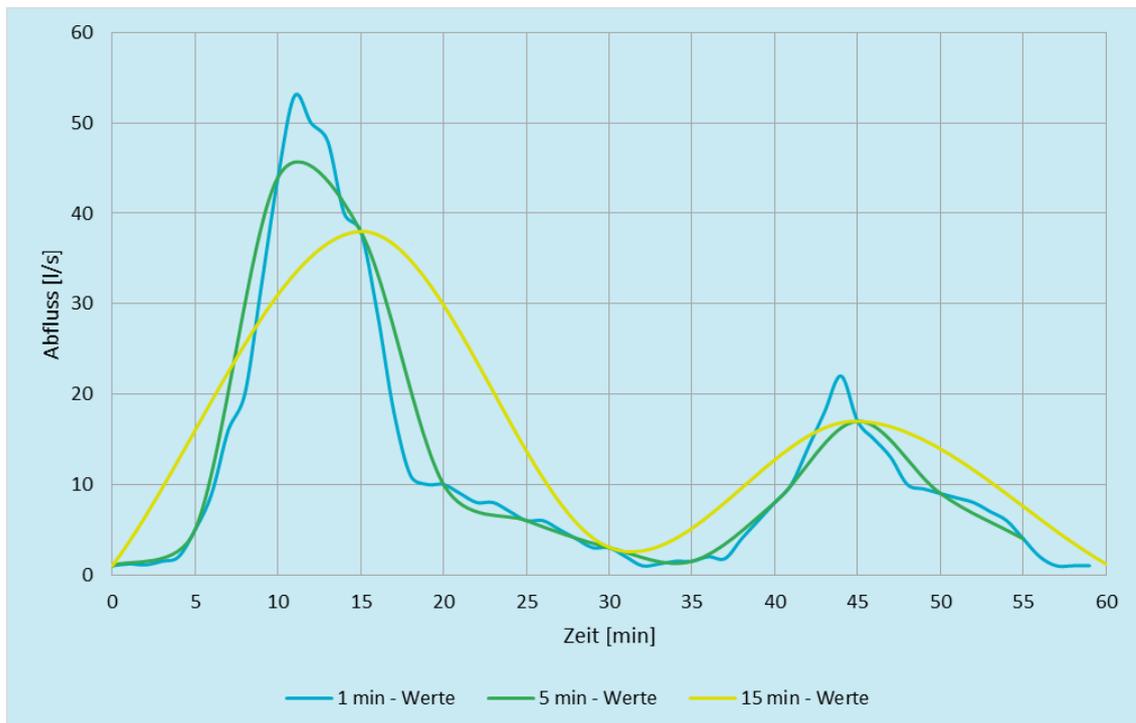


Abbildung 2-5: Abfluss in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung (Muschalla u. a., 2015)

### 2.3.4 Datenbedarf

Für den Modellaufbau und eine darauffolgende Kalibrierung sind folgende Datentypen notwendig:

- Einzugsgebietsbezogene Daten
- Leitungsbezogene Daten
- Hydrologische Daten
- Monitoringdaten

Die Daten betreffend Einzugsgebiet müssen Auskunft über die Flächen und deren Abflusswirksamkeit geben. Darin sind z. B. Informationen über die Aufteilung in Teileinzugsgebiete, Geländeneigung oder die Beschaffenheit der Flächen und Materialien enthalten. Leitungsbezogene Daten sollen alle maßgeblichen Informationen über das Kanalsystem, wie z. B. Lage, Geometrie und Materialien geben. Die hydrologischen Daten enthalten die Niederschlagsdaten für das Modell, während Monitoringdaten Durchfluss- und/oder Wasserstandsmessungen im Kanalnetz für eine Kalibrierung beinhalten. Die genauen Anforderungen an die Daten, wie z. B. der Detaillierungsgrad der Oberflächen und des Kanalnetzes oder die zeitliche Auflösung der Niederschlagsdaten ergeben sich durch die Aufgabenstellung bzw. die Ergebnisse, die das Modell liefern soll. (Muschalla u. a., 2015)

### 2.3.5 Ablauf einer Modellerstellung

Prinzipiell lassen sich bei der Erstellung eines Modells die manuelle und die automatische Vorgangsweise unterscheiden. Es geht dabei darum, ob die erforderlichen Daten in der Modellierungssoftware manuell erstellt werden, oder, wenn diese bereits in anderen Datenbanken vorhanden sind, über ein GIS (Geografisches Informationssystem) oder LIS (Leitungsinformationssystem) importiert werden. Eine Kontrolle der Daten nach dem Importieren ist auch bei der automatischen Erstellung unabdingbar. (Muschalla u. a., 2015)

### 2.3.6 Modellkalibrierung

Abweichungen zwischen den Ergebnissen des Modells und den in der Realität gemessenen Daten treten bei der Modellierung eines Entwässerungssystems aufgrund von Vereinfachungen und Unsicherheiten mit hoher Wahrscheinlichkeit auf. Um diese Unterschiede auszugleichen oder zu minimieren, ist eine Kalibrierung vorzusehen. Hierbei ist zwischen Systemkenngrößen und Modellparametern zu unterscheiden. Während erstere als messbare, „fixe“ Größen anzusehen sind (z. B. Querschnittsabmessungen, Gefälle von Kanalhaltungen, Netztopologie), sind die Modellparameter jene, die bei einer Kalibrierung erkannt und verändert werden können. (Muschalla u. a., 2015)

Um ein NA-Modell kalibrieren zu können, sind zeitgleiche Messungen von Niederschlag und Durchfluss im Entwässerungssystem notwendig. Dabei ist darauf zu achten, dass die Niederschlagsmessstelle so nah wie möglich, oder besser noch im betrachteten Einzugsgebiet situiert ist, da die Niederschlagsintensität und deren Verlauf schon im Bereich von wenigen Kilometern stark abweichen können. Erfolgt die Messung des Durchflusses nur an einer Stelle, lassen sich nur pauschale Aussagen über das gesamte oberhalb der Messstelle liegende Einzugsgebiet treffen. (Muschalla u. a., 2015)

Für eine Kalibrierung sollten laut OEWAV (2009) mindestens drei Regenereignisse herangezogen werden. Um das Modell auch validieren zu können, was bei großen Einzugsgebieten empfohlen wird, sind als Mindestanforderung mindestens zwei weitere Ereignisse sinnvoll (OEWAV, 2009). Grundsätzlich sollten so viele Ereignisse wie möglich für die Modellkalibrierung und -validierung herangezogen werden. Die Anzahl der Validierungsereignisse sollte dabei größer sein, da vor allem die Validierung Aussagen über die Qualität des Modells und dessen Fähigkeit, zukünftige Abflüsse bei verschiedenen Niederschlagsereignissen berechnen zu können, liefert.

Ziel der Kalibrierung ist es, durch eine Anpassung der Modellparameter eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung zu erreichen. Eine vollständige Übereinstimmung ist dabei in der Regel nicht möglich. Um Aussagen über die Güte der Anpassung treffen zu können, lassen sich folgende Kenngrößen heranziehen:

- Gesamtvolumen des Abflusses bei einem Ereignis
- Spitzenabfluss
- Zeitpunkt der Abflussspitze
- Form und Verlauf der Abflussgang- und Abflusssummenlinie
- Ganglinienfehler (Standardabweichung der Differenz pro Zeitschritt)

Je nach Aufgabenstellung ist dabei zu entscheiden, welche Gewichtung den verschiedenen Kenngrößen zuzuordnen ist. Eine ausreichende Übereinstimmung des Gesamtvolumens sollte jedoch immer angestrebt werden, weshalb darauf auch als erstes kalibriert werden sollte. Bei Abweichungen ist vorerst durch Kontrolle verschiedener Niederschlagsereignisse zu prüfen, ob diese durch Fehler in den Systemkenngrößen zustande gekommen sein könnten. In weiterer Folge sind die Modellparameter zu variieren, bis die gewünschte Übereinstimmung von Simulation und Messung bei unterschiedlichen Niederschlagsbelastungen auftritt. (Muschalla u. a., 2015)

Um herauszufinden, welche Modellparameter das Ergebnis wie beeinflussen, sollte eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Hierbei wird jeweils ein Parameter um einen gewissen Prozentsatz, der sich in einem realistischen Bereich befinden sollte, verändert, während die anderen unverändert bleiben. Danach wird kontrolliert, wie sich das Simulationsergebnis aufgrund dieser Änderung verhält. Dabei können Aussagen über die Sensitivität des Modells auf den jeweiligen Modellparameter getätigt werden.

### 2.3.7 Modellunsicherheiten

Alle Modelle und deren Inputs sind mit Unsicherheiten behaftet. Diese können nie ganz eliminiert werden, jedoch sollte versucht werden, sie zu erkennen und zu minimieren. Das Wissen über diese und eventuell eine dahingehende Quantifizierung kann dabei helfen, die Ergebnisse einer Modellsimulation besser interpretieren zu können. Die Unsicherheitsfaktoren lassen sich in drei Bereiche unterteilen:

- Input-Daten
- Kalibrierungsdaten
- Modellstruktur

Unsicherheiten in den Inputdaten können etwa Abweichungen bei der Messung des Niederschlags sein, aber auch Annahmen von Modellparametern. Bei den Kalibrierungsdaten können ebenso Unsicherheiten in Form von Messfehlern vorhanden sein, wie z. B. bei Durchflussmessungen, die später für die Kalibrierung verwendet werden. Unsicherheiten in der Modellstruktur entstehen z. B. durch Vereinfachungen oder Fehler in der Erstellung des Modells durch die/den Bearbeiter/in. (Deletic u. a., 2011)

### 2.4 SWMM

SWMM steht für „Stormwater Management Model“ und ist ein hydrodynamisches Modellierungsprogramm, welches von der US-amerikanischen Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) entwickelt wurde. Seit seinem erstmaligen Erscheinen im Jahr 1971 wurden mehrere Änderungen und Updates bis zur, für dieses Projekt angewandten, Version 5.1 durchgeführt. Diese Version wurde von der EPA in Zusammenarbeit mit der Firma CDM-Smith entwickelt. Es kann für einzelne Niederschlagsereignisse als auch Langzeitsimulationen von Abflussmengen sowie Schmutzfrachten im Abfluss herangezogen werden. SWMM schließt bei seinen Berechnungen verschiedene hydrologische (Regen, Evaporation, Infiltration usw.) und hydraulische Prozesse mit ein. Eine individuelle Lösung dieser Prozesse wird durch Unterteilung des Untersuchungsgebietes in sogenannte „Subcatchments“, also Teileinzugsgebiete, mit homogenen Eigenschaften, erreicht. Jedes dieser Teileinzugsgebiete besteht dabei aus einem definiertem Anteil aus durchlässiger und undurchlässiger Fläche. (Rossman, 2015)

#### 2.4.1 Abflussberechnung

Das Programm unterscheidet bei seinen Berechnungen den Oberflächenabfluss und den kanalisiert Abfluss und berechnet diese mit verschiedenen Gleichungen.

##### 2.4.1.1 Oberflächenabfluss

Dieser erste Teil des Abflussgeschehens wird nach dem Füllen des Oberflächen-speichers („Depression Storage“,  $d_s$ ) mittels der Manning-Gleichung (Gleichung 2-2) bzw. der Kontinuitätsgleichung (Gleichung 2-3) berechnet. Die zu Grunde liegende Wasserbilanz zur Ermittlung der Abflusstiefe  $d$  wird in Abbildung 2-6 und Gleichung 2-1 dargestellt. (Rossman, 2015)

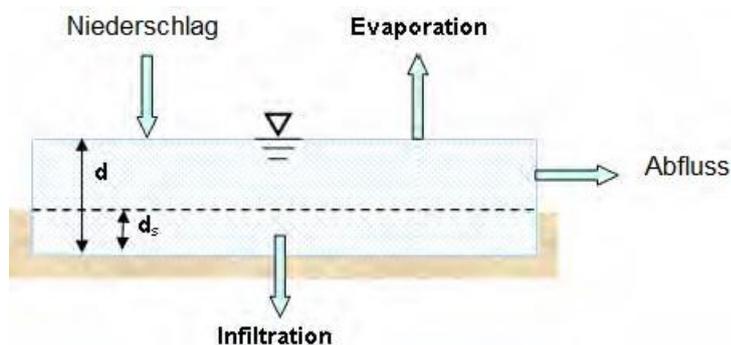


Abbildung 2-6: Konzeptuelle Darstellung des Oberflächenabflusses (Rossman, 2015, mod.)

$$P = I + E + R + \Delta S$$

Gleichung 2-1

mit:

$P$	...	Niederschlag [mm]
$I$	...	Infiltration [mm]
$E$	...	Evaporation [mm]
$R$	...	Abfluss [mm]
$\Delta S$	...	Speicheränderung [mm]

$$v_m = \frac{1}{n} * R^{2/3} * I^{1/2}$$

Gleichung 2-2

mit:

$v_m$	...	mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
$n$	...	Rauheitsbeiwert nach Manning [s/m <sup>1/3</sup> ]
$R$	...	hydraulischer Radius ( $R=A/U$ wobei $A$ = durchflossener Querschnitt [m <sup>2</sup> ] und $U$ =benetzter Umfang [m])
$I$	...	Gefälle (Höhe pro Länge) [-]

Durch Ersetzen von  $v_m$  mithilfe der Kontinuitätsgleichung

$$v_m = Q / A$$

Gleichung 2-3

mit:

$v_m$	...	mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]
$Q$	...	Abflussvolumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
$A$	...	Durchflossener Querschnitt [m <sup>2</sup> ]

erhält man den Abflussvolumenstrom

$$Q = A * \frac{1}{n} * R^{2/3} * I^{1/2}$$

Gleichung 2-4

mit:

$Q$	...	Abflussvolumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
$A$	...	Durchflossener Querschnitt [m <sup>2</sup> ]
$n$	...	Rauheitsbeiwert nach Manning [s/m <sup>1/3</sup> ]
$R$	...	hydraulischer Radius ( $R=A/U$ wobei $A$ = durchflossener Querschnitt [m <sup>2</sup> ] und $U$ =benetzter Umfang [m])
$I$	...	Gefälle (Höhe pro Länge) [-]

Um die Fließzeit des Wassers im Teileinzugsgebiet und damit die Form des Abflussgraphen berechnen zu können, vereinfacht SWMM die einzelnen Flächen in

## Grundlagen

Rechtecke. Neben der Fläche  $A$ , die im Programm mithilfe der Koordinaten berechnet werden kann oder durch ein Importieren aus anderen Quellen vorhanden ist, benötigt man nun noch eine Breite  $W$  (Width) oder eine Länge  $L$  (Gleichung 2-5). Durch diese Werte wird dem Teileinzugsgebiet ein Verhältnis Breite zu Länge gegeben, womit die Fließzeit berechnet werden kann (Abbildung 2-7). (Rossman & Huber, 2016)

$$W = \frac{A}{L}$$

Gleichung 2-5

mit:

$W$	...	Breite (Width) [m]
$A$	...	Fläche [m <sup>2</sup> ]
$L$	...	Fließlänge [m]

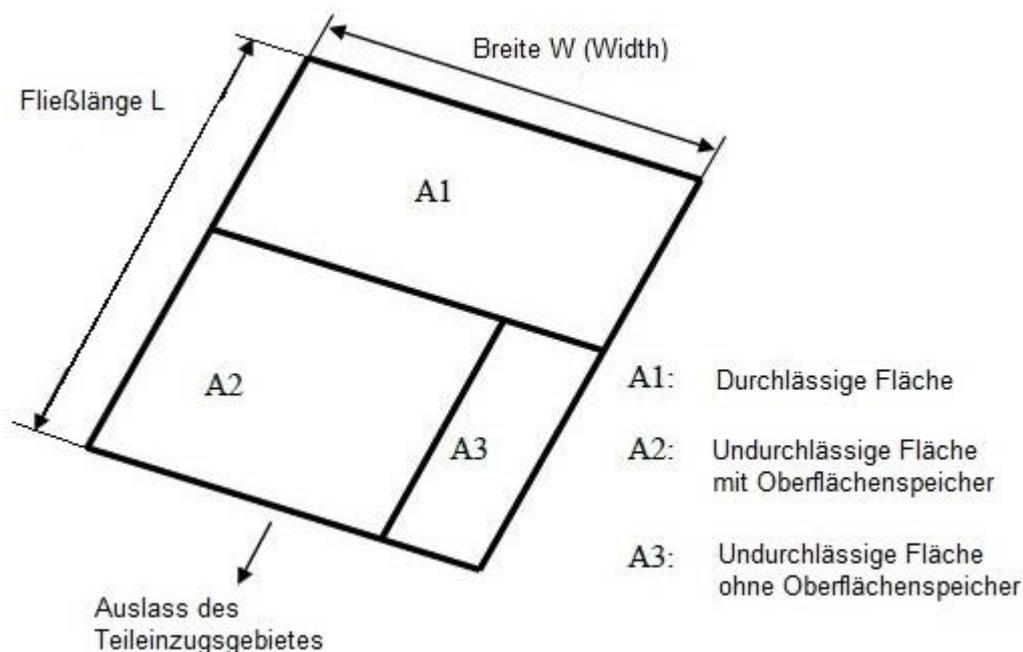


Abbildung 2-7: Idealisiertes Teileinzugsgebiet für Oberflächenabfluss (EPA, 2016, mod.)

Da die Form der Teileinzugsgebiete in der Realität selten einem Rechteck entspricht, ist die Breite  $W$  praktisch eine fiktive Größe. Sie kann jedoch über die maximale Fließlänge, die ein Regentropfen vom Auftreffen auf das Teileinzugsgebiet bis zum Auslass von diesem zurücklegt, berechnet werden. Auch diese Fließlänge ist beim Modellaufbau nicht einfach festzustellen, da auf unebenen Flächen immer eine Art Kanalisierung des Wassers erfolgt und der längste Fließweg dadurch je Einzelfall kompliziert ermittelt werden müsste. (Rossman & Huber, 2016)

### 2.4.1.2 Kanalisierter Abfluss

Der Abfluss im Kanalnetz wird in diesem Projekt mit der „Dynamic Wave“ Methode berechnet. Bei dieser wird während einer Simulation die De-Saint-Venant-

Gleichung gelöst, womit theoretisch die genauesten Ergebnisse erzielt werden. Mit dieser Gleichung kann auch ein unter Druck gehen bei Vollfüllung des Kanalprofils und ein Rückstau berechnet werden. Durch die Funktion „allow Ponding“ wird außerdem ein Rückfluss von aus dem Kanal ausgetretenem, übergestautem Wasser in das Kanalsystem erlaubt. Prinzipiell besteht die De-Saint-Venant-Gleichung aus zwei Teilen, der Kontinuitätsgleichung (Gleichung 2-6) und der Energiebilanz (Gleichung 2-7). Mit Hilfe weiterer Formeln wie z. B. der Manning-Gleichung für das Reibungsgefälle und einer Gleichung für die Berechnung der Kombination aus Schacht und Leitung kann der Abfluss im gesamten Kanalnetz berechnet werden. Eine genaue Beschreibung der Dynamic Wave Berechnungsmethode findet sich im „SWMM Reference Manual – Hydraulics“ (Rossman, 2017).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Gleichung 2-6}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad \text{Gleichung 2-7}$$

mit:

$x$	...	<i>Distanz [m]</i>
$t$	...	<i>Zeit [s]</i>
$A$	...	<i>durchflossener Querschnitt [m<sup>2</sup>]</i>
$Q$	...	<i>Abflussvolumenstrom [m<sup>3</sup>/s]</i>
$H$	...	<i>hydraulische Höhe (Z+Y) [m]</i>
$Z$	...	<i>Sohlhöhe [m]</i>
$Y$	...	<i>Wassertiefe in der Haltung [m]</i>
$S_f$	...	<i>Reibungsgefälle (Höhenverlust pro Längeneinheit) [-]</i>
$g$	...	<i>Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]</i>

### 2.4.2 Evaporation

Neben der Möglichkeit, gemessene Werte der Evaporation in das Modell zu importieren, ist SWMM in der Lage, die potentielle Evaporation mittels der Hargreaves Methode (Hargreaves und Samani, 1985 in Rossman & Huber, 2016), wie in Gleichung 2-8 dargestellt, zu berechnen. (Rossman & Huber, 2016)

$$E = 0,0023(R_a/\lambda)T_r^{1/2}(T_a + 17,8) \quad \text{Gleichung 2-8}$$

mit:

$E$	...	Potentielle Evaporationsrate [mm/Tag]
$R_a$	...	Wasseräquivalent der auftreffenden extraterrestrischen Strahlung [MJ/(m <sup>2</sup> d)]
$T_r$	...	Durchschnittliche, tägliche Temperaturspanne über mehrere Tage [°C]
$T_a$	...	Durchschnittliche, tägliche Temperatur über mehrere Tage [°C]
$\lambda$	...	latenter Wärmestrom [MJ/kg] (=2,50 – 0,002361* $T_a$ )

Die durchschnittliche Temperaturspanne und die durchschnittliche Temperatur sollte über mindestens fünf Tage berechnet werden (Hargreaves und Merkle, 1998 in Rossman & Huber, 2016). SWMM rechnet diese Temperaturen mittels eines gleitenden Durchschnitts über eine Periode von sieben Tagen. Die benötigten Werte der Strahlungsenergie und des Wärmestroms leitet das Programm über den Breitengrad des Einzugsgebietes her. (Rossman & Huber, 2016)

### 2.4.3 Infiltration

Da auch durch Infiltration in den Boden Wasser abgeleitet wird und somit nicht mehr dem Oberflächenabfluss zur Verfügung steht, muss diese im Modell berücksichtigt werden. SWMM bietet die Möglichkeit, die Infiltration in den Untergrund auf vier verschiedenen Arten zu berechnen:

- Horton Methode
- Modifizierte Horton Methode
- Green-Ampt-Methode
- Curve Number Methode

In dieser Arbeit wurde die Infiltrationsberechnung nach Green und Ampt verwendet. Dafür werden die Parameter  $K_s$  (Hydraulische Leitfähigkeit im gesättigten Zustand, in [mm/hr]),  $\Psi_s$  (Saugspannung, in [mm]) und  $\Theta_{dmax}$  (Porosität bzw. Feuchtedefizit oder Volumen trockener Poren pro Bodenvolumen, in [%]) benötigt. (Green und Ampt, 1911 in Rossman & Huber, 2016)

Die hydraulische Leitfähigkeit gibt an, wie viel Wasser innerhalb einer Zeitspanne durch den Boden im gesättigten Zustand fließen kann. Sie ist vergleichsweise einfach zu messen und Rawls u. a. (1983) haben dies, wie in Tabelle 2-1 zu sehen, auch für eine große Anzahl von verschiedenen Böden gemacht. Die Saugspannung  $\Psi_s$  hängt vom Wassergehalt des Bodens ab und ist bei geringem Wassergehalt größer als bei hohem Wassergehalt im Boden. Eine Messung der Saugspannung gestaltet sich schwierig, doch auch hierfür gibt Tabelle 2-1 gute

Ansatzpunkte. Die Porosität bzw. das in SWMM benötigte anfängliche Feuchtedefizit entspricht der Differenz des gesättigten zum anfänglichen Wassergehalts in Prozent.

Für eine genauere Erläuterung dieser Methode wird auf das SWMM Hydrology Manual (Rossman & Huber, 2016) verwiesen.

Tabelle 2-1: Infiltrationsparameter verschiedener Bodenklassen (Rawls u. a., 1983)

Bodenklasse	Hydraulische Leitfähigkeit [mm/hr]	Saugspannung [mm]	Porosität [Anteil]	Anfangsdefizit der Feuchtigkeit [Anteil]
Sand	120,34	49,02	0,437	0,413
Lehmiger Sand	29,97	60,96	0,437	0,390
Sandiger Lehm	10,92	109,98	0,453	0,368
Lehm	3,30	88,90	0,463	0,347
Schluffiger Lehm	6,60	169,93	0,501	0,366
Sandiger Ton Lehm	1,52	219,96	0,398	0,262
Ton Lehm	1,02	210,06	0,464	0,277
Schluffiger Ton Lehm	1,02	270,00	0,471	0,261
Sandiger Ton	0,51	240,03	0,430	0,209
Schluffiger Ton	0,51	290,07	0,479	0,228
Ton	0,25	320,04	0,475	0,210

## 2.5 AFS und AFS<sub>fein</sub>

Als Bestandteil im Niederschlagsabfluss oder auch als Teil der anthropogenen Verunreinigung zählen die Abfiltrierbaren Stoffe (AFS). Wie zu Beginn dieser Arbeit erläutert, sollen diese im Projekt TEMPEST genauer untersucht werden.

### 2.5.1 Definition

Unter Abfiltrierbaren Stoffen versteht man Sink-, Schweb- und Schwimmstoffe, die sich bei einer Beprobung abfiltrieren lassen. In der ÖNORM EN 872 wird der Begriff „suspendierte Stoffe“ verwendet, mit der Definition: „Stoffe, die unter festgelegten Bedingungen durch Filtration entfernt werden“ (Österreichisches Normungsinstitut, 2005). Der zweite Anteil der Stoffe im Abwasser sind die gelösten Stoffe. Die Summe dieser beiden Stoffarten wird als Trockenrückstand (TR) bezeichnet (Dierschke, 2014).

Die Definition der *feinen* Abfiltrierbaren Stoffe (AFS<sub>fein</sub>) ist dabei noch nicht in Richtlinien oder Normen festgelegt. Eine obere Grenze bildet jedoch das, aus der Bodenkunde bekannte, 63 µm Sieb. Die Probe wird durch dieses gesiebt und danach durch einen Filter geleitet. Der zu verwendende Filter unterliegt jedoch keiner genaueren Definition, womit dessen Porengröße zwischen 0,45 µm und 12 µm liegen kann. Der Rückstand daraus ergibt dann die Fraktion der feinen

## Grundlagen

---

Abfiltrierbaren Stoffe. Dafür wurde einmal per Konvention eine Partikelgröße zwischen 0,45 µm und 63 µm festgelegt. (Dierschke, 2014)

### 2.5.2 Bestimmung der AFS in Wasserproben

Die Bestimmung der Abfiltrierbaren Stoffe ist in der ÖNORM EN 872 mit dem Titel „Wasserbeschaffenheit – Bestimmung suspendierter Stoffe – Verfahren durch Abtrennung mittels Glasfaserfilter“ geregelt. Darin wird beschrieben, wie die suspendierten Stoffe vom Wasser mittels Glasfaserfilter und einem Vakuum- oder Druckfiltrationsgerät getrennt werden können. Nach der Filtration ist der mit Partikeln belegte Filter mindestens eine Stunde in einem Trockenschrank bei  $105 \pm 2$  °C zu trocknen und danach wieder abzuwiegen. Es wird auch beschrieben, wie mit Proben, bei denen die Massekonzentration von suspendierten Stoffen festgestellt werden soll, im Idealfall umgegangen zu werden hat. Empfohlen wird, die Bestimmung so bald als möglich nach der Probenahme, vorzugsweise innerhalb von vier Stunden, durchzuführen und die Probenflasche vor der Filtration gut zu schütteln bzw. zu durchmischen. (Österreichisches Normungsinstitut, 2005)

### 2.5.3 Rechtliche Grundlage in Österreich

Allgemein sind die AFS-Emissionen nach der „186. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft über die allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen (AAEV)“ begrenzt. Die AAEV gilt laut §1, Abs.1 auch für „*Niederschlagswasser, mit welchem Schadstoffe von der Landoberfläche eines Einzugsgebietes in ein Gewässer abgeschwemmt werden, die überwiegend durch menschliche Tätigkeiten in diesem Einzugsgebiet entstanden sind*“ (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1996). Die Anforderungen bei Einleitung in eine öffentliche Kanalisation oder in ein Fließgewässer liegen bei einer maximalen Stoffkonzentration von 30 mg/L bzw. maximal 50 mg/L für betriebliche Abwässer mit vorwiegend ungelösten anorganischen Stoffen. Bei der Einleitung in eine öffentliche Kanalisation soll es außerdem zu keiner Beeinträchtigung des Betriebes der Kanalisation und der Abwasserreinigungsanlagen kommen. (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 1996)

### 2.5.4 Verhinderung von AFS

Eine effektive Methode, Abfiltrierbare Stoffe nicht in Oberflächengewässer einzuleiten, bilden vor allem Versickerungsmaßnahmen und Retentionsbodenfilter. Im KURAS-Leitfaden zur „zielorientierten Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung“ wird dafür ein Zurückhaltungspotential von  $> 600$  kg AFS/(ha\*a) vorgegeben. Gebäudebasierte Maßnahmen wie eine Dach-

begrünung oder eine Regenwassernutzung bieten jedoch weniger Reduktionspotenzial ( $< 100 \text{ kg AFS}/(\text{ha} \cdot \text{a})$ ), da das Schmutzstoffaufkommen der angeschlossenen Flächen gering ist. (Matzinger u. a., 2017)

### 2.6 ArcMap (GIS)

GIS ist die Abkürzung für „Geographische Informationssysteme“. Als bekannter öffentlicher, frei zugänglicher Vertreter ist hier z. B. der digitale Atlas der Steiermark zu erwähnen ([www.gis.steiermark.at](http://www.gis.steiermark.at)), aus dem raumbezogene Daten als Planungsgrundlage auch für den privaten Gebrauch herangezogen werden können. („Geographisches Informationssystem - Land Steiermark“ 2018)

ArcMap ist eine vom Environmental Systems Research Institute (ESRI) entwickelte Anwendung, in der sich GIS-Datensätze anzeigen, untersuchen und bearbeiten lassen. Die Software stellt eine Vielzahl von Funktionen bereit, mit denen sich verschiedenstes Karten- und Datenmaterial nach persönlichen Wünschen analysieren, editieren oder erstellen lassen. (ESRI, 2018)

Durch die Möglichkeit der Ausgabe in sogenannten Shapefiles, bietet ArcMap eine ideale Grundlage für einen Modellaufbau in SWMM, da dieses Dateiformat dort importiert und weiterverarbeitet werden kann.

### 2.7 Einzugsgebiet

Die Auswahl des Einzugsgebietes Graz-Ziegelstraße basierte auf den Anforderungen, die zu Beginn des Projekts TEMPEST definiert wurden. Es handelt sich um ein Siedlungsgebiet mit einer Niederschlagswassereinleitung aus einer Trennkanalisation in ein dort verlaufendes Fließgewässer, den Stufenbach.

#### 2.7.1 Lage

Gelegen im nördlichsten Bezirk der Stadt Graz, Andritz, umfasst das Einzugsgebiet eine Fläche von ca. 42 ha. Die Lage in der Stadt sowie die Ausdehnung wird in Abbildung 2-8 dargestellt.



Abbildung 2-8: Luftbild Graz und Lage des Einzugsgebietes Graz-Ziegelstraße

## Grundlagen

### 2.7.2 Gelände

Die Seehöhe beträgt im Kreuzungsbereich Ziegelstraße/Radegunderstraße ca. 367 müA. Nördlich, östlich und südlich eingeschlossen durch kleinere Hügel oder Anhöhen, befindet sich das Siedlungsgebiet in einer Tallage. Eine statistische Auswertung der Seehöhen des Einzugsgebietes wird in Tabelle 2-2 dargestellt sowie eine Visualisierung des digitalen Geländemodells (DGM) in Abbildung 2-9. Im tiefsten Bereich des Tales und parallel zur Ziegelstraße fließt, wie in Abbildung 2-9 zu sehen, der Stufenbach westwärts durch das Einzugsgebiet. Westlich der Kreuzung Inge-Morath-Straße/Ziegelstraße wurde im Herbst 2017 ein Hochwasserrückhaltebecken für den Stufenbach fertiggestellt (Abbildung 2-10).

Tabelle 2-2: Seehöhe des Einzugsgebietes

	Seehöhe [müA]
Minimum	367,19
Maximum	500,71
Mittelwert	404,62

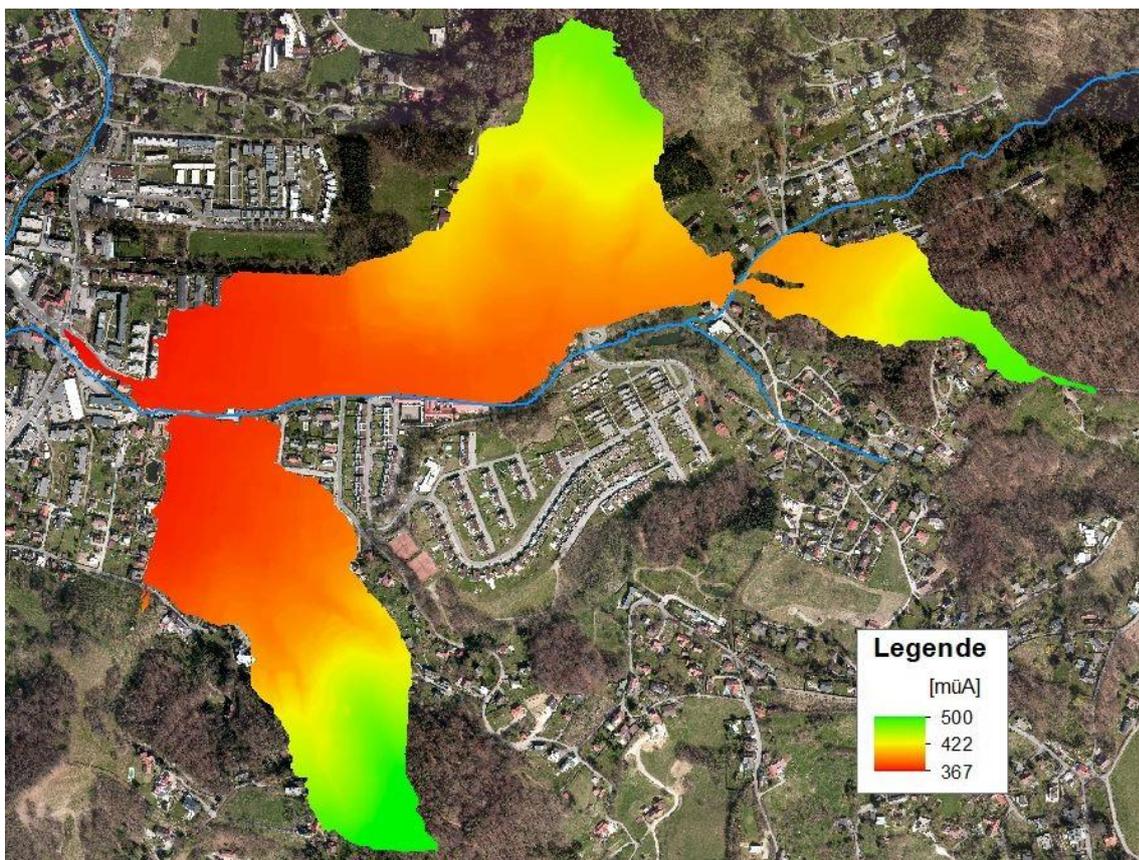


Abbildung 2-9: Visualisierung der Geländehöhen im kanalisiertem Einzugsgebiet

### 2.7.3 Niederschlagsentwässerung

Die Entwässerung erfolgt im untersuchten Gebiet über ein Trennsystem, wovon der Niederschlagswasserkanal (NW-Kanal) in Abbildung 2-10 dargestellt ist. Der NW-Kanal besteht aus Kreisprofilen mit einem Durchmesser von 150 mm bis

600 mm und hat eine Gesamtlänge von ca. 2 800 m. Zu mehr als 93 % bestehen die Kanalrohre aus Beton, während ein Teilstück von 170 m mit Faserzementrohren ausgeführt wurde und eine einzige Leitung mit einer Länge von 15 m aus PVC (Polyvinylchlorid). Die Sohlneigungen der Haltungen variieren zwischen einem Minimum von 0,001 % und einem Maximum von 11,77 %.

Im westlichen Teil ist unter der Ziegelstraße ein ca. 150 m langer Stauraumkanal mit einem Querschnitt von 1,3 \* 2,1 m verbaut. Dieser verfügt über keine Entlastung, jedoch über einen vorangeschlossenen 5 m langen und 1 m tiefen Sandfang. Dieser Sandfang ist seit mehreren Jahren nicht entleert worden und demzufolge mit Feinsedimenten angefüllt.



**Abbildung 2-10: NW-Kanal im Einzugsgebiet, der Stufenbach und das Rückhaltebecken (RHB)**

Am Auslass des NW-Kanals in den Stufenbach wurde von den Mitarbeitern des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der TU Graz ein Durchflussmessgerät installiert (Abbildung 2-11). Oberhalb des Auslasses, hinter einer Busstation, wurde des Weiteren ein Messcontainer aufgestellt (Abbildung 2-12), in welchem das automatische Probenahmegerät untergebracht ist.



Abbildung 2-11: Auslass des NW-Kanals in den Stufenbach



Abbildung 2-12: Messcontainer

Bei der Durchflussmessung bedient man sich eines Gerätes mit dem Messprinzip der Ultraschall-Kreuzkorrelation (Abbildung 2-13). Der Keilsensor des Messgerätes ist an der Kanalsohle fest installiert (Abbildung 2-14).

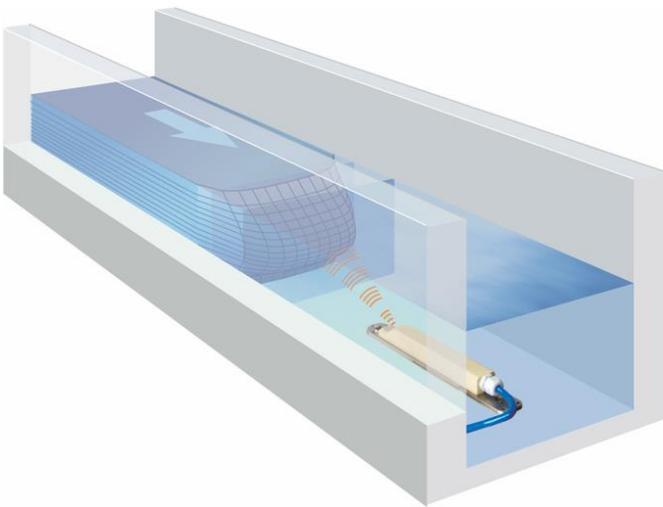


Abbildung 2-13: Systemskizze POA Korrelations-Keilsensor (NIVUS, 2018)



Abbildung 2-14: Einbauort im Kanal

Außerdem wird zur Bestimmung der Inhaltsstoffe des Niederschlagswassers eine Probenahme an der gleichen Stelle des Kanals durchgeführt (Abbildung 2-15). Dabei bedient man sich eines Peristaltik-Systems mit einer Ansaughöhe von 1,5 m, bei dem die Proben vollautomatisch entnommen werden. Das Probenahmegerät des Herstellers Endress+Hauser (Abbildung 2-16) beinhaltet 24 1,0 L Flaschen aus PE-HD (Endress+Hauser, 2018).



Abbildung 2-15: Entnahmeschläuche im Kanal für die automatische Probenahme



Abbildung 2-16: Probenahmegerät "Liquiport 2010 CSP44" (Endress+Hauser, 2018)

#### 2.7.4 Nutzungsarten im Einzugsgebiet

Die dominierende Nutzungsart im Einzugsgebiet Ziegelstraße ist eindeutig „Wohnen“, wobei zu einem großen Anteil Einfamilienhäuser in dieser städtischen Randlage vorzufinden sind. Nur im Nordwesten befinden sich 16 mehrstöckige Reihenhäuser. Größere Gewerbe- oder Industriebetriebe sind mit Ausnahme eines vierstöckigen Bürogebäudes im Kreuzungsbereich Radegunderstraße/Ziegelstraße nicht vorhanden. In Bezug auf Schmutzfrachten im Oberflächenabfluss eventuell auch erwähnenswert ist die Anlage eines Tennisclubs mit sechs Sandplätzen.

#### 2.7.5 Verkehr

Der größte Teil der Verkehrsbelastung im Einzugsgebiet entfällt auf den Kreuzungsbereich Andritzer Reichsstraße/Radegunderstraße/Ziegelstraße, welchen ca. 23 000 Kfz pro Tag passieren. Die Ziegelstraße, welche eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 30 km/h aufweist und insgesamt auf einer Länge von etwa 1 800 m durch das Einzugsgebiet verläuft, durchfahren im westlichen Abschnitt ca. 2 400 Kfz täglich. Da sie im Osten eine Sackstraße bildet, herrscht hier nur noch Anrainerverkehr vor. Auch der im Süden durch das Einzugsgebiet führende Ulrichsweg entspricht einer schmalen Wohnstraße mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 30 km/h, wovon keine große Verkehrsbelastung zu erwarten ist. Über einen Schwerverkehrsanteil liegen keine Daten vor, jedoch sind bis auf den Kreuzungsbereich Radegunderstraße/Ziegelstraße keine nennenswerten Anteile zu erwarten. Lediglich durch die Buslinie 52 der Holding Graz Linien, welche eine Umkehre am Rand des Einzugsgebiets an der Kreuzung Inge-Morath-

## Grundlagen

Straße/Ziegelstraße hat und durch die Ende 2017 fertiggestellte Baustelle des Hochwasserrückhaltebeckens ist oder war vereinzelt Schwerverkehr vorhanden. Einen Überblick über die Straßen, die in und rund um das Einzugsgebiet verlaufen, verschafft Abbildung 2-17.

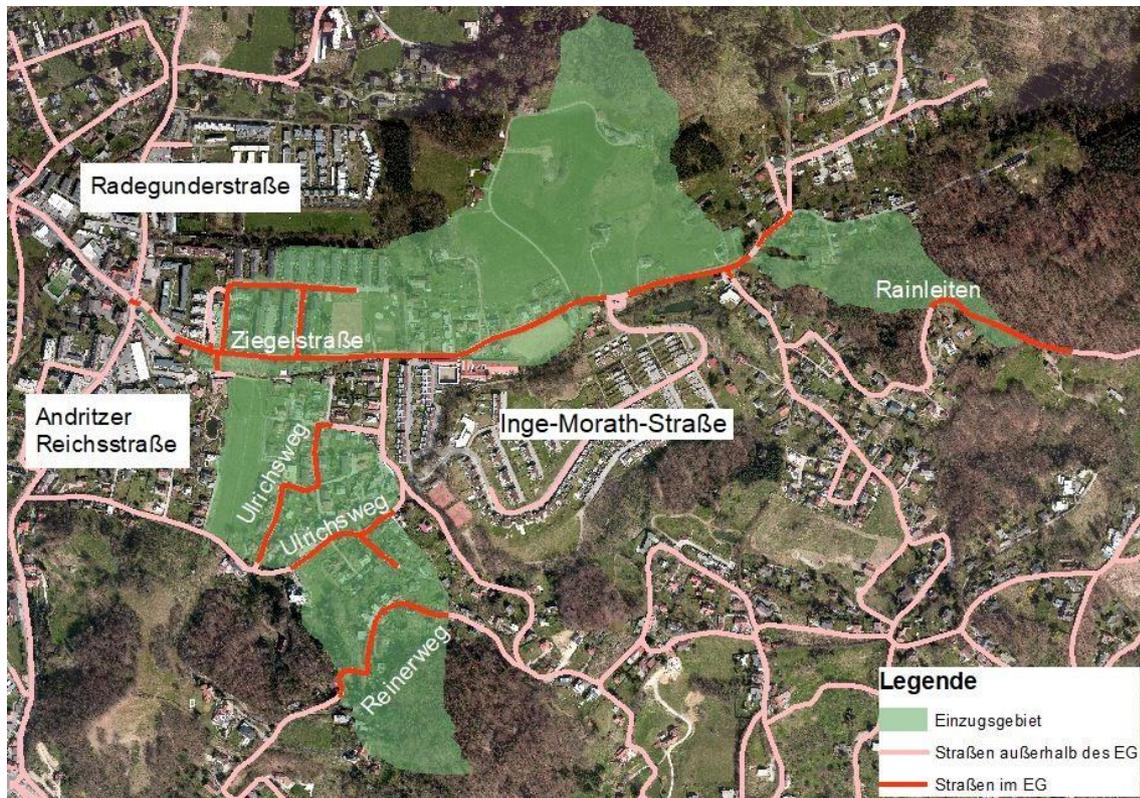


Abbildung 2-17: Straßen im und um das Einzugsgebiets

## 3 Methodik

In diesem Kapitel werden die Arbeitsschritte der Modellerstellung und Aufbereitung der Daten sowie der Sensitivitätsanalyse, Kalibrierung und Validierung beschrieben.

### 3.1 Daten und deren Aufbereitung

Eine Grundvoraussetzung für die Simulation eines Niederschlagswasserabflusses sind selbstverständlich Daten über den Niederschlag im betrachteten Einzugsgebiet, der als Belastung im Modell angesetzt wird. Aber es werden auch weitere abflussbeeinflussende Parameter der Oberfläche und der die Niederschlagswasser sammelnden Kanalisation benötigt, um den Abfluss so gut wie möglich der Realität entsprechend simulieren zu können. Es folgen die Beschreibungen aller Eingangsdaten, die zum Aufbau des Modells verwendet wurden.

#### 3.1.1 Kanalisation

Die gesamte Kanalisation des EG war mit Topologie, Durchmessern und Rauigkeiten bereits vorgegeben. Zur Verwendung in SWMM wurden die Schmutz- und Mischwasserhaltungen in ArcMap aus den Daten gelöscht. Da in den vorhandenen Daten eine Haltung des NW-Kanals ein negatives Gefälle aufwies, was bedeuten würde, dass das Wasser aufwärts fließen müsste, wurde die fälschlicherweise höher liegende Schachtsohle soweit abgesenkt, bis sich für die Haltung ein minimal positives Gefälle ergeben hat.

#### 3.1.2 Erstellen des Einzugsgebiets

Mittels des vorhandenen digitalen Geländemodells (DGM) der Region Graz-Ziegelstraße, welches in ArcMap als Rasterdatensatz mit einer Auflösung von einem Meter vorhanden war, wurde das Einzugsgebiet des NW-Kanals automatisch erstellt. Man muss der Software dafür die Einlaufpunkte des Oberflächenabflusses in den Kanal, welche den Kanalschächten entsprechen, bekanntgeben. Auf eine genauere Detaillierung, in dem man jeden NW-Einlaufschacht der Straßen implementiert, wurde aufgrund fehlender Information, wo diese Einlaufschächte am eigentlichen NW-Kanal angeschlossen sind, verzichtet. Als Ergebnis dieses Vorgehens entstanden die Teileinzugsgebiete jedes Kanalschachtes, deren Summe das Gesamteinzugsgebiet ergibt (Abbildung 3-1).

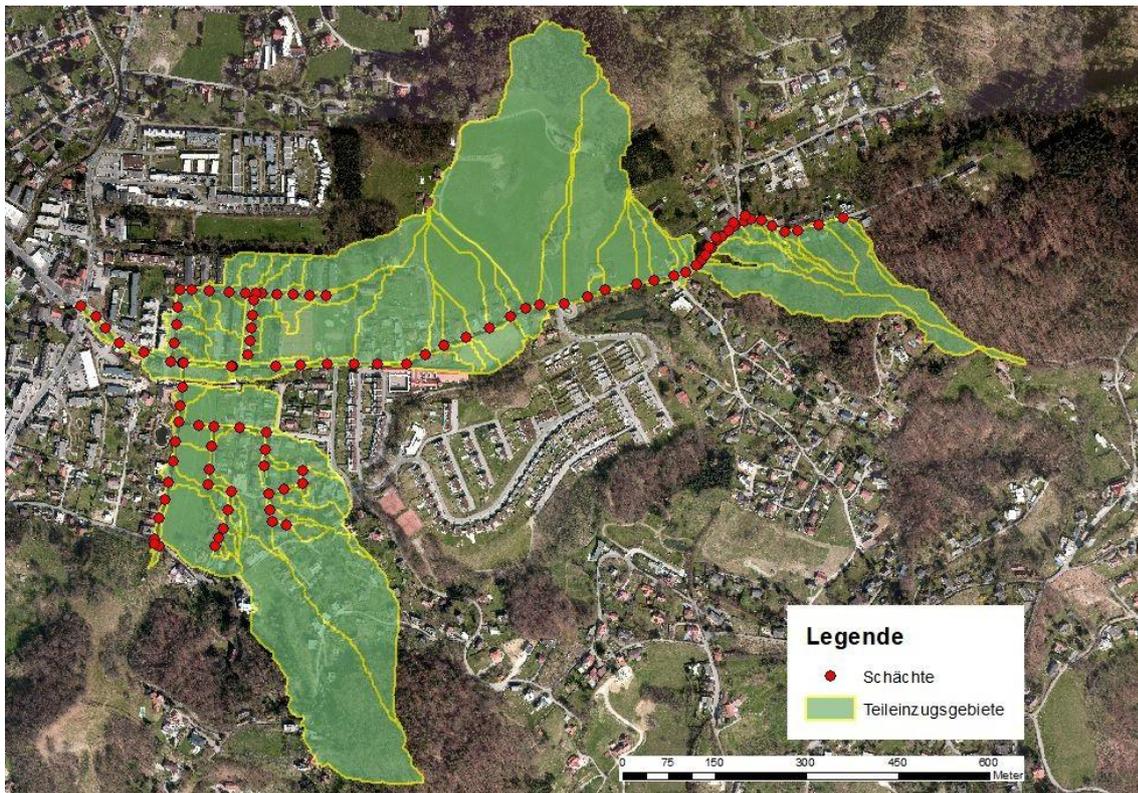


Abbildung 3-1: Teileinzugsgebiete

### 3.1.3 Oberflächen

Eine der ersten Aufgaben, um letzten Endes den Niederschlagswasserabfluss des Einzugsgebiets Ziegelstraße simulieren zu können, war die flächendeckende Aufnahme von Oberflächendaten im Gebiet des untersuchten Niederschlagswasserkanals. Diese wurde nach einer ersten Abschätzung der Dimensionen des Einzugsgebietes am Computer mittels einer Begehung vor Ort durchgeführt. Dafür wurde das vorhandene Orthofoto unterteilt und in entsprechend gut erkennbarem Maßstab auf DIN A3 Blätter gedruckt. Bei der Begehung wurden diese Fotos entsprechend den vorgefundenen Oberflächen typisiert und beschriftet. Da das Abflussverhalten von verschiedenen oberflächenabhängigen Parametern beeinflusst wird, wurden die aufgenommenen Teilflächen in „Landnutzungsart“ und „Oberflächenmaterial“ kategorisiert. Von allen Dachflächen wurde außerdem deren Neigung abgeschätzt. Alle aufgenommenen Informationen wurden anschließend in ArcMap mithilfe des Orthofotos im Hintergrund digitalisiert (Abbildung 3-2).

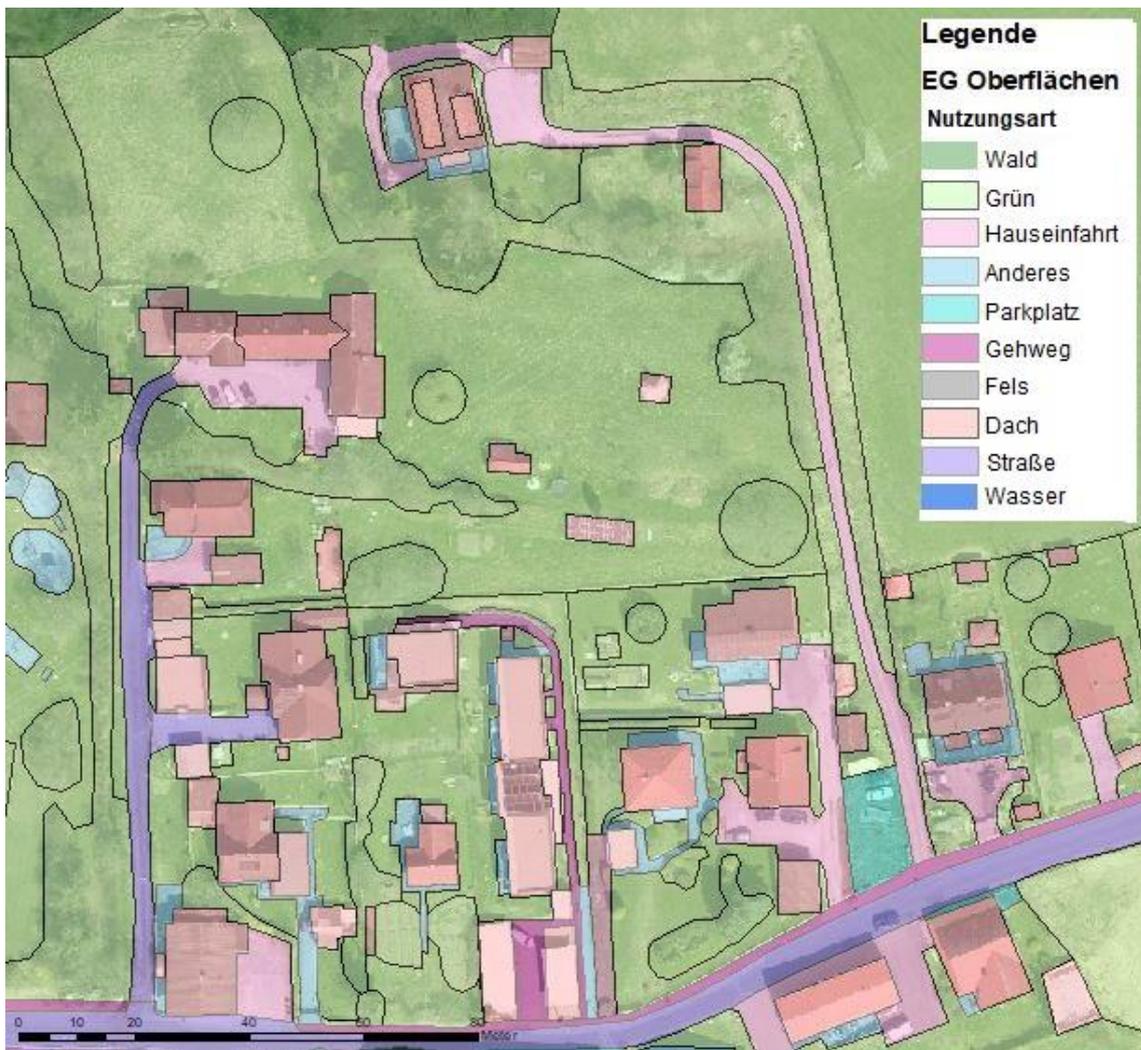


Abbildung 3-2: Beispielbild: Oberflächen - Nutzungsarten

Bei der Dokumentation der verschiedenen Einzelflächen wurde eine möglichst hohe Auflösung angestrebt, damit das später mit diesen Aufzeichnungen gebildete Simulationsmodell möglichst gut der Realität entspricht. So wurden zum Beispiel auch alle Gartenhütten oder kleinere befestigte Flächen aufgenommen, sofern die Grundstücke ausreichend einsehbar waren. Die Lücken, welche in der Digitalisierung durch nicht einsehbare Bereiche entstanden, wurden durch einen Abgleich des Orthofotos und Google Maps vervollständigt.

Da keine Daten über den Anschluss von (Dach-)Flächen an den Niederschlagswasserkanal gegeben waren, wurde bei der Begehung auch auf sichtbare Hinweise von Versickerungsanlagen in Grünflächen oder andere Ableitungen der Regenwässer geachtet. Leider waren solche nur in seltenen Fällen erkennbar, so zum Beispiel bei einigen Objekten, die an den Stufenbach grenzen, welche sehr wahrscheinlich ihre gesammelten Regenwässer direkt in diesen einleiten.

Neben den Attributen wie Fläche, Lage, Landnutzungsart und Oberflächenart musste für alle Teilflächen auch die maximale Fließlänge bis zu deren Auslasspunkt implementiert werden. Da die tatsächliche Fließlänge, wie in Kapitel 2.4.1.1

## Methodik

---

beschrieben, nicht einfach zu ermitteln ist, wurde der jeweilige Abstand (Luftlinie) vom Auslasspunkt, also vom Schacht des NW-Kanals, in den das Teileinzugsgebiet entwässert, zum weitest entfernten Punkt im Teileinzugsgebiet berechnet. Der am weitesten entfernte Punkt wurde dabei mittels eines fünf Meter Punktrasters ermittelt, indem von jedem dieser Rasterpunkte der Abstand zum Auslasspunkt berechnet und dann eine „zonale Statistik“ in ArcMap angewendet wurde, die jedem Teileinzugsgebiet die größte dieser berechneten Längen zuordnet. Der Nachteil dieser Methode ist, dass ein „Fläche-auf-Fläche-Abfluss“ nicht simuliert wird, auch wenn zwischen Teilfläche und NW-Kanal noch einige andere Teilflächen liegen. Der Abfluss der Teilflächen wird also so berechnet, als ob das Wasser direkt in den NW-Kanal fließt, auch wenn es in der Realität über andere Teilflächen fließen müsste. Das Gleichbleiben der Oberflächenattribute über den gesamten Fließweg und die nicht der Realität entsprechende Ermittlung der Länge ergibt Ungenauigkeiten in den Simulationsergebnissen. Bei Niederschlag, der auf undurchlässigen Flächen auftrifft, wird somit eine Infiltration in umliegenden Boden generell verhindert. Um die Ungenauigkeiten möglichst klein zu halten, wurde bei Teilflächen, welche weit entfernt vom NW-Kanal liegen und somit mit großer Wahrscheinlichkeit nicht an diesen angeschlossen sind, manuell die in Fließrichtung darunterliegenden Flächen als „Outlet“ (Auslasspunkt des Teileinzugsgebiets) angesetzt und die Fließlängen in SWMM gemessen bzw. abgeschätzt. Somit ist, wenn das Wasser über unversiegelte Flächen fließt, eine Infiltration in den Untergrund möglich.

Auch die Geländeneigung wurde aus dem DGM mit ArcMap berechnet. In SWMM kann pro Teileinzugsgebiet nur ein einziger Wert für die Geländeneigung (Slope) angegeben werden. Dafür wurde vorerst die Neigung zwischen jedem Rasterpunkt berechnet. Aus dieser Vielzahl an Werten pro Fläche wurde dann der Mittelwert gebildet und der Fläche zugeschrieben. Für alle Dachflächen wurden die Neigungen bei der Begehung abgeschätzt und manuell ins Programm eingetragen.

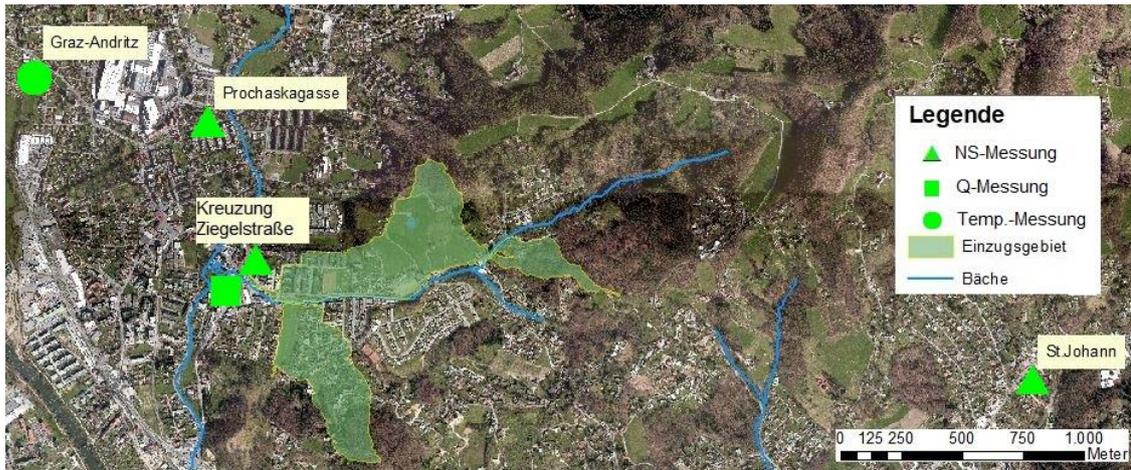
### 3.1.4 Niederschlagsdaten

Zur Abflusssimulation waren Niederschlagsaufzeichnungen der Messstelle Graz-Andritz, Prochaskagasse, der letzten drei Jahre vorhanden. Der Standort der Niederschlagsmessung befindet sich etwa 650 m nördlich der Kreuzung Ziegelstraße/Andritzer Reichsstraße und damit in unmittelbarer Nähe des Einzugsgebiets. Als Kontrolle bzw. Vergleich wurden Daten von einer weiteren Messstelle, welche sich in der Mariatrosterstraße bei der NMS Graz - St. Johann befindet, herangezogen. Da dieser Standort jedoch etwa 1 800 m vom östlichsten Punkt des Einzugsgebiets entfernt liegt und sich dazwischen außerdem eine Anhöhe mit etwa 140 m Höhe, relativ gesehen zur Kreuzung Ziegelstraße/Andritzer Reichsstraße, befindet, wurden diese Daten als weniger repräsentativ für das

Einzugsgebiet angesehen. Die Werte dieser beiden Messstellen sind jeweils in einer Niederschlagsintensität gegeben, wobei die Einheit [mm/min] genutzt wird.

Direkt am Auslass des Kanals in den Stufenbach und somit am Rand des Einzugsgebiets befindet sich außerdem ein Totalisator, der zwar keinen zeitlichen Verlauf eines Niederschlagsereignisses aufzeichnet, aber durch Auslitern des Behälters nach jedem Ereignis Aufschluss über die Gesamtniederschlagshöhe des jeweiligen Ereignisses geben kann.

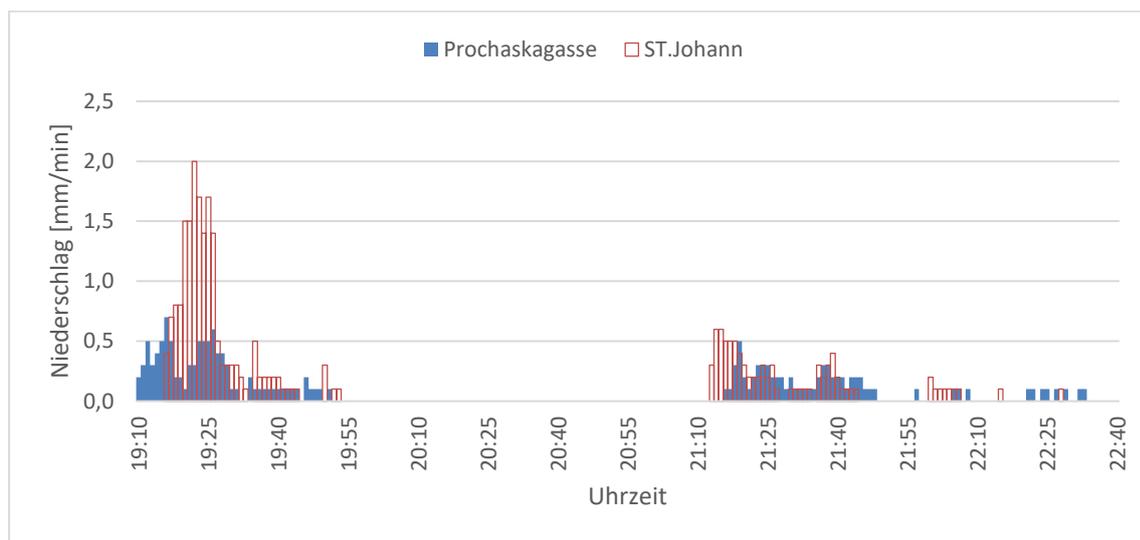
Ein Lageplan mit den Standorten der Messstationen von denen die Daten herangezogen wurden, ist in Abbildung 3-3 zu finden.



**Abbildung 3-3: Messstandorte**

Der direkte Vergleich der aufgezeichneten Niederschlagswerte der beiden Stationen Prochaskagasse und St. Johann, die etwa 3 km voneinander entfernt liegen, zeigt sowohl ein um einige Minuten zeitlich versetztes Auftreten von Niederschlägen, als auch einen teilweise großen Unterschied in den Niederschlagshöhen. Zur Veranschaulichung dieser Abweichungen zwischen den beiden Messstandorten dient Abbildung 3-4, in der ein Niederschlagsereignis vom 2.8.2017 zu sehen ist.

## Methodik



**Abbildung 3-4:** Vergleich von Niederschlagsdaten der beiden Niederschlagsmessstationen Prochaskagasse und St. Johann vom 2.8.2017

Ein Vergleich zwischen den Niederschlagshöhen ( $h_N$ ) der Standorte Prochaskagasse und Kreuzung Ziegelstraße zeigt, wie in Tabelle 3-1 zu sehen, trotz der geringen Distanz von nur rund 650 m auch teils große Unterschiede.

**Tabelle 3-1:** Vergleich von Niederschlagshöhen der Messstationen Prochaskagasse und Ziegelstraße

Zeitraum	$h_N$ [mm]	
	Prochaskagasse	Kreuzung Ziegelstraße
6.11. 11:00 bis 9.11. 9:00	27,44	22,30
23.11. 14:00 bis 26.11. 16:00	7,04	4,2
26.11. 16:00 bis 30.11. 15:00	14,8	8,3
30.11. 15:00 bis 9.12. 00:00	6,7	3,6

Zur späteren Kalibrierung konnten in weiterer Folge allerdings nur Niederschlagsereignisse aus dem Zeitraum, indem Niederschlags- und Durchflussdaten vorhanden waren (24.7.2017 bis 12.12.2017), ausgewählt werden. Dies geschah durch eine visuelle Auswahl am geplotteten Graphen der Niederschlagshöhen in Kombination mit dem Graphen des gemessenen Durchflusses am Ende der NW-Kanalisation in den Stufenbach. Dabei wurden sehr kleine Ereignisse, die einerseits am Graphen schon schwer zu erkennen waren und andererseits der Durchfluss nie größer als 25 L/s war, von Anfang an ausgeschlossen. Ergebnis dieses Vorgehens waren schließlich die in Tabelle 3-2 aufgelisteten 26 Niederschlagsereignisse. In der Tabelle sind für jedes Ereignis dessen Dauer, Niederschlagshöhe ( $h_N$ ), Niederschlagsintensität ( $i_N$ ) und Spitzenintensität ( $i_{N,p}$ ) dargestellt.

Tabelle 3-2: Alle für die Kalibrierung und Validierung verwendbaren Niederschlagsereignisse

Bez.	Datum	Dauer [h]	$h_N$ [mm]	$i_N$ [mm/5min]	$i_{N,p}$ [mm/5min]
E1	24.07.2017	3:30	19,3	0,46	2,7
E2	24.07.2017	3:10	12,9	0,34	2,9
E3	28.07.2017	1:50	1,9	0,09	0,8
E4	02.08.2017	4:25	17,2	0,32	2,5
E5	04.08.2017	1:35	5,7	0,30	2,6
E6	06.08.2017	2:20	11,9	0,43	5,8
E7	06.08.2017	3:30	29,1	0,69	6,9
E8	10.08.2017	3:05	15,5	0,42	4,3
E9	16.08.2017	5:40	6,8	0,10	2,0
E10	19.08.2017	17:35	23,7	0,11	1,3
E11	01.09.2017	2:25	16,7	0,58	8,3
E12	02.09.2017	3:45	5,3	0,12	0,5
E13	14.09.2017	5:50	13,1	0,19	0,7
E14	16.09.2017	8:30	13,2	0,13	0,6
E15	16.09.2017	1:50	2,2	0,10	1,3
E16	17.09.2017	16:05	18,6	0,10	2,1
E17	18.09.2017	15:05	26,7	0,15	0,5
E18	25.09.2017	1:50	2,5	0,11	1,6
E19	26.09.2017	13:30	3,4	0,02	0,6
E20	22.10.2017	13:05	11,4	0,07	1,0
E21	29.10.2017	3:45	2,6	0,06	1,2
E22	05.11.2017	22:45	15,7	0,06	0,5
E23	07.11.2017	2:40	18,6	0,58	0,5
E24	25.11.2017	11:20	4,2	0,03	0,2
E25	29.11.2017	6:45	8,3	0,10	0,3
E26	08.12.2017	4:40	3,5	0,06	0,4

Die 17 Ereignisse mit einer Niederschlagshöhe größer als 6 mm wurden, um eine gleichmäßige Aufteilung zu erhalten, nach ihrer Niederschlagshöhe absteigend sortiert und abwechselnd mit K bzw. V für Kalibrierung oder Validierung und einer fortlaufenden Nummer benannt. Niederschlagsereignisse zwischen 3 mm und 6 mm wurden als Validierungsereignisse herangezogen. Daraus entstanden die in Tabelle 3-3 ersichtlichen neun Kalibrierungsereignisse (K1 – K9) und dreizehn Validierungsereignisse (V1 – V13).

## Methodik

Tabelle 3-3: Niederschlagsereignisse zur Kalibrierung (K1 - K9) und zur Validierung (V1 – V13)

Bez.	Name	Datum	Uhrzeit	Dauer [h]	$h_N$ [mm]	$i_N$ [mm/5min]	$i_{N,p}$ [mm/5min]
E7	K1	06.08.2017	18:25	3:30	29,1	0,69	6,9
E10	K2	19.08.2017	14:40	17:35	23,7	0,11	1,3
E16	K3	17.09.2017	03:45	16:05	18,6	0,10	2,1
E4	K4	02.08.2017	19:10	4:25	17,2	0,32	2,5
E22	K5	05.11.2017	23:55	22:45	15,7	0,06	0,5
E14	K6	16.09.2017	00:35	8:30	13,2	0,13	0,6
E2	K7	24.07.2017	11:50	3:10	12,9	0,34	2,9
E20	K8	22.10.2017	12:00	13:05	11,4	0,07	1,0
E9	K9	16.08.2017	14:55	5:40	6,8	0,10	2,0
E17	V1	18.09.2017	20:55	39:05	26,7	0,06	0,5
E1	V2	24.07.2017	05:30	3:30	19,3	0,46	2,7
E23	V3	07.11.2017	13:55	26:40	18,6	0,06	0,5
E11	V4	01.09.2017	12:35	2:25	16,7	0,58	0,0
E8	V5	10.08.2017	20:50	3:05	15,5	0,42	4,3
E13	V6	14.09.2017	20:55	5:50	13,1	0,19	0,7
E6	V7	06.08.2017	00:40	2:20	11,9	0,43	5,8
E25	V8	29.11.2017	15:35	30:45	8,3	0,02	0,3
E5	V9	04.08.2017	23:50	1:35	5,70	0,30	2,6
E12	V10	02.09.2017	22:25	3:45	5,30	0,12	0,5
E24	V11	25.11.2017	19:45	11:20	4,20	0,03	0,2
E26	V12	08.12.2017	15:45	4:40	3,50	0,06	0,4
E19	V13	26.09.2017	06:00	13:30	3,40	0,02	0,6

### 3.1.5 Abflussdaten

Die für eine Kalibrierung des Modells notwendigen Abflussdaten des NW-Kanals waren für den Zeitraum von 24.7.2017 bis 19.12.2017 vorhanden.

Das Durchflussmessgerät zeichnet bei Trockenwetterabfluss alle fünf Minuten, und sobald es eine Erhöhung des Abflusses gibt jede Minute einen Wert in [L/s] auf. Dieser Umstand machte auch eine ausführliche nachträgliche Bearbeitung der Daten mit MS Excel notwendig. In den Zeiträumen, welche als Kalibrierungs- oder Validierungsereignisse ausgewählt wurden (siehe Tabelle 3-3), musste der Durchfluss, wenn er nur in 5-minütigen Zeitschritten gegeben war, dazwischen linear interpoliert werden, um später die Ergebnisse von SWMM auch in MS Excel vergleichbar machen zu können. Auch SWMM interpoliert die Werte linear, sollte, wie im vorliegenden Fall, der Zeitschritt einer Aufzeichnung größer sein, als jener der Berechnungen (Rossman, 2015).

Nach einer visuellen Plausibilitätsprüfung der Abflussganglinie während der betrachteten Niederschlagsereignisse, wurden entdeckte Unstimmigkeiten mittels der Vorschläge des Merkblattes DWA-M 181 (DWA, 2011) korrigiert. Es wurde vor allem nach Auftreten von Sprüngen, Aussetzern oder langer Wertkonstanz

gesucht. Diese Auffälligkeiten resultieren aus fehlerbehaftete Messungen des Abflusses. Die einfachste Korrektur einer Lücke geschieht über eine lineare Interpolation zwischen dem letzten und nächstfolgenden richtigen Wert. (DWA, 2011)

Diese vermutlich richtigen Werte sind bei einer Lücke, bei der die Werte für einige Zeitschritte auf null fallen, noch einfach zu finden (Abbildung 3-5). Bei einem Sprung mit einer folgenden Wertkonstanz und einem darauffolgenden Sprung in die entgegengesetzte Richtung jedoch, sind diese richtigen Werte praktisch nicht zu rekonstruieren. Eine realistische Erklärung für das Zustandekommen einer Abflussganglinie, wie in Abbildung 3-6 dargestellt ist, ist nicht auszumachen. Ein Vergleich mit den Niederschlagsdaten bzw. dem simulierten Abfluss zeigt keinen Grund für eine solche Abflussganglinie. Aufgrund fehlender Anhaltspunkte für eine Korrektur, müssen solche vermeintlichen Messfehler in den Daten belassen werden.

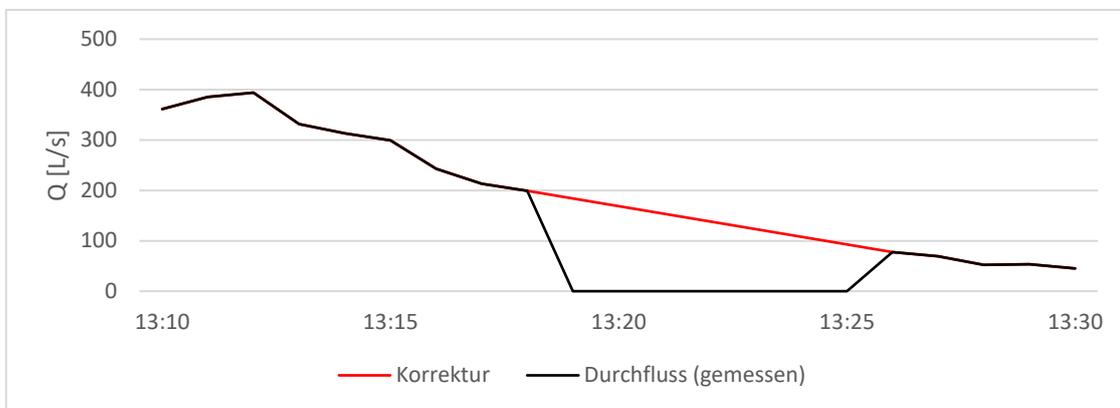


Abbildung 3-5: Lücke in der Messung bei V4 (1.9.2017)

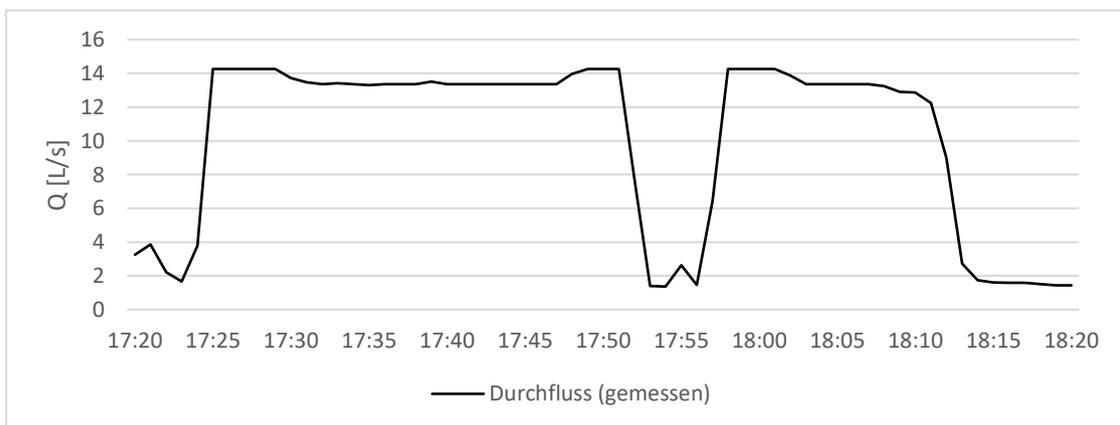


Abbildung 3-6: Sprung und Wertkonstanz bei K8 (22.10.2017)

## Methodik

In einigen Fällen blieb nichts anderes übrig, als den fehlerbehafteten Zeitraum der Durchflussmessung nicht in den weiteren Berechnungen zu berücksichtigen, wie etwa am Ende von Ereignis K1 (Abbildung 3-7).

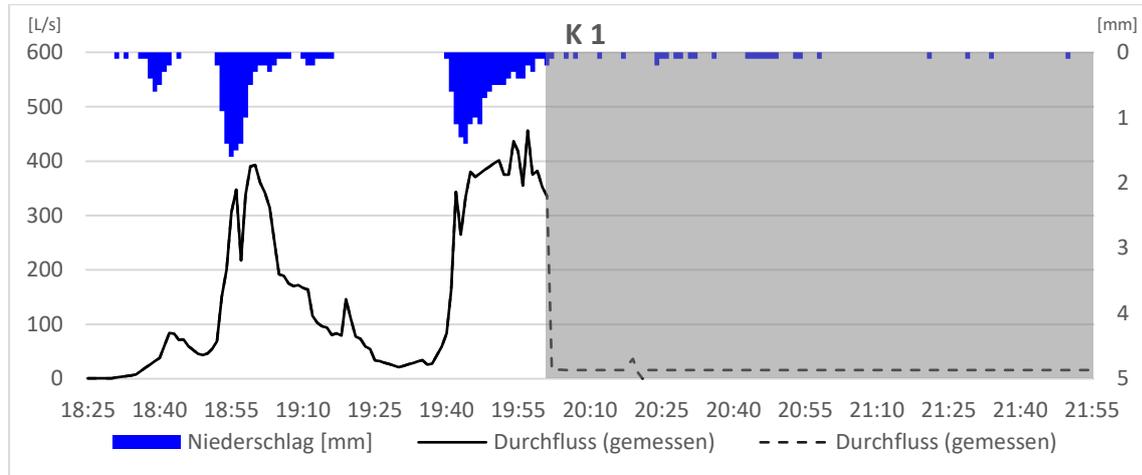


Abbildung 3-7: K1 mit fehlerbehaftetem Abschnitt ab ca. 20 Uhr

### 3.1.6 Bodenparameter

Die für das Modell verwendeten Bodenkennwerte, mit denen sich die Infiltration auf nicht versiegelten Flächen nach der Green-Ampt-Methode berechnen lässt, wurden mit Hilfe eines Layers in ArcMap, der die verschiedenen Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte (k-Werte, Gleichung 3-1), und somit verschiedene Bodenklassen im EG zeigt, implementiert (Abbildung 3-8). Über die gegebenen k-Werte wurde laut Tabelle 3-4 auf eine Bodenklasse geschlossen. Die benötigten Parameter für die Green-Ampt-Methode wurden danach aus Tabelle 2-1 herangezogen.

$$v = k * i$$

Gleichung 3-1

mit:

$v$	...	Fließgeschwindigkeit [m/s]
$k$	...	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert [m/s]
$i$	...	Hydraulisches Gefälle

Tabelle 3-4: Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte für verschiedene Bodenarten (Krapfenbauer, 2006)

Bodenart	k in [m/s]
Löss	$10^{-7}$ bis $10^{-5}$
Geröll	1 bis 5
Grobkies	$10^{-2}$ bis 1
Feinkies	$10^{-3}$ bis $10^{-2}$
Sandiger Kies	$2 \cdot 10^{-2}$ bis $10^{-4}$
Sand	$10^{-3}$ bis $10^{-6}$
Schluff-Sand-Gemische	$5 \cdot 10^{-5}$ bis $10^{-7}$
Schluff	$5 \cdot 10^{-6}$ bis $10^{-9}$
Ton	$10^{-9}$ bis $10^{-12}$

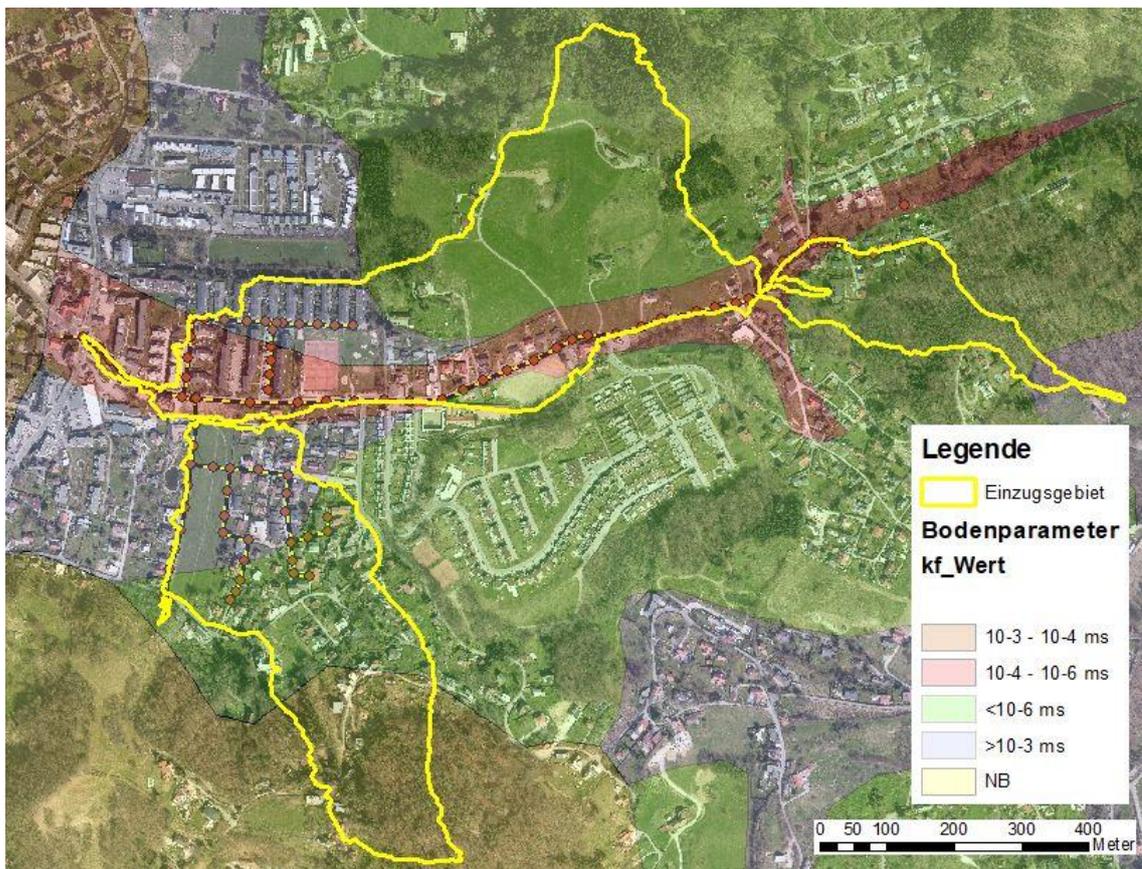


Abbildung 3-8: k-Werte im Einzugsgebiet

## Methodik

Tabelle 3-5: Bodenarten im Einzugsgebiet

Gegebener k-Wert	Gewählte Bodenklasse lt. Tabelle 2-1
$10^{-3}$	Sand
$10^{-4}$	Sandiger Lehm
$10^{-4}$ bis $10^{-6}$	Sandiger Lehm
„NB“	Lehm

### 3.1.7 Klimadaten

Damit für das Modell Werte der potenziellen Evaporation errechnet werden können, benötigt das Programm unter anderem für jeden Tag die jeweilige Höchst- und Tiefsttemperatur. Diese waren von der Messstelle Andritz des Hydrographischen Dienstes im Zeitraum von 1.11.2002 bis zum 8.6.2017 vorhanden. Die Messstelle befindet sich etwa 1 200 m nordwestlich der Kreuzung Ziegelstraße/Andritzer Reichsstraße (Abbildung 3-3). Für den darüber hinaus fehlenden Zeitraum, für den auch Niederschlags- und Durchflussdaten vorhanden waren (bis Dezember 2017), wurden die Temperaturlaufzeichnungen vom Jahr 2016 kopiert. Ein Erwerb der tatsächlichen Werte für diesen Zeitraum würde einerseits Geld kosten, andererseits wird angenommen, dass der Fehler, der durch dieses Vorgehen entsteht, vernachlässigbar gering ausfällt. Da die Aufzeichnungen stündliche Temperaturmesswerte enthalten, musste zur Verwendung dieser in einem ersten Schritt die jeweilige Minimal- und Maximaltemperatur für jeden Tag ermittelt werden (siehe Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Beispiel der Aufbereitung der Temperaturdaten

Datum/Uhrzeit	Temp. [°C]		Datum	Min.temp. [°C]	Max.temp. [°C]
14.05.2017 06:00	13,5		14.05.2017	11.80	24.10
14.05.2017 07:00	15,5		15.05.2017	12.60	19.70
14.05.2017 08:00	18,5		16.05.2017	12.40	22.90
14.05.2017 09:00	21,3		17.05.2017	12.10	21.10
14.05.2017 10:00	23,2	→	18.05.2017	8.90	24.40
14.05.2017 11:00	23,5		19.05.2017	9.90	26.40
14.05.2017 12:00	24,1		20.05.2017	15.10	21.00
14.05.2017 13:00	23,8		21.05.2017	11.60	20.20
14.05.2017 14:00	21,0		22.05.2017	9.50	23.50
14.05.2017 15:00	18,4		23.05.2017	12.00	23.20

Tage an denen keine Temperaturdaten aufgezeichneten wurden, wurden durch Einträge von „0,0“ für die Maximal- und Minimaltemperatur kenntlich gemacht. Somit konnten diese Tage ausfindig gemacht werden, indem die Differenz von Minimum und Maximum errechnet wurde. Bei allen Tagen, bei denen auch diese Differenz 0,0 ergab, wurden die Zahlenwerte gelöscht und mit „\*“ ersetzt. Dadurch zieht SWMM für die Berechnung der potentiellen Evaporation die Temperaturwerte des letzten Tages mit einer Aufzeichnung heran. Diese nun berechneten Werte wurden, um sie in SWMM einlesen zu können, weiter aufbereitet. Die Datei muss dafür acht Spalten enthalten, wobei die jeweiligen Zellen folgenden Inhalt haben müssen: Stationsname, Jahr, Monat, Tag, Maximaltemperatur, Minimaltemperatur, Evaporation und durchschnittliche Windgeschwindigkeit. Da die potentielle Evaporation durch die Temperaturwerte berechnet werden sollte und die durchschnittliche Windgeschwindigkeit, wie im folgenden Absatz beschrieben, nur monatsweise bekannt war, wurden diese beiden Spalten mit einem „\*“ ausgefüllt.

## Methodik

Tabelle 3-7: Beispiel von Temperaturdaten im einlesbaren Format (Tabstopp getrennt)

Station	2017	5	14	24.1	11.8	*	*
Station	2017	5	15	19.7	12.6	*	*
Station	2017	5	16	22.9	12.4	*	*
Station	2017	5	17	21.1	12.1	*	*
Station	2017	5	18	24.4	8.9	*	*
Station	2017	5	19	26.4	9.9	*	*
Station	2017	5	20	21	15.1	*	*
Station	2017	5	21	20.2	11.6	*	*
Station	2017	5	22	23.5	9.5	*	*
Station	2017	5	23	23.2	12	*	*

SWMM benötigt zur Berechnung der Schneeschmelze Daten über Windgeschwindigkeiten. Auch wenn im Betrachtungszeitraum dieser Arbeit kein Schneefall vorgekommen war, wurden die in Tabelle 3-8 dargestellten mittleren Windgeschwindigkeiten aus dem Klimaatlas Steiermark, aufgezeichnet am Standort Universität Graz, herangezogen. Diese stammen aus Aufzeichnungen der Jahre 1996 bis 2000 und wurden im „Climatology Editor“ in PCSWMM manuell eingetragen und nicht eingelesen. (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2018)

Tabelle 3-8: Durchschnittliche Windgeschwindigkeiten (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2018)

	Durchschnittliche Windgeschwindigkeit [m/s]
Jan	1,1
Feb	1,4
Mär	1,6
Apr	1,9
Mai	1,7
Jun	1,7
Jul	1,6
Aug	1,5
Sep	1,5
Okt	1,2
Nov	1,1
Dez	1,1

### 3.2 Modellaufbau

Dieses Kapitel befasst sich mit dem eigentlichen Modellaufbau, also dem Zusammenführen der vorhandenen Daten in SWMM.

### 3.2.1 Importieren der Daten

Da nun alle Daten in Form von Textdateien, Excel-Tabellen, Shape-Files oder Rasterdateien vorhanden waren, mussten sie nur noch in SWMM importiert und somit zusammengefügt werden. Dabei mussten die Formatierungsvorgaben laut SWMM User's Manual 5.1 (Rossman, 2015) bzw. laut der PCSWMM Support Homepage (Computational Hydraulics Int., 2018) eingehalten werden.

### 3.2.2 Flächenattribute festlegen

Nach dem Importieren der Oberflächendaten aus ArcMap in SWMM wurden für die verschiedenen Oberflächenarten jeweilige Parametergrößen der Rauigkeit (Manning's  $n$ ), des Oberflächenspeichers ( $d_s$ ) und des Versiegelungsgrades  $I$  festgelegt. Die in Tabelle 3-9 zu sehenden Anfangswerte wurden aus Krebs (2016) sowie Rossman (2015) herangezogen. Für Oberflächenarten, die dort nicht vorhanden waren, wurden Werte von vergleichbaren Oberflächen angenommen.

Tabelle 3-9: Anfangswerte der Oberflächenparameter (Rossman, 2015; Krebs, 2016)

Oberflächenart	Abkürzung	$d_s$ [mm]	$n$ [ $s/m^{1/3}$ ]	$I$ [%]
Asphalt	A	0,40	0,011	95
Beton	C	0,40	0,011	100
Bewuchs	V	5,00	0,65	0
Bewuchs/Wiese	VL	3,50	0,35	0
Bitumenbahnen	BS	0,60	0,011	100
Bitumenschindel	BT	0,80	0,011	100
Blechdeckung	MS	0,15	0,011	100
Eternit	E	0,60	0,011	100
Fels	R	0,20	0,5	100
Flachdach	FR	5,00	0,03	100
Glas	Gl	0,10	0,008	100
Holz	T	0,50	0,1	90
Kopfsteinpflaster	CS	1,00	0,02	90
Kunststoff	PI	0,10	0,008	100
Natursteinpflaster	NS	1,00	0,015	90
Rasengitter	CG	2,50	0,03	40
Schotter	G	2,50	0,03	30
Tonziegel	CT	1,00	0,012	100
Wald	F	7,50	0,668	0
Waschbeton	EC	1,50	0,02	95
Wasser	W	0,00	1	0
Wiese	L	5,00	0,17	0
Wiese/Bewuchs	LV	4,50	0,25	0

## 3.2.3 Simulationseinstellungen

In SWMM müssen vor dem Start einer Simulation verschiedenste Einstellungen getroffen werden. Neben der Wahl der Art der Abfluss-, Infiltrations- und Evaporationsberechnungsmethode (siehe Kapitel 2.4 und Abbildung 3-9), müssen der gewünschte Simulationszeitraum, ein Aufzeichnungszeitschritt (Reporting Time-step), ein Berechnungszeitschritt für den Oberflächenabfluss im Trockenwetterfall („Runoff: dry weather“) und Regenwetterfall („Runoff: wet weather“) sowie ein Berechnungszeitschritt des Abflussgeschehens im Kanalnetz („Routing Time-step“) gewählt werden. Die Berechnungszeitschritte geben vor, wie oft die zugrundeliegenden Gleichungen berechnet werden sollen und beeinflussen maßgeblich die Rechenzeit der Simulation. Der Aufzeichnungszeitschritt gibt an, in welchen Zeitschritten das Berechnungsergebnis ausgegeben werden soll und beeinflusst damit die Größe der Ausgabedatei. Die gewählten Simulationszeitschritte finden sich in Abbildung 3-10.

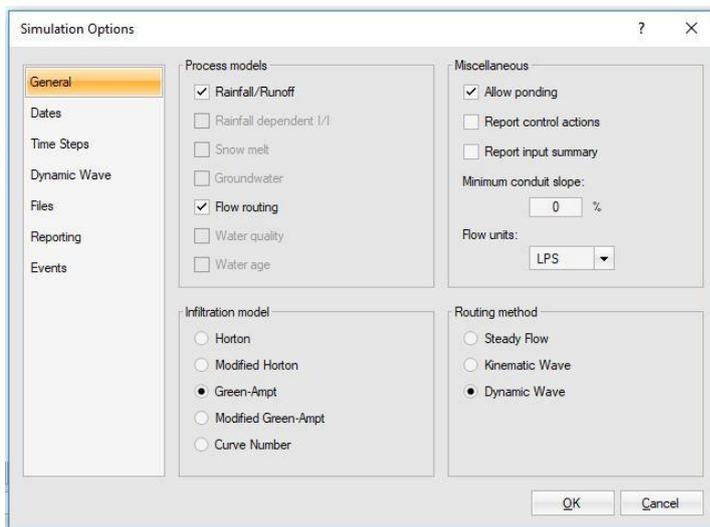


Abbildung 3-9: Generelle Simulationseinstellungen

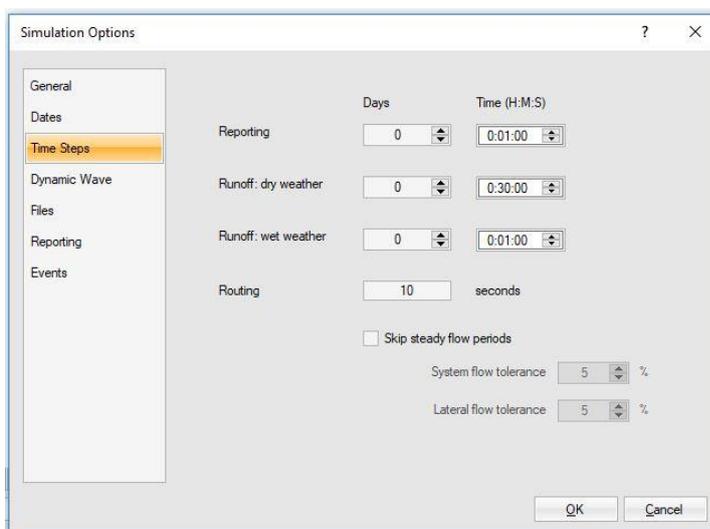


Abbildung 3-10: Simulationszeitschritte

### 3.3 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse sollte als Hilfe für die in weiterer Folge anstehende Kalibrierung des Modells einen Überblick über die Auswirkungen der Änderung einzelner Modellparameter liefern. Nachdem alle vorhandenen Daten und Parameter in SWMM übernommen wurden, konnte eine erste Simulation gestartet werden. Aufgrund dieser ersten Ergebnisse konnte der simulierte Abfluss bereits mit dem Ergebnis der Durchflussmessung abgeglichen und eine grobe Kalibrierung vorgenommen werden, indem einzelne Teilflächen, wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, anstatt des direkten Anschlusses an den NW-Kanal auf umliegende Fläche geleitet wurden. Dabei wurde nur auf das Gesamtabflussvolumen und eine optische Anpassung der Abflusskurven geachtet und nicht auf weitere Kennwerte, die die Güte der Anpassung zwischen Simulation und Realität beschreiben.

Die Sensitivitätsanalyse wurde in mehreren Schritten ausgeführt, indem ausgehend von den gewählten Anfangswerten Abflusssimulationen durchgeführt wurden, bei denen der jeweils betrachtete Modellparameter auf ein realistisches Maximum und Minimum gesetzt wurde, während alle anderen Parameter auf ihrem Anfangswert belassen wurden. Für diese Simulationsergebnisse wurden die Kennzahlen der Anpassung ausgegeben und miteinander verglichen. Diese Kennzahlen wurden einerseits für alle Kalibrierungsereignisse gemeinsam, andererseits für jedes Kalibrierungsereignis einzeln ermittelt, in der Hoffnung daraus Zusammenhänge zwischen Niederschlagsintensität bzw. -menge und Größe der Fehler feststellen zu können.

Außerdem wurde versucht, festzustellen, bei welchen Niederschlagsereignissen auch die Grünflächen abflusswirksam werden, indem zwei Simulationen durchgeführt wurden. Bei der ersten Simulation wurde den Grün- und Waldflächen eine Regenserie mit Nullwerten zugewiesen, also auf diese Flächen keine Niederschlagsbelastung angesetzt. Bei der zweiten Simulation wurde die normale Regenserie des Betrachtungszeitraumes auf alle Flächen angesetzt. Ergaben sich bei den beiden Simulationsergebnissen keine oder nur sehr geringfügige Unterschiede (Änderung des VE < 2 %), wurde angenommen, dass die Grün- und Waldflächen nicht abflusswirksam sind und diese daher beim weiteren Vorgehen nicht berücksichtigt.

#### 3.3.1 Kennzahlen der Anpassung

Um die Qualität der Anpassung zwischen Simulation und Messungen quantifizieren zu können, gibt es einige statistische Kennzahlen, die in weiterer Folge die Simulationsergebnisse vergleichbar machen sollen. Diese Kennzahlen wurden auch bei der folgenden Kalibrierung und Validierung verwendet.

### 3.3.1.1 Volumenfehler (Volume Error, VE)

Als einfach zu ermittelnde und doch aussagekräftige Kennzahl wurde der Volumenfehler herangezogen. Bei diesem wird lediglich das gemessene und simulierte Gesamtabflussvolumen pro Ereignis verglichen und in einem Prozentsatz des gemessenen Volumens ausgegeben (Gleichung 3-2).

$$VE = \frac{V_o - V_s}{V_o} * 100 \quad \text{Gleichung 3-2}$$

mit:

VE	...	Volumenfehler [%]
V <sub>o</sub>	...	Gemessenes Abflussvolumen [m <sup>3</sup> ]
V <sub>s</sub>	...	Simuliertes Abflussvolumen [m <sup>3</sup> ]

### 3.3.1.2 Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE)

Die Nash-Sutcliffe-Effizienz ergibt sich aus eins minus des Quadrats der absoluten Abweichungen, dividiert durch die Varianz der Messungen (Nash & Sutcliffe, 1970)(Gleichung 3-3). Diese Kennzahl gibt somit eine Auskunft der Anpassung zweier Kurven über den gesamten betrachteten Zeitraum, unabhängig vom Berechnungszeitschritt. Die Größenordnung der Kennzahl liegt dabei zwischen minus unendlich und eins. Ein Wert von eins würde eine perfekte Übereinstimmung bedeuten, während ein Wert kleiner als null bedeutet, dass der Mittelwert der Messungen eine bessere Voraussage wäre als die berechneten Simulationsergebnisse. Zu beachten ist, dass große Werte durch das Quadrieren auch großen Einfluss auf das Ergebnis haben.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - Q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{o,i} - \overline{Q_o})^2} \quad \text{Gleichung 3-3}$$

mit:

NSE	...	Nash-Sutcliffe-Effizienz [-]
Q <sub>o</sub>	...	Gemessener Abflussvolumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>s</sub>	...	Simulierter Abflussvolumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
$\overline{Q_o}$	...	Mittelwert des gemessenen Abflussvolumenstroms [m <sup>3</sup> /s]

### 3.3.1.3 Bestimmtheitsmaß (R<sup>2</sup>)

Das Bestimmtheitsmaß gibt Auskunft über den linearen Zusammenhang zwischen gemessenen und simulierten Werten (Gleichung 3-4). Die Größenordnung der Kennzahl liegt zwischen null und eins. Ein Wert von eins würde einen perfek-

ten linearen Zusammenhang zwischen Messung und Simulation bedeuten, während ein Wert von Null keinen linearen Zusammenhang bedeutet. Das Maß beschreibt demnach nicht die Differenz oder den Größenunterschied zweier Kurven, sondern nur wie sich deren Verlauf ähnelt bzw. übereinstimmt.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (Q_{O,i} - \overline{Q_O})(Q_{S,i} - \overline{Q_S}))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{O,i} - \overline{Q_O}) \sum_{i=1}^n (Q_{S,i} - \overline{Q_S})} \quad \text{Gleichung 3-4}$$

mit:

$R^2$	...	Bestimmtheitsmaß [-]
$Q_O$	...	Gemessener Abflussvolumenstrom [ $m^3/s$ ]
$Q_S$	...	Simulierter Abflussvolumenstrom [ $m^3/s$ ]
$\overline{Q_O}$	...	Mittelwert des gemessenen Abflussvolumenstroms [ $m^3/s$ ]
$\overline{Q_S}$	...	Mittelwert des simulierten Abflussvolumenstroms [ $m^3/s$ ]

### 3.3.1.4 Spitzenabflussfehler

Ähnlich dem Volumenfehler, wird hierbei nur der maximale Wert des Abflussvolumenstroms (Spitzenabfluss) zwischen Observation und Simulation verglichen (Gleichung 3-5). Diese Kennzahl liefert somit nur eine Aussage über den jeweils maximalen Wert des Volumenstroms der Simulation bzw. Messung und ist für eine gesamtheitliche Betrachtung der Anpassung von zwei Graphen wenig geeignet.

$$PFE = \frac{Q_{O,P} - Q_{S,P}}{Q_{O,P}} * 100 \quad \text{Gleichung 3-5}$$

mit:

$PFE$	...	Spitzenabflussfehler [%]
$Q_{O,P}$	...	Gemessener maximaler Abflussvolumenstrom [ $m^3/s$ ]
$Q_{S,P}$	...	Simulierter maximaler Abflussvolumenstrom [ $m^3/s$ ]

Für die Sensitivitätsanalyse wurden NSE,  $R^2$  und VE als zu vergleichende Kennzahlen herangezogen.

### 3.3.2 Parametervariationen

Die Modellparameter wurden bei der Sensitivitätsanalyse auf ein zuvor gewähltes realistisches Minimum und Maximum gebracht. Diese Werte wurden von der PCSWMM Support Homepage (Computational Hydraulics Int., 2018) bzw. aus (Krebs, 2016) abgeleitet und durch eigene Überlegungen teilweise variiert. So

## Methodik

wurde z. B. bei der Geländeneigung (Slope) eine Spannweite von 5 % untersucht, und nicht wie empfohlen 25 %. Diese Reduzierung geschah aufgrund der vermeintlich genauen Ermittlung der Geländeneigung durch das DGM. Die in der Sensitivitätsanalyse untersuchten Parameterbereiche sind in Tabelle 3-10 zu sehen. Die Änderungen bei der Geländeneigung und der Versiegelung entsprechen Absolutwerten in Prozent, während alle anderen Parameter relativ zum Anfangswert um die angegebenen Prozentwerte verändert wurden. Die Infiltrationsparameter ( $K_s$ ,  $\Psi_s$ ,  $\Theta_{dmax}$ ) wurden alle gemeinsam auf die nächsthöhere bzw. -niedrigere Bodenklasse laut Tabelle 2-1 verändert.

Tabelle 3-10: Parameterspannweiten für die Sensitivitätsanalysen

Parameter	Spannweite (+/-)
Geländeneigung (S)	5 %
Fließlänge	50 %
Geländerauigkeit (Mannings n)	50 %
Oberflächenspeicher (ds)	50 %
Versiegelungsgrad (I)	20 %
Infiltrationsparameter (Green-Ampt)	+/- eine Bodenklasse

### 3.4 Kalibrierung

Die Kalibrierung der Modellparameter erfolgte manuell, nach der „Trial and Error“ Methode. Die Parameter wurden solange in ihren festgelegten Grenzen variiert, bis keine Verbesserung der Anpassung mehr zu finden war. Um schnell auf diese Werte zu gelangen, halfen die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. Zu beachten waren dabei jedoch die teilweise vorhandenen Korrelationen zwischen den Parametern. So beeinflusst eine kürzere Fließlänge etwa die Auswirkungen einer veränderten Oberflächenrauigkeit.

Da die Kalibrierung manuell erfolgte, konnten alle berechneten Kennzahlen (NSE,  $R^2$ , PFE, VE) und auch die optische Anpassung der simulierten Abflussgraphen in das Ergebnis miteinfließen. Es wurde zwar in erster Linie darauf geachtet, die Nash-Sutcliffe-Effizienz und das Bestimmtheitsmaß zu maximieren, jedoch wurde der Volumenfehler nicht außer Acht gelassen. Da das Modell in weiterer Folge vor allem auch dazu dienen soll, Schmutzfrachten abzuschätzen, sollte dessen Betrag nicht zu groß werden.

Außerdem wurde nicht nur die über den gesamten Ereigniszeitraum berechnete NSE betrachtet, sondern auch ein Mittelwert der einzelnen Ereignisse. Im ersten Fall wurden damit die Ereignisse sozusagen nach ihrer Dauer gewichtet, im zweiten Fall erhielt jedes Ereignis gleiches Gewicht, unabhängig von dessen Dauer.

Schon bei den ersten Simulationen fiel auf, dass der gemessene Abfluss einige Minuten vor dem simulierten Abfluss eintritt, teilweise sogar annähernd zeitgleich mit dem Einsetzen des Niederschlags anzusteigen beginnt. Da es bei der Abflussbildung, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben und in Abbildung 2-2 gezeigt, erst verzögert zu einem Auftreten des Abflusses im Kanalnetz nach dem Auftreffen des Niederschlags kommt (Benetzung, Muldenfüllung, Oberflächenabfluss), ist ein gleichzeitiges Auftreten von Niederschlag und Abfluss im Kanalnetz unrealistisch. Dieser zeitliche Versatz zwischen Messung und Simulation wurde nach der eigentlichen Kalibrierung versucht zu quantifizieren. Die Zeitserie des gemessenen Abflusses wurde solange jeweils um eine Minute nach hinten verschoben, bis sich keine Verbesserung des Ergebnisses mehr ergab. Dieses Vorgehen diene lediglich der Veranschaulichung und Quantifizierung des augenscheinlich vorhandenen Zeitversatzes zwischen Messung und Simulation und soll kein Versuch sein, die zu Grunde liegenden Daten zu manipulieren oder die Qualität der Ergebnisse besser darzustellen. Die Ergebnisse dieses Vorgangs sollen bei der Suche nach den Ursachen des Zeitversatzes helfen und die Wichtigkeit der Niederschlagsdaten in der NA-Modellierung aufzeigen.

Es ist anzumerken, dass die Modellparameter immer für alle Oberflächenmaterialien im gesamten EG um den gleichen Prozentsatz verändert wurden. Auf eine Kalibrierung der Modellparameter in Abhängigkeit der verschiedenen Oberflächen- und Nutzungsarten wurde verzichtet, da auch aufgrund der vorhandenen Durchflussdaten nur an einer Stelle des Kanals das gesamte EG gemeinsam abgebildet wird und einzelne Änderungen für jede Nutzungsart einen immensen Aufwand bei der manuellen Kalibrierung bedeuten würden.

Auf eine Kalibrierung der Infiltrationsparameter des Bodens wurde aufgrund zu weniger Ereignisse, bei denen auch unversiegelte Flächen abflusswirksam werden, verzichtet. Wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben, sollen befestigte und unbefestigte Teilflächen bei einer Modellierung aufgrund ihres unterschiedlichen Abflussverhaltens getrennt betrachtet werden. Das wurde in dieser Arbeit berücksichtigt, indem auf unbefestigte Flächen (Grün- und Waldflächen) bei den Simulationen keine Belastung in Form von Niederschlag angesetzt wurde. Nur zur Feststellung, bei welchen Regenereignissen auch diese Teilflächen abflusswirksam werden, wurde auf dem gesamten EG eine Belastung angesetzt. Für eine Kalibrierung der Infiltrationsparameter bräuchte es mehrere Regenereignisse, bei denen das der Fall ist.

### **3.5 Validierung**

Die Ergebnisse der Kalibrierung wurden mit den dreizehn ausgewählten und unabhängigen Niederschlagsereignissen validiert. Hierbei wurden für eben diese Ereignisse die statistischen Kennzahlen ausgegeben und untereinander, sowie mit den Kennzahlen der Kalibrierungsereignisse verglichen. Danach wurde die

## **Methodik**

---

Zeitreihe der Durchflussmessung um den nach der Kalibrierung gefunden Zeitversatz verschoben und die Veränderung der Kennzahlen dadurch dann noch einmal verglichen und interpretiert.

### 4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Arbeitsschritte der Oberflächenaufnahme, der Sensitivitätsanalyse, der Kalibrierung sowie der Validierung dargestellt, beschrieben und diskutiert. Im abschließenden Unterkapitel findet ein Vergleich zu anderen Studien zum Thema statt.

#### 4.1 Oberflächen

Die Ergebnisse der Digitalisierung als Summen der Einzelflächen sowie als Prozentanteile der Gesamtfläche bzw. der Nutzungsart werden in Tabelle 4-1 dargestellt. Aufgrund der Erhebung ergibt sich eine versiegelte Fläche von ca. 8,2 ha, was bei einer kanalisierten Gesamtfläche von ca. 42 ha einem Versiegelungsgrad von etwa 19,5 % entspricht.

## Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 4-1: Flächen und Prozentanteile der Nutzungsarten und Oberflächenarten

Oberflächenart	Nutzungsart	Fläche der Nutzungsart [m <sup>2</sup> ]	Fläche der Oberflächenart in dieser Nutzungsart [m <sup>2</sup> ]	Anteil an Gesamtfläche [%]	Anteil an Nutzungsart [%]
Tonziegel	Dach	38902	8199	9,3 %	21,1 %
Eternit			20528		52,8 %
Blechdeckung			4878		12,5 %
Glas			830		2,1 %
Kunststoff			436		1,1 %
Bitumenschindel			220		0,6 %
Bitumenbahnen			362		0,9 %
Flachdach			3449		8,9 %
Asphalt	Straße	26055	20748	6,2 %	79,6 %
Schotter			5308		20,4 %
Asphalt	Hauseinfahrt	9414	7334	2,2 %	77,9 %
Natursteinpflaster			766		8,1 %
Schotter			689		7,3 %
Waschbeton			51		0,5 %
Kopfsteinpflaster			117		1,2 %
Beton			432		4,6 %
Rasengitter			27		0,3 %
Asphalt	Gehweg	3340	3039	0,8 %	91,0 %
Schotter			25		0,8 %
Natursteinpflaster			37		1,1 %
Waschbeton			7		0,2 %
Kopfsteinpflaster			115		3,5 %
Rasengitter			36		1,1 %
Beton			80		2,4 %
Asphalt	Parkplatz	4227	3128	1,0 %	74,0 %
Schotter			674		15,9 %
Kopfsteinpflaster			414		9,8 %
Beton			11		0,3 %
Wiese	Grün	240111	139856	57,3 %	58,2 %
Wiese/Bewuchs			36787		15,3 %
Bewuchs/Wiese			25754		10,7 %
Bewuchs			37714		15,7 %
Asphalt	Anderes	13331	319	3,2 %	2,4 %
Natursteinpflaster			3499		26,2 %
Schotter			6581		49,4 %
Waschbeton			441		3,3 %
Kopfsteinpflaster			140		1,1 %
Holz			73		0,5 %
Rasengitter			14		0,1 %
Beton			2264		17,0 %
Wasser	Wasser	352	352	0,1 %	100,0 %
Wald	Wald	83480	83480	19,9 %	100,0 %
Fels	Fels	86	86	0,0 %	100,0 %

Das Einzugsgebiet enthält 531 Dächer, wovon 28 Flachdächer sind. Nicht jede aufgenommene Dachfläche ist direkt am NW-Kanal angeschlossen, denn es wurden auch Gartenhütten oder Carports aufgenommen, die augenscheinlich auf eine Wiese entwässern bzw. über keine Dachrinnen verfügen. Die Verteilung der bei allen Dachflächen abgeschätzten Neigungen wird in Tabelle 4-2 dargestellt.

**Tabelle 4-2: Verteilung der Dachneigungen**

Dachneigung [°]	Anzahl
Flachdach	28
1 – 15	256
16 – 30	149
31 – 45	62
> 45	36

In Tabelle 4-3 finden sich die Baujahre der im vorhandenen Kataster registrierten Gebäude wieder.

**Tabelle 4-3: Verteilung der Gebäudebaujahre**

-1993	188
1994 - 2000	11
2001 - 2005	18
2006 - 2010	9
2011 -	15

## 4.2 Sensitivitätsanalyse

Die Veränderungen der gewählten Kennzahlen bei den Änderungen der jeweiligen Modellparameter finden sich in Tabelle 4-4 (Gesamtbetrachtung), Tabelle 4-5 (K1 bis K5) und Tabelle 4-6 (K6 – K9). Es ist anzumerken, dass beim Parameter der Durchlässigkeit (I) und der Geländeneigung (S) die Prozentwerte absolut geändert wurden, während die restlichen Parameter prozentuell um den angegebenen Wert verändert und die Bodenklassen jeweils eine Klasse durchlässiger oder undurchlässiger gewählt wurden. Des Weiteren wurden nur bei den Simulationen für die Green-Ampt-Parameter auch Grün- und Waldflächen berechnet.

Tabelle 4-4: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - Gesamt

Parameter	Änderung	Minimum	Mittelwert	Maximum	Gesamt		
					E	R <sup>2</sup>	VE
Geländeneigung S [%]	-5 %	0,00	15,30	168,21	0,53	0,62	25,6
	0 %	0,54	19,74	173,21	0,34	0,64	0,4
	+5 %	5,54	24,74	178,21	0,34	0,65	0,3
Fließlänge FL [m]	-50 %	0,00	31,45	287,03	0,33	0,65	0,0
	0 %	0,00	62,90	574,05	0,34	0,64	0,4
	+50 %	0,00	94,35	861,08	0,33	0,62	0,5
Rauigkeit n [s/m <sup>1/3</sup> ]	-50 %	0,004	0,094	0,500	0,33	0,65	0,1
	0 %	0,008	0,187	1,000	0,34	0,64	0,4
	+50 %	0,012	0,281	1,500	0,33	0,63	0,5
Oberflächenspeicher d <sub>s</sub> [mm]	-50 %	0,00	1,11	3,75	0,32	0,64	-1,0
	0 %	0,00	2,22	7,50	0,34	0,64	0,4
	+50 %	0,00	3,34	11,25	0,35	0,64	1,7
Versiegelung I [%]	-20 %	0,00	45,15	80,00	0,53	0,65	21,8
	0 %	0,00	57,42	100,00	0,34	0,64	0,4
	+20 %	20,00	67,53	100,00	0,22	0,63	-8,1
Green-Ampt-Parameter	Durchlässiger				0,31	0,64	-1,4
	0				0,18	0,60	-4,3
	Dichter				0,11	0,59	-4,7

Tabelle 4-5: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse - K1 bis K5

Parameter	Änderung	K1			K2			K3			K4			K5		
		E <sub>K3</sub>	R <sup>2</sup> <sub>K3</sub>	VE <sub>K3</sub>	E <sub>K5</sub>	R <sup>2</sup> <sub>K5</sub>	VE <sub>K5</sub>	E <sub>K7</sub>	R <sup>2</sup> <sub>K7</sub>	VE <sub>K7</sub>	E <sub>K2</sub>	R <sup>2</sup> <sub>K2</sub>	VE <sub>K2</sub>	E <sub>K9</sub>	R <sup>2</sup> <sub>K9</sub>	VE <sub>K9</sub>
Geländeneigung S [%]	-5 %	0,36	0,58	-7,7	0,77	0,86	36,8	0,49	0,69	49,2	0,25	0,36	9,7	0,22	0,67	43,1
	0 %	0,10	0,59	-35,6	0,78	0,88	14,9	0,60	0,73	31,4	-0,08	0,40	-22,5	0,38	0,68	24,1
	+5 %	0,10	0,60	-36,0	0,78	0,88	14,8	0,60	0,74	31,3	-0,09	0,40	-22,8	0,36	0,68	23,9
Fließlänge FL [m]	-50 %	0,09	0,60	-36,1	0,78	0,89	14,4	0,61	0,75	30,9	-0,11	0,41	-23,1	0,34	0,68	23,4
	0 %	0,10	0,59	-35,6	0,78	0,88	14,9	0,60	0,73	31,4	-0,08	0,40	-22,5	0,38	0,68	24,1
	+50 %	0,07	0,56	-34,1	0,77	0,87	15,1	0,60	0,71	31,6	-0,05	0,38	-22,1	0,39	0,68	24,3
Rauigkeit n [s/m <sup>1/3</sup> ]	-50 %	0,09	0,60	-36,2	0,78	0,89	14,5	0,61	0,75	31,0	-0,11	0,41	-23,2	0,34	0,68	23,5
	0 %	0,10	0,59	-35,6	0,78	0,88	14,9	0,60	0,73	31,4	-0,08	0,40	-22,5	0,38	0,68	24,1
	+50 %	0,08	0,57	-34,0	0,77	0,87	15,1	0,60	0,72	31,5	-0,06	0,38	-22,2	0,39	0,68	24,3
Oberflächenspeicher d <sub>s</sub> [mm]	-50 %	0,08	0,59	-37,4	0,78	0,88	14,6	0,60	0,73	30,6	-0,12	0,39	-24,6	0,38	0,68	22,8
	0 %	0,10	0,59	-35,6	0,78	0,88	14,9	0,60	0,73	31,4	-0,08	0,40	-22,5	0,38	0,68	24,1
	+50 %	0,11	0,60	-34,1	0,78	0,87	15,4	0,60	0,73	32,1	-0,04	0,40	-20,5	0,37	0,68	25,3
Versiegelung I [%]	-20 %	0,38	0,61	-12,7	0,80	0,87	33,5	0,55	0,72	46,3	0,23	0,39	4,7	0,27	0,68	40,2
	0 %	0,10	0,59	-35,6	0,78	0,88	14,9	0,60	0,73	31,4	-0,08	0,40	-22,5	0,38	0,68	24,1
	+20 %	-0,06	0,58	-44,0	0,72	0,87	7,9	0,60	0,74	25,3	-0,20	0,40	-32,8	0,37	0,69	18,0
Green-Ampt-Parameter	Durchlässiger	0,07	0,59	-37,4	0,77	0,88	13,5	0,60	0,73	30,2	-0,11	0,40	-24,8	0,37	0,68	22,8
	0	-0,02	0,59	-42,5	0,77	0,88	13,5	0,60	0,73	30,2	-0,11	0,40	-24,8	0,37	0,68	22,8
	Dichter	-0,13	0,57	-46,5	0,77	0,88	13,5	0,60	0,73	30,1	-0,11	0,40	-24,7	0,37	0,68	22,8

Tabelle 4-6: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse – K6 bis K9

Parameter	Änderung	K6			K7			K8			K9		
		E <sub>C6</sub>	R <sup>2</sup> <sub>C6</sub>	VE <sub>C6</sub>	E <sub>C1</sub>	R <sup>2</sup> <sub>C1</sub>	VE <sub>C1</sub>	E <sub>C8</sub>	R <sup>2</sup> <sub>C8</sub>	VE <sub>C8</sub>	E <sub>C4</sub>	R <sup>2</sup> <sub>C4</sub>	VE <sub>C4</sub>
Geländeneigung S [%]	-5 %	0,73	0,87	31,3	0,55	0,61	22,5	0,81	0,86	17,3	-0,11	0,18	2,3
	0 %	0,71	0,88	7,3	0,52	0,66	-5,3	0,51	0,88	-10,7	-0,59	0,19	-30,1
	+5 %	0,70	0,88	7,1	0,51	0,67	-5,3	0,50	0,88	-10,9	-0,70	0,18	-30,7
Fließlänge FL [m]	-50 %	0,69	0,89	6,8	0,49	0,68	-5,7	0,47	0,88	-11,4	-1,03	0,15	-32,5
	0 %	0,71	0,88	7,3	0,52	0,66	-5,3	0,51	0,88	-10,7	-0,59	0,19	-30,1
	+50 %	0,72	0,87	7,6	0,52	0,65	-5,4	0,54	0,87	-10,4	-0,46	0,20	-29,7
Rauigkeit n [s/m <sup>1/3</sup> ]	-50 %	0,70	0,89	6,8	0,49	0,68	-5,7	0,48	0,88	-11,3	-0,96	0,16	-32,0
	0 %	0,71	0,88	7,3	0,52	0,66	-5,3	0,51	0,88	-10,7	-0,59	0,19	-30,1
	+50 %	0,72	0,87	7,5	0,52	0,65	-5,4	0,54	0,87	-10,4	-0,47	0,20	-29,8
Oberflächenspeicher d <sub>s</sub> [mm]	-50 %	0,72	0,88	5,5	0,52	0,66	-5,3	0,47	0,87	-13,3	-0,91	0,16	-36,3
	0 %	0,71	0,88	7,3	0,52	0,66	-5,3	0,51	0,88	-10,7	-0,59	0,19	-30,1
	+50 %	0,70	0,87	8,8	0,52	0,66	-5,3	0,55	0,87	-8,0	-0,42	0,20	-25,1
Versiegelung l [%]	-20 %	0,76	0,88	27,5	0,59	0,64	18,2	0,80	0,87	13,0	-0,21	0,17	-2,9
	0 %	0,71	0,88	7,3	0,52	0,66	-5,3	0,51	0,88	-10,7	-0,59	0,19	-30,1
	+20 %	0,64	0,88	-0,2	0,43	0,67	-16,1	0,37	0,88	-19,1	-0,68	0,19	-38,2
Green-Ampt-Parameter	Durchlässiger	0,70	0,88	5,7	0,51	0,66	-6,9	0,48	0,87	-12,6	-0,61	0,19	-32,4
	0	0,70	0,88	5,7	0,51	0,66	-7,0	0,48	0,87	-12,6	-0,61	0,19	-32,5
	Dichter	0,70	0,88	5,7	0,50	0,66	-7,4	0,48	0,87	-12,6	-0,61	0,19	-32,4

Die aus den obigen Tabellen abzulesenden Werte lassen erkennen, wie stark sich das Simulationsergebnis bei einer Änderung des jeweiligen Parameters um den angegebenen Prozentsatz verändert.

Die Zeilen, bei denen die jeweiligen Parameter nicht verändert wurden, zeigen mit Ausnahme der Betrachtung der Infiltrationsparameter immer genau die gleichen Werte für alle Kennzahlen, da sie sich aus den Startwerten der Modellparameter ergeben. Bei den Infiltrationsparametern ergeben sich andere Werte, weil hierfür auch Grünflächen berechnet wurden.

Beginnend bei der Betrachtung aller Niederschlagsereignisse gemeinsam, zeigt sich vorerst schon eine gute Anpassung beim Gesamtabflussvolumen, welches nur einen VE von 0,4 % aufweist. Dieser sehr gute Wert kommt aus der vorangegangenen, in Kapitel 3.1.3 beschriebenen, groben Kalibrierung. Das Abflussvolumen und damit auch der VE wird maßgeblich von der Versiegelung der Oberflächen (I) beeinflusst. Je stärker die Oberfläche versiegelt ist, desto mehr Wasser fließt in den Kanal ab und umgekehrt. Zur Veranschaulichung dieses Effektes dient Abbildung 4-1, in der beispielhaft die gemessene und die simulierte Abflussganglinien des Regenereignisses K7 gezeigt werden. Eine ähnlich große Auswirkung auf das Abflussvolumen bewirkt nur die Verringerung der Geländeneigung (S). Das Resultat daraus ist, dass dabei einige Flächen eine Oberflächenneigung von 0 % erlangen (Abbildung 4-2). Das würde bedeuten, dass von diesen Flächen kein Wasser abfließt, was unrealistisch wäre. Bei den aus dem DGM berechneten Neigungen ist das Minimum zumindest 0,54 %, also hat jede Teilfläche eine gewisse Neigung. Eine Erhöhung der Geländeneigungen um 5 % bedeutet nur eine Veränderung von -0,1 % des VE. Weiters schafft nur eine Veränderung des Oberflächenspeichers ( $d_s$ ) eine auffällige Änderung des Abflussvolumens. Bei einer Erhöhung von  $d_s$  wird mehr Wasser auf der Oberfläche zurückgehalten und fließt daher nicht ab, sondern evaporiert in weiterer Folge. Ähnlich wie bei der Versiegelung verhält es sich bei einer Veränderung der Bodenparameter bezüglich der Infiltration. Hier kann der VE bei einem durchlässiger Gestalten des Bodens um etwa 3 % verbessert werden, jedoch verändert sich dieser nur um 0,4 % bei weniger durchlässigen Bodenverhältnissen.

Bezüglich NSE zeigt sich, dass die Verringerung der Geländeneigung und die Verringerung der Versiegelung eine starke Verbesserung, also eine Erhöhung des Wertes, bringen. Jedoch geht das bei beiden Parametern mit einer Verschlechterung des VE um 25 % bzw. 21 % einher. Bei der Rauigkeit und der Fließlänge bedeuten sowohl eine Erhöhung als auch eine Verringerung eine Verschlechterung der NSE um jeweils 0,01. Auch eine Veränderung der Bodenparameter bringt deutliche Veränderungen der Kennzahl um plus 0,13 (durchlässiger) bzw. minus 0,07 (dichter).

Beim Bestimmtheitsmaß  $R^2$  lässt sich durch keine der Veränderung eine starke Verbesserung erzielen. Die größte Steigerung (um 0,04) ergibt sich aus einem

## Ergebnisse und Diskussion

durchlässigeren Boden, gefolgt von einem Herabsetzen der Neigungen (0,02). Alle anderen Variationen bedeuten nur eine Veränderung von maximal 0,01.

Betrachtet man die Änderungen der Kennzahlen für jedes Regenereignis einzeln, lassen sich keine besonderen Unterschiede zur Gesamtbetrachtung erkennen. Die Parametervariationen beeinflussen das Ergebnis immer ähnlich, auch wenn sich die Größenordnungen von Ereignis zu Ereignis leicht verändern. Das hängt auch von der Gesamtniederschlagshöhe ab, was sich beim Parameter  $d_s$  zeigt. Dieser hat beim Abflussvolumen prozentuell einen größeren Anteil bei Ereignissen mit kleinerer Niederschlagshöhe. Auffällig ist Ereignis K9, bei dem die Variationen augenscheinlich größere Veränderungen aller drei Kennzahlen hervorrufen als bei den anderen Regenereignissen. Jedoch hat dieses eine sehr schlechte Anpassung, wie man an der negativen NSE und dem sehr kleinen  $R^2$  sehen kann.

Dadurch, dass nur bei Ereignis K1 Veränderungen in Folge einer Variation der Bodenparameter auftreten, lässt sich erkennen, dass dieses das einzige betrachtete Ereignis ist, bei dem die Grünflächen abflusswirksam werden (Abbildung 4-3). Hierbei ist aber zu erwähnen, dass K1 allgemein eine schlechte Anpassung zwischen Messungen und Simulation hat. Bei allen anderen Regenereignissen bleiben die Kennzahlen bei einer Variation der Bodenparameter ident, womit klar ist, dass auch der Einfluss auf die Gesamtbetrachtung der Kennzahlen nur von K1 kommt.

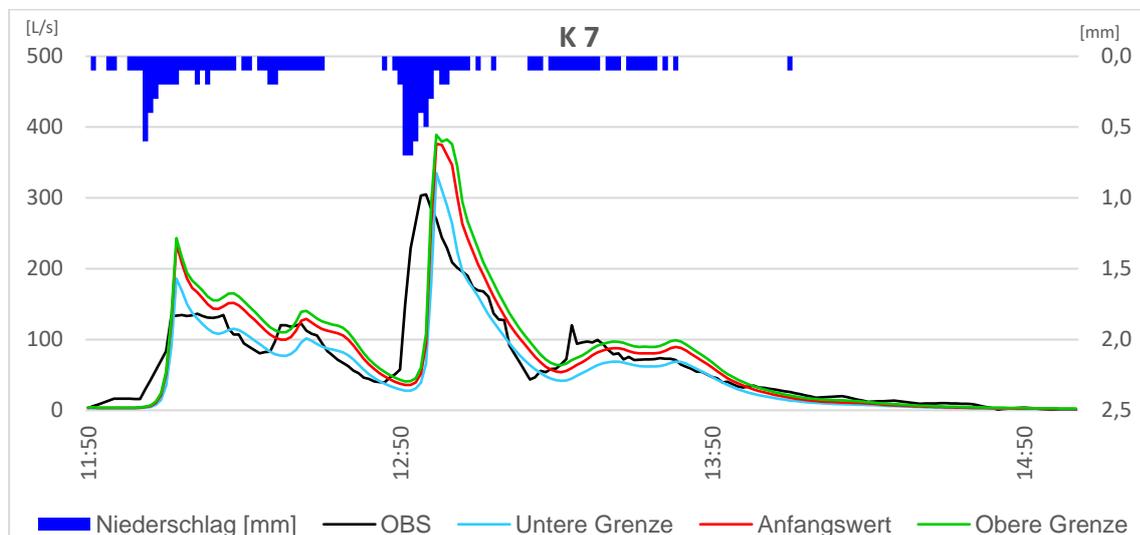


Abbildung 4-1: Versiegelung +/- 20 % bei K7 ( $h_N$ : 12,9 mm;  $i_N$ : 0,34 mm/5min)

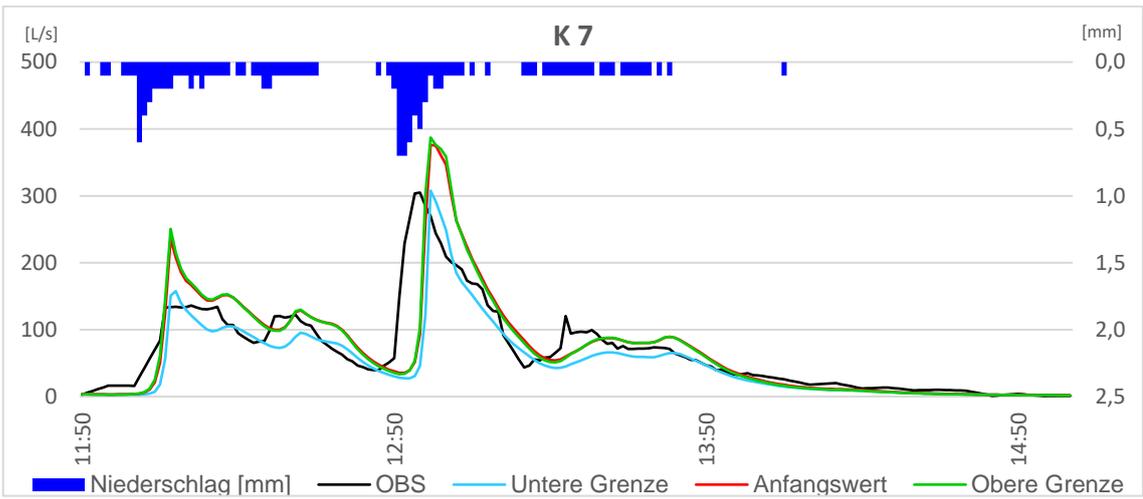


Abbildung 4-2: Geländeneigung +/- 5 % bei K7 (hN: 12,9 mm; iN: 0,34 mm/5min)

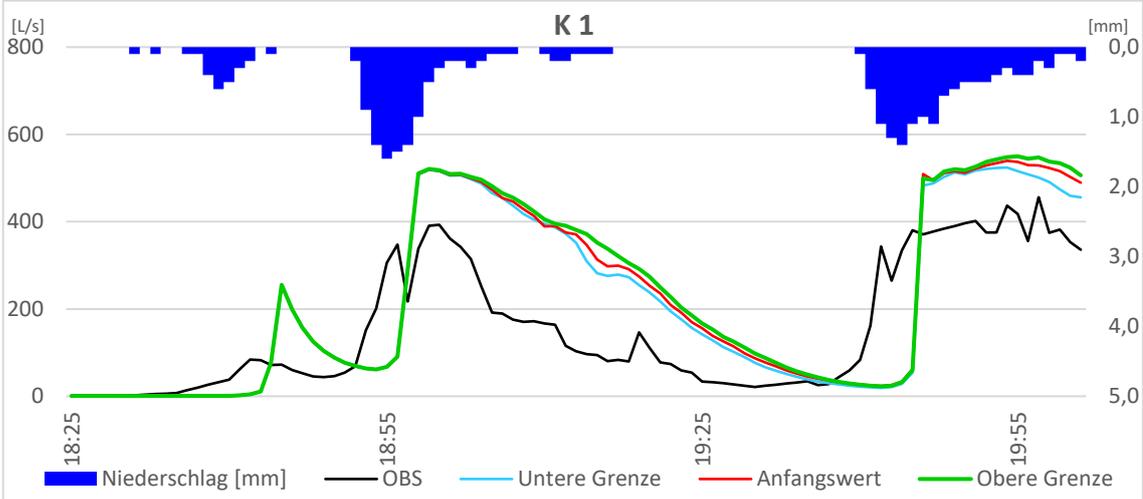


Abbildung 4-3: Infiltrationsparameter +/- eine Bodenklasse bei K1 (hN: 29,1 mm; iN: 0,69 mm/5min)

Durch einen Blick auf die Abflussganglinien, die im Zuge der Sensitivitätsanalyse für alle Kalibrierungsereignisse und jede Parametervariation dargestellt wurden, zeigen sich außerdem weitere aufschlussreiche Informationen. So lässt sich beispielsweise erkennen, in welchem Zeitabschnitt eines Regenereignisses die Parameterveränderungen ihre Wirkung zeigen. Während die Verringerung der Geländeneigung (Abbildung 4-2) als auch eine Veränderung der Versiegelung (Abbildung 4-1) über den ganzen Zeitraum eine ähnliche Wirkung zu haben scheinen, wirkt der Oberflächenspeicher (Abbildung 4-4) nur am Beginn eines Regenereignisses, bis er gefüllt ist und der Abfluss des Regenwassers beginnt. Bei K7 zeigt sich durch eine Veränderung von  $d_s$  allerdings fast gar keine Wirkung, da kurz zuvor ein anderes Regenereignis (V2) stattfand und die Oberflächenspeicher durch dieses noch gefüllt waren. Bei den Veränderungen der Fließlänge (Abbildung 4-5) sticht vor allem die Form der Abflussspitzen ins Auge, welche bei einer Verkürzung dieser größer ausgeprägt sind und früher eintreten und bei einer Verlängerung flacher werden. Bei einer Verkürzung kommt es allgemein

## Ergebnisse und Diskussion

schneller zum Abfluss. Ein sehr ähnliches Bild zeigt sich auch bei den Veränderungen der Rauigkeit (Abbildung 4-6). So verhält sich der Abfluss bei einer Verringerung dieser wie bei der Verkürzung der Fließlänge, die Abflussspitzen sind stärker ausgeprägt und der Abfluss tritt früher ein.

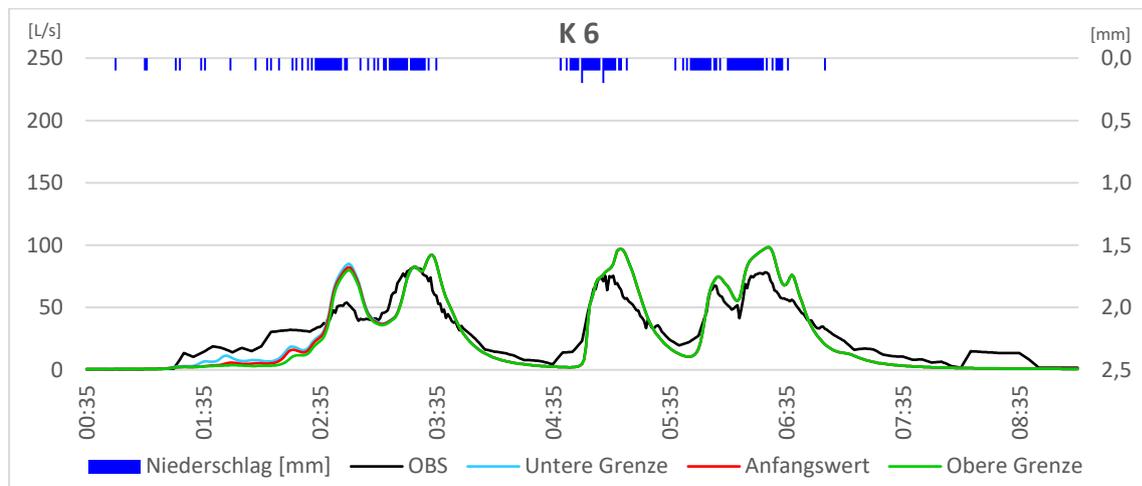


Abbildung 4-4: Oberflächenspeicher +/- 50 % bei K6 ( $h_N$ : 13,2 mm;  $i_N$ : 0,13 mm/5min)

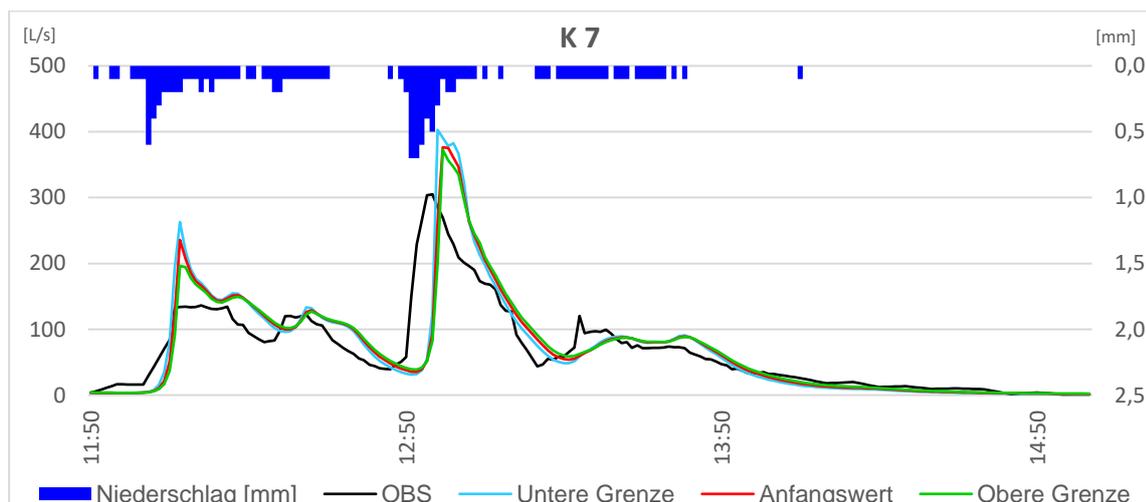


Abbildung 4-5: Fließlänge +/- 50 % bei K7 ( $h_N$ : 12,9 mm;  $i_N$ : 0,34 mm/5min)

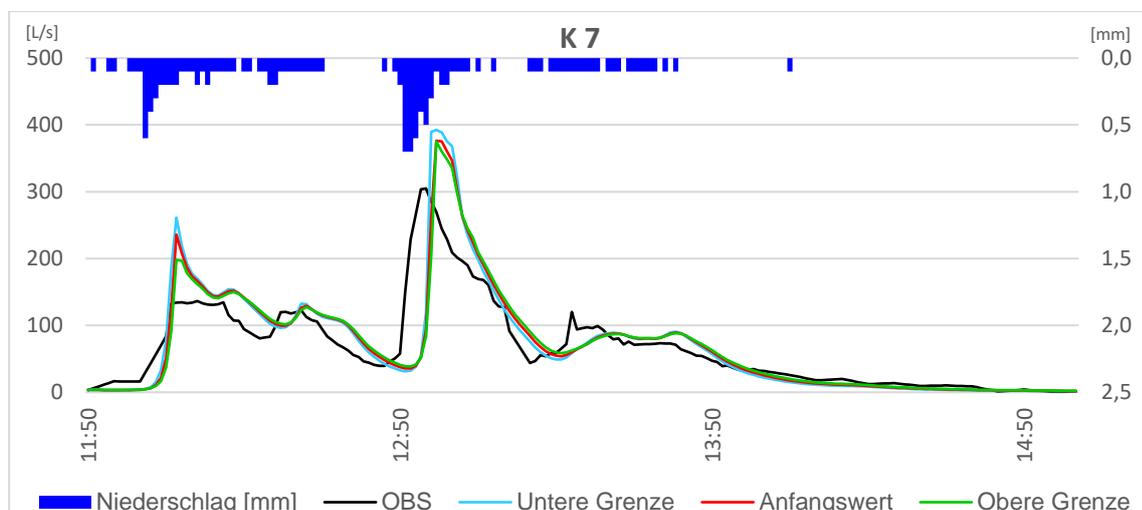


Abbildung 4-6: Rauigkeit +/- 50 % bei K7 ( $h_N$ : 12,9 mm;  $i_N$ : 0,34 mm/5min)

### 4.3 Kalibrierung

Bei der Kalibrierung wurde als erster Schritt die Versiegelung aller Flächen außer der Dachflächen um 20 % herabgesetzt. Die Versiegelung der Dachflächen wurde bei 100 % belassen, da davon auszugehen ist, dass darauf gefallener Niederschlag zum größten Teil auch zu Abfluss wird. Durch diese Maßnahme wird das simulierte Abflussvolumen reduziert und der Volumenfehler größer. Der Oberflächenspeicher wurde um 50 % vergrößert. Das hat eine Verbesserung der NSE um etwa 0,02 zur Folge, jedoch verschlechtert sich der Volumenfehler auch hier minimal, da im Modell mehr Wasser im Einzugsgebiet gespeichert wird. Um auch optisch eine bessere Anpassung der Graphen zu erhalten, wurden sowohl die Fließlängen als auch die Rauigkeiten um 30 % herabgesetzt, wodurch eine Beschleunigung des Abflussverhaltens erreicht werden konnte. Durch diese Maßnahme wird auch das Abflussvolumen wieder größer, der VE somit kleiner,  $R^2$  wird größer, die NSE bleibt annähernd ident, die Abflussspitzen prägen sich jedoch mehr aus und der Spitzenabflussfehler verschlechtert sich. Da bei der Geländeneigung nur eine Verringerung dieser eine Verbesserung der NSE zur Folge hätte, dies aber mit einer deutlichen Verschlechterung des VE einhergehen würde, wurde die Neigung nicht verändert. Die erreichten Kennzahlen für alle Regenereignisse gemeinsam und für jedes einzeln finden sich in Tabelle 4-7. Da der Spitzenabflussfehler auch in einer Gesamtbetrachtung nur zwei Werte unabhängig vom Zeitpunkt deren Auftretens miteinander vergleicht, wurde er bei dieser mangels Sinnhaftigkeit nicht berechnet. Denn so wäre es möglich, dass Spitzenwerte von verschiedenen Ereignissen miteinander verglichen werden.

Tabelle 4-7: Kennzahlen nach der Kalibrierung

Kennzahl	Gesamt	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
NSE	0.49	0.30	0.82	0.58	0.14	0.31	0.76	0.59	0.73	-0.34
$R^2$	0.66	0.63	0.88	0.74	0.40	0.67	0.88	0.67	0.88	0.18
PFE		-18,6	-6,9	-44,4	-21,8	-50,4	-4,0	-22,6	-30,0	-28,8
VE	14,6	-22,3	26,6	41,4	-4,2	34,7	20,9	9,5	5,8	-9,9

Der Mittelwert aller NSE beträgt hierbei 0,43.

Bei der Gesamtbetrachtung der Kennzahlen fällt auf, dass diese in der vorhandenen Größenordnung teilweise auch schon bei der Sensitivitätsanalyse mit der Veränderung nur eines Modellparameters erreicht werden konnten. Da bei der Kalibrierung jedoch versucht wurde, eine ausgewogene Optimierung aller gezeigten Kennzahlen zu erreichen, sind diese isoliert betrachtet nicht auf dem höchsten erreichbaren Wert optimiert.

Im Vergleich zu den Kennzahlen, die schon bei der Sensitivitätsanalyse erreicht wurden, ist die NSE mit 0,49 etwas kleiner als beispielsweise bei einer Verringerung der Geländeneigungen um 5 %. Ein  $R^2$  von 0,66 konnte mit der Veränderung nur eines Parameters in der Sensitivitätsanalyse jedoch nicht erreicht werden.

## Ergebnisse und Diskussion

Der VE von 14 % ist ein Kompromiss aus dem unkalibrierten Wert von 0,4 % und den über 20 %, die z. B. durch eine weitere Herabsetzung der Versiegelung zustande kommen würden.

Bei einer Betrachtung der einzelnen Ereignisse bezüglich NSE fällt vor allem K9 mit einer NSE von -0,34 negativ auf. K9 ist gleichzeitig das Kalibrierungsereignis mit der kleinsten Niederschlagshöhe (6,8 mm). Alle anderen Regenereignisse haben zumindest eine positive NSE. Während der Spitzenabflussfehler bei allen Ereignissen negativ ist, was bedeutet, dass die simulierte Spitze größer ist als die gemessene, haben nur drei der neun Regenereignisse einen negativen Volumenfehler. Den größten VE hat K5 mit 35 %. Dieses Ereignis ist mit 22:45 h das längste der Kalibrierungsereignisse und weist mit 0,06 mm/5min die geringste Niederschlagsintensität auf.

Zur Veranschaulichung der genannten Werte dienen die folgenden beiden Abbildungen. Die gute Anpassung des Regenereignisses K2 ist in Abbildung 4-7 zu sehen (NSE=0,82;  $R^2=0,88$ ), eine schlechtere des Ereignisses K9 in Abbildung 4-8 (NSE=-0,34;  $R^2=0,18$ ). Die schlechteren Werte von K9 lassen sich auch rein optisch durch die fehlende Spitze in der Abflussmessung am Beginn des Ereignisses bereits erahnen.

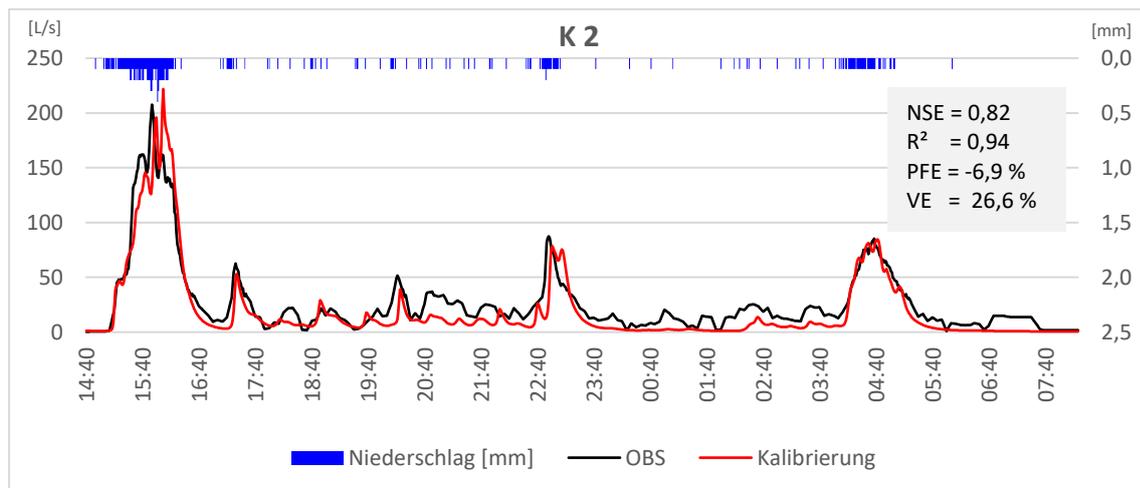


Abbildung 4-7: Kalibrierungsergebnis von K2 ( $h_N$ : 23,7 mm;  $i_N$ : 0,11 mm/5min)

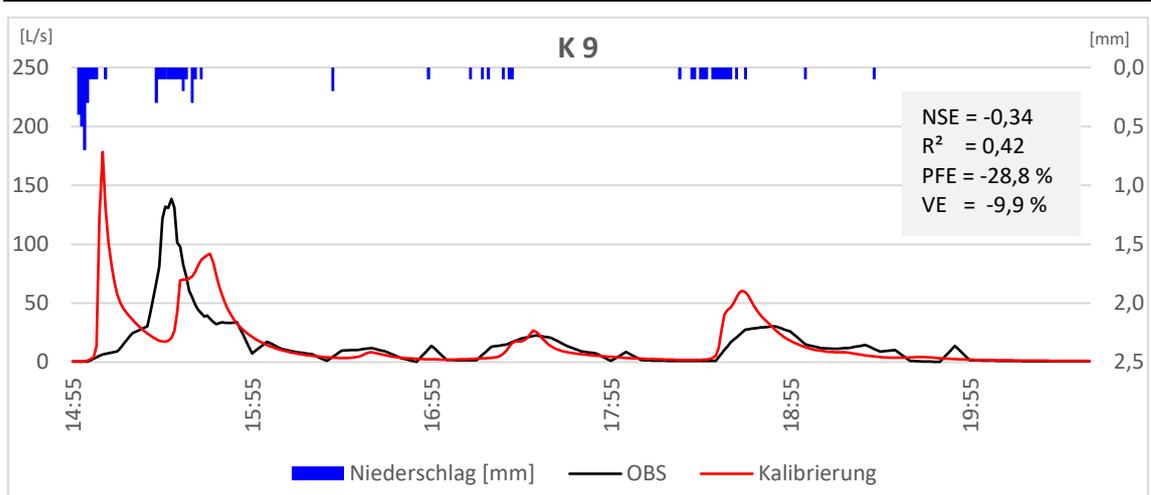


Abbildung 4-8: Kalibrierungsergebnis von K9 ( $h_N$ : 6,8 mm;  $i_N$ : 0,10 mm/5min)

In Anhang A werden die Graphen und Kennzahlen aller Kalibrierungsereignisse dargestellt.

In der folgenden Tabelle 4-8 finden sich die durch die Kalibrierung ergebnen Absolutwerte der Rauigkeit ( $n$ ), des Oberflächenspeichers ( $d_s$ ) und der Versiegelung ( $l$ ) der verschiedenen Oberflächenmaterialien. Die in Klammer neben den Kürzeln stehenden Werte zeigen die Veränderungen in Prozent gegenüber den Anfangswerten.

## Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 4-8: Kalibrierte Parameterwerte für die verschiedenen Oberflächenmaterialien

Oberflächenmaterial	Parameter (Änderung gegenüber Anfangswert)		
	$d_s$ (+50 %) [mm]	n (-30 %)	l (-20 % außer Dachflächen)
Asphalt	0,60	0,008	76
Beton	0,60	0,008	80
Bewuchs	7,50	0,455	0
Bewuchs/Wiese	5,25	0,245	0
Bitumenbahnen	0,90	0,008	100
Bitumenschindel	1,20	0,008	100
Blechdeckung	0,23	0,008	100
Eternit	0,90	0,008	100
Fels	0,30	0,350	80
Flachdach	7,50	0,021	100
Glas	0,15	0,006	100
Holz	0,75	0,070	72
Kopfsteinpflaster	1,50	0,014	72
Kunststoff	0,15	0,006	80
Natursteinpflaster	1,50	0,011	72
Rasengitter	3,75	0,021	32
Schotter	3,75	0,021	24
Tonziegel	1,50	0,008	100
Wald	11,25	0,468	0
Waschbeton	2,25	0,014	76
Wasser	0,00	0,700	0
Wiese	7,50	0,119	0
Wiese/Bewuchs	6,75	0,175	0

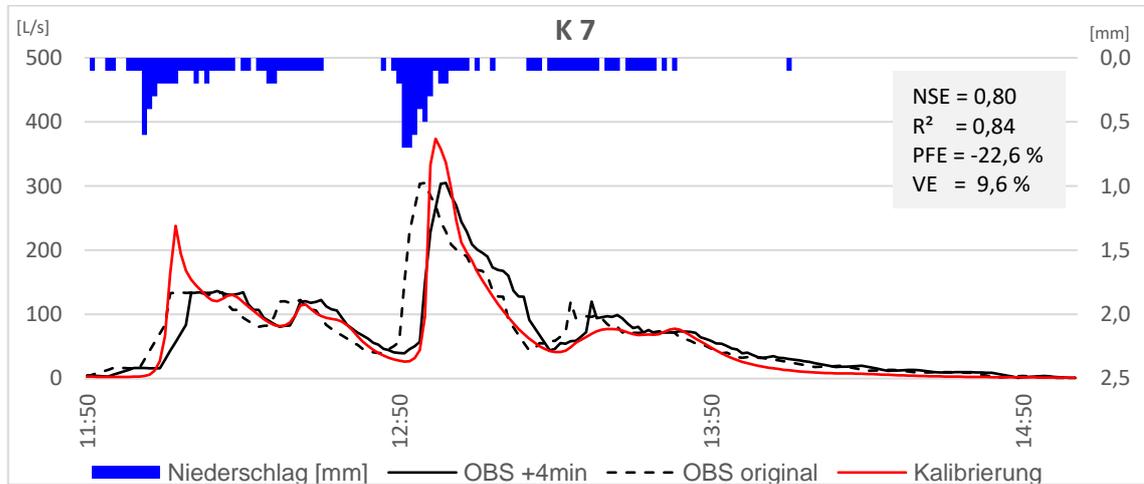
Der durch nach hinten verschieben der Zeitreihe des Durchflusses gefundene zeitliche Versatz, bei dem die beste Anpassung besteht, beträgt vier Minuten. Der im Modell ermittelte Abfluss tritt also „durchschnittlich“ vier Minuten später auf, als der gemessene. VE und PFE ändern sich durch dieses Vorgehen nur bei wenigen Ereignissen geringfügig. Durch das Verschieben lassen sich die in Tabelle 4-9 gezeigten Werte der Kennzahlen erreichen.

Tabelle 4-9: Kennzahlen nach der Kalibrierung und zeitlicher Verschiebung der Durchflussdaten

Kennzahl	Gesamt	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
NSE	0,67	0,59	0,86	0,73	0,27	0,30	0,73	0,80	0,71	-0,17
R <sup>2</sup>	0,79	0,88	0,92	0,87	0,48	0,66	0,86	0,84	0,87	0,25
PFE [%]		-18,6	-6,9	-44,4	-21,8	-50,4	-4,0	-22,6	-30,0	-28,8
VE [%]	14,5	-22,3	26,6	41,3	-4,4	34,7	20,9	9,6	5,8	-9,9

Der Mittelwert aller NSE beträgt mit dieser Verschiebung 0,54, der Mittelwert der Ereignisse mit NSE > 0,5 (6 von 9 Ereignisse) beträgt 0,74.

Durch das Verschieben der Durchflussmessung um vier Minuten tritt bei allen Ereignissen außer K5, K6 und K8 eine teils starke Verbesserung der NSE ein. Die Verschlechterung der NSE bei den drei genannten Ereignissen beläuft sich auf maximal 0,03. Ein positives Beispiel, bei dem auch optisch die Verbesserung gut zu erkennen ist, ist K7 (Abbildung 4-9).



**Abbildung 4-9:** K7 mit Zeitversatz (h<sub>N</sub>: 12,9 mm; i<sub>N</sub>: 0,34 mm/5min)

Der gefundene zeitliche Versatz resultiert vermutlich nicht aus einem falschen Modellaufbau, da auch durch die Kalibrierung eine so große Verschiebung des Abflussgraphen nicht erreicht werden konnte. Parameteränderungen, die den Abfluss früher einsetzen lassen würden, wie z. B. eine Verkürzung der Fließlängen oder eine Verringerung der Rauigkeiten ziehen außerdem eine noch stärker ausgeprägte Abflussspitze nach sich. Zunächst wurde vermutet, dass die Ursache nicht idente Uhrzeiten bei den Messgeräten der Niederschlags- und der Durchflussmessstationen sein könnten. Auf Nachfrage beim zuständigen Mitarbeiter der TU Graz konnte das jedoch ausgeschlossen werden, da die Uhrzeiten der Messeinrichtungen vom gleichen Server stammen und daher ident sein sollten. Eine weitere Ursache könnte sein, dass die Distanz zwischen Niederschlagsmessstation und Einzugsgebiet (ca. 650 m) eine derartige Verzögerung des Niederschlagsbeginns ausmacht. Das Einzugsgebiet ist außerdem dreiseitig umgeben von leichten Anhöhen, die ebenfalls ein spezielles Wettergeschehen hervorrufen und Auswirkungen auf das Eintreten von Niederschlag haben könnten. Diese Theorie würden auch die Ereignisse K4 (Abbildung 4-10) und K9 (Abbildung 4-8) unterstützen, bei denen je eine Abflussspitze in der Messung fehlt, was für eine sehr lokale Ausbreitung des Niederschlags sprechen könnte.

## Ergebnisse und Diskussion

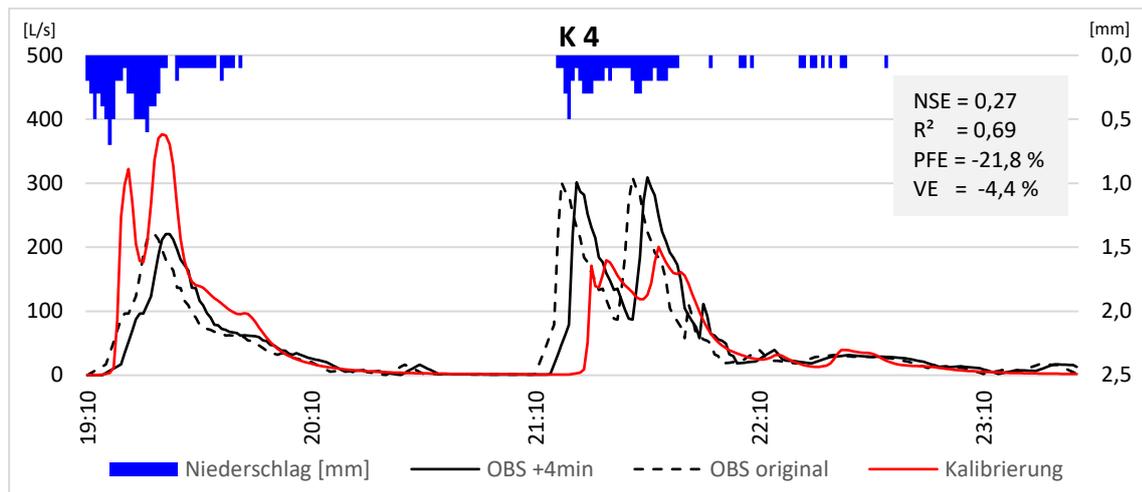


Abbildung 4-10: K4 mit vier Minuten Zeitversatz ( $h_N$ : 17,2 mm;  $i_N$ : 0,32 mm/5min)

### 4.4 Validierung

Die nach der Kalibrierung durchgeführte Validierung mit den zuvor ausgewählten 13 Validierungsereignissen lieferte die in Tabelle 4-10 ersichtlichen Ergebnisse.

Tabelle 4-10: Kennzahlen der Validierung

Kennzahl	Gesamt	V1	V2	V3	V4	V5	V6
NSE	0,74	0,11	0,64	0,66	0,59	0,88	0,79
R <sup>2</sup>	0,82	0,68	0,69	0,80	0,88	0,91	0,81
PFE		-8,3	-13,6	3,0	-33,1	2,7	24,3
VE [%]	29,6	56,7	7,9	33,6	-39,5	14,6	8,7
Kennzahl	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13
NSE	0,76	-0,90	0,26	0,31	0,44	0,51	0,57
R <sup>2</sup>	0,80	0,00	0,84	0,80	0,60	0,75	0,68
PFE	-14,1	-17,3	-92,7	-60,6	17,7	-48,7	-21,0
VE [%]	9,8	52,0	-134,7	18,4	34,7	28,7	44,7

Der Mittelwert aller NSE beträgt hierbei 0,43.

Es zeigt sich, dass in der Gesamtbetrachtung der Validierungsereignisse auch ohne eine Zeitverschiebung der Messdaten bis auf den Volumenfehler bessere Werte erreicht werden als bei den Kalibrierungsereignissen. Die Werte sind sogar besser, als jene der Kalibrierung mit der durchgeführten Verschiebung der Messung. Der Volumenfehler ist hier jedoch mit ca. 30 % etwa doppelt so groß wie bei den Kalibrierungsereignissen und der Mittelwert der NSE ist mit 0,43 genau gleich groß.

Bei einer Betrachtung der einzelnen Ereignisse fallen vor allem die negativen Ausreißer von V1, V8 und V9 auf. V1 weist mit 0,11 eine gerade noch positive NSE auf, jedoch bei einem sehr großen VE von 56,7 %. V8 hat mit einer NSE von -0,90 eine sehr schlechte Anpassung und auch der VE ist mit 52,0 % sehr groß. Bei der Betrachtung des Abflussgraphen von V8 zeigt sich ein eigenartiger

Verlauf der Durchflussmessung, sodass sich auch rein optisch eine schlechte Anpassung zwischen Messung und Simulation erkennen lässt (Abbildung 4-11). Zudem wurde noch Stunden nach der letzten Niederschlagsaufzeichnung (ca. 10 Uhr) ein erhöhter Durchfluss im Kanal gemessen (bis ca. 20 Uhr). V1 und V8 haben eine lange Dauer von je über 30 Stunden und einen eher geringen simulierten Maximaldurchfluss von unter 100 L/s (V1) bzw. unter 35 L/s (V8). Den größten VE mit -134,7 % hat das Ereignis V9, welches wiederum nur eine Dauer von ca. 1,5 h und einen maximalen simulierten Durchfluss von ca. 350 L/s hat. Eine sehr hohe Güte der Anpassung weist V5 mit einer NSE von 0,88 und  $R^2$  von 0,91 auf, trotz eines optisch erkennbaren späteren Eintretens des simulierten Abflusses (Abbildung 4-12).

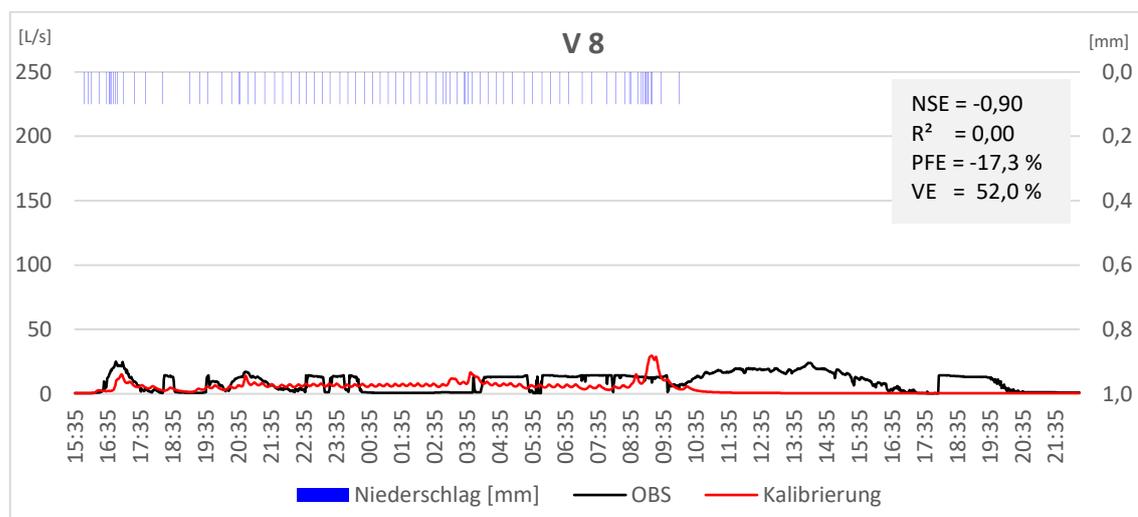


Abbildung 4-11: V8 ( $h_N$ : 8,3 mm;  $i_N$ : 0,02 mm/5min)

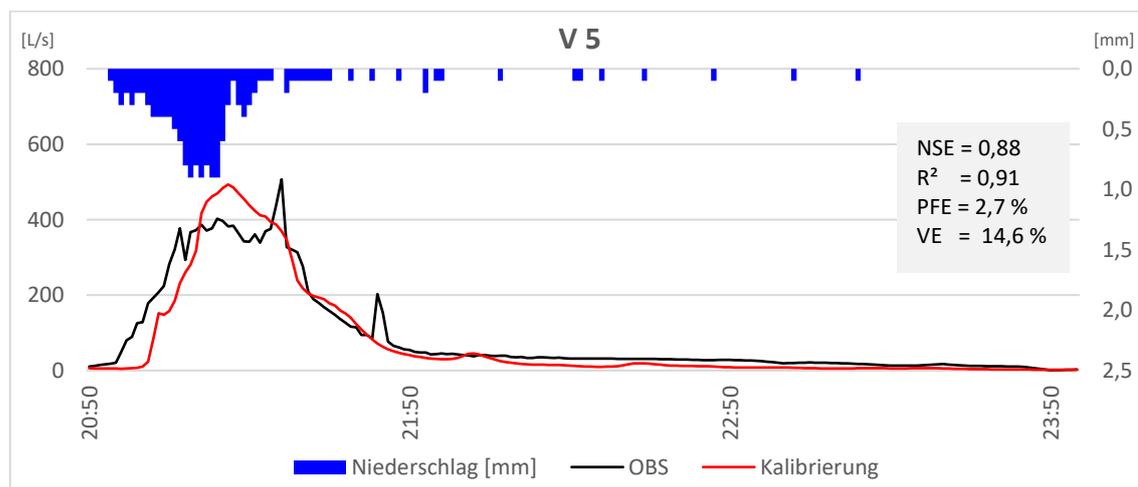


Abbildung 4-12: V5 ( $h_N$ : 15,5 mm;  $i_N$ : 0,42 mm/5min)

In Anhang B werden die Graphen und Kennzahlen aller Validierungsereignisse dargestellt.

Verschiebt man die Durchflussmessdaten um den in der Kalibrierung gefundenen Zeitversatz von vier Minuten nach hinten, kommen die in Tabelle 4-11 zu sehenden Werte zustande.

## Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 4-11: Kennzahlen der Validierung mit Zeitverschiebung um vier Minuten

Kennzahl	Gesamt	V1	V2	V3	V4	V5	V6
NSE	0,77	0,11	0,79	0,65	0,55	0,86	0,79
R <sup>2</sup>	0,84	0,69	0,81	0,79	0,85	0,89	0,81
PFE		-8,3	-13,6	3,0	33,1	2,7	24,3
VE [%]	29,6	56,7	7,8	33,6	-39,6	14,8	8,6
Kennzahl	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13
NSE	0,91	-0,90	-0,05	0,33	0,41	0,49	0,58
R <sup>2</sup>	0,93	0,00	0,68	0,81	0,57	0,73	0,69
PFE	-14,1	-17,3	-92,7	-60,6	17,7	-48,7	-21,0
VE [%]	9,6	52,0	-134,8	18,3	34,7	28,7	44,7

Der Mittelwert aller NSE beträgt hierbei 0,42.

Hier wird die Gesamt-NSE nur um 0,03 verbessert, im Gegensatz zur Zeitverschiebung nach der Kalibrierung, wo eine Verbesserung von 0,18 eintrat. Die Verbesserung bei R<sup>2</sup> beträgt nur 0,02 im Gegensatz zu 0,13 bei den Kalibrierungsereignissen.

Eine deutliche Verbesserung der NSE ist nur bei V2 (von 0,64 auf 0,79) und V7 (von 0,76 auf 0,91) zu erkennen.

### 4.5 Vergleich zu anderen Studien

Im Vergleich zu einer Studie von Krebs (2014) stellen sich die hier erreichten Ergebnisse der Kalibrierung (Gesamt-NSE: 0,49, NSE der Einzelereignisse: - 0,34 – 0,82) als durchwegs schlechter dar. In jener Studie, in der ebenfalls hochaufgelöste NA-Modelle von drei Einzugsgebieten in Lahti, Finnland, kalibriert wurden, wurden Gesamt-NSE von 0,97 (EG 2), 0,88 (EG 1) bzw. 0,80 (EG 3) erreicht. Die NSE der betrachteten Regenereignisse reichten dabei von 0,65 - 0,98 (EG 2), 0,60 – 0,94 (EG 1) bzw. 0,42 – 0,81 (EG 3). Die NSE bei der Validierung waren für alle drei betrachteten Einzugsgebiete geringer als bei der Kalibrierung, was im Vergleich zur vorliegenden Arbeit ein gänzlich anderes Verhalten darstellte. Hier zeigen die Kalibrierungsereignisse mit 0,49 eine deutlich schlechtere NSE als die der Validierung mit 0,74. Der Autor gibt außerdem an, dass das Modell bei größeren Regenereignissen bessere Anpassungen zwischen Messung und Simulation lieferte. Diese Aussage kann für das NA-Modell des EG Ziegelstraße nicht getätigt werden. Die in der Studie von Krebs (2014) verwendeten Niederschlagsdaten lagen ebenfalls in einer 1-minütigen Auflösung vor und wurden von einer Messstation am Auslass des EG 2 aufgezeichnet. Es stellte sich heraus, dass sich die Güte der Anpassung in Form der NSE mit dem Abstand der Niederschlagsmessung zum Einzugsgebiet verschlechterte. Diese Aussage könnte auch eine Begründung für die schlechteren NSE bei der Kalibrierung des EG Ziegelstraße sein. Die Distanz zwischen Niederschlagsmessung und EG beträgt in diesem Fall aber nur etwa 0,65 km, im Vergleich zu 1,0 km

(EG 1) bzw. 4,9 km (EG 3) bei der finnischen Studie. Betrachtet man die Topographie von Lahti, erkennt man, dass zwischen Niederschlagsmessung und EG 1 praktisch keine Anhöhen liegen. Zwischen der Messung und EG 3 liegt jedoch, ähnlich wie im Falle des EG Ziegelstraße, ein kleiner Hügel mit einer Höhe von ca. 40 m.

Eine Studie, die genau diesen Einfluss der Niederschlagsmessung auf die Qualität der Simulationsergebnisse beschreibt erstellte Niemi (2017) für ein Einzugsgebiet in Helsinki, Finnland. Darin werden auf das Modell die Niederschlagsdaten von Messstellen mit unterschiedlichen Distanzen zum Einzugsgebiet als Belastung angesetzt und die damit erreichten NSE und VE verglichen. Es zeigte sich klar, dass die Daten der Messeinrichtung, die sich direkt im EG befand, die besten Ergebnisse lieferten. Mit diesen konnte der geringste VE sowie die höchste NSE erreicht werden. Weiters zeigten die berechneten Kennzahlen bei Betrachtung der einzelnen Regenereignisse die geringste Streuung. Es konnten bei allen Ereignissen eine NSE von über 0,7 und ein VE zwischen 0 und maximal ca. 30 % erreicht werden. Mit der Belastung der Niederschlagsdaten von einem etwa 2,5 km entfernten Regenschreiber, verschlechterten sich sowohl die Werte des VE, als auch der NSE. Der VE lag damit zwischen -10 % und +60 % für die einzelnen Ereignisse, die NSE sank auf Werte zwischen 0,4 und 0,85.

# 5 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

In früheren Untersuchungen wurden bereits Siedlungsgebiete mit Trennkanalisation als relevanter Eintragspfad von bestimmten Schadstoffen in Fließgewässer identifiziert. Diese Stofffrachten im Niederschlagsabfluss sollen in Zukunft für weitere Modellierungsaufgaben oder wasserwirtschaftliche Maßnahmenplanungen quantifiziert werden. Dafür muss als erster Schritt ein Modell eines geeigneten Einzugsgebiets erstellt werden und danach mit gemessenen Daten wie Niederschlag, Durchfluss und Stoffkonzentrationen kalibriert und validiert werden.

Ein Grundstein solcher zukünftigen Aufgabe wurde in dieser Masterarbeit mit der hochaufgelösten Digitalisierung der Oberflächen des Einzugsgebiets Graz-Ziegelstraße und der Erstellung eines hydrodynamischen Modells für die Simulation des hydraulischen Abflusses gelegt. Durch den gemessenen Durchfluss am Auslass eines NW-Kanals und zeitgleich gemessenen Niederschlagsdaten der Messstelle Prochaskagasse in der Nähe des Einzugsgebietes konnte der Niederschlagsabfluss des Zeitraumes Juli bis Dezember 2017 simuliert und das Modell darauf kalibriert und validiert werden.

Beginnend bei den Ergebnissen der Oberflächenaufnahme erweist sich das Einzugsgebiet durch den Versiegelungsgrad von ca. 20 % und einem großen Grün- und Waldflächenanteil von ca. 80 % als typisches städtisches Randgebiet. Der große Grünflächenanteil und die aufgelöste Siedlungsstruktur machen den Modellaufbau schwierig, da bei jeder Fläche zu eruieren wäre, ob deren Abflüsse auch in den betrachteten Kanal fließen. Genaue Informationen über die Kanalschlüsse der Liegenschaften würden in diesem Fall ungemein helfen. Ohne diese kann das Modell zwar auch funktionieren, doch wären mit diesen Informationen gewisse Annahmen und Vereinfachungen nicht mehr nötig.

Durch die Tatsache, dass die Durchflussmessung an nur einer Stelle stattfindet, im vorliegenden Fall am Auslass des Kanals in den Stufenbach, lassen sich keine genaueren Rückschlüsse über die Dynamik im Kanalnetz bilden. Das Einzugsgebiet muss somit immer als Ganzes betrachtet werden und lokale Änderungen des Modells, etwa bei der Kalibrierung der Modellparameter, sind daher nicht sinnvoll.

Die Anpassung der simulierten Werte an die Messung des Durchflusses erweist sich auch nach der Kalibrierung als relativ inkonsistent und zeigt einige negative Ausreißer. Diese sind jedoch teilweise auf den gefundenen zeitlichen Versatz zwischen Messung und Simulation oder auch auf Unstetigkeiten in der Durchflussmessung zurückzuführen. Die Güte der Anpassung war nach dem Verschieben der Abflussmessungen um vier Minuten um einiges besser. Die dadurch erzielte starke Verbesserung zeigt die Sensitivität des „Parameters Zeit“ bzw. der

Wahl der Aufzeichnungszeitschritte von Niederschlags- und Durchflussdaten sowie die Wichtigkeit, Niederschlagsdaten am besten direkt im Einzugsgebiet aufzuzeichnen. Wenn die Messdaten z. B. in fünfminütiger Auflösung vorhanden gewesen wären, wäre dieser Versatz möglicherweise nicht so stark ins Gewicht gefallen. Trotz Verschieben der Durchflussdaten bleiben im Vergleich zur Simulation fehlende Abflussspitzen in der Messung vorhanden, die bei Betrachtung der Niederschlagsdaten jedoch eindeutig auftreten müssten. Dieses Problem lässt sich eventuell durch eine zu große Distanz zwischen Niederschlagsmessung und Einzugsgebiet (650 m) und der leichten Tallage des Einzugsgebietes erklären, welche eine spezielle Wetterlage mit sich bringen könnte.

Die Stärke des im Rahmen der Masterarbeit aufgebauten Modells liegt eindeutig in der hohen Auflösung der Teilflächen, was das Ziel, später damit Spurenstofffrachten abschätzen zu können, vereinfachen kann. Auch eine wasserwirtschaftliche Maßnahmenplanung, zumindest was das Abflussvolumen und nicht dessen Inhaltsstoffe anbelangt, lässt sich bereits mit dem Modell in diesem Bearbeitungsstand umsetzen, da damit bereits ein relativer Vergleich zwischen Szenarien erstellt werden könnte. Die Ergebnisse, die mit den zur Verfügung stehenden Daten erzielt wurden, sind durchaus verbesserungsfähig. Dafür müssten zuallererst Niederschlagsdaten von einer repräsentativen Stelle im Einzugsgebiet verwendet werden. Sehr gut dafür geeignet wäre der Regenschreiber am Hochwasserrückhaltebecken Stufenbach, welcher seit Herbst 2017 Daten aufzeichnet und relativ zentral im EG liegt. Aufgrund technischer Probleme an diesem Regenschreiber standen mir leider seine Messdaten für die Bearbeitung dieser Masterarbeit noch nicht zur Verfügung. Auch bei der Durchflussmessung sollte versucht werden, konstantere Daten zu erhalten und Aussetzer oder Unstetigkeiten in den Messdaten, wie sie bei einigen betrachteten Regenereignissen zu erkennen waren, so gut als möglich zu vermeiden. Mehrere Durchflussmessungen, beispielsweise an den wichtigeren Knotenpunkten des Kanalnetzes, würden außerdem eine genauere Abbildung bzw. Kontrolle der Abflussdynamik in den Halungen ermöglichen.

In Zukunft wird es mit dem aufgebauten hydrodynamischen Modell für das Einzugsgebiet Ziegelstraße auch möglich sein, die in das Gewässer eingeleiteten AFS-Frachten abschätzen zu können. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die vorgeschlagenen Verbesserungen so gut als möglich umgesetzt und in das Modell integriert werden. Die Grundlage dafür wurde mit dieser Masterarbeit geschaffen.

## Literaturverzeichnis

- Amt der NÖ Landesregierung, Gruppe Wasser (2010) *Naturnahe Oberflächenentwässerung für Siedlungsgebiete*, St. Pölten, Österreich.
- Amt der Stmk. Landesregierung (2012) *Leitfäden für Oberflächenentwässerung 2.0*, Graz, Österreich.
- ATV-DVWK (2004) Merkblatt ATV-DVWK-M 165 Anforderungen an Niederschlag-Abfluss-Berechnungen in der Siedlungsentwässerung.
- Bundeskanzleramt der Republik Österreich (1959) *Wasserrechtsgesetz, Fassung vom 20.03.2018*, [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/10010290/WRG%201959%2c%20Fassung%20vom%2020.03.2018.pdf>.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (1996) *Verordnung über die Allgemeine Begrenzung von Abwasseremissionen in Fließgewässer und öffentliche Kanalisationen (AAEV), Fassung vom 20.03.2018*, [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/10010977/AAEV%2c%20Fassung%20vom%2020.03.2018.pdf>.
- Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2000) *EU-Wasserrahmenrichtlinie, Fassung vom 01.01.2014*, [online] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0060-20140101&from=EN>,
- Clara M., Ertl T., Gruber G., Giselbrecht G., Hofer T., Humer F., Kretschmer F., Koll L., Scheffknecht C., Weiß S., & Windhofer G. (2014) *Spurenstoffemissionen aus Siedlungsgebieten und von Verkehrsflächen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft*, Wien, Österreich.
- Clara M., Gruber G., Hofer T., Hohenblum P., Kittlaus S., Lenz K., Maier R., Scheffknecht C., & Zessner M. (2018) *TEMPEST - Erfassung von Emissionen ausgewählter Spurenstoffe aus Kanalsystemen, Handlungsoptionen zu deren Minderung und Optimierung einer alternativen Nachweismethode für Kunststoffpartikeln in Wasserproben - Zwischenbericht*, Wien, Österreich.
- Computational Hydraulics Int. (2018) [online] <https://support.chiwater.com/> (Zugegriffen am 21.03.2018).
- Deletic A., Dotto C. B. S., McCarthy D. T., Kleidorfer M., Freni G., Mannina G., Uhl M., Henrichs M., Fletcher T. D., Rauch W., Bertrand-Krajewski J. L., & Tait S. (2011) Assessing uncertainties in urban drainage models. *Physics and Chemistry of the Earth*, **42–44**, 3–10.
- Dierschke M. (2014) Methodischer Ansatz zur Quantifizierung von Feinpartikeln (PM63) in Niederschlagsabflüssen in Abhängigkeit von der Herkunftsfläche, Kaiserslautern, Deutschland.
- DWA (2011) Merkblatt DWA-M 181 - Messung von Wasserstand und Durchfluss in Entwässerungssystemen.

- Endress+Hauser (2018) Vollautomatische Probenahme Liquiport 2010 CSP44. [online] <https://www.at.endress.com/de/messgeraete-fuer-die-prozesstechnik/fluessigkeitsanalyse-produktuebersicht/tragbarer-probennehmer-csp44> (Zugegriffen 21. März 2018).
- ESRI (2018) ArcGIS for Desktop. [online] <http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/main/map/what-is-arcmap-.htm> (Zugegriffen 13. März 2018).
- Geographisches Informationssystem - Land Steiermark (2018) [online] <http://www.gis.steiermark.at/> (Zugegriffen 13. März 2018).
- IPCC (2014) Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A.Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.
- Krapfenbauer T. (2006) *Bautabellen*, Jugend&Volk, Wien.
- Krebs G. (2016) *Spatial Resolution and Parameterization of an Urban Hydrological Model - Requirements for the Evaluation of Low Impact Development Strategies at the City Scale*, Aalto University, Helsinki.
- Krebs G. (2014) Spatial resolution consideration for urban hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, **512**, 482–497.
- Matzinger A., Riechel, M, Remy C., Schwarzmüller H., Rouault P., Schmidt M., Offermann M., Strehl C., Nickel D., Sieker H., Pallasch M., Köhler M., Kaiser D., Möller C., Büter B., Leßman D., von Tils R., Säumel I., Pille L., Winkler A., Bartel H., Heise S., Heinzmann B., Joswig K., Rehfeld-Klein M., & Reichmann B. (2017) *Zielorientierte Planung von Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung - Ergebnisse des Projektes KURAS*, Berlin, Deutschland. [online] [http://www.kuras-projekt.de/fileadmin/Dokumenten\\_Verwaltung/pdf/20170428\\_Leitfaden\\_Regenwasser\\_full\\_final\\_med\\_res.pdf](http://www.kuras-projekt.de/fileadmin/Dokumenten_Verwaltung/pdf/20170428_Leitfaden_Regenwasser_full_final_med_res.pdf) (Zugegriffen 20. März 2018).
- Muschalla D., Sulzbacher R. M., Leimgruber J., Maier R., Ertl T., Neunteufel R., Kretschmer F., Kleidorfer M., Tscheikner-Gratl F., Fellner M., & Fyrer D. (2015) *Auf effizientem Wege von den Daten zum Modell (DATMOD) - Sanierungs- und Anpassungsplanung von kleinen und mittleren Kanalnetzen*, Ministerium für ein lebenswertes Österreich, Wien, Österreich. [online] [https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user\\_upload/media/umweltfoerderung/Dokumente\\_Betriebe/Wasser\\_Betriebe/Studien\\_Wasserwirtschaft/DATMOD\\_Leitfaden\\_160217.pdf](https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user_upload/media/umweltfoerderung/Dokumente_Betriebe/Wasser_Betriebe/Studien_Wasserwirtschaft/DATMOD_Leitfaden_160217.pdf) (Zugegriffen 20. März 2018).
- Nash J. E. & Sutcliffe J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**, 282–290.
- Niemi T. (2017) *Improved Precipitation Information for Hydrological Problem Solving*, Aalto University, Helsinki.

- OEWAV (2009) ÖWAV-Regelblatt 11 - Richtlinien für die abwassertechnische Berechnung und Dimensionierung von Abwasserkanälen, Wien, Österreich.
- OEWAV (2003) ÖWAV-Regelblatt 35 - Behandlung von Niederschlagswässern, Wien, Österreich.
- Österreichisches Normungsinstitut (2005) ÖNORMEN 872 - Wasserbeschaffenheit - Bestimmung suspendierter Stoffe - Verfahren durch Abtrennung mittels Glasfaserfilter.
- Rawls W. J., Brakensiek D. L., & Miller N. (1983) Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, **109**, 62–70.
- Rossman L. A. (2017) *SWMM Reference Manual Volume II - Hydraulics*, EPA, Cincinnati, Ohio, USA. [online] <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (Zugegriffen 5. Februar 2018).
- Rossman L. A. (2015) *SWMM User's Manual Version 5.1*, EPA, Cincinnati, Ohio, USA. [online] <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (Zugegriffen 5. Februar 2018).
- Rossman L. A. & Huber W. C. (2016) *SWMM Reference Manual Volume I - Hydrology*, EPA, Cincinnati, Ohio, USA. [online] <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (Zugegriffen 5. Februar 2018).
- Hargreaves G.H., Samani Z.A. (1985) Reference Crop Evapotranspiration from Temperature, zitiert in Rossman L. A. & Huber W. C. (2016) *SWMM Reference Manual Volume I - Hydrology*, EPA, Cincinnati, Ohio, USA.
- Hargreaves G.H., Merkle G.P. (1998) Irrigation Fundamentals zitiert in Rossman L. A. & Huber W. C. (2016) *SWMM Reference Manual Volume I - Hydrology*, EPA, Cincinnati, Ohio, USA.
- Green W.H. und Ampt G.A., *Studies on Soil Physics*, 1. The Flow of Air and Water Through Soils zitiert in Rossman L. A. & Huber W. C. (2016) *SWMM Reference Manual Volume I - Hydrology*, EPA, Cincinnati, Ohio, USA.
- Umweltbundesamt (2018) [online] [http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/raumordnung/rp\\_flaecheninanspruchnahme/bodenversiegelung/](http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/raumordnung/rp_flaecheninanspruchnahme/bodenversiegelung/) (Zugegriffen am 9.5.2018).
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2018) *Klimaatlas Steiermark*. [online] [http://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/10728281\\_16178332/f2121802/7\\_WINDVERH%C3%84LTNISSE%20-%20Vers\\_2.0.pdf](http://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/10728281_16178332/f2121802/7_WINDVERH%C3%84LTNISSE%20-%20Vers_2.0.pdf) (Zugegriffen 13. März 2018).

## **Anhang**

In den folgenden Anhängen A und B finden sich die Abflussgraphen aller Kalibrierungsereignisse (Anhang A) und Validierungsereignisse (Anhang B).

# Anhang A

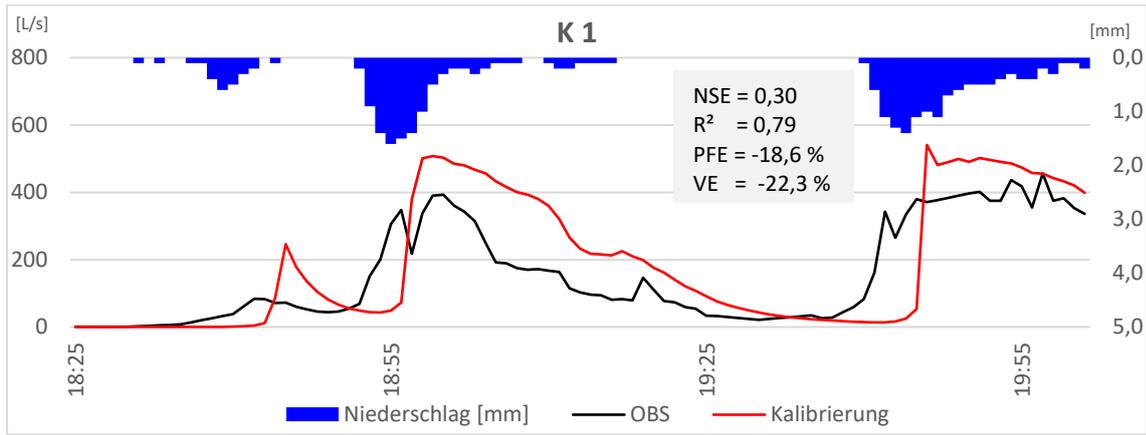


Abbildung A- 1: K1 (h<sub>N</sub>: 29,1 mm; i<sub>N</sub>: 0,69 mm/5min)

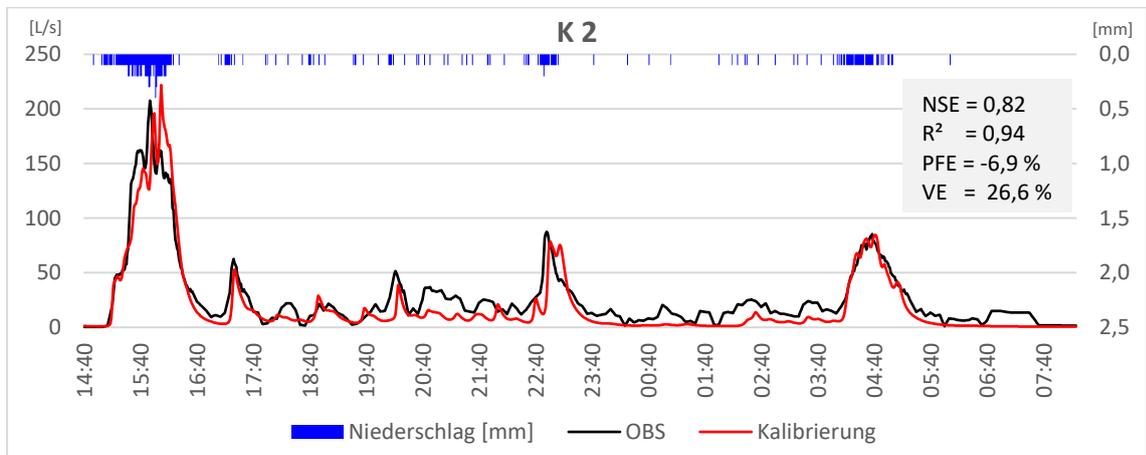


Abbildung A- 2: K2 (h<sub>N</sub>: 23,7 mm; i<sub>N</sub>: 0,11 mm/5min)

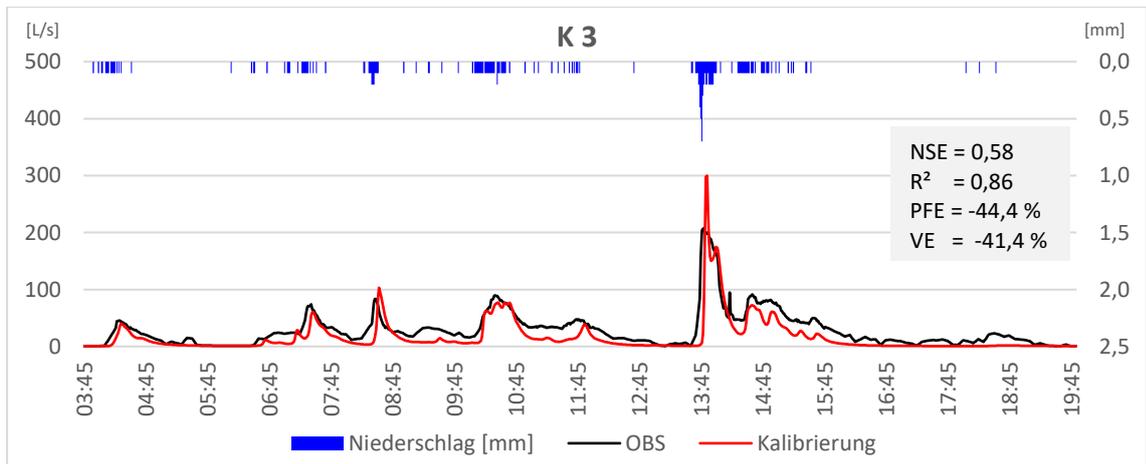
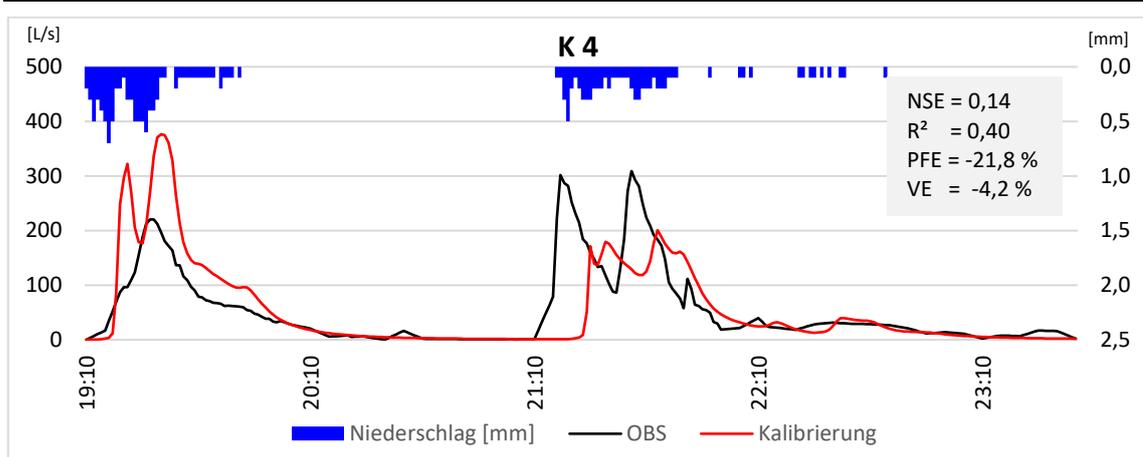
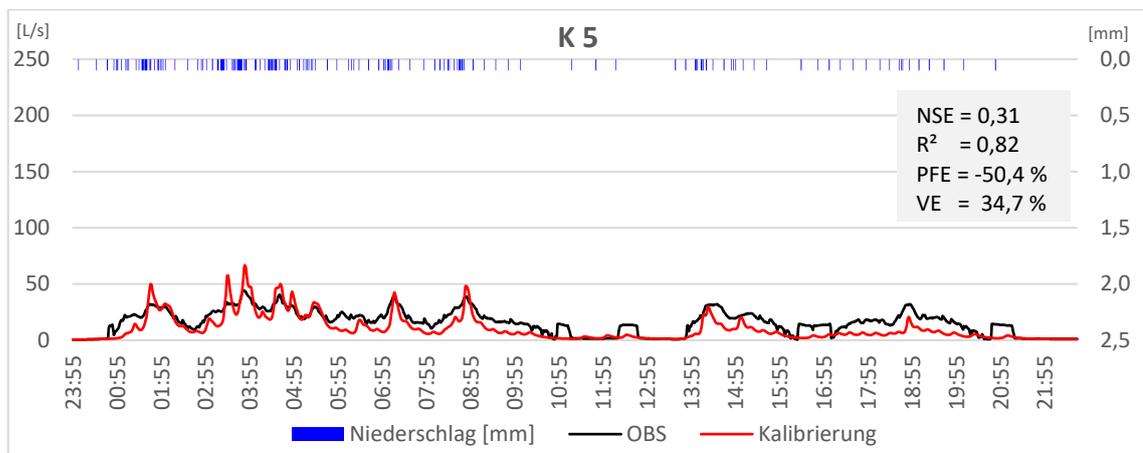
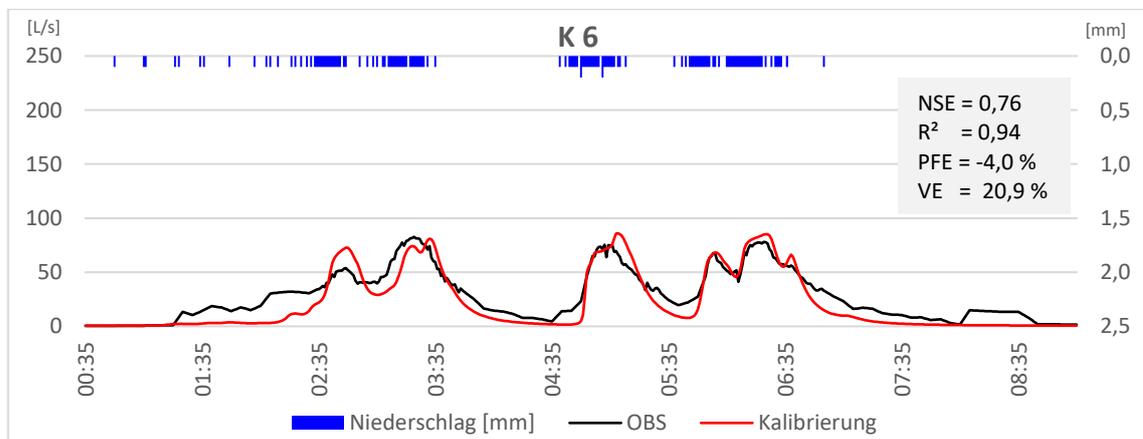
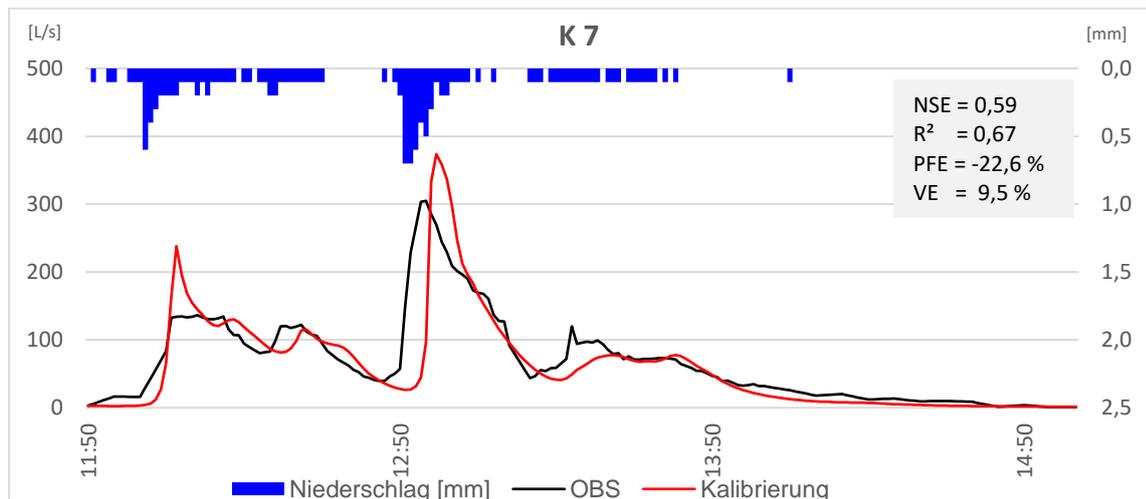


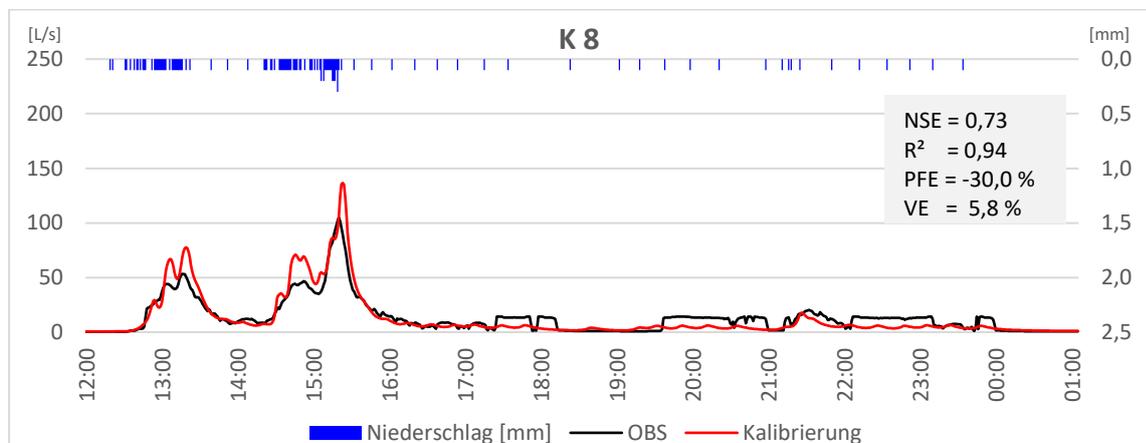
Abbildung A- 3: K3 (h<sub>N</sub>: 18,6 mm; i<sub>N</sub>: 0,10 mm/5min)

Abbildung A- 4: K4 (h<sub>N</sub>: 17,2 mm; i<sub>N</sub>: 0,32 mm/5min)Abbildung A- 5: K5 (h<sub>N</sub>: 15,7 mm; i<sub>N</sub>: 0,06 mm/5min)Abbildung A- 6: K6 (h<sub>N</sub>: 13,2 mm; i<sub>N</sub>: 0,13 mm/5min)

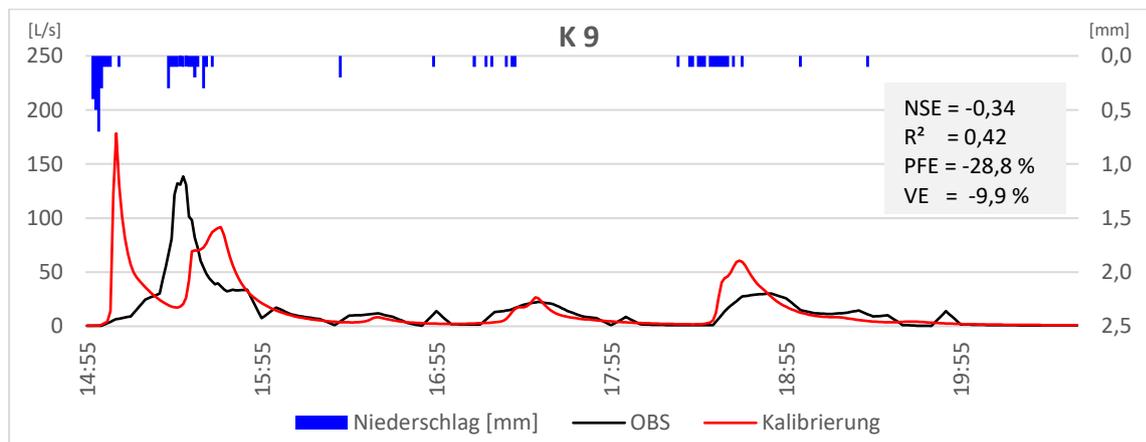
# Anhang



**Abbildung A- 7: K7 (hN: 12,9 mm; iN: 0,34 mm/5min)**

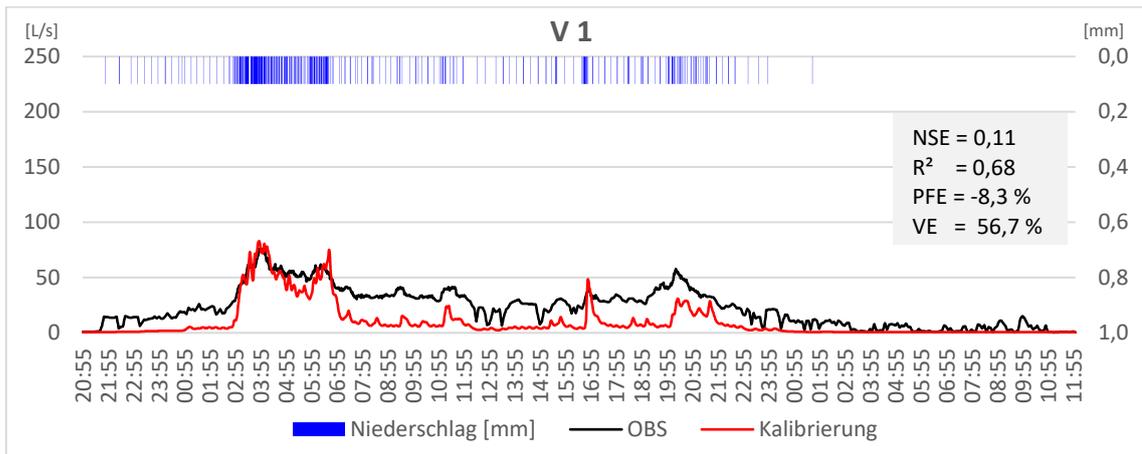
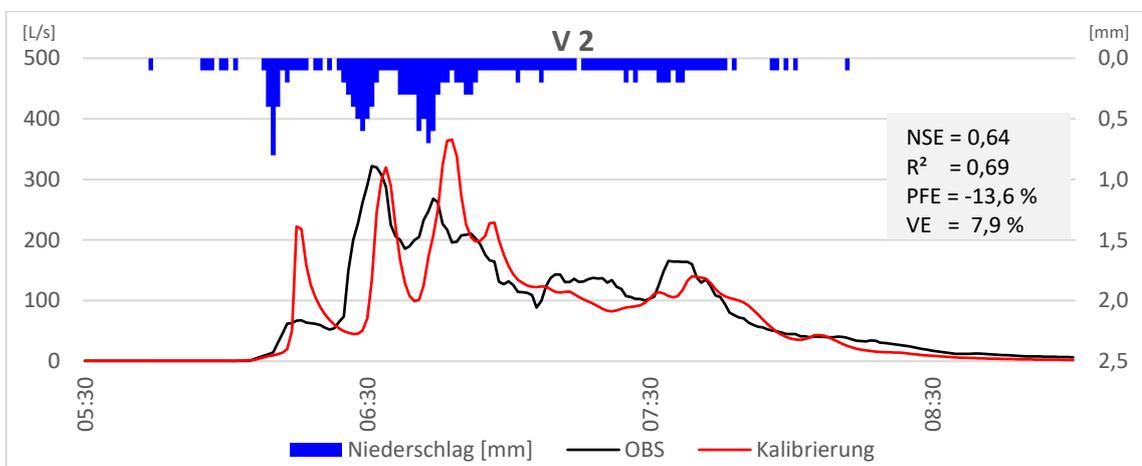
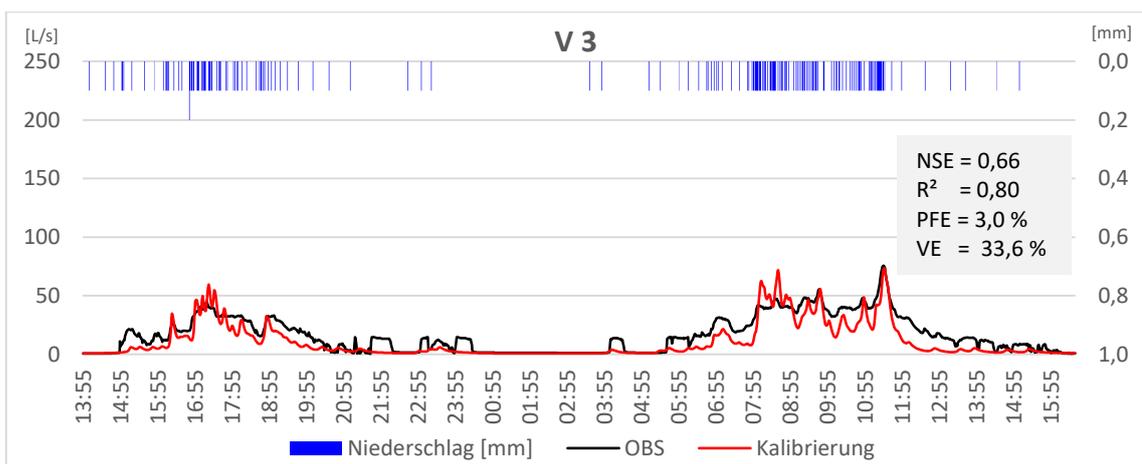


**Abbildung A- 8: K8 (hN: 11,4 mm; iN: 0,07 mm/5min)**



**Abbildung A- 9: K9 (hN: 6,8 mm; iN: 0,10 mm/5min)**

## Anhang B

Abbildung B- 1: V1 (h<sub>N</sub>: 26,7 mm; i<sub>N</sub>: 0,06 mm/5min)Abbildung B- 2: V2 (h<sub>N</sub>: 19,3 mm; i<sub>N</sub>: 0,46 mm/5min)Abbildung B- 3: V3 (h<sub>N</sub>: 18,6 mm; i<sub>N</sub>: 0,06 mm/5min)

# Anhang

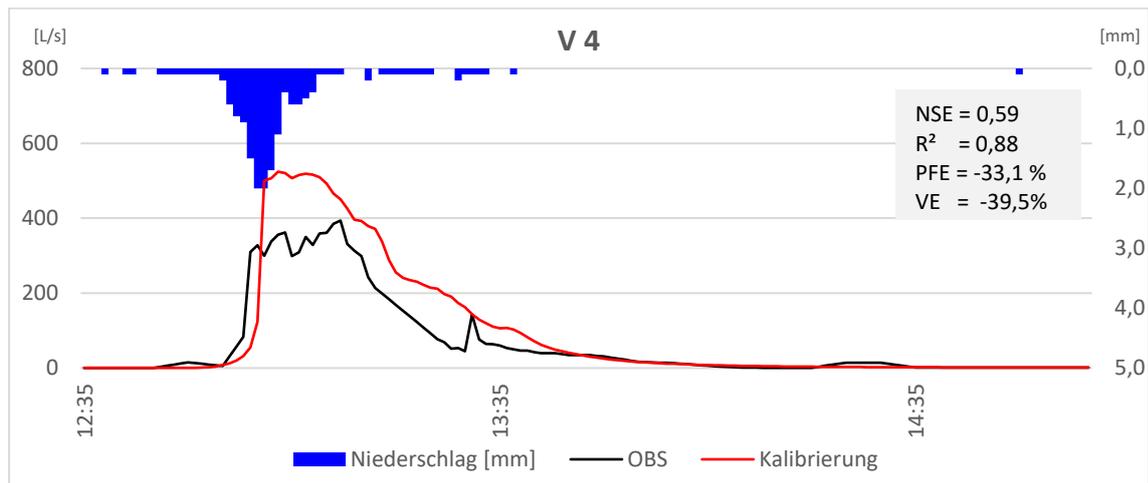


Abbildung B- 4: V4 (h<sub>N</sub>: 16,7 mm; i<sub>N</sub>: 0,58 mm/5min)

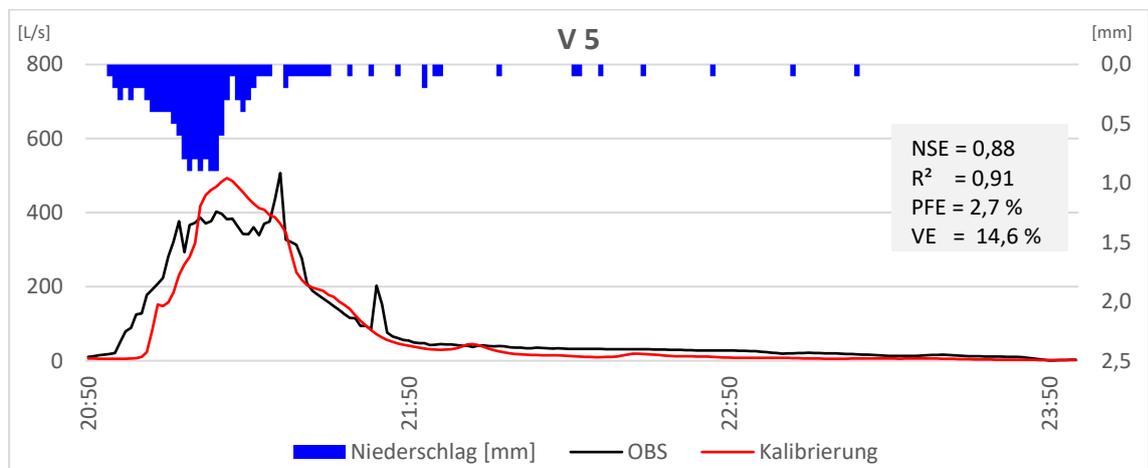


Abbildung B- 5: V5 (h<sub>N</sub>: 15,5 mm; i<sub>N</sub>: 0,42 mm/5min)

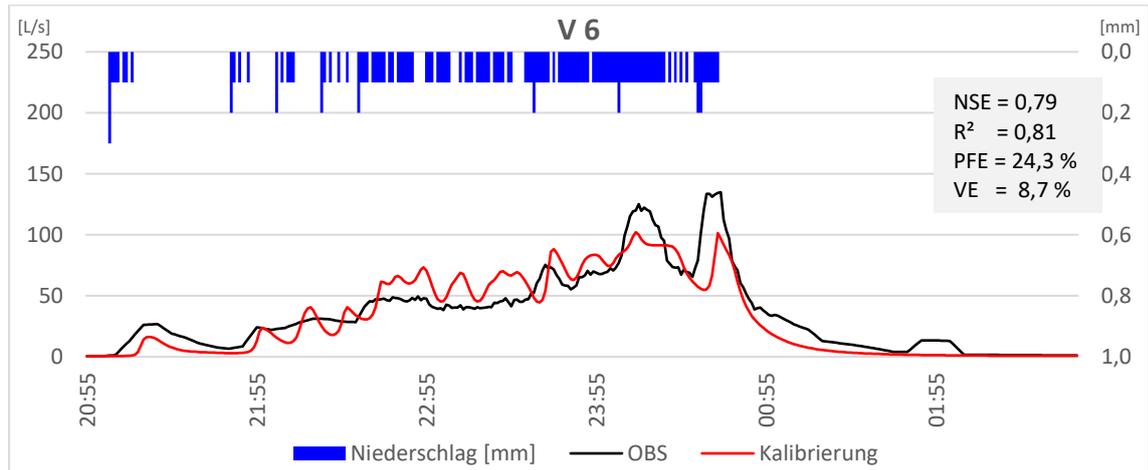


Abbildung B- 6: V6 (h<sub>N</sub>: 13,1 mm; i<sub>N</sub>: 0,19 mm/5min)

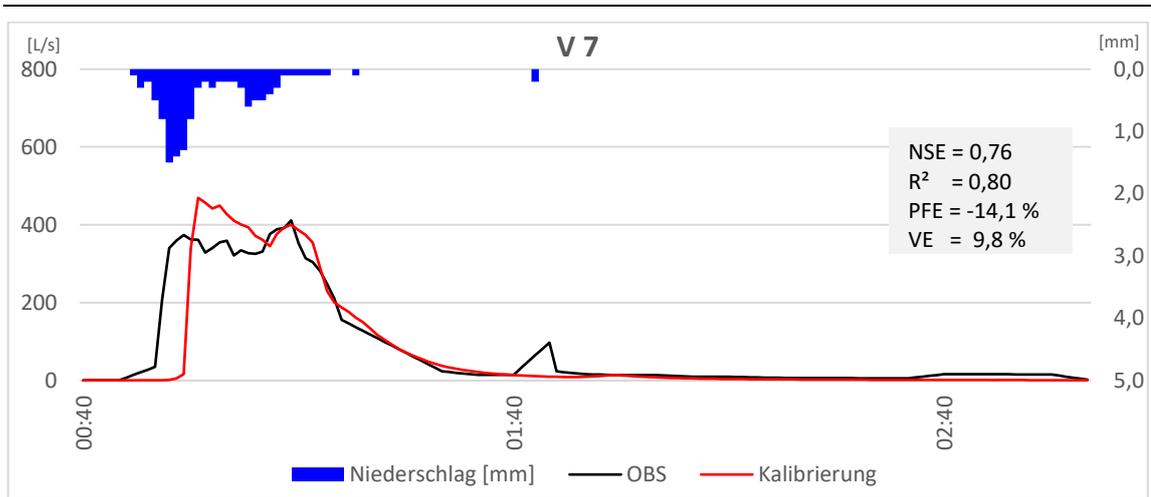


Abbildung B- 7: V7 ( $h_N$ : 11,9 mm;  $i_N$ : 0,43 mm/5min)

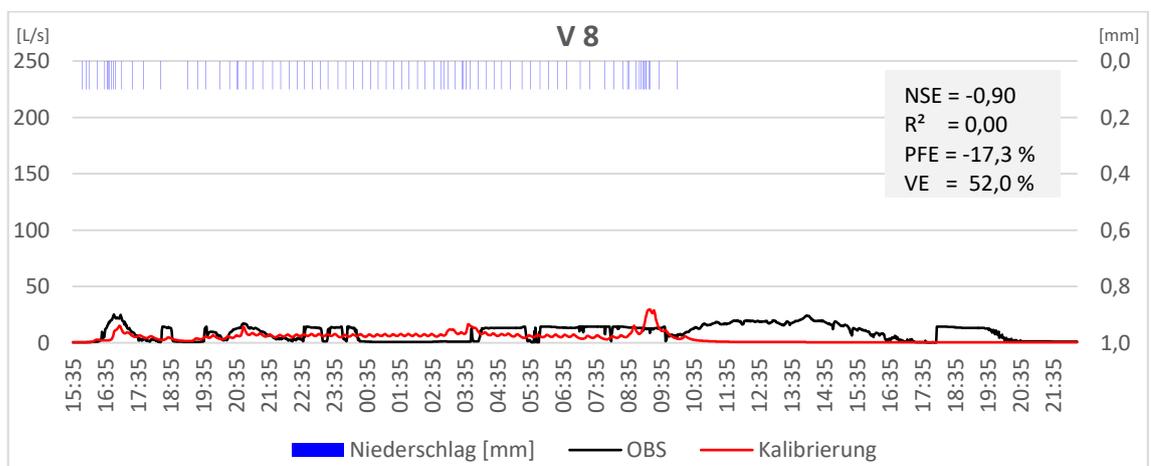


Abbildung B- 8: V8 ( $h_N$ : 8,3 mm;  $i_N$ : 0,02 mm/5min)

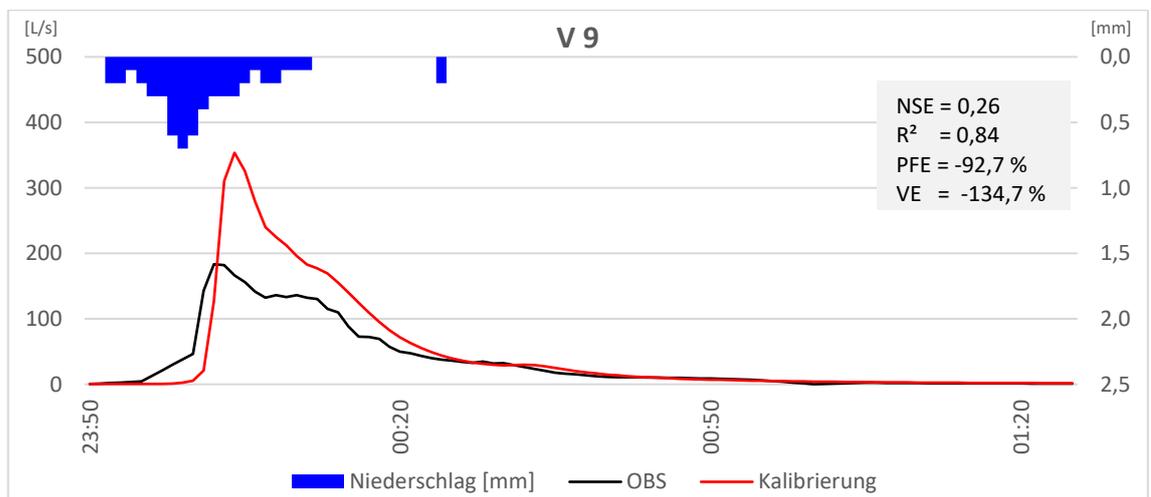
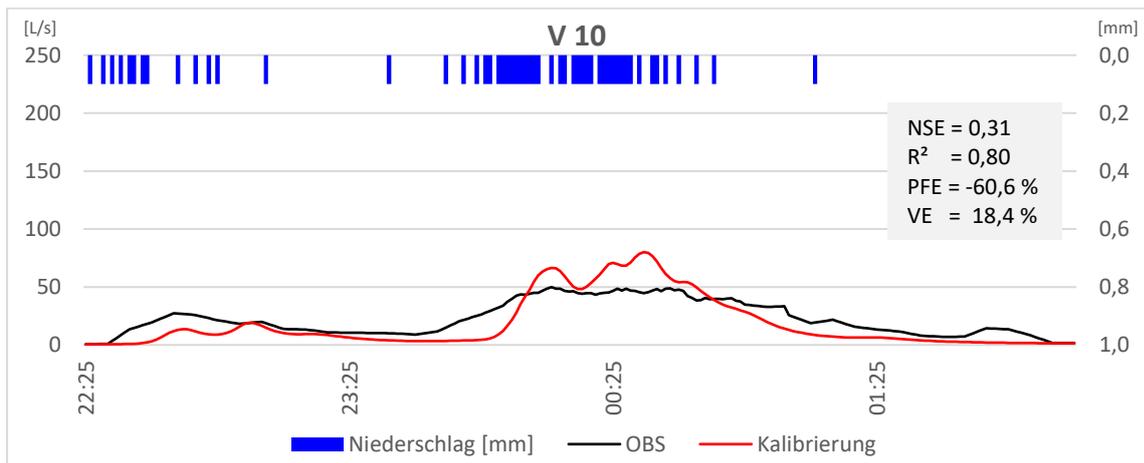
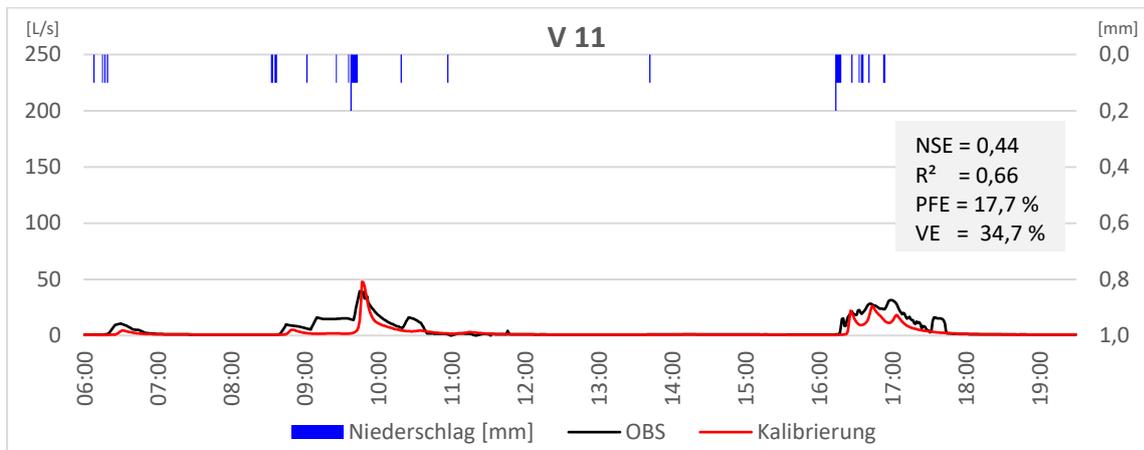


Abbildung B- 9: V9 ( $h_N$ : 5,7 mm;  $i_N$ : 0,30 mm/5min)

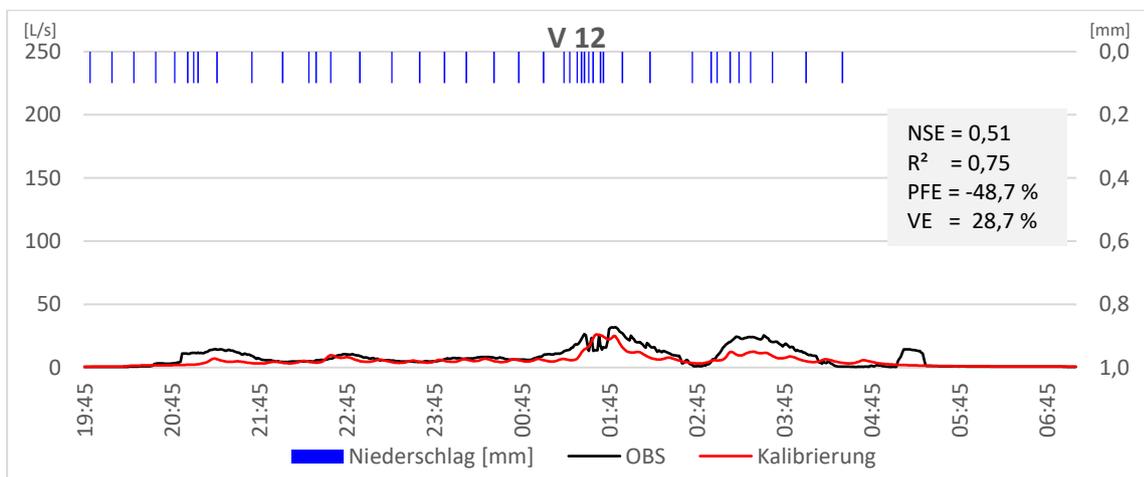
# Anhang



**Abbildung B- 10: V10 (h<sub>N</sub>: 5,30 mm; i<sub>N</sub>: 0,12 mm/5min)**



**Abbildung B- 11: V11 (h<sub>N</sub>: 4,2 mm; i<sub>N</sub>: 0,03 mm/5min)**



**Abbildung B- 12: V12 (h<sub>N</sub>: 3,50, mm; i<sub>N</sub>: 0,06 mm/5min)**

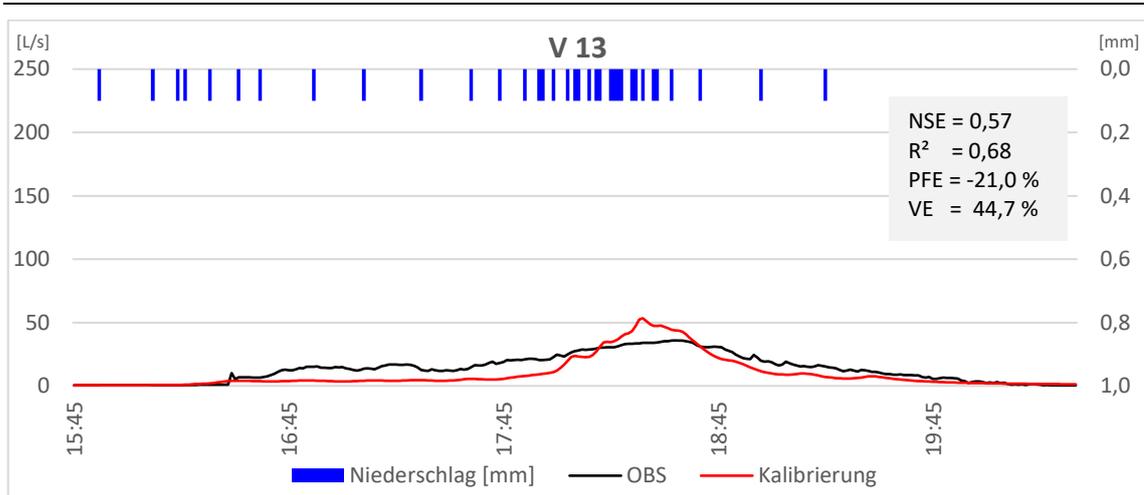


Abbildung B- 13: V13 (h<sub>N</sub>: 3,4 mm; i<sub>N</sub>: 0,02 mm/5min)