



Markus Kaser, BSc

**Optimierung von Grüner Infrastruktur auf  
Einzugsgebietsgröße mit einem hochdetaillierten  
Oberflächenmodell**

Fallbeispiel: Waagner-Biro Viertel, Graz

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur/In

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Muschalla

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Gerald Krebs, D.Sc.

Dipl.-Ing. Roman Maier, BSc

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, März 2018



Kontakt:  
Markus Kaser  
markuskaser@gmx.at

## **EIDESSTATTLICHE 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**

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei jenen bedanken, die mich während meiner Studienzzeit unterstützt haben, und dazu beigetragen haben, die vorliegende Masterarbeit zu verfassen.

Ich bedanke mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Muschalla für die Betreuung meiner Masterarbeit. Außerdem möchte ich mich vielmals bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. Gerald Krebs und Herrn Dipl.-Ing. Roman Maier, BSc für die Hilfe beim Verfassen dieser Arbeit bedanken.

Besonderer Dank gilt meinem langjährigen Freund Markus Pijavec, der mir mit viel Hilfsbereitschaft während meinem Studium beigestanden ist.

Ein großer Dank gebührt all meinen FreundInnen und KollegInnen aus dem Stahlbauzeichensaal, mit denen ich eine schöne gemeinsame Studienzzeit verbracht habe.

Ich bedanke mich herzlich bei meiner Freundin Noelia, die mich während meines Studiums unterstützt und motiviert hat und viel Abwechslung in mein Leben bringt.

Ein ganz besonderer Dank gebührt selbstverständlich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, Maria und Günter für die Unterstützung vor und während meiner Studienzzeit in Graz.



## Kurzfassung

Durch die voranschreitende Urbanisierung kommt es zu einer Zunahme der Oberflächenversiegelung, die zusammen mit der kanalisierten Ableitung, in den aufnehmenden Gewässern wasserwirtschaftlich-ökologische Nachteile, wie der Verschärfung von Hochwasserabflüssen, erhöhten Schadstoffeinträgen und der Reduktion der Grundwasserneubildung, entstehen lassen. Durch den Einsatz von Grüner Infrastruktur im Bereich der Niederschlagswasserbewirtschaftung (NWB) kann der Einfluss auf das Entwässerungssystem und schlussendlich auf die aufnehmenden Gewässer reduziert werden.

Im Waagner-Biro Viertel, einem ehemaligen Industriegebiet westlich des Hauptbahnhofs Graz, soll im Zuge des Smart City- bzw. des Living Green City Projekts ein energieeffizienter, emissionsreduzierter und möglichst ressourcenschonender Stadtteil entstehen, der darüber hinaus, den sich darin aufhaltenden Personen eine lebenswerte Umgebung bieten soll. Diese großflächige Einzugsgebietsanpassung wird zum Anlass genommen, die vorhandene Niederschlags-Abfluss-Situation näher zu betrachten und durch den Einsatz verschiedener naturnaher NWB-Maßnahmen möglichst zu verbessern.

Neben der Aufnahme und Erstellung einer detaillierten Oberflächenabbildung wird eine hydrologische Analyse des Projektgebiets durchgeführt und ein Niederschlags-Abfluss-Modell erstellt. Die Oberflächenerhebung des Projektgebiets zeigt rund 37 % Asphalt-, 27 % Grün-, 21 % Dach-, 12 % Schotter-, 2 % Pflasterflächen und somit einen Versiegelungsgrad von rund 60 %. Es werden verschiedene Maßnahmenvarianten der Grünen Infrastruktur im Bereich der NWB konzipiert und ihr Einfluss auf das Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Projektgebiets überprüft. In der Ergebnisauswertung kann je nach Variante und Niederschlagsereignis eine Reduktion der quantitativen Abflussparameter, dem Abflussvolumen und der Abflussspitze, von 3,6 bis 61,8 bzw. 5,4 bis 62,7 % festgestellt werden. Die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit zeigt je nach Maßnahme 4 bis 31 bzw. 4 bis 37 \* 10<sup>4</sup> €/ % Volums- bzw. Spitzenabflussreduktion und Gesamterrichtungskosten von ca. 1,5 bis 17,2 Mio. €. In der Modellsimulation kann durch den Einsatz von Speichermulden eine hohe Maßnahmeneffektivität bei geringen Errichtungskosten erzielt werden, womit sich das beste Preis/Leistungsverhältnis der untersuchten Maßnahmen zeigt. Da besonders im urbanen Raum, bei hoher Flächenversiegelung, kaum öffentliche Freiflächen vorhanden sind, muss zur wirksamen Abflussreduktion im Projektgebiet eine Maßnahmenkombination herangezogen werden.

Stichwörter:

Smart City Waagner-Biro, Grüne Infrastruktur, Niederschlags-Abfluss-Modell, Reduktion von quantitativen Abflussparametern



## Abstract

Advancing urbanization is associated with increasing imperviousness, which together with channeled runoff has adverse impacts for receiving water bodies, such as increased flood risk, increased pollutant discharge and reduced groundwater recharge. The use of green Infrastructure in the field of stormwater management can reduce the impact on urban drainage systems and ultimately on receiving water bodies.

The district Waagner-Biro, a former industrial area west of the main railway station, is currently being redeveloped in the course of the Smart City initiative of the city of Graz and the following project Living Green City. The main goals for the development are an energy-efficient, low-emission and resource-efficient district, which should provide a pleasant environment for residents. This extensive catchment adjustment provides an opportunity to evaluate the current rainfall-runoff situation and to improve it as far as possible by using various measures of green infrastructure.

In addition to developing a detailed surface description, a hydrological analysis of the project area is conducted and subsequently a rainfall-runoff model is created. The surface observation of the project area indicates approximately 37% asphalt, 27% green, 21% roof, 12% gravel, 2% paved areas and thus an impervious coverage of about 60%. Different measures of green infrastructure in the area of urban stormwater management were designed and their influence on the rainfall-runoff behavior of the project area examined. Depending on the scenario and the rainfall event, a reduction of the quantitative discharge parameters, discharge volume and peak outflow rate from 3.6 to 61.8 and 5.4 to 62.7%, respectively, were determined. Depending on the measure, the estimation of economic efficiency shows 4 to 31 resp. 4 to 37 \* 10<sup>4</sup> €/% reduction in total effluent volume or peak flow rate and overall costs of approx. 1.5 to 17.2 million €. In the model simulation, the use of grassed swales achieved a high measure effectiveness for low construction costs, which shows the best price/performance ratio of the investigated measures. Since there are hardly any available public spaces however, especially in highly impervious urban areas, combined measures of green Infrastructure must be used to effectively reduce the runoff in the project area.

Keywords:

smart city Waagner-Biro, green infrastructure, rainfall-runoff model, reduction of quantitative runoff parameters



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation	2
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Grundlagen	3
1.3.1	Flächennutzung und Klimawandel	3
1.3.2	Urban-Heat-Island-Effekt und Biodiversität	5
1.3.3	Urbanisierung und Oberflächenversiegelung	6
1.3.4	Abflussproblematik im urbanen Raum	9
1.3.5	Rechtliche Grundlagen	11
1.4	Grüne Infrastruktur	14
1.4.1	Speichermulden	17
1.4.2	Gründächer	18
1.4.3	Durchlässige Verkehrsflächen	20
1.4.4	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	23
1.5	Projektgebiet	26
1.5.1	Geschichtliche Entwicklung	32
1.5.2	Smart City Waagner-Biro	36
1.5.3	Teilprojekte der Smart City in Ausführung/Planung	38
1.6	Geografische Informationssysteme	40
1.7	Niederschlags-Abfluss-Simulationssoftware	41
1.7.1	Meteorologie – Niederschlag	43
1.7.2	Oberflächenabfluss	44
1.7.3	Infiltration	46
1.7.4	Naturnahe NWB-Maßnahmen	46
1.7.5	Hydraulik	49
<b>2</b>	<b>Methodik</b>	<b>51</b>
2.1	Anwendung der GIS-Software	52
2.1.1	Erstellung der Oberflächenkarte	52
2.1.2	Begehung des Projektgebiets	55
2.1.3	Überarbeitung der Oberflächenkarte	56

2.1.4	Erstellung der Einzugsgebietskarte.....	57
2.1.5	Aufbereitung des DGM .....	58
2.1.6	Erstellung der Einzugsgebiete .....	61
2.1.7	Überprüfung und Anpassung der vorläufigen Einzugsgebietskarte.....	63
2.1.8	Aufbereitung der Geländeneigung .....	65
2.1.9	Ermittlung der Fließlängen .....	66
2.2	Bemessung von Versickerungsanlagen .....	69
2.3	Anwendung der Niederschlags-Abfluss-Simulationssoftware..	72
2.3.1	Erstellung des Ausgangsmodells .....	72
2.3.2	Infiltration .....	73
2.3.3	Evapotranspiration .....	75
2.3.4	Niederschlag .....	75
2.3.5	NWB- Maßnahmen .....	76
2.3.6	Hydraulisch-hydrologische Anpassungen im Modell.....	82
2.4	Berechnungsszenarien.....	84
2.4.1	Durchlässige Verkehrsflächen .....	85
2.4.2	Gründächer .....	86
2.4.3	Speichermulden .....	87
2.4.4	Maßnahmenkombination .....	88
2.4.5	Sensitivitätsszenario IST-Zustand.....	88
2.4.6	Weitere mögliche Szenarien .....	89
2.5	Ergebnisauswertung.....	91
<b>3</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>92</b>
3.1	Oberflächenerhebung.....	93
3.2	Langzeitsimulation .....	98
3.3	Einzelereignissimulation .....	102
3.3.1	Einzelereignis 1 .....	102
3.3.2	Einzelereignis 25.....	109
3.3.3	Einzelereignis 31 .....	116
3.3.4	Ergebniszusammenstellung und Vergleich .....	123
3.4	Wirtschaftlichkeit von NWB-Maßnahmen .....	126

3.5	Sensitivitätsanalyse.....	129
3.6	Diskussion.....	131
3.6.1	Durchlässige Verkehrsflächen (PPS) .....	131
3.6.2	Gründächer .....	133
3.6.3	Speichermulden.....	137
3.6.4	Maßnahmenkombinationen .....	138
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>139</b>
4.1	Zusammenfassung.....	139
4.2	Schlussfolgerungen.....	141
4.3	Ausblick.....	142
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>143</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Weltbevölkerungsentwicklung für urbane/ländliche Gebiete 1950 bis 2030 (United Nations, 2005) .....	6
Abbildung 1-2: Weltbevölkerungsentwicklung für urbane/ländliche Gebiete 1950 bis 2030 bei stark und gering entwickelten Ländern (United Nations, 2005).....	7
Abbildung 1-3: Themenbereiche des WRG modifiziert nach BMLFUW (1959) .....	11
Abbildung 1-4: Bewilligungspflicht bei der Versickerung von Niederschlagswasser (ÖWAV, 2015) (BMLFUW, 1959).....	13
Abbildung 1-5: wesentliche Bestandteile eines Entwässerungssystems (Kainz u. a., 2012) .....	15
Abbildung 1-6: Schnitt durch Speichermulde (Geiger & Dreiseitl, 2001) .....	17
Abbildung 1-7: Schema der Komponenten eines Gründachaufbaus (Vijayaraghavan, 2016) mod.....	19
Abbildung 1-8: Aufbau von permeable (obere Abb.) und porous (untere Abb.) pavement (PPS) nach Scholz u. a. (2014) modifiziert	21
Abbildung 1-9: Übersichtskarte des Grazer Stadtgebiets – das Projektgebiet „Waagner-Biro Viertel“ in Rot umrandet (basemap.at Karte, 2017) .....	26
Abbildung 1-10: Übersichtskarte des Projektgebiets Waagner-Biro – Projektgebiet in Rot umrandet (basemap.at Karte, 2017) .....	27
Abbildung 1-11: Übersicht des Entwässerungssystems (beschnitten) im Projektgebiet – Verlauf des Entwässerungssystems (Linien), Modelauslaufpunkte (Dreiecke) und Entwässerungsrichtungen (Pfeile) – Projektgebiet in Rot umrandet und (ArcGIS).....	31
Abbildung 1-12: zerstörtes Bahnhofsviertel in Graz im Jahr 1945 (Kleine Zeitung, 2015 © Steiermärkisches Landesarchiv) .....	32
Abbildung 1-13: historisches Industrieviertel an der Waagner-Biro-Straße (Smart Future Graz   www.gat.st, 2012).....	33
Abbildung 1-14: Kataster der Abfallablagerungen oder Untergrundverunreinigungen – Projektgebiet in Rot umrandet (BMLFUW, 2017a).....	34
Abbildung 1-15: Ausschnitt aus dem Verdachtsflächenkataster-Bomben Bereich Waagner-Biro (Magistrat Graz, 2011) .....	35
Abbildung 1-16: Übersicht der geplanten Teilprojekte im Projektgebiet Smart City Waagner-Biro (Stadtbaudirektion Graz, 2013) .....	36
Abbildung 1-17: Rahmenplan Smart City (Stadtbaudirektion Graz, 2013) .....	37

---

Abbildung 1-18: Wohnbebauung Starhemberggasse – Entwurf Dr. Tschom (Bundeskammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten, 2016).....	39
Abbildung 1-19: Entwurfsstudie zur Umgestaltung des Bahnhofsviertel – im südlichen Teil des Projektgebiet (Stadtbaudirektion Graz, 2017) .....	39
Abbildung 1-20: Darstellung der in SWMM abgebildeten Prozesse (Rossman & Huber, 2016a) mod.....	43
Abbildung 1-21: Modell des Oberflächenabfluss (Rossman & Huber; 2016a) mod. ....	44
Abbildung 1-22: Modell der Oberflächenabbildung (Rossman & Huber, 2016a) mod. ....	45
Abbildung 1-23: Aufbau von Bioretentionszellen (Rossman & Huber, 2016b).....	47
Abbildung 2-1: Erste Schritte in der Erstellung der Oberflächenkarte – Darstellung der Gebäude- und Verkehrsflächen im nördlichen Bereich des Projektgebiets (ArcGIS) .....	53
Abbildung 2-2: Veranschaulichung der Anwendung der Methode-D8 – Fließrichtung bzw. Abflussakkumulation (ESRI, 2016) mod. ....	57
Abbildung 2-3: Darstellung des 1m-DGM-Ausgangsrasters mit Schummerungen und Konturlinien - Umgrenzung des Projektgebiets in Rot (ArcGIS) .....	58
Abbildung 2-4: Darstellung des Ausgangskanalnetzes (Schächte und Haltungen) im nördlichen Bereich des EZG (ArcGIS) .....	59
Abbildung 2-5: Überführung des modifizierten Kanalnetzes in eine Rasterdatei im nördlichen Bereich des EZG (ArcGIS).....	60
Abbildung 2-6: Darstellung des bearbeiteten 1m-DGM-Rasters mit Schummerungen und Konturlinien im nördlichen Bereich des EZG - Umgrenzung des Projektgebiets in Rot (ArcGIS) .....	61
Abbildung 2-7: erzeugte Rasterdatei Abflussakkumulation im nördlichen Bereich des EZG – Darstellung der Abflusspfade in grün bis rot (ArcGIS) .....	62
Abbildung 2-8: vorläufige Karte der Einzugsgebiete im nördlichen Bereich des EZG – erstellt durch Verwendung des Grundlagenentwässerungsnetzes (ArcGIS) .....	63
Abbildung 2-9: Karte der Einzugsgebiete im nördlichen Bereich des EZG – erstellt durch Verwendung des erweiterten Entwässerungsnetzes (ArcGIS) .....	64
Abbildung 2-10: Karte der Einzugsgebiete im nördlichen Bereich des EZG – erstellt durch Verwendung des erweiterten	

Entwässerungsnetzes und angepasst an das Hauptentwässerungssystem (ArcGIS).....	65
Abbildung 2-11: Darstellung der Zonenschwerpunkte im nördlichen Bereich des EZG (ArcGIS).....	67
Abbildung 2-12: Karte der Bodendurchlässigkeit – Projektgebiet rot umrandet (ArcGIS).....	74
Abbildung 2-13: zehn Jahresniederschlagsserie (1996 bis 2006) gemessen in Graz-Universität (PCSWMM).....	75
Abbildung 2-14: Darstellung der Verkehrsstärken im nördlichen Bereich des EZG – zulässige Fläche im Sinne der ÖNORM B 2506 in Grün (ArcGIS).....	86
Abbildung 3-1: Ausschnitt der fertigen Oberflächenkarte im nördlichen Bereich des EZG – farblich bzw. mittels Abkürzungen codiert der Landnutzungs- respektive Oberflächentyp - Umgrenzung des Projektgebiets in Rot (ArcGIS).....	93
Abbildung 3-2: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Abflussvolumens im GPG bei einer 10-Jahresniederschlagsserie .....	99
Abbildung 3-3: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Spitzenabflusses im GPG bei einer 10-Jahresniederschlagsserie .....	99
Abbildung 3-4: Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Modells (Variante 0 IST EE <sub>1</sub> ) .....	102
Abbildung 3-5: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 1 und 2 EE <sub>1</sub> .....	104
Abbildung 3-6: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 3 u. 4 EE <sub>1</sub> .....	104
Abbildung 3-7: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 5 und 6 EE <sub>1</sub> .....	105
Abbildung 3-8: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 7 und 8 EE <sub>1</sub> .....	105
Abbildung 3-9: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Abflussvolumens im GPG bei Einzelereignis 1 .....	106
Abbildung 3-10: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Spitzenabflusses im GPG bei Einzelereignis 1 .....	107
Abbildung 3-11: Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Modells (Variante 0 IST EE <sub>25</sub> ).....	109
Abbildung 3-12: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 1 und 2 EE <sub>25</sub> .....	110
Abbildung 3-13: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 3 und 4 EE <sub>25</sub> .....	111

---

Abbildung 3-14: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 5 und 6 EE <sub>25</sub> .....	111
Abbildung 3-15: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 7 und 8 EE <sub>25</sub> .....	112
Abbildung 3-16: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Abflussvolumens im GPG bei Einzelereignis 25.....	113
Abbildung 3-17: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Spitzenabflusses im GPG bei Einzelereignis 25.....	114
Abbildung 3-18: Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Modells (Variante 0 IST EE <sub>31</sub> ).....	116
Abbildung 3-19: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 1 und 2 EE <sub>31</sub> .....	118
Abbildung 3-20: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 3 und 4 EE <sub>31</sub> .....	118
Abbildung 3-21: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 5 und 6 EE <sub>31</sub> .....	119
Abbildung 3-22: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 7 und 8 EE <sub>31</sub> .....	119
Abbildung 3-23: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Abflussvolumens im GPG bei Einzelereignis 31.....	120
Abbildung 3-24: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Spitzenabflusses im GPG bei Einzelereignis 31.....	121

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1	Vor- und Nachteile von Speichermulden modifiziert nach Geiger & Dreiseitl (2001) und Assinger (2012) .....	18
Tabelle 1-2	Vor- und Nachteile von Gründachanlagen modifiziert nach Geiger & Dreiseitl (2001) und Assinger (2012) .....	20
Tabelle 1-3	Vor- und Nachteile von PPS modifiziert nach Geiger & Dreiseitl (2001), Scholz u. a. (2014) und Assinger (2012) .....	23
Tabelle 1-4	Übersicht der Teilbereiche des Projektgebiets.....	30
Tabelle 2-1:	Oberflächenkategorisierung modifiziert nach Krebs u. a. (2016a) .....	54
Tabelle 2-2:	Strukturelemente zur Anpassung des Ausgangsrasters (jeweils Auflösung von 1 m).....	59
Tabelle 2-3:	Oberflächenparameter modifiziert nach Krebs u. a. (2016a) .....	73
Tabelle 2-4:	Auszug der Niederschlagsereignisse – geordnet gem. Niederschlagshöhe $h$ – ebenfalls abzulesen die Dauerstufe $D$ , die maximale Intensität $I$ sowie die Wiederkehrzeit $T$ .....	76
Tabelle 2-5:	Faktor erforderliche Muldenfläche pro entwässerter Fläche bei einer Muldentiefe von 0,3 m – vorhanden Muldenfläche steht in der Klammer .....	78
Tabelle 2-6:	Vergleich der Implementierung einer Mulde mit 0,3 m Tiefe .....	78
Tabelle 2-7:	Gründachparameter nach Krebs u. a. (2016b) mod. ....	79
Tabelle 2-8:	PPS Parameter nach (Zhang & Guo, 2015) mod.....	80
Tabelle 2-9:	Auflistung der Berechnungsszenarien sowie Kurzbeschreibung der Änderungen zur Referenzvariante (Maßnahmen) .....	84
Tabelle 2-10:	verwendete Simulationszeitschritte.....	85
Tabelle 2-11:	Analyse der Sensitivität der Oberflächenparameter modifiziert nach Krebs u. a. (2016a) – Oberflächenspeicher $D$ , Rauigkeit nach Manning für den Oberflächenabfluss $n_0$ und Versiegelungsgrad $I$ .....	89
Tabelle 3-1:	Ergebnisse der Oberflächenerhebung gemäß Oberflächenkarte (GIS) - für das gesamte Projektgebiet (GPG) und ausgewählte Teilgebiete (A, E <sub>1</sub> und F <sub>2</sub> ) nach Krebs u. a. (2016a) mod. ....	95
Tabelle 3-2:	Ergebnisse der Oberflächenerhebung gemäß Oberflächenkarte (GIS) – Oberflächentypen, Versiegelungsgrad und Flächenanteile für das gesamte	

	Projektgebiet und ausgewählte Teilgebiete (Krebs u. a., 2016a) mod. ....	97
Tabelle 3-3:	Ergebnisse der Simulation einer 10-Jahresniederschlagsserie (1996 bis 2006) – Abflussvolumen, Spitzenabfluss, Reduktion (R) sowie Reduktionen bezogen auf das Verhältnis von Gesamtfläche des EZG zur angewandten NWB-Maßnahmenflächen ( $R_F$ ) der drei Auslaufpunkte (OUT ES, OUT PT, OUT AP sowie des GPG) – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Maßnahmeneffektivität (R bzw. $R_F$ ).....	101
Tabelle 3-4:	Ergebnisse der Simulation des Einzelereignis 1 – Abflussvolumen, Spitzenabfluss, Reduktion (R) sowie Reduktionen bezogen auf das Verhältnis von Gesamtfläche des EZG zur angewandten NWB-Maßnahmenflächen ( $R_F$ ) der drei Auslaufpunkte (OUT ES, OUT PT, OUT AP sowie des GPG) – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Maßnahmeneffektivität (R bzw. $R_F$ ).....	108
Tabelle 3-5:	Ergebnisse der Simulation des Einzelereignis 25 – Abflussvolumen, Spitzenabfluss, Reduktion (R) sowie Reduktionen bezogen auf das Verhältnis von Gesamtfläche des EZG zur angewandten NWB-Maßnahmenflächen ( $R_F$ ) der drei Auslaufpunkte (OUT ES, OUT PT, OUT AP sowie des GPG) – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Maßnahmeneffektivität (R bzw. $R_F$ ).....	115
Tabelle 3-6:	Ergebnisse der Simulation des Einzelereignis 31 – Abflussvolumen, Spitzenabfluss, Reduktion (R) sowie Reduktionen bezogen auf das Verhältnis von Gesamtfläche des EZG zur angewandten NWB-Maßnahmenflächen ( $R_F$ ) der drei Auslaufpunkte (OUT ES, OUT PT, OUT AP sowie des GPG) – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Maßnahmeneffektivität (R bzw. $R_F$ ).....	122
Tabelle 3-7:	Zusammenstellung der Auswertungsergebnisse – Reduktionen bezogen auf das Verhältnis von Gesamtfläche des EZG zur angewandten NWB-Maßnahmenflächen ( $R_F$ ) der drei Auslaufpunkte (OUT ES, OUT PT, OUT AP sowie des GPG) – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Maßnahmeneffektivität ( $R_F$ ).....	125

Tabelle 3-8: Errichtungskosten (EK) NWB-Maßnahmen, Betriebskosten (BK) und Nutzungsdauer (ND) nach Gantner (2002), Montalto u. a. (2007) und StadtLABOR Graz (2017).....	126
Tabelle 3-9: Analyse der Wirtschaftlichkeit der NWB-Maßnahmen für das Gesamtprojektgebiet (GPG) bei unterschiedlichen Niederschlagsereignissen – Gesamtkosten bzw. Kosten pro Reduktion in € bzw. 10k €/% – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Errichtungskosten pro Prozent Reduktion .....	128
Tabelle 3-10: Analyse der Sensitivität der Variante 0 IST-Zustand .....	129

## Abkürzungsverzeichnis

AP	Alte Poststraße
EIA	engl. Effective Impervious Area
ES	Eggenberger Straße
EZG	Einzugsgebiet
GIS	Geographische Informationssysteme
GPG	Gesamtprojektgebiet
NWB	Niederschlagswasserbewirtschaftung
PPS	engl. Permeable Pavement System
PT	Peter-Tunner-Gasse
SR	Spitzenreduktion
TIA	engl. Total Impervious Area
UHI	engl. Urban Heat Island
VG	Versiegelungsgrad
VR	Volumensreduktion



# 1 Einleitung

Dieses Einleitungskapitel kann im Grunde in fünf Hauptteile gegliedert werden. Der Beginn soll eine Kurzeinleitung in das Thema ermöglichen, gefolgt von der Motivation und der Zielsetzung dieser Masterarbeit. Neben den allgemeinen Grundlagen des Problemfeldes, in dem sich diese Masterarbeit bewegt, sollen anschließend der Begriff der Grünen Infrastruktur, das Projektgebiet und die verwendeten Softwarepakete näher betrachtet werden.

In den letzten Jahrzehnten lässt sich ein stetiges Wachstum der urbanen Bevölkerung feststellen, womit notwendigerweise vermehrt benötigter Wohnraum und andere Infrastruktur, wie z.B. Straßen und Parkplätze, im urbanen Raum geschaffen werden muss. Diese Entwicklung kann durch den Begriff der Urbanisierung zusammengefasst werden. In letzter Konsequenz wird durch die voranschreitende Urbanisierung immer weiter von einer ursprünglich-naturnahen Oberflächenbeschaffenheit abgerückt, die Oberfläche wird versiegelt. Im Zuge von Niederschlagsereignissen können damit auf diesen Flächen kaum natürliche hydrogeologische Austauschprozesse (z.B. Infiltration, Evapotranspiration) stattfinden, womit es im urbanen Raum notwendig wird, verschiedenste Niederschlagsmanagementmaßnahmen, wie z.B. Ableitungskanäle, vorzusehen. Durch die Kombination von Flächenversiegelung und kanalisierter Ableitung des Niederschlagsabflusses entstehen den aufnehmenden Gewässern wasserwirtschaftlich-ökologische Nachteile, wie der Verschärfung von Hochwasserabflüssen, erhöhten Schadstoffeinträgen und der Reduktion der Grundwasserneubildung.

Durch den Einsatz von Grüner Infrastruktur im Bereich der Niederschlagswasserbewirtschaftung (NWB) kann jedoch die Infiltration, die Evapotranspiration sowie die Oberflächenretention von Niederschlagswasser gesteigert werden, womit sich das im Entwässerungssystem zum Abfluss kommende Niederschlagswasser reduzieren und die allgemeine Abflussproblematik etwas entschärfen lässt. In dieser Arbeit werden solche Maßnahmen (z.B. Speichermulden, Gründächer, durchlässige Verkehrsflächen) als naturnahe NWB bezeichnet.

Im Waagner-Biro Viertel, einem ehemaligen Industriegebiet westlich des Hauptbahnhofs Graz, soll im Zuge des Smart City Projekts der Stadt Graz bzw. des Living Green City Projekts von StadtLABOR Graz ein energieeffizienter, emissionsreduzierter und möglichst ressourcenschonender Stadtteil entstehen, der darüber hinaus den sich darin aufhaltenden Personen eine lebenswerte Umgebung bieten soll. Diese großflächige Einzugsgebietsanpassung wird zum Anlass genommen, die vorhandene Niederschlags-Abfluss-Situation näher zu betrachten und durch den Einsatz verschiedener naturnaher NWB-Maßnahmen, wenn möglich, zu verbessern.

### **1.1 Motivation**

Die Smart City Waagner-Biro gilt als Leitprojekt für den Einsatz und die Erprobung verschiedenster alternativer Ansätze und Technologien, die natürliche Ressourcen schonen. Dahingehend soll unter anderem durch die Anpassung vorhandener bzw. die Auslegung von neu zu errichtender Infrastruktur auch die Beeinflussung des natürlichen Wasserhaushalts im Projektgebiet minimiert werden. Eine Methode dies erreichen zu können, ist die Verwendung von Grüner Infrastruktur im Bereich der Niederschlagswasserbewirtschaftung bzw. naturnaher NWB. Mittels eines offenporigen Schichtaufbaus kann die Aufrechterhaltung von Infiltrations-, Retentions- und Evapotranspirationseffekten ermöglicht werden, wodurch der Einfluss auf das Entwässerungssystem und schlussendlich auf die aufnehmenden Gewässer reduziert werden kann.

### **1.2 Zielsetzung**

Das Hauptziel dieser Masterarbeit ist es, die Beeinflussung der Umwelt durch Baumaßnahmen im Projektgebiet Waagner-Biro zu minimieren. Dies soll durch den Einsatz verschiedener Maßnahmen der Grünen Infrastruktur im Bereich der NWB bzw. naturnaher NWB-Maßnahmen erfolgen. Zu diesem Zweck sollen verschieden Maßnahmenvarianten konzipiert und ihr Einfluss auf das Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Projektgebiets überprüft werden. Die Beurteilung der Maßnameneffektivität soll dabei hinsichtlich der Reduktion quantitativer Abflussparameter erfolgen, in dieser Studie das Abflussvolumen und die Abflussspitze. Ebenfalls auftretende qualitative Verbesserungen des Abflusses, wie beispielsweise die Reduktion von Nährstoffen oder Schwermetallen, werden nicht näher betrachtet. Zusätzlich soll zum Zwecke einer verbesserten Variantenvergleichbarkeit eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit und zur Bewertung der Ergebnisschwankungsbreite eine vereinfachte Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden.

### 1.3 Grundlagen

Das folgende Unterkapitel gibt eine allgemeine Übersicht über das Problemfeld in dem sich diese Masterarbeit bewegt. Ausgehend von der globalen Problematik soll schlussendlich auf die lokale Abflussproblematik für den urbanen Raum eingegangen werden.

#### 1.3.1 Flächennutzung und Klimawandel

Foley u. a. (2005) betrachteten die globalen Auswirkungen der durch den Menschen beeinflussten Änderung in der Flächennutzung, die zumeist eine Verschlechterung der Umweltbedingungen in Kauf nimmt, um Ressourcen, die direkt zur Stillung von menschlichen Bedürfnissen benötigt werden, produzieren zu können. Weide- und Ackerflächen sind, neben Waldflächen mit 40 % der gesamten Oberflächennutzung, bereits zu einem großen Teil der terrestrischen Biomasse herangewachsen und ermöglichten somit eine Verdoppelung der Getreideernte auf bis zu zwei Milliarden Tonnen in den letzten 40 Jahren. Einen großen Anteil der Zuwächse in der Produktivität der Ackerflächen haben „Green Revolution“-Technologien, wie etwa künstliche Dünger und Pestizide sowie die Mechanisierung und Bewässerung in der Landwirtschaft. Die moderne Landwirtschaft trägt durch den starken Einsatz von Kunstdüngern und Pestiziden maßgeblich zur Beschädigung der Umwelt, mitsamt der Beeinträchtigung von Trinkwasserressourcen, der Erosion des Mutterbodens, und der reduzierten Fruchtbarkeit der Böden bei und kann zum jetzigen Zeitpunkt in keiner Weise als nachhaltig angesehen werden. Änderungen in der Flächennutzung beeinflussen auch direkt den Wasserhaushalt sowie das regionale Klima, indem sie die effektive Aufteilung des Niederschlagswassers in Infiltration, Evapotranspiration sowie Abfluss beeinflussen und haben somit direkten Einfluss auf Temperatur, Wasserkreislauf und Luftqualität. So werden bereits in etwa 10 % des gesamten „neugebildeten“ Wassers (ca. 3900 km<sup>3</sup>/a) entnommen wovon 85 % dieser Menge in landwirtschaftlichen Bewässerungsanlagen genutzt werden. Des Weiteren sind Phänomene, wie der „Urban-Heat-Island“-Effekt (UHI), im Grunde auf extreme Änderungen in der Flächennutzung zurück zu führen (Foley u. a., 2005).

Das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wurde bereits im Jahr 1988 von der World Meteorological Organisation und dem United Nations Environment Programme gegründet. Hauptaufgabe des IPCC ist es den Klimawandel wissenschaftlich zu untersuchen sowie dem Trend entgegenwirkende Verhaltensstrategien zu entwickeln. Die Effekte und Auswirkungen der Veränderung des Klimas sind vielerorts bereits spürbar und es gibt bereits ausreichend Studien, die die Änderung des Klimas im letzten Jahrhundert dokumentieren z.B. bei IPCC (1996). So führte die stetige Erhöhung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre seit dem vorindustriellen Zeitalter (ca. 1750) zur Erwärmung der Erdoberfläche. Die Konzentration von CO<sub>2</sub> (30 %), CH<sub>4</sub> (145 %) und N<sub>2</sub>O (15 %)

stieg, vor allem bedingt durch den menschlichen Einfluss, signifikant an (IPCC, 1996). Der Meeresspiegel ist in den letzten 100 Jahren bedingt durch die globale Temperaturerhöhung und andere Ursachen um 10 bis 25 cm gestiegen. Die globale Lufttemperatur in Oberflächennähe hat sich seit dem späten 19. Jahrhundert im Mittel um 0,3 bis 0,6°C erhöht und auch die Nachttemperaturen an Land sind sukzessive gestiegen. Das IPCC geht davon aus, dass sich das Klima in den nächsten Jahren weiter verändern wird. Die globale Lufttemperatur in Oberflächennähe soll sich bis zum Jahr 2100 im Mittel, abhängig vom jeweiligen Klimaszenario, um 1,0 bis 3,5°C erhöhen. Der Meeresspiegel soll, abhängig vom jeweiligen Klimaszenario, bis 2100 um weitere 15 bis 50 cm ansteigen. Die allgemeine Erderwärmung führt zu einer Erhöhung der Anzahl von Tagen mit extremer Hitze sowie zu einer Reduktion von Tagen mit extremer Kälte. Die wärmeren Temperaturen führen zu einer starken Beeinträchtigung des hydrologischen Kreislaufs und somit zu vermehrten Dürre- bzw. Überflutungsereignissen. Mehrere Szenarien gehen von einer Erhöhung der Niederschlagsintensität und somit von einer weiteren Erhöhung von Niederschlagsextrema aus. Es kann jedoch noch nicht gesagt werden, ob sich die geografische Verteilung von heftigen Sturmereignissen (z.B. tropische Zyklone) ändert. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich das Klima seit dem vorindustriellen Zeitalter bereits verändert hat und von einer weiteren Änderung ausgegangen werden kann. Aufgrund der Nichtlinearität der Natur und des Klimas, ist es schwer, Voraussagen zu treffen (IPCC, 1996).

Semadeni-Davies u. a. (2008) untersuchten den Einfluss des Klimawandels auf das Mischwasserentwässerungssystem der Innenstadt Helsingborgs (Schweden). Als Basis für die Abschätzung des zukünftigen Klimas dient ein regionales atmosphärisch-ozeanographisches Klimamodell (RCAO) des meteorologischen und hydrologischen Instituts Schwedens (SMHI). Die Untersuchung stellt zwölf Simulationen an, die aus Kombination von zwei IPCC-Gasemissionsklimaszenarien (medium und hoch) sowie Stadtentwicklungsszenarien (erhöhte Population - Systemabkoppelung der Innenstadt - Reduktion des Wasserverbrauchs) hervorgehen. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen bei gleichbleibender bzw. erhöhter Population eine geringfügige bzw. deutliche Verschärfung der Entwässerungsproblematik, eine Erhöhung der abgeschlagenen Volumina sowie in Folge dessen einen erhöhten Nährstoffeintrag in die Gewässer. Es zeigt sich jedoch auch, dass durch konsequente Reduktion der an die Mischwasserkanalisation angeschlossenen Flächen, zusammen mit anderen Maßnahmen, der Einfluss des Klimawandels auf ein geringfügiges Ausmaß reduziert werden kann (Semadeni-Davies u. a., 2008).

### 1.3.2 Urban-Heat-Island-Effekt und Biodiversität

Howard (1818) gilt durch seine Beobachtungen des Londoner Klimas als „Begründer“ des Begriffes des Wärmeinseleffekts (engl. Urban Heat Island, Abk. UHI), indem er feststellte, dass die Lufttemperatur in der Stadt oft höher ist, als im unmittelbaren Umland. Die Effekte des UHI sind mittlerweile durch zahlreiche Studien belegt. So beobachtete Oke (1982) einen Zusammenhang zwischen maximaler UHI-Intensität und der Siedlungspopulation. Oke (1982) beschreibt eine Erhöhung der Evapotranspiration durch Zuführen von warmer trockener Luft von umgebenden versiegelten Flächen mit der Konsequenz einer beschleunigten Austrocknung der Vegetation. Versiegelte Flächen tragen somit direkt durch spürbare Wärmeabgabe zum Mikroklima der Umgebung bei. Yuan & Bauer (2007) stellten bei ihren Untersuchungen einen stark linearen Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur und dem Grad der Oberflächenversiegelung (% ISA) zu allen Jahreszeiten fest. Da die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen normalisiertem Vegetationsdifferenzindex (Abk. NDVI) und der Oberflächentemperatur zu einem weniger aussagekräftigen Ergebnis geführt hat und auch stärker jahreszeitlich schwankt, legen die Autoren die Nutzung des Versiegelungsgrades zumindest als ergänzenden Parameter nahe. Beide Parameter sowohl % ISA als auch der NDVI können somit als Indikatoren des UHI-Effekts angesehen werden.

Der Terminus der Biodiversität wird als Überbegriff des Reichtums sowie der Vielfalt der Arten verstanden und schließt weitere Ausdrücke wie die Artenkomposition sowie die An- bzw. Abwesenheit von Schlüsselarten mit ein. Der menschliche Einfluss führt zu einer andauernden globalen Wandlung der Umwelt mit Änderungen in der biotischen Struktur, der Komposition von ökologischen Gemeinschaften mitsamt Artensterben bzw. Zugewinn von exotischen Arten und beeinflusst somit die Leistungsfähigkeit sowie die Anpassungsfähigkeit des Ökosystems. Veränderte Biodiversität beeinträchtigt sowohl wirtschaftliche (z.B. Ökotourismus, Informationsgewinnung in der Medizin) als auch nicht wirtschaftliche (ästhetische, ethische u.v.m.) Interessen und nimmt Einfluss auf die Produktivität, den Kohlenstoffspeicher, die Hydrologie sowie den Nährstoffzyklus eines Ökosystems (Hooper u. a., 2005).

Le Viol u. a. (2009) untersuchten den Einfluss von Retentionsbecken entlang von Autobahnen auf die Biodiversität von Kleinstlebewesen in der Umgebung. Es konnten trotz der vermeintlichen schlechteren Bedingungen, hohe Salz- sowie Schadstoffkonzentrationen, im Vergleich zu umliegenden Feuchtbiotopen, kaum Unterschiede in der Komposition der Artenfamilien festgestellt werden. Damit tragen künstlich geschaffene Becken in von Menschen dominierter Landschaft günstig zur Schaffung bzw. Vernetzung von Feuchtgebietslebensräumen bei.

### 1.3.3 Urbanisierung und Oberflächenversiegelung

Von Urbanisierung wird zumeist bei einer progressiven Ausdehnung der Fläche einer Stadt einhergehend mit Erhöhung der Einwohneranzahl gesprochen. Sie umfasst Verdichtungseffekte, demographische Änderungen, Flächenversiegelung sowie Änderung der Flächennutzung. Die fortschreitende Urbanisierung bringt vielerlei Probleme aber auch Möglichkeiten mit sich (Bähr, 2011).

Im Allgemeinen führen durch Menschen verursachte Änderungen der Flächennutzung (z.B. Stadt, Landwirtschaft) zu lokalen bis hin zu globalen Anpassungen der Umweltprozesse, der Beeinträchtigung der bio-geo-chemischen Zyklen, der Hydrosysteme, der Bio-Diversität sowie des Klimas. Die starke Konzentration von Menschen in urbanen Gebieten ist meist Ergebnis der sozialen und wirtschaftlichen Vorteilen verschiedenster Art, die hauptsächlich aus einer dynamischeren Wirtschaft resultieren (Grimm u. a., 2008).

Wie in Abbildung 1-1 ersichtlich, zeichnet sich für die Bevölkerungsentwicklung von urbanen Gebieten ein eindeutiger Trend ab. Der Anteil der in urbanen Gebieten lebenden Menschen hat sich von 13 % im Jahr 1900, zu 29 % im Jahr 1950 bis hin zu 49 % im Jahr 2005 immer weiter vergrößert. Im Jahr 2030 werden bereits 4,9 Milliarden im urbanen Gebieten lebende Menschen erwartet (United Nations, 2005).

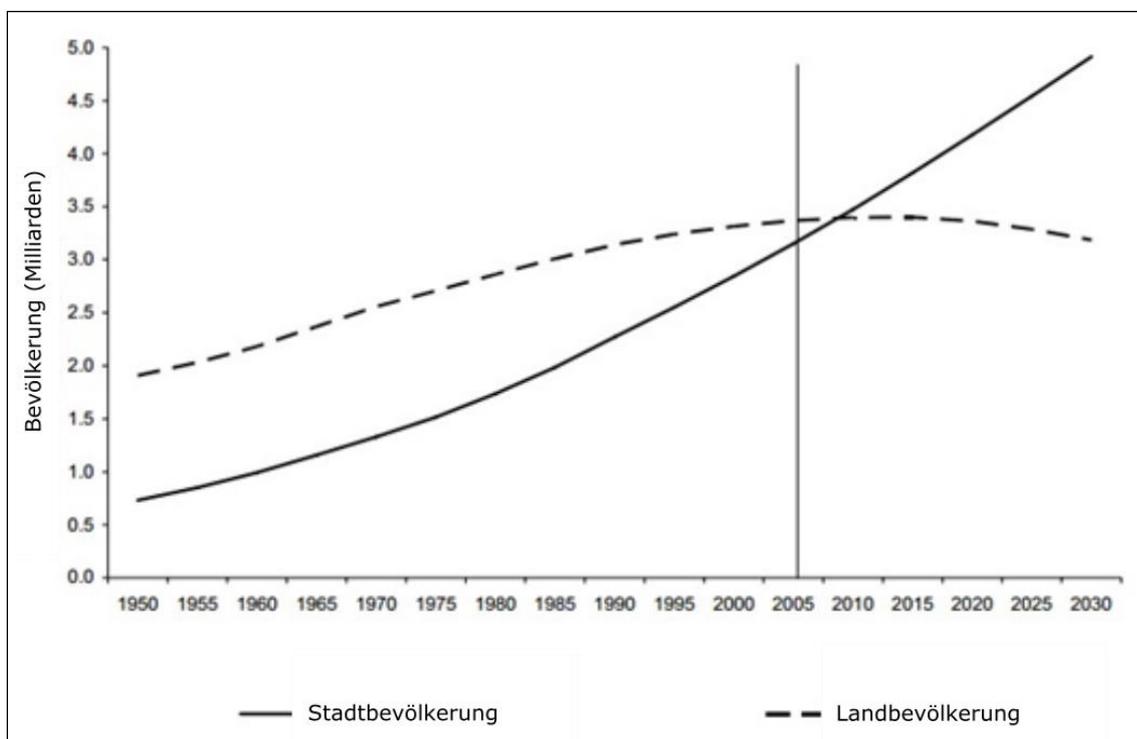


Abbildung 1-1: Weltbevölkerungsentwicklung für urbane/ländliche Gebiete 1950 bis 2030 (United Nations, 2005)

Bei einer differenzierten Betrachtung zwischen stark und weniger stark entwickelten Ländern zeigt sich eine Zuspitzung der Situation (Abbildung 1-2). Die Bevölkerungsentwicklung urbaner Gebiete in weniger stark entwickelten Ländern zeigt einen eindeutig stärkeren Trend, als dies bei stark entwickelten Ländern der Fall ist. Im Jahr 2005 lebten bereits fast dreiviertel (74 %) der Einwohner stark entwickelter Länder in urbanen Gebieten, womit bereits von fortgeschrittener Urbanisierung gesprochen werden kann. Bis zum Jahr 2030 sind noch weitere Zuwächse bis auf 81 % für diese Gebiete zu erwarten. Bei weniger stark entwickelten Ländern hält der Anteil der in urbanen Gebieten lebenden Bevölkerung im Jahr 2005 bei 43 %, wobei dieser bis zum Jahr 2030 bis auf 56 % ansteigen soll.

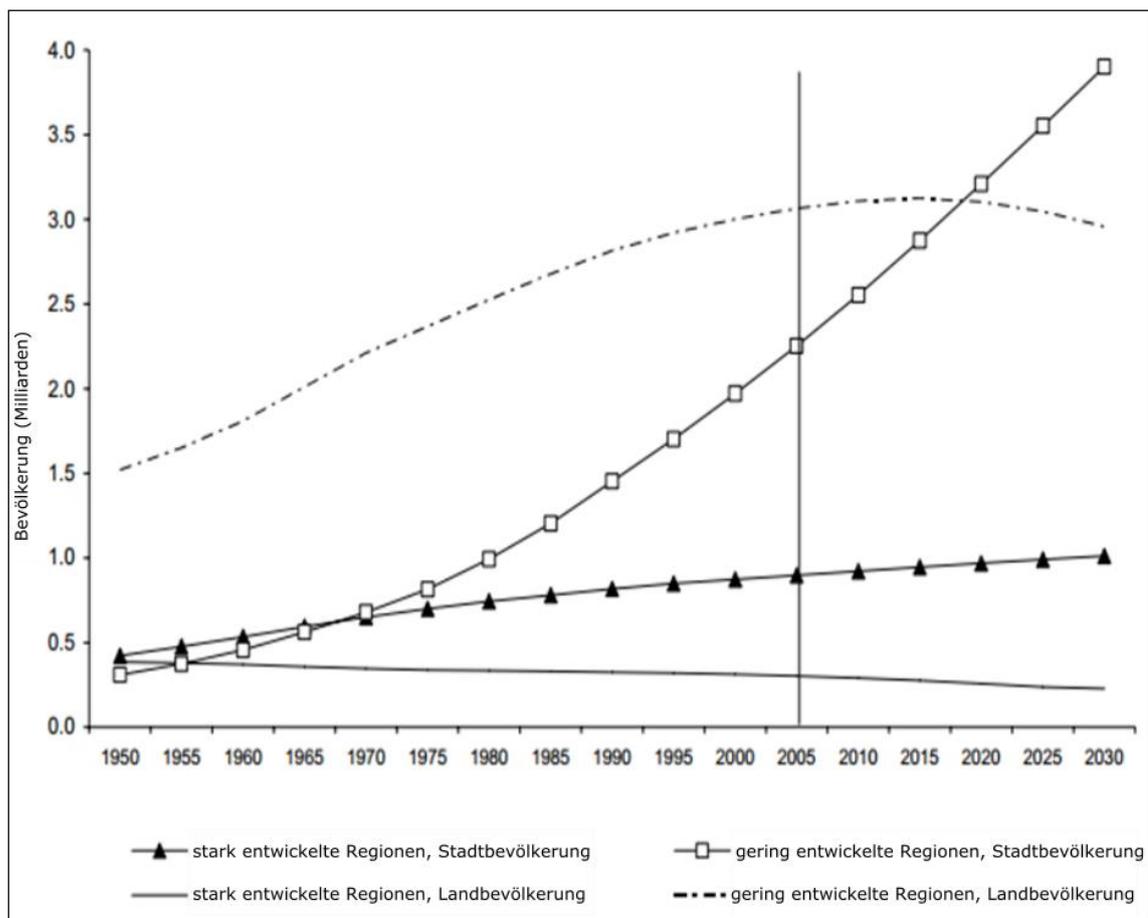


Abbildung 1-2: Weltbevölkerungsentwicklung für urbane/ländliche Gebiete 1950 bis 2030 bei stark und gering entwickelten Ländern (United Nations, 2005)

Das Bevölkerungswachstum wird sich in Zukunft gänzlich auf städtische Gebiete verlagern womit in ländlichen Gebieten tendenziell ein gegenläufiger Trend zu erwarten ist (United Nations, 2005).

Der Parameter TIA (engl. Total Impervious Area) stellt die Gesamtgröße der versiegelten Fläche dar und gibt somit Aufschluss über den Versiegelungsgrad (Abk. VG) des Gebiets. Versiegelte Flächen können in Allgemeinen in versiegelte Fläche von direkter hydraulischer Relevanz (engl. Effective Impervious Area,

Abk. EIA) und in versiegelte Flächen ohne direkter hydraulischer Relevanz aufgespalten werden. Flächen, die der EIA zugerechnet werden, sind unmittelbar mit dem Entwässerungssystem verbunden wie beispielsweise Straßen mit Bordsteinen und Regenwasserreinlaufschächten oder Parkflächen, die in Richtung der Straße entwässern. Nicht zur EIA gezählt werden versiegelte Flächen, dessen Abfluss auf unversiegelten Flächen entwässert wird. Der Zusammenhang der Gleichung 1-1 wurde anhand der Untersuchung der Innenstadt von Denver entwickelt. Durch die Verwendung der EIA kann gegenüber der TIA eine geringere Überschätzung der Abflussvolumina, Spitzenabflüsse sowie Infiltrationsrate erreicht werden (Alley & Veenhuis, 1983).

$$EIA = 0,15 TIA^{1,41}$$

Gleichung 1-1

mit:

*EIA ... Versiegelungsgrad bei Flächen mit direkter hydraulischer Relevanz (%)*

*TIA ... Gesamtversiegelungsgrad (%)*

*nach Alley & Veenhuis (1983)*

Lee & Heaney (2003) untersuchten den Einfluss von versiegelten Flächen sowie die notwendige Genauigkeit deren Ermittlung auf urbane Entwässerungssysteme. Die Ermittlung EIA wird in mehreren Stufen der Genauigkeit ausgeführt, um deren Einfluss auf das Abflussverhalten evaluieren zu können. Die Genauigkeit der Abschätzung von versiegelten Flächen beginnt mit Stufe 1, die komplett ohne GIS-Unterstützung, mittels Literatur Referenzdaten, auskommt und endet bei Stufe 5, die eine aufwändige GIS-Projektbearbeitung mitsamt ausführlicher Oberflächenaufnahme vor Ort und detaillierte Ermittlung der EIA darstellt. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die Genauigkeit der Bestimmung der EIA infolge Fernerkundung (engl. Remote Sensing) für eine detaillierte Abbildung der versiegelten Flächen unzureichend und die Modellerstellung demzufolge von einer ausführlichen Aufnahme der Oberfläche bzw. der EIA vor Ort zu begleiten ist. Für kleinere Niederschlagsereignisse ist eine detaillierte Aufnahme der EIA anzuraten, da es sonst häufig zu einer Überschätzung des Abflusses kommt. Die Verwendung der TIA kann bei großen Niederschlagsereignissen als zulässig angesehen werden kann (Lee & Heaney, 2003).

### 1.3.4 Abflussproblematik im urbanen Raum

Ein Effekt der voranschreitenden Urbanisierung ist die Erhöhung der Oberflächenversiegelung. So zeigt sich für das Emschergebiet von 1955 bis 1995 eine Steigerung des Versiegelungsgrads von in etwa 7 auf 17 %. Im Gegensatz zu unversiegelter Fläche, weist versiegelte Fläche jedoch eine geringere Verdunstung sowie eine kleinere Speicherkapazität auf, was schlussendlich zu einem höheren Oberflächenabfluss führt. So kommen bei unbefestigter Fläche nur rund 0 bis 20 % des gefallenen Niederschlags zum Abfluss. Bei stark versiegelten Oberflächen (z.B. Asphalt, Beton, Dächern) hingegen, muss mit einem Abflussanteil von 90 bis 100 % gerechnet werden. Die Versiegelung von Flächen im urbanen Gebieten beeinflusst das Entwässerungssystem, indem die Intensität des anfallenden Niederschlags direkt an das Netz weitergegeben wird (Geiger & Dreiseitl, 2001).

Nach Sieker (1996) entstehen dem Gewässer durch die zunehmende Oberflächenversiegelung zusammen mit der kanalisierten Ableitung von Niederschlagswasser durch Misch- oder Trennsysteme wasserwirtschaftlich-ökologische Nachteile. Neben der Verschärfung von Hochwasserabflüssen kommt es so zu erhöhten Schadstoffeinträgen und zur Reduktion der Grundwasserneubildung.

Gemäß dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015) ist bei Hochwässern hinsichtlich Entstehungsform zwischen Starkregenereignissen, Hochwasser in Flüssen, Kanalarückstau, Grundwasserhochwasser, Eisgang und Sturmflut zu unterscheiden. Besonders problematisch können dabei Niederschlagsereignisse mit hohen Intensitäten sein. Bei kleineren Einzugsgebieten verbleibt nur eine kurze Reaktionszeit, bis ein Gewässer gegebenenfalls über dessen Ufer tritt. Neben der Hochwasserproblematik von Oberflächengewässern kann es durch Starkniederschlagsereignisse auch zu einer Überlastung des Kanalsystems kommen. Bei Auftreten eines Rückstaus können bei angeschlossenen Gebäuden große Schäden entstehen.

Durch den Einsatz von naturnahen NWB-Maßnahmen kann jedoch ein gewisser Hochwasserschutz für den urbanen Raum erzielt werden, indem Abfluss vermieden, vermindert, versickert oder zurückgehalten wird (Bostijancic, 2013; BML-FUW u. a., 2014).

Damit es bei starken Niederschlagsereignissen innerhalb von Mischwasserkanalisationen zu keiner Überschreitung der hydraulischen Kapazität kommen kann, werden über das Netz verteilt Entlastungsbauwerke (Mischwasserüberläufe) eingesetzt. Nach dem Erreichen bestimmter Schwellenwerte werden Teile des Mischwassers in den Vorfluter abgeleitet (Kainz u. a., 2012). Nach Gruber u. a. (2004) tragen Mischwasserüberläufe wesentlich zu den Gesamtemissionen in

Gewässer bei. Neben der Kombination von Trockenwetterabfluss mit kanalisiertem Oberflächenabfluss kommt es im Entlastungsfall aber auch zu einer Remobilisierung von abgelagerten Schmutzstoffen, die einen großen Anteil der Gesamtbelastung ausmachen.

Abgeschlagenes Mischwasser, aus z.B. Mischwasserüberläufen, führt im Gewässer zu einer Zehrung des gelösten Sauerstoffs. Bei sommerlichen Bedingungen kann es somit zu anoxischen Zuständen kommen, wodurch die Fischpopulation extrem gefährdet ist. Infolge des „Piren-Seine“-Programms wurde gezielt der Einfluss von Mischwasserüberläufen auf die Wasserqualität des empfangenden Gewässers untersucht (Even u. a., 2004). Für die Entwicklung von geeigneten Strategien der Mischwasserbewirtschaftung werden neben der genauen Zusammensetzung des entlasteten Mischwassers an Mischwasserüberläufen noch Informationen über die Herkunft und die stattfindenden Aufbau- und Transportmechanismen der Schmutz- und Schadstoffe in der Mischwasserkanalisation benötigt. Anhand durchgeführter Qualitätsmessungen vor und nach dem Eintritt des Niederschlagswassers in die Kanalisation, können dort ablaufende Abbau- und Umwandlungsprozesse nachvollzogen und die Verteilung von Schmutz- und Schadstoffen festgestellt werden (Gromaire u. a., 2001).

Durch den Einsatz von naturnahen NWB-Maßnahmen kann die Infiltration, die Evapotranspiration sowie die Oberflächenretention von Niederschlagswasser deutlich gesteigert werden. Die obengenannten wasserwirtschaftlich-ökologischen Nachteile auf Gewässer können somit durch eine Verringerung des im Entwässerungssystem zum Abfluss kommenden Niederschlagswassers reduziert werden (Sieker, 1996; Ahiablame u. a., 2012).

Der Einfluss von NWB-Maßnahmen wird oftmals mittels Vergleich der quantitativen Abflussparameter bestimmt. Neben der Abflussvolumensreduktion (VR) und der Abflussspitzenreduktion (SR) kann auch noch die zeitliche Verschiebung der Abflussspitze zur Effektivitätsbeurteilung herangezogen werden. Palla & Gnecco (2015) und Guan u. a. (2015a) stellten deutliche VR und SR fest. Versini u. a. (2015) und Deutsch & Whitlow (2005) ermittelten eine VR und SR beim Einsatz von Gründachanlagen, zusammen mit einer Reduktion der abgeschlagenen MW-Volumina. Jato-Espino u. a. (2016) und Fassman & Blackburn (2010) zeigten die Effektivität von durchlässigen Verkehrsflächen hinsichtlich VR und SR auf. Jia u. a. (2015a) untersuchte die hydrologische Effektivität (VR und SR) von Speichermulden und Bioretentionszonen. Montalto u. a. (2007) zeigten in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse, dass der Einsatz von naturnaher NWB-Maßnahmen im Vergleich zu konventionellen Systemen durchaus einen kosteneffizienten Ansatz zur Verminderung von abgeschlagenem Mischwasser bieten kann.

### 1.3.5 Rechtliche Grundlagen

Wasser muss als ein wertvolles Gut angesehen werden, ist für den Menschen und dessen Umwelt von essenzieller Bedeutung und wird neben der Verwendung als Trink- und Nutzwasser auch zur Energiegewinnung benötigt. Die negativen anthropogen beeinflussten Auswirkungen auf Gewässer (Urbanisierung, Industrie, Landwirtschaft etc.) sind daher möglichst zu minimieren. Im Gegensatz dazu muss aber auch der Mensch vor Gefahren, die aus Gewässern entstehen können (Hochwasser etc.), geschützt werden (BMLFUW, 2017b).

Das Wasserrechtsgesetz (WRG) (BMLFUW, 1959) dient als das Fundament der Wasserwirtschaft und bildet die Grundlage für entsprechende Verordnungen sowie Maßnahmen der Umsetzung. Das WRG kann in folgende Bereiche untergliedert werden (Abbildung 1-3):

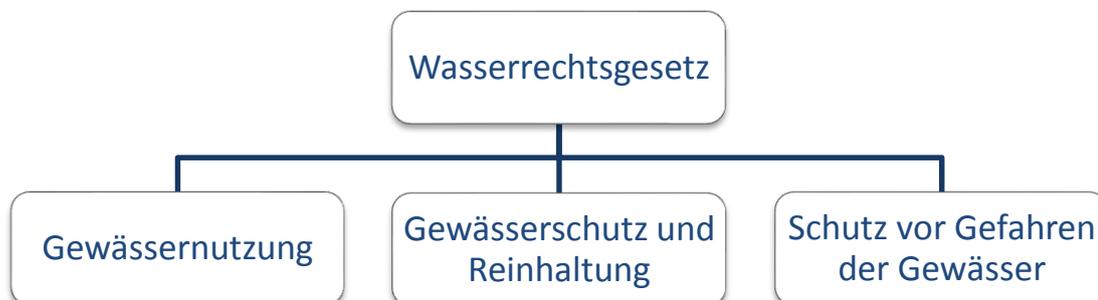


Abbildung 1-3: Themenbereiche des WRG modifiziert nach BMLFUW (1959)

Die Wasserwirtschaft hat sich nach dem Vorsorgeprinzip und der Nachhaltigkeit auszurichten, sodass schädliche oder nachteilige Einwirkungen auf Mensch, Tier und Pflanze, deren Lebensgrundlagen und deren natürliche Umwelt so gering wie möglich gehalten werden. Daraus ergibt sich die Verpflichtung Gewässer, einschließlich Grundwasser, zu schützen und reinzuhalten (WRG, §30). Die Gewässer sind dementsprechend zu schützen oder zu sanieren, dass definierte ökologische Zielzustände erreicht werden können. Je nach Art des Gewässers muss somit gemäß der Wasserrahmenrichtlinie (EU-Parlament und Rat, 2000) ein guter ökologischer Zustand bzw. ein gutes ökologisches Potenzial erreicht werden (WRG, §30a). Um die vorgegebenen Gewässerzustände erreichen zu können, werden vielerlei Maßnahmen gesetzt; im Bereich der Abwasserbewirtschaftung kommt es unter anderem zu Emissionsbegrenzungen für Abwasserinhaltsstoffe (WRG, §33b) gemäß dem Stand der Technik.

Die Allgemeine Abwasseremissionsverordnung (AAEV) (BMLFUW, 1993) ist dem WRG untergeordnet und bildet die rechtliche Grundlage des Abwasserbegriffs sowie für die „Abwassereinleitung“ in Gewässer. Die AAEV legt fest, welche Wässer als Abwasser anzusehen sind, wie mit diesen umzugehen ist und unter

welchen Voraussetzungen der Abwasserbegriff wieder erlischt. Da die Zusammensetzung von emittierten Abwasser je nach Emittenten sehr unterschiedlich sein kann, werden in der AAEV eine Vielzahl von eigenständigen Abwasseremissionsverordnungen aufgeführt, die somit teilweise von den Regelungen der AAEV ausgenommen sind.

Durch das Regelblatt (RB) 11 (ÖWAV, 2009), herausgegeben vom österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, wird im Allgemeinen das Vorgehen bei der Dimensionierung von Abwasserkanälen definiert. Die für die Nachweisführung notwendige Modellbildung kann durch geeignete Modellierungssoftware erfolgen. Im RB hingegen wird eher auf die Anwendung des Fließzeitverfahrens verwiesen, dessen Anwendung bei einfachen Systemen noch dem Stand der Technik entspricht. Die Auslegung von Mischwasserentlastungen ist gemäß RB 19 (ÖWAV, 2007) vorzunehmen und behandelt sowohl den Emissions- als auch den Immissionsfall. Maßnahmen Grüner Infrastruktur wirken zwar nicht direkt auf RB 11 und RB 19, führen jedoch durch ihre positiven Eigenschaften indirekt zu positiven Veränderungen in der Nachweisführung (z.B. Wirkungsgrad der Weiterleitung etc.).

Das RB 45 (ÖWAV, 2015) gibt den Stand der Technik im Bereich der Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund vor. Vom Anwendungsbereich des RB werden Niederschlagswässer ausgenommen, die im Sinne des AAEV §1 Abs.3 Z 1 als Abwasser gelten. Außerdem ist das Regelblatt auf problematische Bereiche mit hoher verkehrstechnischer Belastung wie Flughäfen, Gleisanlagen und Straßen mit JDTV von >15.000 Kfz/24 h ebenfalls nicht anzuwenden. Jede Versickerung von Niederschlagswasser, die zu einer Beeinträchtigung der Beschaffenheit des Grundwassers führt und somit das Maß der Geringfügigkeit überschreitet, ist nach WRG §32 Abs. 2 bewilligungspflichtig. Das Einbringen in den Grundwasserkörper muss nach Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser (BMLFUW, 2010) nachgewiesenermaßen als unbedenklich gelten. Für die Versickerung von Niederschlagswasser in den Untergrund sind demnach einige wichtige Punkte zu beachten, wie Abbildung 1-4 entnommen werden kann.

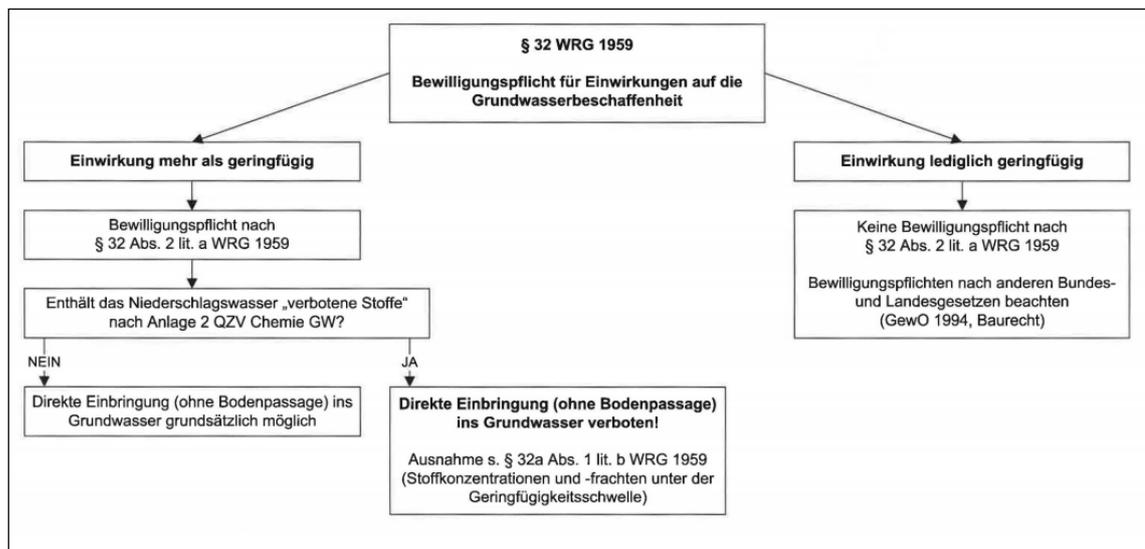


Abbildung 1-4: Bewilligungspflicht bei der Versickerung von Niederschlagswasser (ÖWAV, 2015) (BMLFUW, 1959)

Die Nachweisführung der hydraulischen Funktionalität sowie der Aufbau der Oberflächenentwässerung hat gemäß der ÖNORM B 2506-1 (Austrian Standards Institute, 2013) zu erfolgen, wobei diese für die Versickerung von Niederschlagsabflüssen von Verkehrsflächen nur bis zu Verkehrsstärken von 5000 DTV angewendet werden darf.

Die Ausführung von Maßnahmen zur Behandlung von belasteten Niederschlagsabflüssen wird durch die ÖNORM B 2506-2 (Austrian Standards Institute, 2012) vorgegeben und in ÖNORM B 2506-3 (Austrian Standards Institute, 2016) wird näher auf die Anforderungen des zu verwendeten Filtermaterials eingegangen.

Die Dimensionierung der Versickerungsanlagen kann auch nach den Vorgaben des Arbeitsblatts A 138 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA, 2005) erfolgen.

Im Zuge dieser Arbeit soll primär gemäß den Regelungen des RB 45 vorgegangen werden. Bemessung und Dimensionierung von Anlagen der Versickerung von Oberflächenwässern werden in Kapitel 2.2 noch ausführlicher betrachtet.

### 1.4 Grüne Infrastruktur

Das folgende Unterkapitel definiert die Begriffe der Grauen respektive der Grünen Infrastruktur und beschreibt den Aufbau und die Funktionsweise von naturnahen NWB-Maßnahmen sowie deren Vorteile gegenüber konventionellen Systemen der Niederschlagswasserbewirtschaftung (NWB).

Die voranschreitende Urbanisierung führt zu Änderungen in der Flächennutzung, Versiegelung von natürlicher Oberfläche, Beeinträchtigungen der Biodiversität und somit zu einer schwerwiegenden Belastung der Umwelt mitsamt Störung von elementaren Kreisläufen der Natur (z.B. Nährstoff, Wasser). Vor diesem Hintergrund und im Sinne der Nachhaltigkeit muss an alternativen Methoden und Strategien gearbeitet werden, da ein Festhalten am Status Quo, aufgrund der vielen negativen Auswirkungen, nicht anzustreben ist. Nach Lucius u. a. (2011) ist aufgrund der unterschiedlichen Lösungsstrategien bzw. der Definition eines funktionierenden Gesamtsystems zwischen Grauer und Grüner Infrastruktur zu differenzieren.

Als Graue Infrastruktur werden vor allem technische Elemente der Infrastruktur bezeichnet, die zumeist gewisse Strukturen aufweisen bzw. Netze bilden und einen großen Beitrag zur Aufrechterhaltung der modernen Gesellschaft leisten. Somit sind Straßen, städtische Siedlungen, Kraftwerke, Stromnetze, Fernmelde-netze, Wasserver- und Abwasserentsorgungsnetze im Allgemeinen der Grauen Infrastruktur zuzuordnen. Mit dem Begriff der Grünen Infrastruktur hingegen werden im Allgemeinen die Teile eines natürlichen Netzwerks von Landschaftselementen bezeichnet, die durch ihren Beitrag zur Steigerung der Ökosystemleistung auch überaus wichtig für die Gesellschaft sein können. Als Beispiele von Elementen dieser Netzwerkbildung können unter anderem Grünflächen jeder Art, Hecken, kleine Wasserläufe, Grünflächen im Stadtbereich u.v.m. genannt werden. Durch die Kombination von Grüner Infrastruktur mit konventionellen Systemen können durch gegenseitige Unterstützung bestimmte Synergieeffekte nutzbar entstehen. Im Idealfall sollen somit durch die Anpassung von vorhandener bzw. geplanter Infrastruktur ökologische Korridore geschaffen werden, deren Vorteile auch graue Infrastruktur positiv beeinflussen (z.B. Reduktion des UHI-Effekts oder von Abflussspitzen in Gewässern) (Lucius u. a., 2011).

Nach Guan u. a. (2015a) lassen sich durch den Einsatz von Grüner Infrastruktur in der NWB zwar deutliche Verbesserungen erreichen, ein natürliches Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Einzugsgebiet kann jedoch nicht erreicht werden.

Ein konventionelles Entwässerungssystem muss somit der Grauen Infrastruktur zugeordnet werden und besteht im Wesentlichen aus Straßenkanälen (Sammler) mit Hausanschlüssen, Straßeneinläufen, Einstiegsschächten, der Abwasserrei-

nigungsanlage (ARA) sowie erforderlichenfalls Düker- und Entlastungsbauwerken (Abbildung 1-5). Die Abwasserableitung kann nach Kainz u. a. (2012) mit verschiedenen Verfahren erfolgen:

- Mischverfahren: Schmutz- und Regenwasserabflüsse werden durch ein gemeinsames Entwässerungssystem abgeleitet.
- Trennverfahren: Schmutz- und Regenwasserabflüsse werden durch getrennte Entwässerungssysteme abgeleitet.
- modifiziertes Mischverfahren: Gering verschmutztes Regenwasser wird möglichst am Eigengrund dem natürlichen Wasserkreislauf zurückgegeben, wobei Regenwasser von stark verschmutzten Flächen in die Kanalisation geleitet wird.
- modifiziertes Trennverfahren: Im Gegensatz zum modifizierten Mischverfahren wird stark verschmutztes Regenwasser einem eigenständigen System zugeführt.

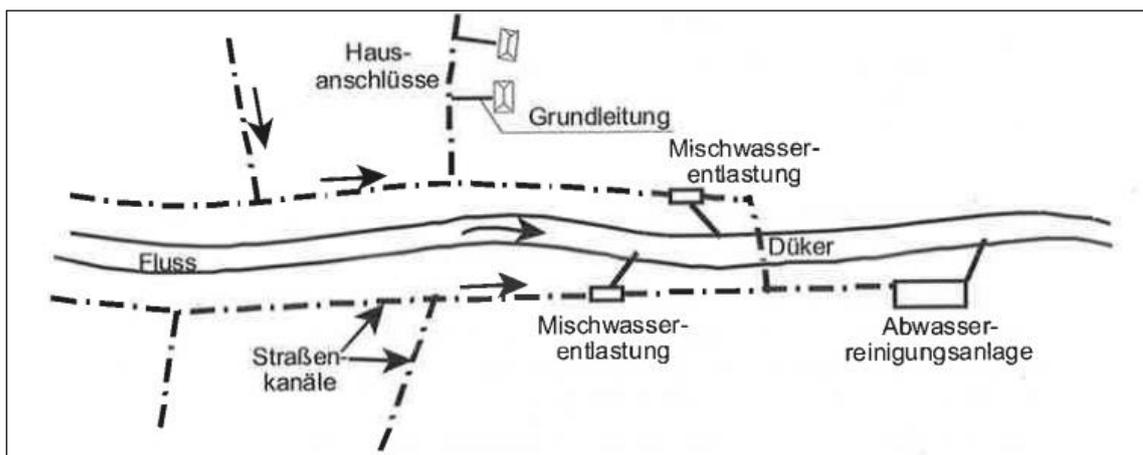


Abbildung 1-5: wesentliche Bestandteile eines Entwässerungssystems (Kainz u. a., 2012)

Konventionelle Systeme der Siedlungsentwässerung bestehen damit im Grunde aus einem unterirdischen Leitungsnetz, das durch Schachtbauwerke mit der darüber liegenden, versiegelten Oberfläche verbunden ist und bei anfallendem Niederschlag die benötigte Entwässerungsfunktion erfüllt. Durch das Entwässerungssystem wird Regenwasser somit gesammelt, konzentriert und auf schnellstem Wege aus dem urbanen Gebiet abgeleitet. Großen Gebieten wird dadurch indirekt die Wassergrundlage entzogen, es kommt zu Absenkungen des Grundwasserspiegels und zu Auswirkungen auf das lokale Klima (UHI). Die Bereiche am Ende des Systems (z.B. Abwasserreinigungsanlage) werden durch die anfallenden Wassermassen hingegen massiv belastet (hydraulischer Stress, Schadstoffe, etc.). Konventionelle Systeme der Siedlungsentwässerung können neben dem eigentlichen Entwässerungsnetz auch Bauwerke zur Zwischenspeicherung

bzw. Retention beinhalten und sind im Allgemeinen der Grauen Infrastruktur zuzuordnen.

Der Begriff der Grünen Infrastruktur als Teil der Niederschlagswasserbewirtschaftung umfasst eine Vielzahl von Maßnahmen, die gegenüber konventionellen Systemen hauptsächlich Vorteile in der Abflussbeschaffenheit sowie der Ökologie mit sich bringen. Maßnahmen Grüner Infrastruktur sind in der Literatur unter „Low Impact Development“ (LID), „Sustainable Urban Drainage Systems“ (SUDS), „Water Sensitive Urban Design“ (WSUD) oder im deutschsprachigen Raum unter Niederschlagswasserbewirtschaftung (NWB) zu finden und sind im Prinzip den Niederschlags-Abfluss-Verhalten von natürlichen, unbebauten Gebieten nachempfunden. Durch die Anwendung von naturnahen NWB-Maßnahmen kann nach Hunt u. a. (2010) eine Reduktion der Abflussspitzen und Volumen, eine Erhöhung der Infiltration, eine höhere Grundwasseranreicherung, eine Bewahrung von natürlichen Gewässern und eine Verbesserung der Wasserqualität durch verschiedene Möglichkeiten der Schadstoffentfernung erreicht werden.

Naturnahe NWB-Maßnahmen gelten im Gegensatz zu konventionellen Systemen als dezentral zu bewirtschaften und sind modular anwendbar, wodurch sie sich miteinander kombinieren lassen und oder erweitert werden können.

Ahiablame u. a. (2012) gaben einen Überblick der Ergebnisse verschiedener Untersuchungen hinsichtlich der Wirkungsweise mehrerer naturnaher NWB-Maßnahmen. Neben der Verbesserung der Abflussqualität wird auch ein großes Potenzial zur Verbesserung hydrologischer Abflussparameter (VR und SR) festgestellt.

Die volkswirtschaftliche Sinnhaftigkeit von naturnahen NWB-Maßnahmen steht bei großflächiger Implementierung in urbanen Gebieten aufgrund einer massiven Verbesserung der Lebensbedingungen (Luft- Wasserverschmutzung, Stabilisierung des Stadtklimas, Biodiversität usw.) vieler Menschen außer Frage (CNT, 2011).

Grüne Infrastruktur bildet den Überbegriff für eine Vielzahl von Maßnahmen, wobei unter anderen Speichermulden, Gründächer sowie durchlässige Verkehrsflächen wohl die größten Anwendungsmöglichkeiten für den urbanen Bereich bieten.

### 1.4.1 Speichermulden

Speichermulden sind abgesenkte Zonen, die darauf ausgelegt sind, anfallenden Regenwasserabfluss aufzunehmen, zu infiltrieren und verzögert wieder abzugeben. Sie werden zumeist in Wohn- sowie Gewerbegebieten eingesetzt und können in verschiedenen Vegetationsintensitäten ausgeführt werden (Dietz, 2007). Das System beruht nach Geiger & Dreiseitl (2001) auf flächenförmiger Versickerung über eine belebte Bodenschicht und ermöglicht eine sehr gute biologische Reinigung der Zulaufwässer sowie den Rückhalt von ungelösten Stoffen. Das Funktionieren der Maßnahme muss durch regelmäßige Reinigung und Kontrolle (z.B. Laubfall im Herbst) sowie durch eine regelmäßige Mahd sichergestellt werden. Diese Maßnahme findet vor allem bei mäßig durchlässigen Untergrund Anwendung und stellt anhand der guten Reinigungsleistung nur geringe Anforderungen an das zu versickernde Wasser. Speichermulden benötigen einen geringeren Platzbedarf als Flächenversickerungen und können zur Gestaltung des urbanen Lebensraums eingesetzt werden (Geiger & Dreiseitl, 2001).

Die Konstruktionsvarianten von Speichermulden reichen von bloß mit Rasen (Abbildung 1-6) bewachsenen Mulden bis hin zu stärker bewachsenen Bioretentionszonen. Letzteren unterscheiden sich im Allgemeinen von Speichermulden durch eine deutlich dichtere Vegetation und eine darauf abgestimmte Substrat- und Speicherschicht.

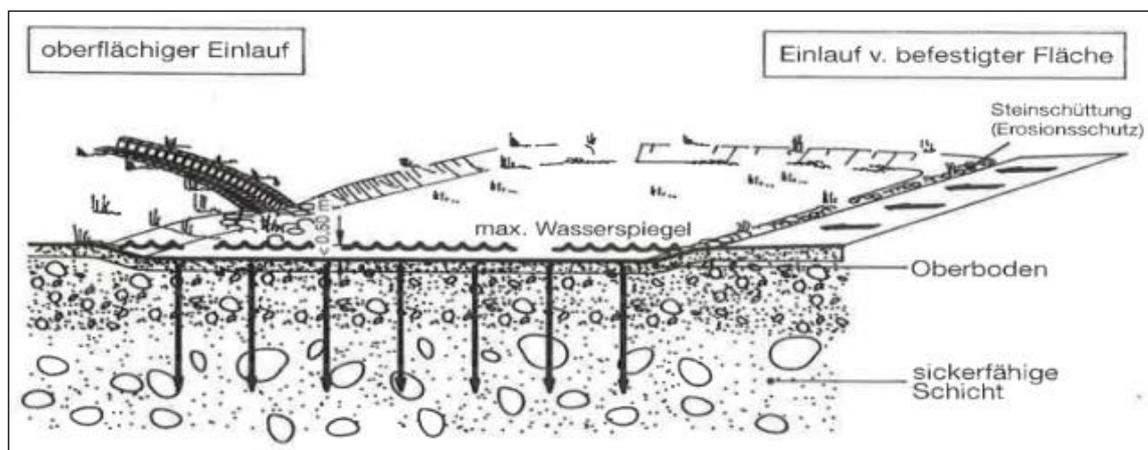


Abbildung 1-6: Schnitt durch Speichermulde (Geiger & Dreiseitl, 2001)

Bioretentionszonen ermöglichen durch Umwandlungsprozesse eine Verringerung der Nährstoffkonzentration (Stickstoff, Phosphor) des anfallenden Wassers und können somit wirksam zur Reduktion der Eutrophierung beitragen. Durch die Verringerung der Metallkonzentration (Cu, Zn, Pb) können sie auch zur Behandlung von Niederschlagswasser von Verkehrsflächen eingesetzt werden. Die Anlage reduziert außerdem wirksam die Konzentration von Fecal coliform und Escherichia coli-Bakterien (Indikatororganismus Wasserqualität, Fäkalverunreinigung) im abfließenden Wasser und bietet somit zusammen mit der deutlichen

Reduktion des Spitzenabflusses viele Vorteile gegenüber konventionellen Maßnahmen (Hunt W. F. u. a., 2008).

Jia u. a. (2015a) zeigten die Fähigkeit von Speichermulden und Bioretentionszonen die Quantität und Qualität von anfallenden Niederschlagsabfluss zu beeinflussen. Für Speichermulden mit einer Tiefe von 15 cm, Längen von 15 bis 36 m sowie Breiten von 2 und 4 m konnte durchschnittlich eine VR von 36,2 % und eine SR von 44,3 % ermittelt werden. Für den Einsatz von Bioretentionszonen konnten sogar noch höher Werte mit rund 62 % VR und ca. 66 % SR festgestellt werden.

In Tabelle 1-1 lassen sich folgende Vor- und Nachteile feststellen.

Tabelle 1-1 Vor- und Nachteile von Speichermulden modifiziert nach Geiger & Dreiseitl (2001) und Assinger (2012)

Vorteile	Nachteile
gute Retentions- und Reinigungswirkung (Versickerung durch Oberboden)	Missbrauch der Muldenbereiche z.B. durch Ablagerung von Unrat oder Gartenabfällen
vielfältige Gestaltungs- und Bepflanzungsmöglichkeiten	keine intensive Nutzung möglich (Verringerung der Durchlässigkeit anhand Oberflächenverdichtung z.B. Spielfläche)
geringer technischer Aufwand	hoher Flächenbedarf von 10 – 20 % der angeschlossenen Fläche
leichte Wartung (Zugänglichkeit)	Flächenverfügbarkeit (urbanen Raum)

### 1.4.2 Gründächer

Dachflächen stellen in der Regel im urbanen Gebiet neben Verkehrsflächen den größten Anteil der Gesamtfläche (Palla & Gnecco, 2015; Krebs u. a., 2016a) dar. Aus der vermehrten Anwendung von Gründächern können besonders im städtischen Bereich vielfältige Nutzen gezogen werden. Neben der hydraulischen Reduktion und der qualitativen Verbesserung des Dachabflusses können Gründächer auch als thermische Isolierung und zur Reduktion von Lärm und Schadstoffen in der Luft eingesetzt werden (Vijayaraghavan, 2016).

Den zentralen Bestandteil des Gründachaufbaus (Abbildung 1-7) bildet dabei das speicherfähige Bodensubstrat mitsamt Bepflanzung, durch welches eine Abflussretention und eine Reduktion der maximalen Abflussmenge (Verdunstung) erreicht werden kann. Innerhalb des Systems kann es zu einer biologisch-mechanischen Reinigung von Regenwasser sowie Absorption von Luftschadstoffen kommen, innerhalb der ersten zwei bis drei Jahre ist jedoch mit vermehrten Wartungsaufwand zu rechnen (Geiger & Dreiseitl, 2001).



Abbildung 1-7: Schema der Komponenten eines Gründachaufbaus (Vijayaraghavan, 2016) mod.

Im Aufbau bzw. im System können bei Dachbegrünungen extensive und intensive Systeme unterschieden werden. Extensive Gründächer können durch ihre geringe Konstruktionsstärke auch auf bestehenden Dachanlagen nachgerüstet werden, bilden für die Implementierungen in urbanen Gebieten somit die günstigere Variante, weisen jedoch auch ein geringeres Retentionsvermögen auf (Dietz, 2007). Als Bepflanzung kommen aufgrund der geringen Stärke der Substratschicht Vegetationsarten mit geringer Wurzeltiefe in Frage. Intensive Dachbegrünungen werden hingegen mit einer deutlich größeren Substratschichtstärke ausgeführt, wodurch auch Vegetationsformen größeren Maßstabs (z.B. Bäume) eingesetzt werden können. Schematisch werden Gründächer aus drei Schichten aufgebaut (Rossman & Huber, 2016b), welche jeweils unterschiedliche Funktionen zu erfüllen haben. So bildet der Oberflächenlayer das Substrat für am Dach vorgesehene Vegetation und hat erst einmal die Aufgabe Niederschlagswasser aufzunehmen und zu infiltrieren. Der mittlere Layer dient der Speicherung von anfallenden Wasser aus oberen Schichten, hat bei großen Ereignissen eine Retentionswirkung und versorgt die Vegetation bei Bedarf mit aufsteigender Feuchtigkeit. Der unterste Layer dient als Drainage des Systems und verhindert eine hydraulische Überlastung. Die Konstruktion, die verwendeten Materialien sowie deren Parameter können in der Literatur unter anderem bei Krebs u. a. (2016b) oder Getter u. a. (2007) entnommen werden.

Die vermehrte Anwendung von Gründächern ist aufgrund ihrer vielen positiven Eigenschaften ein zentraler Bestandteil von Entwicklungskonzepten urbaner Gebiete. Durch den Einsatz von Dachbegrünungen kann eine starke Reduktion des Dachabflussvolumens (bis zu 85 %) erreicht werden, womit die Entwässerungssysteme entlastet und folglich die abgeschlagenen MW-Volumina in natürliche Gewässer deutlich reduziert werden. Des Weiteren kann durch ihren Einsatz positiv auf die Qualität der Luft in urbanen Gebieten eingewirkt werden, indem zentrale Schadstoffe wie PM<sub>10</sub>, CO, NO<sub>2</sub> oder O<sub>3</sub> abgebaut bzw. von der Biomasse absorbiert werden (Deutsch & Whitlow, 2005).

Die positiven Auswirkungen bei großräumiger Gründachimplementierung sind bereits in mehreren Studien untersucht worden. Palla & Gnecco (2015) stellen deutliche Verbesserungen in den hydrologischen Abflussparametern eines urbanen Einzugsgebiets fest. Demzufolge kann bei Ausnützung von 100 % des Gründachpotenzials mit einer SR von bis zu 45 %, einer VR von bis zu 23 % sowie einer Hydrografenverzögerung von bis zu 19 % gerechnet werden. Versini u. a. (2015) betrachten die Auswirkungen von großflächigen Gründachanwendung auf urbane Einzugsgebiete in Frankreich und stellen eine deutliche SR von 60 % sowie eine VR von 45 % bei Ausschöpfung des gesamten Ausbaupotenzials fest. Außerdem können die entlasteten Volumina der MW-Kanalisation deutlich um bis zu 60% reduziert werden.

In Tabelle 1-2 lassen sich folgende Vor- und Nachteile dieser naturnahen NWB-Maßnahme feststellen.

Tabelle 1-2 Vor- und Nachteile von Gründachanlagen modifiziert nach Geiger & Dreiseitl (2001) und Assinger (2012)

Vorteile	Nachteile
biologisch-mechanische Reinigung des Abflusses	hoher Wartungsaufwand besonders bei Intensivbegrünung
gute Abflussretention und Reduktion von Luftschadstoffen	Nachrüsten nur bedingt möglich, besonders bei Intensivbegrünung (Statik)
Anwendung im urbanen Gebiet gut möglich	hohe Ausführungskosten
Temperaturregulierung (UHI-Effekt)	

### 1.4.3 Durchlässige Verkehrsflächen

Verkehrsflächen mit traditioneller Asphalt bzw. Betondeckschicht gelten in der Regel als versiegelte Flächen bei der mit keiner nennenswerten Infiltration in die darunterliegenden Tragschichten gerechnet werden kann. Ein großer Teil der versiegelten, innerstädtischen Fläche entfällt auf Verkehrsflächen (Palla & Gnecco, 2015), die somit ein großes Potenzial für Entsiegelungsmaßnahmen aufweisen.

Nach Dietz (2007) können durchlässige Verkehrsflächen (engl. permeable oder porous pavement system, abg. PPS) in mehreren Konstruktionsarten ausgeführt werden und gelten als Maßnahme der Flächenversickerung. Neben Betonsteinpflasterungen mit durchlässigen Fugen (permeable) werden nach Scholz u. a. (2014) auch poröse Beton- sowie Asphalt-schichten (porous) als PPS bezeichnet (Abbildung 1-8). Die Durchgängigkeit des Aufbaues hat sich bis in die Tragschicht fortzusetzen, des Weiteren sind gegebenenfalls Drainageelemente vorzusehen.

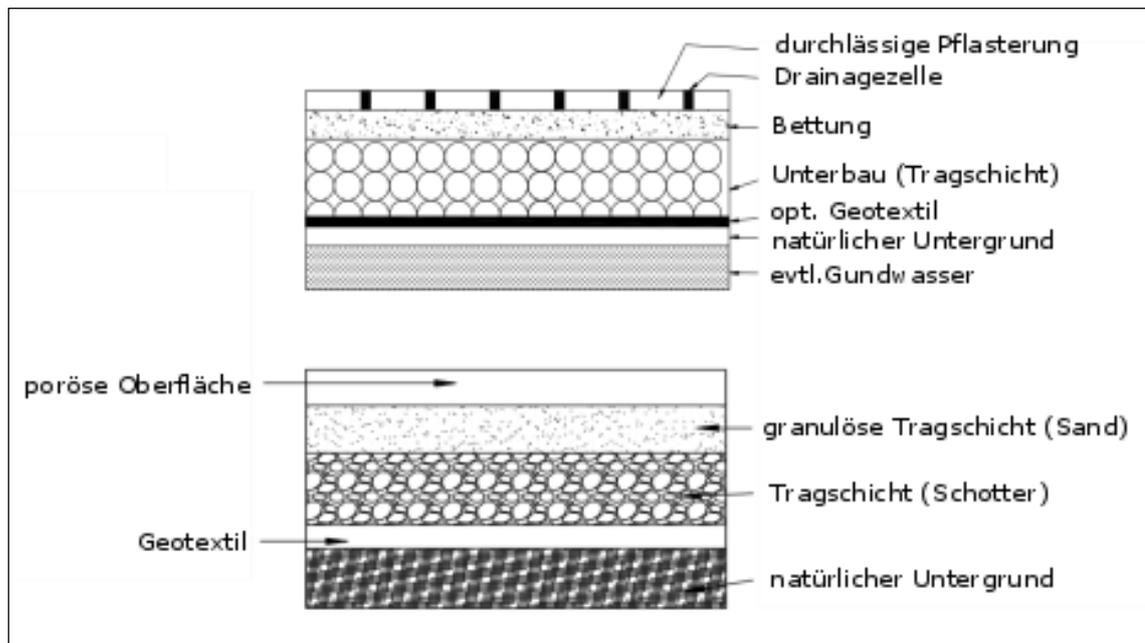


Abbildung 1-8: Aufbau von permeable (obere Abb.) und porous (untere Abb.) pavement (PPS) nach Scholz u. a. (2014) modifiziert

PPS ermöglichen es durch Infiltration sowie Retention die Höhe von Abflussspitzen sowie die Menge von Abflussvolumina bei Niederschlagsereignissen zu reduzieren. Fassman & Blackbourn (2010) untersuchten in einem Feldversuch die Infiltrationseigenschaften verschiedener Asphaltstrukturen bei mehreren Niederschlagsereignissen und konnten durchschnittlich eine SR und VR von ca. 7 mm/h bzw. rund 3 mm infolge einer PPS-Anwendung feststellen. Jato-Espino u. a. (2016) zeigten, dass durch den Einsatz von PPS das Auftreten von Überflutungen durch Überlastung des Entwässerungssystems verhindert werden kann. Für den Einsatz von 7500 m<sup>2</sup> PPS ergaben sich eine VR von 67,6 % bei einer Effektivität von 0,138 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. Palla & Gnecco (2015) stellten bei einer Implementierung von PPS auf 16 % der Verkehrsflächen eine SR von 3 % fest. Laut Qin u. a. (2013) können PPS zur Abflussreduktion eingesetzt werden.

Neben der quantitativen Leistungsfähigkeit ist jedoch auch sicherzustellen, dass durch Infiltrationsprozesse qualitative Immissionsparameter nicht beeinträchtigt

(WRG, Kapitel 1.3.5) werden. Nach Drake u. a. (2014) kann durch die Anwendung von PPS eine qualitative Verbesserung (Reduktion von Na, Cl, Nährstoffen und Schwermetallen) des Drainageabflusses festgestellt werden.

Bei Newman u. a. (2006) hat sich gezeigt, dass mittels mikrobiellen Vorgängen eine Dekontamination sichergestellt werden kann, indem Ölfractionen, die an der Oberfläche des Aufbaus anfallen, eingetragen und durch die poröse Struktur direkt bis zum Geotextil weitergeleitet und zurückgehalten werden. Durch die dort angesiedelten Mikroorganismen findet unter aeroben Bedingungen (ausreichend Luft-Sauerstoff vorhanden) ein Abbau bzw. eine Umwandlung der Hydrocarbonate statt. Die Aufrechterhaltung der aeroben Bedingungen ist daher sicherzustellen, da bei anaeroben Bedingungen (keinerlei Sauerstoff vorhanden) die Produktion von übelriechenden Treibhausgasen stattfinden würde. Durch die poröse Struktur des PPS und die Infiltration von Niederschlagswasser sollte jedoch eine ausreichende Versorgung mit Sauerstoff ermöglicht werden. Das langfristige Aufrechterhalten der Abbauprozesse sowie der Drainage-Eigenschaften der Konstruktion hängen stark von der Wahrung einer existenzfähigen Population von Mikroorganismen ab. Das eingebaute Geotextil bietet den Bakterien auch bei hydraulischem Stress einen geschützten Lebensraum, verhindert die Austragung von Schadstoffen und ist daher essenziell für die Funktionsweise des Systems. Die Wirkungsweise sowie Reinigungsleistung der PPS kann in einer durchgeführten Langzeitstudie über fünf Jahre nachvollzogen werden. So ist der zurückgehaltene Anteil des aufgebracht Mineralöls nie unter 97 % gefallen wobei sich der Rückhaltekoeffizient nach 600 Tagen bei 98,5 % einpendelt (Newman u. a., 2006).

Bedingt durch die allmählich voranschreitende Verknappung der Trinkwasserressourcen werden bereits alternative Systeme zur Gewinnung bzw. Nutzbarmachung angedacht. Eine interessante Möglichkeit ist es den tendenziell negativen Auswirkungen der Versiegelung etwas Positives abzugewinnen, indem mittels versiegelter Verkehrsfläche Niederschlagswasser gesammelt und nutzbar gemacht wird. Durchlässige Asphaltsschichten ermöglichen durch ihre Konstruktion eine Reduktion des Spitzenabflusses, ein gewisses Retentionsvermögen und Infiltrationsvermögen. Diese Eigenschaften können somit nutzbar gemacht werden, um das in die Konstruktion eingedrungene Wasser für Bewässerungszwecke verwenden zu können. Nnadi u. a. (2015) haben in ihrer Untersuchung die Eignung von Niederschlagswasser zur Wiederverwendung nach vorherigem Durchsickern eines durchlässigen Asphaltaufbaus untersucht. Zur Nachbildung eines Schadstoff- bzw. Nährstoffeintrag wird in regelmäßigen Abständen Schmieröl sowie Dünger aufgebracht, welche durch eine simulierte Beregnung in das System eingetragen wird. Die Analyse mittels eines Spektrometers stellt im abfließenden Wasser kaum Ölfractionen fest, wodurch PPS durchaus Potenzial

zur Nutzbarmachung von Niederschlagswasser für Bewässerungszwecke nachgesagt werden kann. Die hohe Menge an im Wasser gelöster Nährstoffe stellt jedoch, aufgrund eines geringen Nährstoffrückhalts bzw. Abbaus in der Konstruktion, eine eventuelle Rückführung in den natürlichen Wasserkreislauf in Frage.

In Tabelle 1-3 lassen sich folgende Vor- und Nachteile dieser naturnahen NWB-Maßnahme feststellen.

Tabelle 1-3 Vor- und Nachteile von PPS modifiziert nach Geiger & Dreiseitl (2001), Scholz u. a. (2014) und Assinger (2012)

Vorteile	Nachteile
geringer technischer Aufwand	geringe Speicherefähigkeit
gute Reinigungsleistung (Schmutz- und Schadstoffe) besonders bei teilweise bewachsenen Flächen	direkte Versickerung rechtlich oft nicht möglich
reduzierter Oberflächenabfluss	großer Flächenbedarf
Vielseitig nutzbar	Festsetzen der Poren (Kolmation)
unterstützt Grundwassernachbildung durch Entsiegelung	hohe Ausführungskosten
Wassernutzung möglich	

#### 1.4.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Konventionelle Herangehensweisen an die Niederschlagsbewirtschaftung (graue Infrastruktur) versuchen im Prinzip anfallendes Niederschlagswasser auf schnellsten Wege aus urbanen Gebieten in Gebiete mit geringerer Priorität abzuleiten. Die Herangehensweise bei naturnahen NWB-Systemen ist hingegen eine ganz andere. Anfallendes Niederschlagswasser wird nicht abgeleitet, sondern vor Ort (dezentral) nutzbar gemacht.

Wirtschaftliche Betrachtungen in diesen Bereich werden hauptsächlich mittels Kostenvergleichsrechnungen (DWA, 2012) oder Lebenszyklusanalysen angestellt, wobei ein einheitlicher Aufbau für eine gute Vergleichbarkeit der Varianten notwendig ist.

Eine Kostenvergleichsrechnung von naturnahen NWB-Maßnahmen enthält üblicherweise leichter monetarisierbare Positionen wie z.B. Kosten für Errichtung und Betrieb, Kostenreduktion für Abwasserreinigung, verringerte Überflutungsschäden, Wertsteigerung von Liegenschaften. Positionen, deren Nutzen schwerer abzuschätzen ist, wie beispielsweise Nutzen für die Umwelt, verringerte Schadstofffrachten, erhöhte Grundwasseranreicherung, sollten jedoch nicht vernachlässigt werden (EPA, 2007).

Ein entscheidender Teil von wirtschaftlichen Betrachtungen kann im urbanen Umfeld auch die Flächenverfügbarkeit sein. Dezentral organisierte, naturnahe

NWB-Maßnahmen können entlang von Straßen oder auf Grundstücksteilen situiert werden. Für die Errichtung von konventionellen Maßnahmen wie etwa Rückhaltebecken werden hingegen große zusammenhängende Flächen benötigen.

Bei der Analyse der Errichtungskosten von 17 Fallbeispielen kann festgehalten werden, dass naturnahe NWB-Maßnahmen im Schnitt um 15 bis 80 % günstiger als vergleichbare konventionelle Systeme sind. Dabei kann anhand geringerer Flächenversiegelung sowie durch Erhaltung von unbebauten Gebieten entsprechendes Material eingespart werden (EPA, 2007).

Zhan & Chui (2016) beschrieben die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse für die Anwendung von naturnahen NWB-Maßnahmen über das Stadtgebiet von Hong Kong. Für die Analyse ist zuerst die Ermittlung der versiegelten Flächen notwendig, um danach ein realistisches Anwendungspotenzial bestimmen zu können. Darauf folgend können Lebenszykluskosten sowie der Nutzen der Maßnahmen bestimmt werden. Bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten wird vor allem zwischen Kapitalkosten sowie Kosten für Betrieb und Instandhaltung unterschieden. Beim Lebenszyklusnutzen kann zwischen ökonomischen, ökologischen und sozialen Nutzen unterschieden werden. Der Nutzen einer stadtweiten Anwendung von naturnahen NWB-Maßnahmen wurde dabei über einen 30-jährigen Zeitraum mit 41,58 bis 56,09 Milliarden US\$ beziffert, wobei der größte Teil davon (sozialer Nutzen) auf durch die WTP-Methode (engl. „Willingness To Pay“) ermittelte Beträge zurückgreift. Die Lebenszykluskosten wurden dabei auf 55,8 Milliarden festgesetzt. In der Untersuchung wurde über eine voraussichtliche Maßnahmenlebensdauer von 30 Jahren ein recht ausgeglichenes Kosten-Nutzen Verhältnis (+2,3 bis -12,2 Milliarden US\$) festgestellt. Hong Kong verfügt über ein Trennsystem wodurch, im Vergleich zu einem Mischsystem, vermeintlich weniger positive Effekte geltend gemacht werden können (Zhan & Chui, 2016).

Die Untersuchung eines 30 ha großen Projektgebiets mit einem Versiegelungsgrad von 59 % in Foshan City (China) hat die Kostenermittlung einer großräumigen Implementierung von naturnahen NWB-Maßnahmen zum Ziel. Dabei werden die Errichtungskosten sowohl für (I) ein Szenario der geringsten Kosten als auch für (II) eine Variante mit maximaler Leistungsfähigkeit eingehend betrachtet. Nach Durchführung etwaiger Optimierungen können die Kosten für Szenario I bzw. II auf 11,74 bzw. 29,13 Mio. Yuan (ca. 1,51 bzw. 3,75 Mio. € mit derzeitigen Kursfaktor von 0,1288) festgehalten werden. Entsprechend den Zielvorgaben können somit für die Errichtung von NWB-Maßnahmen, bezogen auf das Projektgebiet, je Prozent Reduktion des Abflussvolumens 0,682 Mio. Yuan (ca. 88 000 €), Reduktion des Spitzenabflusses 0,523 Mio. Yuan (ca. 67 000 €) sowie Schadstoffreduktion 0,580 Mio. Yuan (ca. 75 000 €) angegeben werden (Jia u. a., 2015b).

Montalto u. a. (2007) verglichen die Kosteneffizienz von naturnahen NWB-Maßnahmen mit einem konventionellen System (Mischwasserüberlaufspeicher) hinsichtlich der Reduktion von entlasteten Mischwasservolumina. Der Einsatz von naturnahen, dezentral organisierten, NWB-Maßnahmen zeigt sich bei großflächiger Anwendung als kosteneffizienter als zentrale Mischwasserspeicher. Dezentrale NWB-Maßnahmen können außerdem weitaus besser skaliert werden, da die Situation Stück für Stück angepasst werden kann. Dem gegenüber steht im Vergleich zu zentralen eine erschwerte Wartung und Kontrolle von dezentralen Maßnahmen.

## 1.5 Projektgebiet

Im folgenden Unterkapitel soll ein Einblick in die Beschaffenheit, die geschichtliche sowie zukünftige Entwicklung des Projektgebiets gegeben werden. Das Projektgebiet – das „Wagner-Biro Viertel“ – liegt im nordwestlichen Teil der steirischen Landeshauptstadt Graz (Abbildung 1-9), westlich des Hauptbahnhofes, des Bahnhofgürtels sowie der Südbahntrasse und umfasst mit 69,9 ha in etwa ein Fünftel der Gesamtfläche des 4. Grazer Bezirks Lend (370,1 ha).

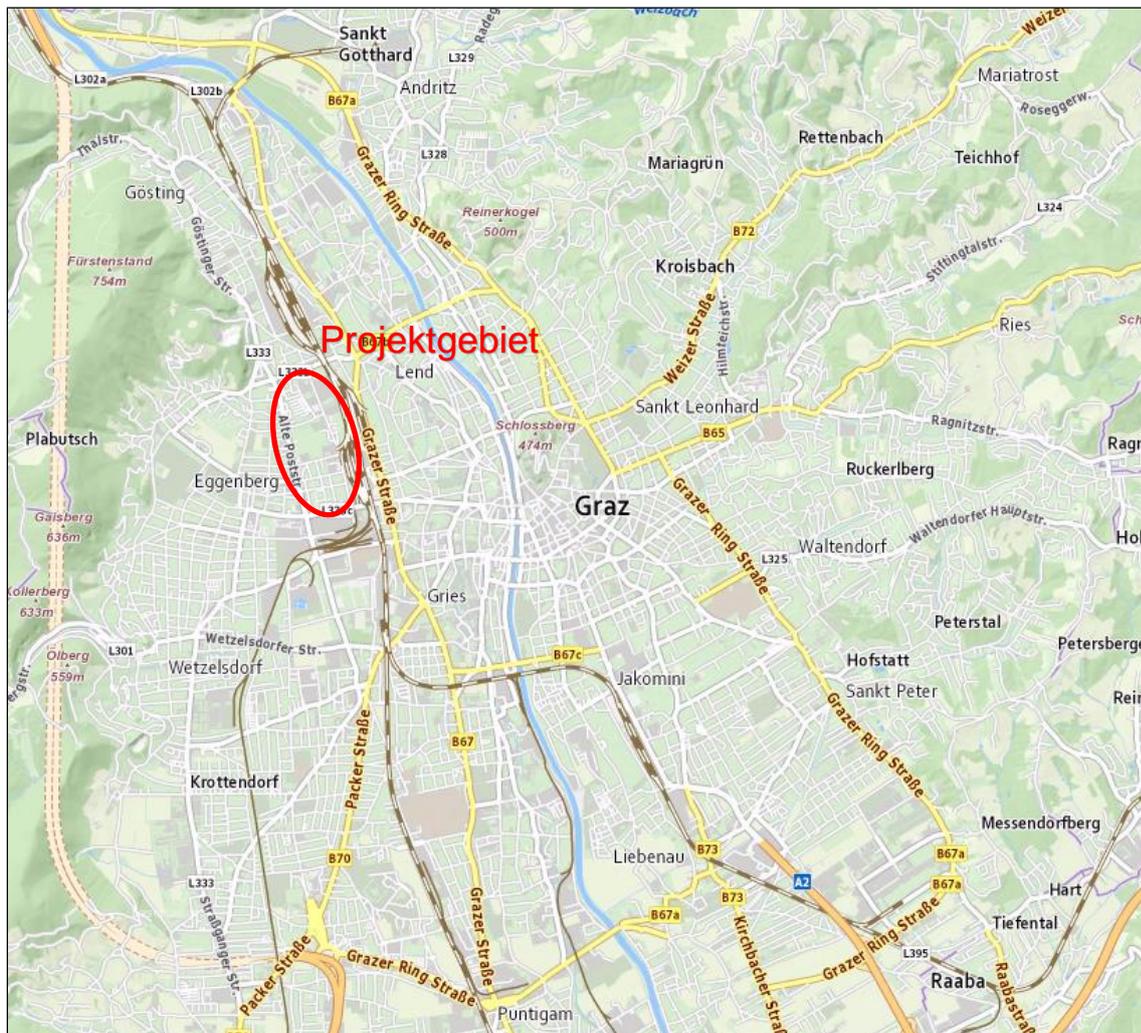


Abbildung 1-9: Übersichtskarte des Grazer Stadtgebiets – das Projektgebiet „Wagner-Biro Viertel“ in Rot umrandet (basemap.at Karte, 2017)

Wie in Abbildung 1-10 ersichtlich, wird es im Norden von der Peter-Tunner-Gasse, im Westen von der Alten Poststraße und im Süden von der Eggenberg Straße eingegrenzt. Die Wagner-Biro-Straße kommt keiner Abgrenzung des Projektgebiets nach, da Nordöstlich von ihr noch größere Teile des betrachteten Einzugsgebietes liegen. Die Festsetzung der nordwestlichen Gebietsgrenzen erfolgte zu großen Teilen anhand fester Abgrenzungen des Gefahrenbereiches der Bahnstrecke, womit primär ein Begehen der Gleisanlagen verhindert werden soll.

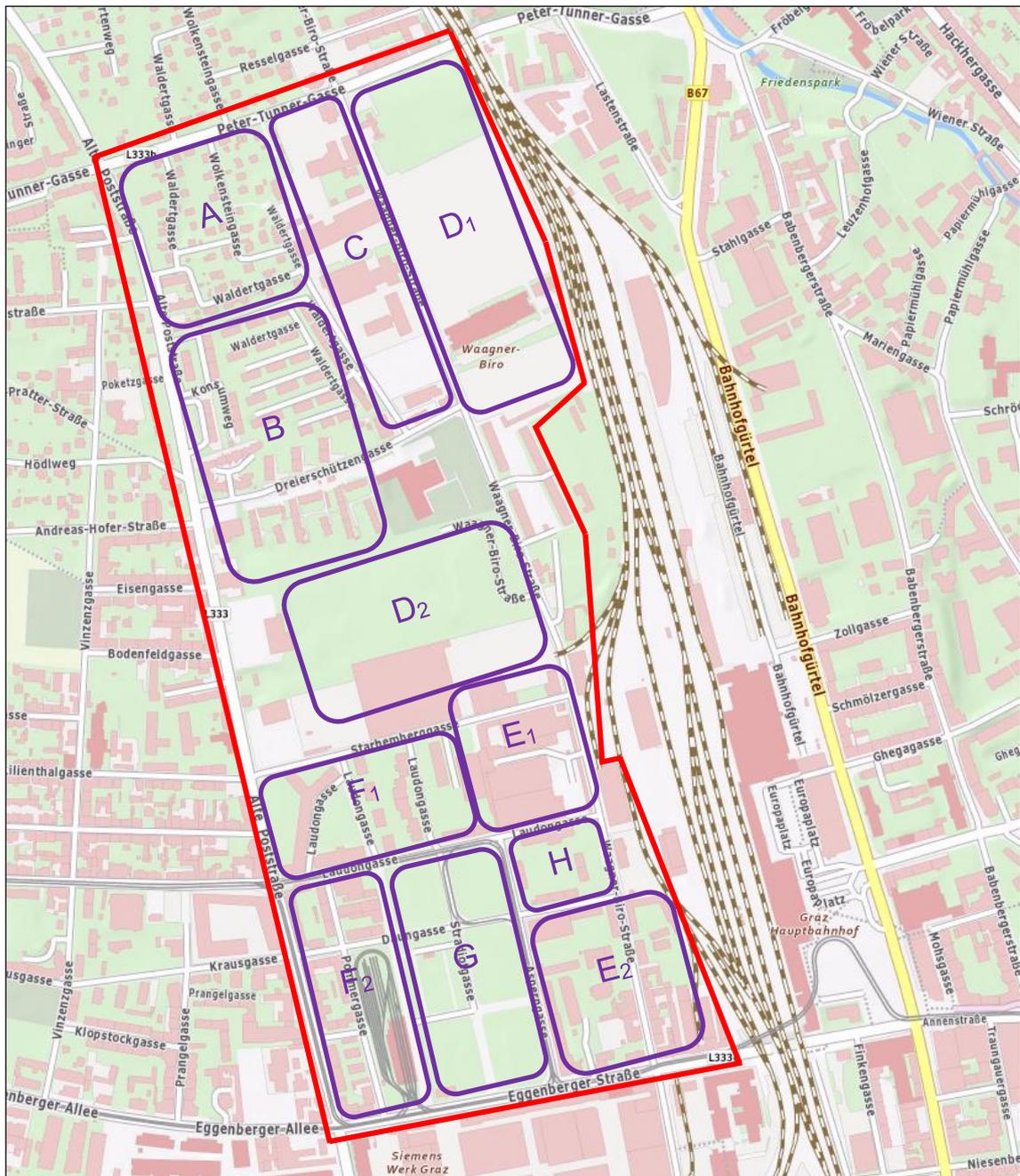


Abbildung 1-10: Übersichtskarte des Projektgebiets Wagner-Biro – Projektgebiet in Rot umrandet (basemap.at Karte, 2017)

Das Projektgebiet weist auf insgesamt 69,9 ha Fläche eine recht heterogene Oberflächenstruktur in Bezug auf Bebauungsdichte, Flächenversiegelung bzw. -verfügbarkeit sowie Nutzungstyp auf. Wie in Abbildung 1-10 ersichtlich, sind die unterschiedlichen Strukturgebiete direkt nebeneinander vorzufinden und zumeist nur durch Verkehrsfläche voneinander getrennt. Nachfolgend wird versucht, auf die unterschiedlichen Areale des Projektgebiets näher einzugehen, wobei die Areale analog Abbildung 1-10 bezeichnet werden:

Der nordwestlichste Bereich des Projektgebiets (A) ist durch eine aufgelöste, gering bebaute Siedlungsstruktur gekennzeichnet. Es finden sich hier großteils Einfamilienhäuser mitsamt etwaiger Garagen- und Terrassenzubauten und Verkehrsflächen geringer Verkehrsstärken (Zufahrtsstraßen). Der Anteil der versiegelten Oberfläche ist relativ gering und weist demnach eine geringe Abflusswirksamkeit auf (siehe Kapitel 1.3.3 und Gleichung 1-1). Für den Bereich A kann somit, verglichen mit anderen Bereichen des GPG, eine geringe hydraulische Belastung des Entwässerungssystems angenommen werden. Gleich südlich an A grenzt ein Areal mit einer weitaus dichteren Bebauung an, das zu großen Teilen aus Mehrparteiengebäuden mitsamt dazugehöriger Infrastruktur besteht (B). Trotz der dichteren Bebauung sind in diesem Bereich durchaus noch nichtversiegelte Flächen sowie Grünflächen vorzufinden. Der größere Teil der Fläche ist erst kürzlich (vor ca. 10 Jahren) von großen Bauträgern entwickelt und bebaut worden. Hierbei sind entsprechend den gesetzlichen Vorgaben bereits einige Maßnahmen der Grünen Infrastruktur zur Anwendung gekommen und daher kann von einem günstigen Niederschlags-Abfluss-Verhalten ausgegangen werden. Der kleinere Teil der Arealfläche entlang der Alten Poststraße sowie der Dreierschützengasse ist durch Gebäude des späten 20. Jahrhunderts gekennzeichnet. Bei dieser Art der Bebauung kann von einer direkten Abflusswirksamkeit ausgegangen werden, womit das Abflussverhalten als eher negativ anzusehen ist. Direkt westlich von Bereich A befindet sich eine ausgeprägte Gewerbe-Industriefläche, die sich durch eine deutlich großräumige Struktur sowie durch höhere Versiegelungsgrade abhebt (C). Großflächige direkt an das Entwässerungssystem angeschlossene Dach- und Asphaltflächen sowie wenige Grünflächen lassen für diesen Bereich ein eher negatives Verhalten bei Niederschlagsereignissen erahnen. Die Bereiche D bieten aufgrund der Verfügbarkeit von großen aneinanderhängenden Flächen ein hohes Entwicklungspotenzial und werden daher auch im Zuge des Smart City Projekts einer städtebaulichen Verwendung zugeführt. Der Nordöstlichste Bereich (D<sub>1</sub>), östlich der Waagner-Biro-Straße, ist zum größten Teil als unbebaute Fläche anzusehen, die früher als Betriebsgelände genutzt wurde und in naher Zukunft einer wohnbaulichen Nutzung zugeführt werden wird. Aufgrund einer lückenlosen Umzäunung ist es, zur Zeit der Durchführung dieser Arbeit, nicht möglich den größeren, nördlichen Teil des Gebiets (vgl. Baufeld Nord und Mitte) ausführlich zu begutachten, die Vornutzung lässt jedoch auf eine zumindest teilweise Versiegelung der Fläche schließen. Der südlichere Teil des Gebiets (vgl. Baufeld Süd) wird zurzeit als Hundewiese genutzt und weist somit keine Versiegelung auf. Ebenfalls im Gebiet D<sub>1</sub> befindet sich das Areal der Helmut-List Halle, das die Baufelder Nord-Mitte und Süd voneinander abtrennt. Die Anlagengestaltung des Veranstaltungszentrums weist zwar im Allgemeinen große versiegelte Flächen auf, die jedoch auf ein Minimum reduziert und auch nicht direkt abflusswirksam scheinen. Südlich der Bereiche B und C befindet sich der zweite Teilbereich des Smart City Waagner-Biro Projekts (D<sub>2</sub>), in der Karte

noch als Grünfläche ohne Verbauung dargestellt, deren Oberfläche in letzter Zeit stark abgeändert wurde. Die freie Fläche ist dabei allmählich durch große Wohngebäude bebaut worden, wobei die Errichtung weiterer Gebäude noch folgt (Kapitel 1.5.2 und 1.5.3). Die südlichen Teilbereiche des GPG (E, F, G, H) sind aufgrund ihrer Lage und Bebauung am ehesten dem Grazer Stadtzentrum zuzuordnen. Der Bereich wird im Osten hauptsächlich gewerblich-industriell und im Westen Großteils wohnbaulich genutzt, wobei sich inmitten des Gebiets noch großflächige Grünflächen befinden. Der Bereich E<sub>1</sub> wird hauptsächlich gewerblich genutzt und weist dahingehend einen hohen Versiegelungsgrad der Oberfläche auf. Die großflächigen Überdachungen der Produktions- bzw. Lagerstätten sowie die dazwischenliegenden Asphaltflächen sind tendenziell direkt an das städtische Entwässerungssystem angeschlossen. Infiltrationsoffene Flächen und Grünflächen sind nur in geringen Umfang vorhanden. Der südöstliche Randbereich des Projektgebiets (E<sub>2</sub>) zeichnet sich durch eine sehr starke Versiegelung der Oberfläche aus. Die Fläche wird für Gewerbe und Industriezwecke verwendet und es sind große Dachflächen vorhanden. Lager und Abstellflächen sowie Verkehrsflächen sind beinahe ausschließlich asphaltiert und gelten somit als versiegelt. Das Niederschlags-Abfluss-Verhalten von E<sub>2</sub> ist ähnlich E<sub>1</sub> einzuschätzen, wobei der Anteil der Dachflächen an der TIA etwas niedriger scheint. Am südlichen Randbereich, westlich von Gebiet (E<sub>2</sub>), befindet sich ein beinahe komplett unbebautes Gebiet (G). Es handelt sich dabei um eine großflächige Kleingartenanlage, die hauptsächlich von ehemaligen Mitarbeitern der Holding Graz und Siemens Benutzung findet. Die vorzufindende Oberfläche besteht aus großflächigen Wiesen- und Vegetationsflächen, kaum versiegelten Verkehrsflächen sowie kleinen Dachflächen. Die wenigen versiegelten Flächen weisen außerdem kaum eine Verbindung zum Entwässerungssystem auf und gelten somit als nicht abflusswirksam. In Kapitel 1.5.3 werden Angaben über eine mögliche Umnutzung dieses Areals in naher Zukunft gemacht. Zwischen den Gebieten E an der Waagner-Biro-Straße gelegen, befindet sich ein weiteres Wohnareal bestehend aus Mehrparteienhäusern mitsamt einem zentral gelegenen Parkareal (H). Der Grad der Versiegelung kann aufgrund großer Grünflächen als ausgeglichen angesehen werden. Versiegelte Flächen hingegen entwässern primär direkt ins Kanalsystem und gelten somit als abflusswirksam. Der südwestlichste Teil des Projektgebiets (F) ist durch mehrgeschossigen Wohnbau sowie durch dazugehörigen Verkehrs- und Stellflächen gekennzeichnet, wobei besonders der südlichere Teil (F<sub>2</sub>) regelrecht eine Wohnblockstruktur mitsamt Innenhöfen aufweist. Im Bereich F<sub>1</sub> hingegen sind noch größer Grünflächen vorzufinden. Die Oberfläche des Teilbereiches F<sub>2</sub> weist bereits einen hohen Grad der Versiegelung auf (>50 %). Der größte Teil der vorhandenen Dach- und Verkehrsflächen weisen plangemäß eine direkte Verbindung mit dem Entwässerungssystem auf, wodurch bei Niederschlag mit einem weniger guten Abflussverhalten gerechnet werden muss.

Tabelle 1-4 Übersicht der Teilbereiche des Projektgebiets

<b>Teilbereiche des Projektgebiets</b>	<b>Vorwiegende Nutzung</b>	<b>Fläche [ha]</b>	<b>Fläche vom GPG [%]</b>
<b>A</b>	Wohnen (gering dicht)	~ 6,7	~ 10
<b>B</b>	Wohnen (mitteldicht)	~ 8,8	~ 13
<b>C</b>	Gewerbe	~ 5,1	~ 7,5
<b>D<sub>(1,2)</sub></b>	Smart City (Wohnen)	~ 16	~ 23
<b>E<sub>(1,2)</sub></b>	Gewerbe/ Industrie	~ 8,5	~ 13
<b>F<sub>(1,2)</sub></b>	Wohnen (dicht)	~ 9,3	~ 13
<b>G</b>	Kleingarten	~ 5,5	~ 8
<b>H</b>	Wohnen (dicht)	~ 1,4	~ 2

In Tabelle 1-4 ist eine Übersicht der Teilareale des Projektgebiets zu erkennen. Es zeigt sich, dass das Gebiet der Smart City rund ein Viertel der Gesamtfläche des EZG ausmacht und somit künftige Änderungen der Oberflächenbeschaffenheit auf alle Fälle Einfluss auf das Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Gesamtprojektgebiets (GPG) haben werden.

Neben der vorhandenen Oberflächenstruktur soll auch der Bestand der Mischwasserkanalisation aufgezeigt werden, da diese ein zentrales Element der Projektgebietsentwässerung bildet. Das im Projektgebiet vorhandene Entwässerungssystem ist in Abbildung 1-11 ersichtlich. Es ist gut zu erkennen, dass die unmittelbare Nähe der Bahntrasse die Erstellung des Systemlayouts in erheblichen Ausmaß beeinflusst hat und das gesamte Gebiet südwestlich der Bahntrasse somit lediglich an zwei Stellen an das übrige Stadtgebiet angebunden ist. Durch die Mischwasserkanalisation in der Peter-Tunner-Gasse wird der gesamte nördliche Teil des Projektgebiets entwässert. Der Strang in der Eggenbergerstraße, mit einer Dimension von 2100 mm, kann als Kanalhauptstrang angesehen werden und entwässert den gesamten südlichen Bereich des Projektgebiets. Auch westliche Bereiche werden durch den Sammler in der Eggenbergerstraße entwässert.

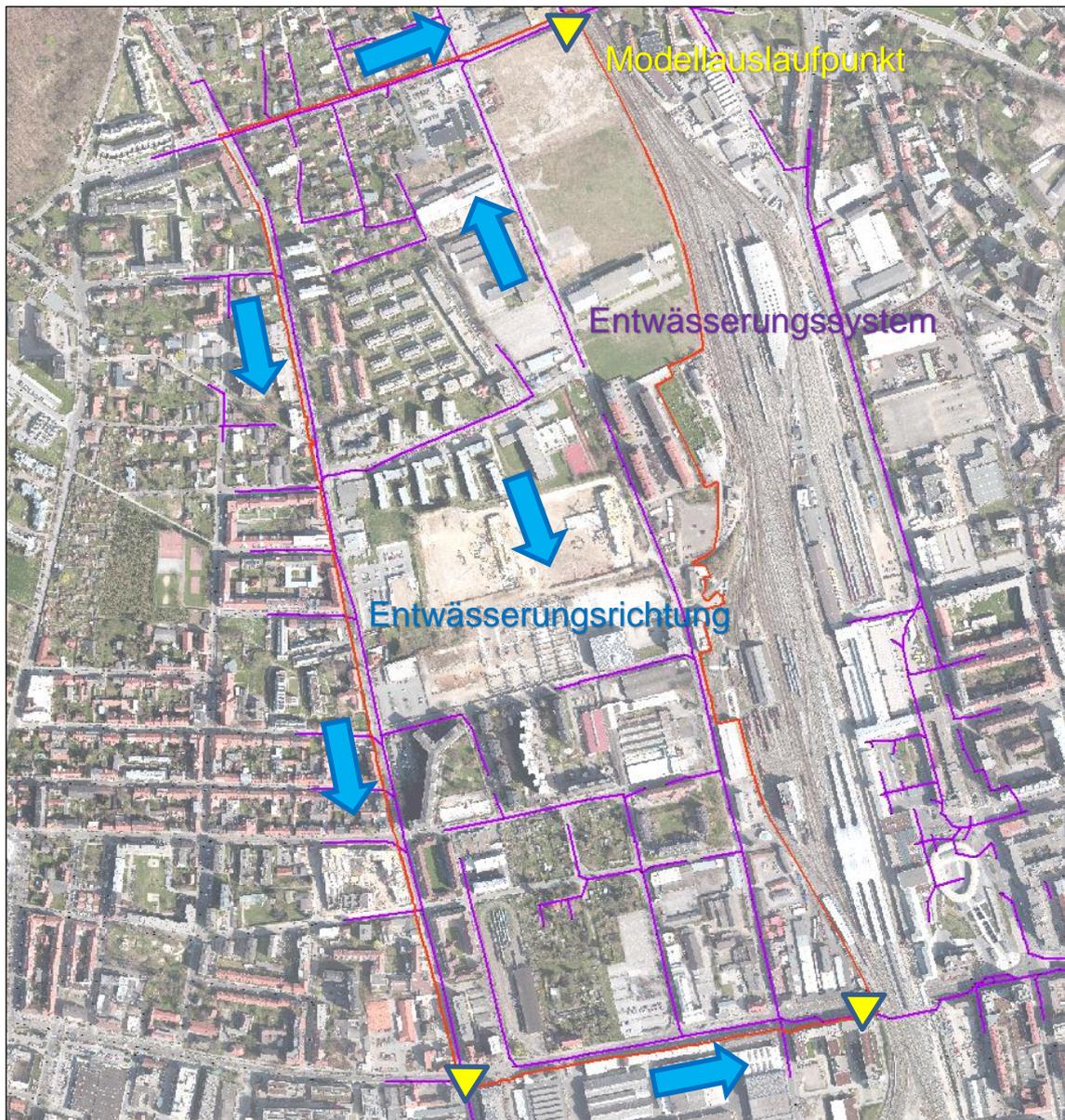


Abbildung 1-11: Übersicht des Entwässerungssystems (beschnitten) im Projektgebiet – Verlauf des Entwässerungssystems (Linien), Modellauslaufpunkte (Dreiecke) und Entwässerungsrichtungen (Pfeile) – Projektgebiet in Rot umrandet und (ArcGIS)

Nachfolgend ein Kurzüberblick der Kerndaten des Entwässerungssystems:

- Länge: ca. 7,5 km
- Dimension (Profilhöhe): 150 bis 2100 mm
- Sohlhöhe und Gefälle: ca. 356 bis 354.88 bzw. 0,51 bis 113,5 mm/m
- Hauptmaterial: Beton (B), Sphäroguss (GGG), Steinzeug (STZ)
- Errichtungszeitraum: 1890 bis 2016

### 1.5.1 Geschichtliche Entwicklung

Das „Waagner-Biro Viertel“ zeigt eine interessante Geschichte mitsamt mehrmaliger Wendepunkte. Die Entwicklung des Gebiets hin zum Zentrum der Grazer Industrie findet durch das Konzept der Smart City Waagner-Biro vorerst einen gelungenen Abschluss.

Mit der Errichtung der Eisenbahn sowie des Hauptbahnhofes Mitte des 19. Jahrhunderts wurde auch Graz an das wichtigste Transportnetz der damaligen Zeit angeschlossen. Durch diese grundlegende Verbesserung der Rahmenbedingungen siedelten sich Industrieunternehmungen und hauptsächlich metallverarbeitende Betriebe wie z.B. die Andritzer Maschinenfabrik (später Waagner-Biro AG) im Nahbereich des Bahnhofs an. Damit einhergehend kam es zu einem Aufschwung der Stadt und dadurch zu einem Zuzug von Metallarbeitern, die zumeist in Quartieren im Bezirk Lend untergebracht wurden. Durch die Bombardierung im Zweiten Weltkrieg (Abbildung 1-15) erfolgte eine weitgehende Zerstörung der Betriebe sowie der Wohneinheiten im Bahnhofsnahbereich (Abbildung 1-12).



Abbildung 1-12: zerstörtes Bahnhofsviertel in Graz im Jahr 1945 (Kleine Zeitung, 2015  
© Steiermärkisches Landesarchiv)

In der Nachkriegszeit wurde das „Waagner-Biro Viertel“ wiederaufgebaut, wobei durch die Errichtung vieler heute noch bestehender Hochhäuser das Gebiet von der Stadtgrenze in das Zentrum der Stadt gerückt wurde (Stadtbaudirektion Graz, 2013). Anhand der geschichtlichen Entwicklung des Waagner-Biro Viertel lassen

sich für die heutige Zeit schon mehrere Punkte erahnen, die bei der Planung von Bauprojekten in diesen Bereich zu Problemen führen können:

Durch die hohe Dichte von Industriebetrieben (Abbildung 1-13), der Aufrechterhaltung des Betriebes einiger Produktionsstätten bis ins 21. Jahrhundert sowie hoher Verkehrsbelastungen kann auf eine tiefgreifende Kontaminierung des Baugrunds im Sinne des Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) geschlossen werden. Im Altlasten-Kataster (BMLFUW, 2017a) des Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft können für den Bereich des Projektgebiets jedoch keine schwerwiegenden Untergrundverunreinigungen ausgelesen werden (Abbildung 1-14).



Abbildung 1-13: historisches Industrieviertel an der Waagner-Biro-Straße (Smart Future Graz | [www.gat.st](http://www.gat.st), 2012)

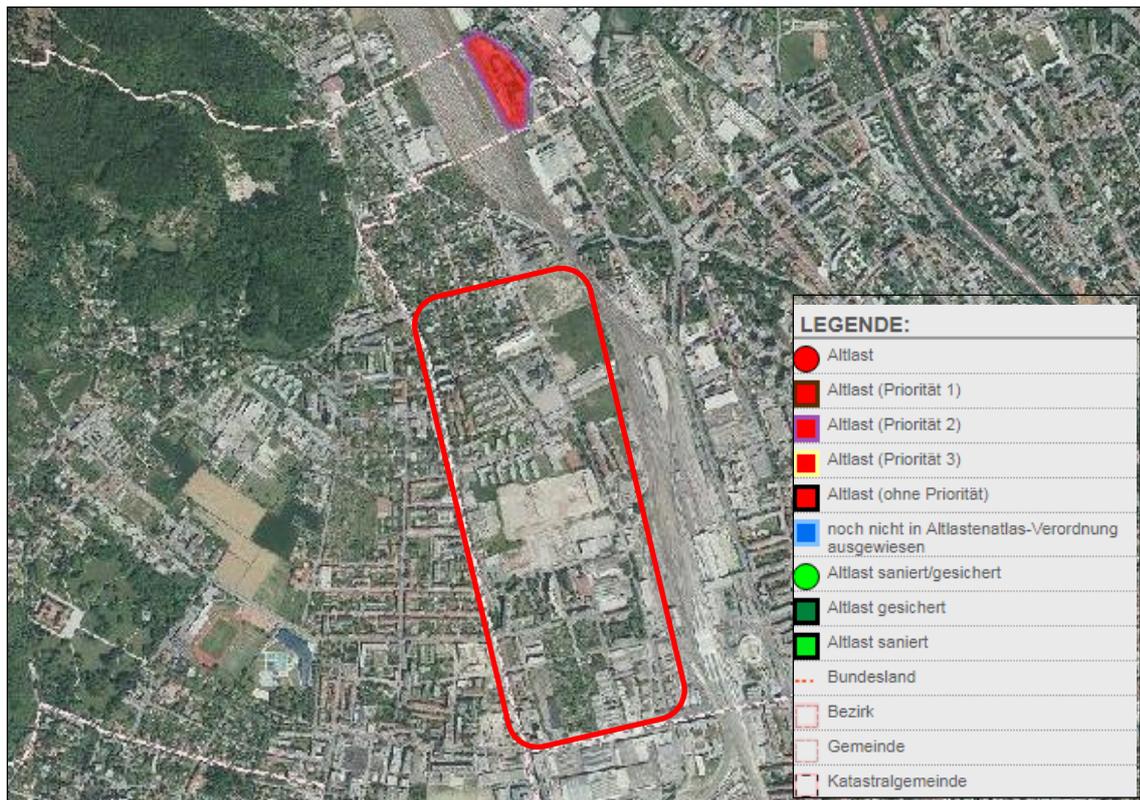


Abbildung 1-14: Kataster der Abfallablagerungen oder Untergrundverunreinigungen – Projektgebiet in Rot umrandet (BMLFUW, 2017a)

Durch die Bombardierung von Graz im Zweiten Weltkrieg kann es im Nahbereich des Bahnhofes nicht ausgeschlossen werden, bei Grabungsarbeiten Kriegsrelikte vorzufinden. Daher sind vor Beginn von Bauarbeiten entsprechende Unterlagen bzw. Institutionen zu konsultieren. In Abbildung 1-15 sind die Bombenverdachtsflächen für den Bereich des Hauptbahnhofes dargestellt. Beinahe das gesamte Projektgebiet befindet sich in der „roten Zone Luftkrieg 1945“ des Verdachtsflächenkatasters. Der Bahnhof, die Nord-Süd Bahnstrecke sowie umliegende Industriebetriebe wurden bei den Bombardierungen als Primärziele ausgemacht, womit sich ebenjene Nord-Süd Ausrichtung im Verdachtsflächenkataster widerspiegelt.



## 1.5.2 Smart City Waagner-Biro

Im Waagner-Biro Viertel, einem ehemaligen Industriegebiet, wird versucht durch innovative Konzepte einen Stadtteil zu entwickeln, der energieeffizient bzw. energieautark, emissionsreduziert und möglichst ressourcenschonend ist, um damit den sich darin aufhaltenden Personen eine lebenswerte Umgebung bieten zu können. Das Projekt Smart City geht aus dem Vorgängerprojekt „I LIVE GRAZ“ hervor, gilt als Leitprojekt für ganz Österreich und teilt sich in Smart City West und Süd, wobei die Projekte Waagner-Biro sowie Reininghaus Teil der Smart City West sind (Stadtbaudirektion Graz, 2013; Klima- und Energiefonds, 2013).

Der Projektbereich Smart City Waagner-Biro wird etappenweise vorangetrieben und soll mit der Errichtung der neuen Mittelschule 2023 fertiggestellt werden (Abbildung 1-16). Zur Zeit der Durchführung dieser Arbeit sind die Teile Cool City und Science Tower so gut wie fertiggestellt. Durch die Baufelder Nord, Mitte und Süd (2019 bis 2022) wird das Erscheinungsbild sowie die Oberfläche des Areals beträchtlich umgestaltet. Für diese Bereiche kann jedoch von einer Planung im Sinne der Ziele und Grundsätze der Grünen Infrastruktur ausgegangen werden.

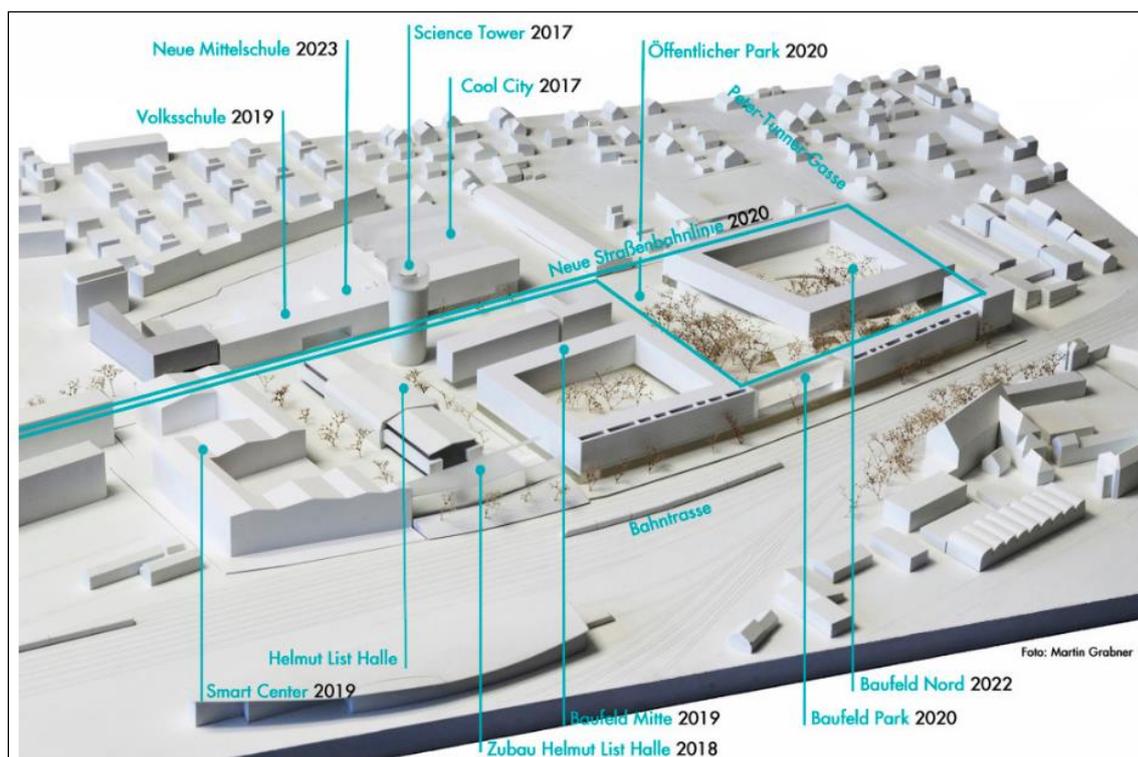


Abbildung 1-16: Übersicht der geplanten Teilprojekte im Projektgebiet Smart City Waagner-Biro (Stadtbaudirektion Graz, 2013)

Ein Teilziel des Projekts ist die Anwendung von innovativen Technologien mit möglichst geringen Emissionen (Zero Emission). Verschiedenste Technologiekomponenten werden daher innerhalb des Projekts und unter realen Bedingungen erprobt:

Durch den Aufbau einer lokalen Energieproduktion (z.B. „Grätzel-Zellen“) kann der Stadtteil unabhängig mit Energie versorgt werden. Die Grätzel-Zelle ist eine innovative Photovoltaik Anlage, die ähnlich der pflanzlichen Photosynthese funktioniert und somit Licht in elektrischen Strom umwandelt. Diese Technologie wird in der Smart City erstmals in einem größeren Maßstab eingesetzt und würde bei einwandfreier Anlagenfunktion eine Energieautarkie sicherstellen. Außerdem ist die Anwendung verschiedener, anderer Systeme vorgesehen wie etwa eine solare Kühlung, Smart-Heat-Grids und eine nachhaltige Mobilität inkl. E-Mobility (Stadtbaudirektion Graz, 2013).

Der Rahmenplan Smart City Waagner-Biro ist in Abbildung 1-17 dargestellt. Darin ist eine deutliche räumliche Trennung des Gebiets durch die geplante öffentliche Parkanlage ersichtlich. Als Zentrum des Gebiets soll neben den Grünflächen auch die Platzgestaltung rund um den Science Tower und die Helmut-List Halle dienen. Gut zu erkennen ist auch die geplante Anbindung des Bereiches an das Straßenbahnnetz, womit zumindest eine Steigerung des motorisierten Individualverkehrs entlang der Waagner-Biro-Straße zufolge der Neubauten vermieden werden sollte.

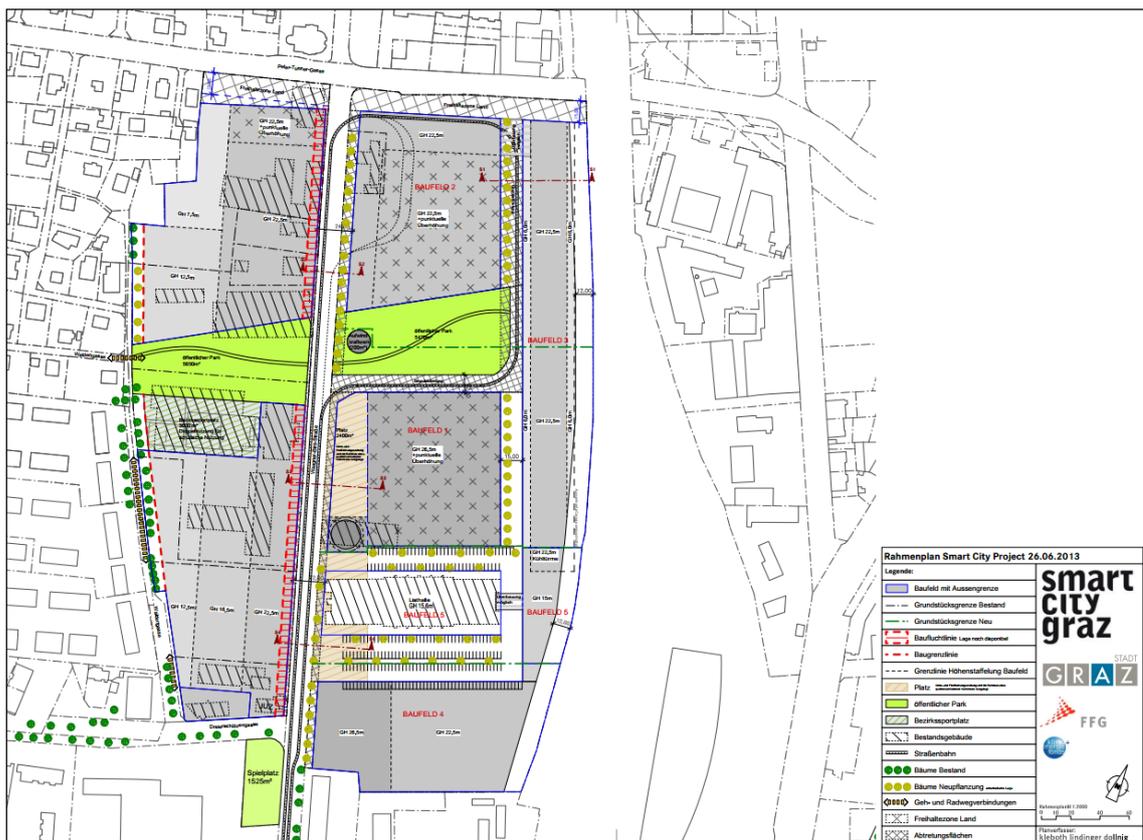


Abbildung 1-17: Rahmenplan Smart City (Stadtbaudirektion Graz, 2013)

### 1.5.3 Teilprojekte der Smart City in Ausführung/Planung

Die Umsetzung der Teilprojekte der Smart City ist über einen Zeitraum von in etwa zehn Jahren angedacht, wobei die ersten fertiggestellten Projekte (Science Tower, Cool City) bereits im Jahr 2017 in Betrieb gehen sollen:

Der 60 Meter hohe "Science Tower" befindet sich gleich nördlich der Helmut-List Halle und soll zukünftig als Ort der Wissenschaft und Innovation fungieren. Die zwölf nutzbaren Geschoße sollen hauptsächlich Betriebe beherbergen, die sich der Forschung bzw. Entwicklung von Zukunftstechnologien verschrieben haben. Die Fassade des Towers ist doppelschalig ausgeführt und dient unter anderem der Erprobung verschiedener Technologien (z.B. Grätzel-Zelle).

Das Cool City Projekt, nordöstlich der Helmut-List Halle, umfasst ein Studentenheim, mehr als 100 Wohnungen, eine Kinderkrippe, ein Café sowie Gewerbeflächen, die zur Nahversorgung dienen sollen. Das Projekt soll mit Ende 2017 vollständig fertiggestellt sein.

Auf halber Höhe zwischen Starhembergasse und Dreierschützengasse, gleich südlich des BORG Dreierschützengasse befindet sich ein weiteres Teilprojekt der Bebauung der Freifläche entlang der Waagner-Biro-Straße. Dabei erfolgt die Bebauung in zwei Wohnblöcken und wird von eigenständigen Bauträgern (ÖWG, Wohnwerk-Wohnbaugruppe) vorangetrieben. Dieses Projekt zeichnet sich durch eine ansprechende Oberflächengestaltung aus, indem durch die Ausführung einer großzügigen Tiefgarage nur wenig der umliegenden Oberfläche versiegelt werden muss.

Ein weiteres Teilprojekt in der Bebauung des unbebauten Areals nördlich der Starhembergasse in der Nähe zur Kreuzung zur Waagner-Biro-Straße befindet sich bereits in der Planung. Der Wettbewerb zur Erstellung eines Bebauungskonzeptes (Abbildung 1-18) ist bereits abgeschlossen und wurde von Dr. Hansjörg Tschom für sich entschieden. Das Konzept orientiert sich dabei augenscheinlich an der bereits zum Teil fertiggestellten Wohnanlage nördlich der neu zu errichteten Wohnanlage Starhembergasse. Notwendige PKW-Stellflächen werden unterirdisch in Parkgaragen sichergestellt, dadurch kann die Oberfläche einer sinnvolleren Nutzung (Grünanlagen, Sportstätten, usw.) zugeführt werden. Dem Entwurf kann ebenfalls entnommen werden, dass an der westlichen Seite des Grundstücks eine großzügige Parkanlage vorgesehen werden soll (Bundeskammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten, 2016).



Abbildung 1-18: Wohnbebauung Starhembergstraße – Entwurf Dr. Tschom (Bundeskammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten, 2016)

Für den südlichen Teil des Projektgebiets, von der Eggenberger Straße bis Laudongasse, hat die Stadtbaudirektion Graz anhand einer Entwicklungsstudie bereits andeutungsweise gezeigt, wie sich dieses nur zum Teil bebaute Areal des Wagner-Biro Viertels zukünftig verändern soll (Abbildung 1-19). Da größere Bereiche des Areals zurzeit von Kleingartenanlagen belegt sind, besteht hier Potenzial zur Verdichtung und das zu einem Bruchteil der Kosten, wie es bei andersartigem Bestand der Fall wäre. In der Entwurfsstudie der Architekten Zechner & Zechner lassen sich großräumige Parkanlagen erkennen, die den Grad der Versiegelung in einem annehmbaren Maß halten sollten. Ausführlichere Aussagen über die Entwicklung dieses Teiles des Projektgebiets scheinen auf Grund des Entwicklungsstandes noch etwas verfrüht.

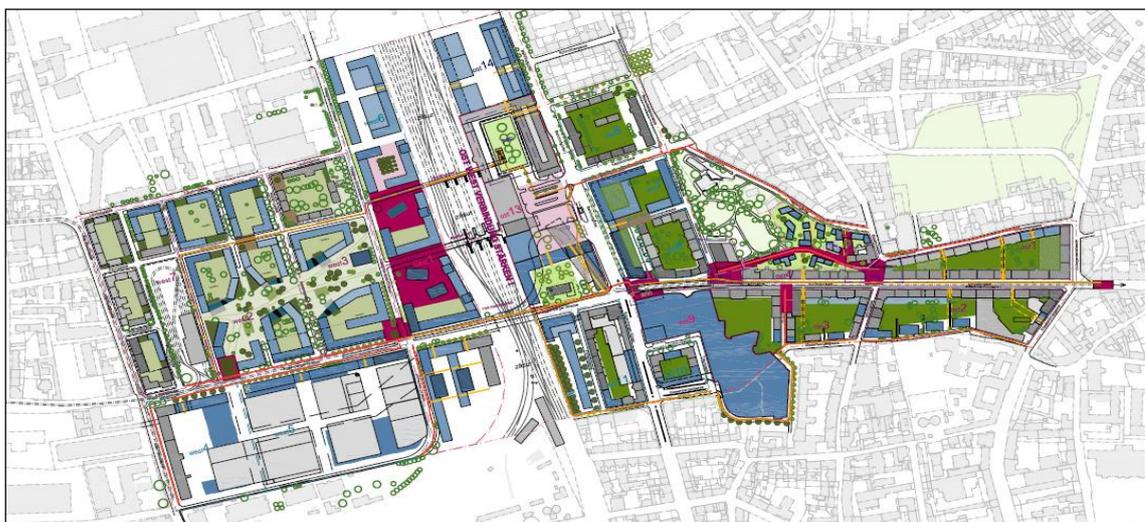


Abbildung 1-19: Entwurfsstudie zur Umgestaltung des Bahnhofsviertel – im südlichen Teil des Projektgebiet (Stadtbaudirektion Graz, 2017)

## 1.6 Geografische Informationssysteme

Geografische Informationssystem (GIS) ermöglichen eine effiziente Verwaltung, Verknüpfung, Analyse und Interpretation von raumbezogenen Datensätzen und sind daher bei Planungs-, Analyse- und Verwaltungsvorgängen nicht mehr wegzudenken.

Dabei bilden geografische Datensätze den wesentlichsten Teil eines jeden GIS, da ohne diese keinerlei Anwenderinteraktionen möglich wären. Die Erfassung von Raumdaten kann heutzutage relativ einfach unter Zuhilfenahme verschiedenster GPS-Systeme erfolgen, wobei neben den geografischen Koordinaten auch die Raumhöhe in einem zumeist länder- oder regionsspezifischen Dateiformat aufgenommen werden. GIS ermöglichen es unter anderem Raumdaten unterschiedlicher Datenformate derart aufzubereiten, dass diese miteinander kombinierbar sind (Transformation).

GIS bieten eine Vielzahl von Verwendungsmöglichkeiten und können unterschiedliche Strukturen aufweisen. Am Markt gibt es eine große Auswahl von Anbietern, wobei sich in den letzten Jahren einige wenige qualitätsvolle Systemanbieter herauskristallisiert haben. Für die Bearbeitung dieses Projekts wird das GIS ArcGIS von ESRI verwendet.

ArcGIS ist ein weitverbreitetes, geografisches Informationssystem (entwickelt von der Environmental System Research Institute Inc. (ESRI)), das eine große Anzahl von Werkzeugen der Datenbearbeitung und Analyse zur Verfügung stellt. Insbesondere die räumlichen Analysetools (Spatial Analyst) bieten eine breite Palette von Werkzeugen, die für die Bearbeitung von Infrastrukturprojekten herangezogen werden können.

## 1.7 Niederschlags-Abfluss-Simulationssoftware

Das folgende Unterkapitel beinhaltet den Aufbau und die Funktionsweise der verwendeten Simulationssoftware. Dabei werden wichtige Teilprozesse der Modellbildung näher betrachtet.

Um auch bei ständiger Ausdehnung urbaner Bereiche (vgl. Kapitel 1.3.3, 3.5) die Funktionsfähigkeit elementarer Infrastruktursysteme gewährleisten zu können, sind die entsprechenden Systeme wie beispielsweise der Stadtentwässerung kontinuierlich anzupassen. Die geltende Rechtslage sieht im Allgemeinen ein Verbot von Verschlechterungen (z.B. WRG, Kapitel 1.3.5) jeglicher Art vor, demzufolge muss bei Anpassungen die rechtlich-technische Unbedenklichkeit nachgewiesen werden. Manuelle Methoden der Belastungsabschätzung und Nachweisführung sind aufgrund der hohen räumlich-dynamischen Variabilität der Belastung von Entwässerungssystemen nur mehr bedingt zweckdienlich. Eine Nachweisführung mit Hilfe von numerischen Modellsimulationen ist mittlerweile definierter Stand der Technik.

Für numerische Simulationen von Niederschlags-Abfluss-Prozessen im urbanen Bereich kann zwischen mehreren Systemen gewählt werden, wobei nur einige wenige als Modellierungsgesamtpaket anzusehen sind. Elliott & Trowsdale (2007) gaben einen Überblick über den Stand der Modellierungswerkzeuge und legen dabei den Fokus auf die Fähigkeit der Modelle aussagekräftig naturnahe NWB-Maßnahmen abbilden zu können. In der Untersuchung sind MUSIC, SWMM sowie WBM am besten in der Lage, die Mehrheit der untersuchten Maßnahmen in einer guten Qualität wiederzugeben. Diese Pakete zeichnen sich für den Bereich der naturnahen NWB-Maßnahmenmodellierung als zu favorisierende Systeme ab, wobei nach Ansicht der Autoren noch keines der untersuchten Systeme in der Lage ist, das volle Maßnahmen Spektrum in der gewünschten Qualität abzubilden. Neben den Anwendungsmöglichkeiten von naturnahen NWB-Maßnahmen werden die Modelle auch anhand zeitlicher Auflösung, Abbildung des Einzugsgebiets- und des Entwässerungssystems, Abflusserzeugung und -ableitung (Quantität) sowie der Möglichkeit der Einbindung von Kontaminationen (Qualität) miteinander verglichen. Es sind hier noch MIKE, HYSTEM-EXTRAN und KANAL++ zu erwähnen, die im deutschsprachigen Raum stark verwendet werden. Jayasooriya & Ng, (2014) betrachteten in ihrer Arbeit ebenfalls mehrere Modellierungswerkzeuge in der städtischen Siedlungsentwässerung und stellen diese in einem mehrstufigen Prozess gegenüber. Die Möglichkeit der Implementierung von Grüner Infrastruktur wird ausführlich untersucht, wobei das Hauptaugenmerk hauptsächlich auf Werkzeuge zur Bestimmung der Ausführungskosten bzw. Lebenszykluskosten gelegt wird.

Für die Durchführung dieser Masterarbeit wurde SWMM als Modellierungstool gewählt. Es findet sowohl Anwendung im akademischen als auch im kommerziellen Bereich und bietet eine breite Palette an spezifischer Literatur. Das Storm Water Management Model (SWMM) von der U.S. Environmental Protection Agency der USA (EPA) ist ein dynamisches Niederschlags-Abfluss-Simulationsmodell, das sowohl für Einzel- als auch Langzeit-Niederschlagsereignisse zur Ermittlung von Quantität und Qualität der anfallenden Abwässer von primär urbanen Gebieten verwendet werden kann. Es wurde 1971 erstmals vorgestellt, wird seitens der EPA kontinuierlich weiterentwickelt und findet Anwendung in Planung und Analyse von Systemen mit Niederschlagswasserabflussbezug, wie vor allem Regen-, Misch- und Schmutzwasserkanalisationen sowie anderen Drainagesystemen. SWMM bietet unter anderem die Möglichkeit hydraulische (Abflussrouting im Entwässerungssystem etc.) und hydrologische (Niederschlag, Evapotranspiration, Infiltration etc.) Prozesse abzubilden und kann durch Objektteilung die räumliche Variabilität der Systeme (Diskretisierung) im EZG mittels möglichst homogener Bereiche nachbilden. Neben der Erzeugung und dem Transport von Abflüssen können auch Abschätzungen der Schadstoffkonzentrationen vorgenommen werden (Rossman, 2004).

In Abbildung 1-20 sind die einzelnen in SWMM vorhandenen Prozesse und Prozessverknüpfungen dargestellt. Von dem erzeugten Niederschlag ausgehend lässt sich im Grunde ein recht linearer Prozessaufbau erkennen, der mit der Behandlung bzw. Verteilung einen Abschluss findet. Nachfolgend wird auf wichtige Teilprozesse näher eingegangen.

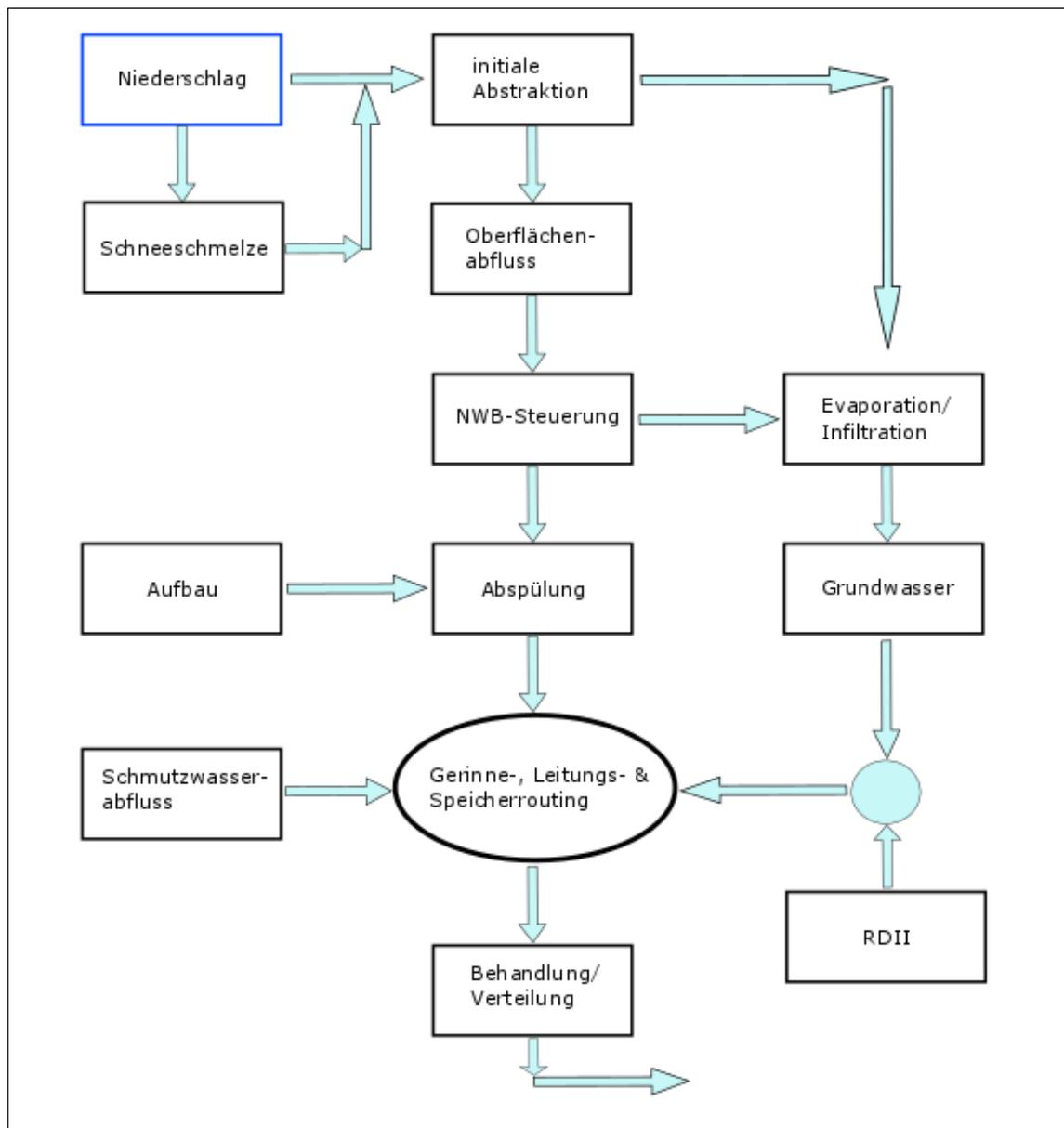


Abbildung 1-20: Darstellung der in SWMM abgebildeten Prozesse (Rossman & Huber, 2016a) mod.

### 1.7.1 Meteorologie – Niederschlag

Meteorologische Daten sind wichtige Eingangsgrößen der Niederschlags-Abfluss-Modellierung. Für die Erstellung detaillierter Modelle ist somit eine repräsentative Erhebung ebenjener Daten erforderlich, wobei primär Niederschlag, Temperatur, Evaporation, und Windgeschwindigkeit von Relevanz sind. Treibende Kraft in der Simulation dabei sind im Allgemeinen Niederschlagszeitserien, die einen direkten Einfluss auf die Ermittlung von Quantität sowie Qualität von Niederschlagsabfluss haben. Diese Zeitserien können von Einzelereignissen über wenige Zeitschritte bis hin zu Langzeitserien über tausenden Zeitschritten reichen. SWMM ermöglicht eine detaillierte Abbildung der zeitlichen Variation des Niederschlags. Erhobene Zeitreihen können in einminütigen bis mehrstündlichen

Intervallen verarbeitet werden. Die räumliche Verteilung des Niederschlags wird tendenziell eher bei großen Einzugsgebieten Einfluss haben, generell können in SWMM jedoch aber auch sehr kleine Gebiete mit räumlich-variiertem Niederschlag beaufschlagt werden. Es ist hier festzuhalten, dass Niederschlag oft als Synonym für Regen Verwendung findet, damit jedoch aber unter anderen auch Schneefall einzuschließen ist. In SWMM wird daher zwischen diesen beiden Niederschlagszuständen anhand der vorherrschenden Oberflächentemperatur unterschieden, wobei diese Unterscheidung in naturnahen Gebieten bei 1 bis 2°C liegt. Die weiteren meteorologischen Daten (Temperatur etc.) sind besonders für Langzeit- sowie Wasserbilanzanalysen von großer Bedeutung (Rossman & Huber, 2016a).

### 1.7.2 Oberflächenabfluss

Der Modellaufbau von SWMM erlaubt es, Gebiete mit unterschiedlichen Eigenschaften in Teilgebiete aufzuteilen. Der Einfluss der räumlichen Variabilität der Topografie, der Landnutzung sowie von Bodencharakteristiken auf das Oberflächenabflussverhalten kann dadurch ins Modell miteingebracht werden.

Die Oberfläche wird in SWMM im Prinzip als rechteckige Fläche mit der Breite  $W$  (engl. width), der Fläche  $A$  (engl. area) und der Länge  $L$  abgebildet (Abbildung 1-21). Der anfallende Oberflächenabfluss des gesamten Gebiets wird in Richtung eines Punktes entwässert.

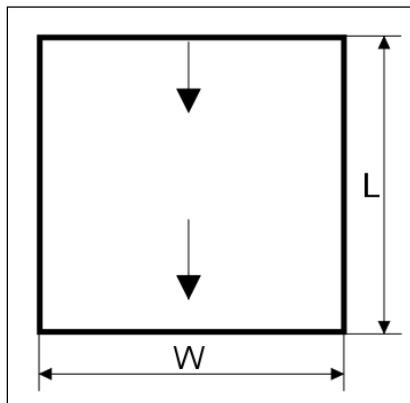


Abbildung 1-21: Modell des Oberflächenabfluss (Rossman & Huber; 2016a) mod.

Die Ermittlung des Oberflächenabflusses erfolgt in SWMM anhand eines Gleichungssystems, welches auf ein nichtlineares Reservoir-Modell aufgebaut ist (Abbildung 1-22). Dabei kommt es durch anfallenden Niederschlag, Infiltration sowie Evapotranspiration zu Änderungen des Speichers. Wird dadurch die Größe bzw. Tiefe des Oberflächenspeichers ( $t_s$ ) überschritten, kommt es zum Abfluss.

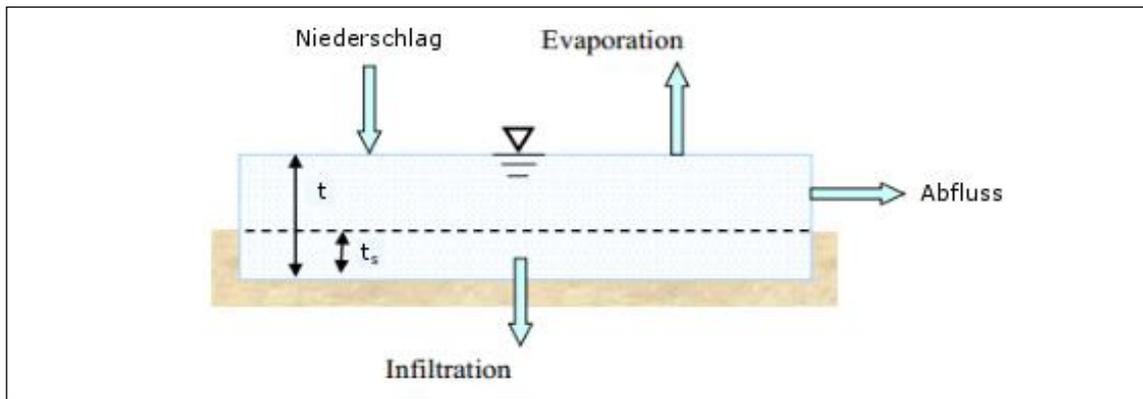


Abbildung 1-22: Modell der Oberflächenabbildung (Rossman & Huber, 2016a) mod.

Die nachfolgende Kurzbeschreibung der in SWMM implementierten, zugrundeliegenden Gleichungssysteme, die für die hydraulische Berechnung des Oberflächenabflusses angewandt werden, wurde Rossman & Huber (2016a) entnommen. In ebenjener Literatur sind alle ablaufenden Prozesse ausführlich beschrieben.

Der in Abbildung 1-22 dargestellte Modellaufbau wird durch Gleichung 1-2 ausgedrückt.

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q$$

Gleichung 1-2

mit:

*i* ... Niederschlagsrate (mm/s)

*e* ... Evaporationsrate (mm/s)

*f* ... Infiltrationsrate (mm/s)

*q* ... Abflussrate (mm/s)

Dabei wird angenommen, dass sich der Oberflächenabfluss ähnlich wie gleichmäßiger Abfluss in einem rechteckigen Gerinne mit der Breite *W* (engl. width), der Tiefe (*d* - *d<sub>s</sub>*) (engl. depth), und dem Gefälle *S* (engl. slope) verhält. Durch Anwendung der Manning-Gleichung lässt sich somit die Abflussrate *Q* (m<sup>3</sup>/s) ausdrücken, wie in Gleichung 1-3 dargestellt. Der Faktor 1,49 kann bei Verwendung metrischer Werte entfallen.

$$Q = \frac{1,49}{n} S^{1/2} R_x^{\frac{2}{3}} A_x \quad \text{Gleichung 1-3}$$

mit:

$n$  ... Rauheitskoeffizient nach Manning ( $s/m^{1/3}$ )

$S$  ... durchschnittliches Gefälle ( $m/m$ )

$A_x = W(d - d_s)$  ... durchflossene Fläche ( $m^2$ )

$R_x = d - d_s$  ... hydraulischer Radius ( $m$ )

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - \alpha(d - d_s)^{5/3} \quad \text{Gleichung 1-4}$$

$$\alpha = \frac{1,49 W S^{1/2}}{A n} \quad \text{Gleichung 1-5}$$

mit:

$A$  ... Fläche des EZG ( $m^2$ )

Gleichung 1-4, unter Einbezug von Gleichung 1-5, entspricht einer nichtlinearen Differentialgleichung und kann somit, bei vorhandenen Eingangsdaten, numerisch über die einzelnen Zeitschritte gelöst werden.

### 1.7.3 Infiltration

Infiltrationsprozesse sind wie in Abbildung 1-22 und Gleichung 1-2 ersichtlich Bestandteil der Ermittlung des anfallenden Oberflächenabflusses und sind dadurch für die Bildung eines detaillierten Modells zu berücksichtigen. Dabei hängt die Relevanz dieses Prozesses vor allem vom Versiegelungsgrad der Oberfläche ab, da bei stark versiegelten Flächen der Evaporationsterm tendenziell zu größeren „Verlusten“ des Abflussvolumens führt.

In SWMM sind nach Rossman & Huber (2016a) mehrere Möglichkeiten implementiert, den Infiltrationsprozess vereinfacht abzubilden:

- Methode nach Horton
- Horton modifiziert
- Green-Ampt
- Curve-Number-Methode

### 1.7.4 Naturnahe NWB-Maßnahmen

Wie bereits in Kapitel 1.4 ausgeführt, bieten naturnahe NWB-Maßnahmen eine Vielzahl an Vorteilen gegenüber konventionellen Maßnahmen. In urbanen Gebieten werden sie zumeist in unmittelbarer Nähe zu abflusswirksamen Flächen angeordnet, weisen zu ebenen Flächen eine hydraulische Verbindung auf und

dienen somit der Abflusskontrolle. Bei großflächiger Anwendung sind positive Änderungen des Abflussverhaltens im EZG und somit eine deutliche Entlastung des hydraulischen Systems zu erwarten.

In der Abbildung 1-23 links ist beispielhaft ein Schnitt durch den Aufbau einer Bioretentionszelle ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass Abfluss, welcher auf der versiegelten Fläche anfällt, direkt zur Maßnahme geleitet und dort versickert sowie zwischengespeichert wird. Die eingesetzte Vegetation sowie das darunterliegende Substrat ermöglichen durch Absorption, Filtration und andere Umwandlungsprozesse eine Reduzierung der Schadstoffkonzentration im abfließenden Wasser. Um ein Ausschwemmen von Feinteilen in den untenliegenden Schotterkörper zu verhindern sowie als Lebensraum wichtiger Mikroorganismen, ist die Anwendung eines Filtervlieses unbedingt anzuraten. In der Abbildung 1-23 rechts ist der Aufbau einer Bioretentionszelle in schematischer Form mitsamt ablaufenden Prozessen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass eine Zelle im Prinzip aus drei Schichten besteht. In diesem Gefüge kommt es zu Interaktionen der einzelnen Schichten und zu Austauschprozessen mit der Umwelt nach außen.

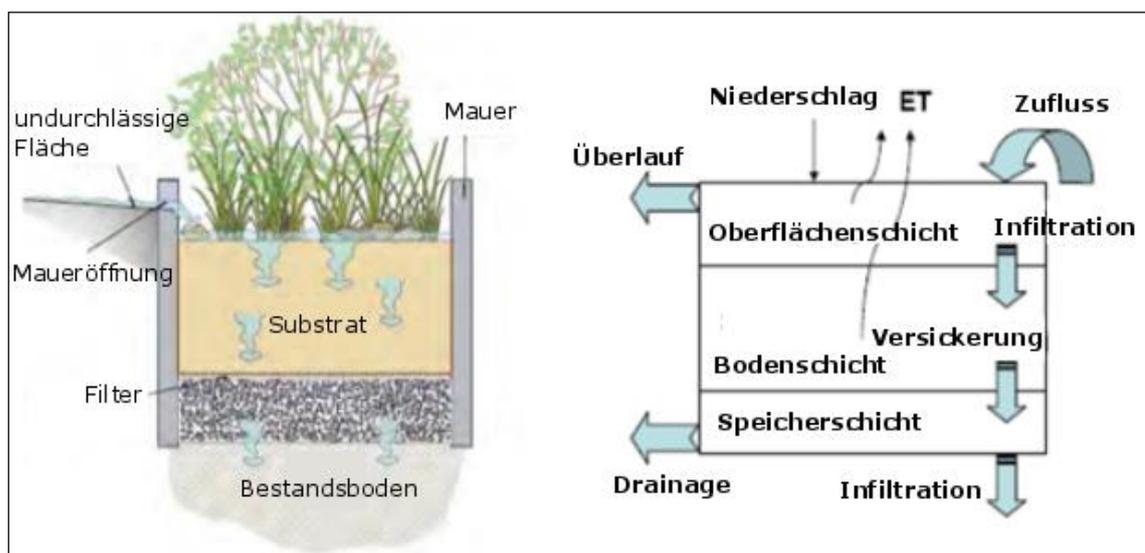


Abbildung 1-23: Aufbau von Bioretentionszellen (Rossman & Huber, 2016b)

Die in SWMM Verwendung findenden, naturnahen NWB-Maßnahmen weisen im Kern beinahe alle einen ähnlichen dreischichtigen Systemaufbau auf, wobei mehrere der, die hydraulisch-hydrologische Leistungsfähigkeit beeinflussenden Parameter, variiert werden können. Der Konstruktionsaufbau wird anhand der Eigenschaften der verwendeten Materialien, der Schichtstärken, der Anordnung eines Drainagesystems sowie des Aufbaus der Oberfläche beschrieben.

Die nachfolgende Kurzbeschreibung der in SWMM implementierten, zugrundeliegenden Gleichungssysteme, die für die hydraulisch-hydrologische Berechnung der naturnahen NWB-Maßnahmen angewandt werden, wurde Rossman & Huber

(2016b) entnommen. In ebenjener Literatur sind alle ablaufenden Prozesse ausführlich beschreiben.

Der dreischichtige Systemaufbau wird durch Gleichung 1-6, Gleichung 1-7 und Gleichung 1-8 beschrieben, wobei Gleichung 1-6 die Oberflächenschicht, Gleichung 1-7 die Bodenschicht und Gleichung 1-8 die Speicherschicht repräsentiert.

$$\phi_1 \frac{\partial d_1}{\partial t} = i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1 \quad \text{Gleichung 1-6}$$

$$D_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_1 - e_2 - f_2 \quad \text{Gleichung 1-7}$$

$$\phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - f_3 - q_3 \quad \text{Gleichung 1-8}$$

mit:

$d_1$  ... gespeichertes Oberflächenwassers (mm)

$\theta_2$  ... Bodenfeuchte (Volumen Wasser / Boden)

$d_3$  ... Wasser in der Speicherschicht (mm)

$i$  ... Oberflächenniederschlagsrate (mm/s)

$q_0$  ... Oberflächensystemzufluss (mm/s)

$q_1$  ... Oberflächensystemabfluss (mm/s)

$q_3$  ... Drainagenabflussrate der Speicherschicht (mm/s)

$e_1$  ... ET-Rate der Oberfläche (mm/s)

$e_2$  ... ET-Rate der Bodenschicht (mm/s)

$e_3$  ... ET-Rate der Speicherschicht (mm/s)

$f_1$  ... Infiltrationsrate in die Bodenschicht (mm/s)

$f_2$  ... Versickerungsrate in die Speicherschicht (mm/s)

$f_3$  ... Versickerungsrate aus der Speicherschicht (mm/s)

$\phi_1$  ... Verhältnis der Hohlräume in der Oberflächenschicht

$\phi_2$  ... Porosität der Bodenschicht

$\phi_3$  ... Verhältnis der Hohlräume in der Speicherschicht

$D_1$  ... Oberflächenfreibord (m)

$D_2$  ... Stärke der Bodenschicht (m)

$D_3$  ... Stärke der Speicherschicht (m)

### 1.7.5 Hydraulik

Der Abfluss von anfallendem Niederschlagswasser durch das Entwässerungssystem kann mittels Gleichungen der Massen- und Momenterhaltung ausgedrückt werden. SWMM ermöglicht es, zwischen mehreren Methoden der Beschreibung des Fließvorgangs zu wählen, wobei dynamische Analysen (engl. „dynamic wave“) die theoretisch genauesten Ergebnisse liefern. Die in SWMM implementierten Gleichungen der Massen- und Momenterhaltung für unsteady Freispiegelabfluss (allmählich veränderliche, instationäre Wasserführung) in Rohren und Kanälen sind als die De-Saint-Venant-Gleichungen bekannt (Gleichung 1-12). Die nachfolgende Kurzbeschreibung der in SWMM implementierten, zugrundeliegenden Gleichungssysteme, die für die hydraulische Berechnung angewandt werden, wurde Rossman (2017) entnommen. In ebenjener Literatur sind alle ablaufenden Prozesse ausführlich beschreiben.

Das Gleichungssystem besteht im Grunde aus der Kontinuitäts- (Gleichung 1-9) und der Energiegleichung (Gleichung 1-10).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{Gleichung 1-9}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + g A \frac{\partial H}{\partial x} + g A S_f = 0 \quad \text{Gleichung 1-10}$$

mit:

$x$  ... Distanz (m)

$t$  ... Zeit (s)

$A$  ... durchflossene Fläche (m<sup>2</sup>)

$Q$  ... Durchfluss (m<sup>3</sup>/s)

$H$  ... hydraulische Höhe (Z+Y) (m)

$Z$  ... Sohlhöhe (m)

$Y$  ... Wassertiefe (m)

$S_f$  ... Reibungsgefälle (Höhenverlust pro Längeneinheit)

$g$  ... Erdbeschleunigung (m /s<sup>2</sup>)

Das Reibungsgefälle  $S_f$  (Gleichung 1-11) wird durch die Manning-Gleichung ausgedrückt und beschreibt gleichmäßigen Abfluss.

$$S_f = n^2 \frac{Q|U|}{A R^{4/3}} \quad \text{Gleichung 1-11}$$

mit:

$n$  ... Rauheit nach Manning (s/m<sup>1/3</sup>)

$R$  ... hydraulischer Radius (m)

$U$  ... Fließgeschwindigkeit, nach  $Q/A$  (m/s)

Gleichung 1-9, Gleichung 1-10 und Gleichung 1-11 können in Form von Gleichung 1-12 kombiniert werden und bilden somit die Beschreibung des Fließvorgangs in den einzelnen Kanalhaltungen.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 2U \frac{\partial A}{\partial t} + U^2 \frac{\partial A}{\partial x} - g A \frac{\partial H}{\partial x} - g A S_f$$

Gleichung 1-12

Die Gleichung 1-12 ermöglicht somit die Berechnung des Fließvorgangs innerhalb der Leitung. Zur Lösung des Gesamtsystems ist eine zusätzliche Gleichung 1-13 notwendig, die die Verknüpfung zwischen Knotenpunkt und anhängenden Haltungen beschreibt.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t} = A_s \frac{\partial H}{\partial t} = \sum Q$$

Gleichung 1-13

mit:

$V$ ... Volumen der Knoteneinheit ( $m^3$ )

$A_s$ ... Oberfläche der Knoteneinheit ( $m^2$ )

$\sum Q$ ... Nettodurchfluss in die Knoteneinheit (Zufluss - Ausfluss)( $m^3/s$ )

## 2 Methodik

Die Methodik dieser Masterarbeit besteht aus zwei Hauptteilen; i) der Datenaufbereitung im GIS sowie ii) der Erstellung und Anwendung eines hydraulisch-hydrologischen Modells mitsamt Auswertung verschiedener Maßnahmenvarianten. Nach dem Kurzüberblick der Methodikabwicklung wird in weiterer Folge auf die Aufbereitung und Verarbeitung der Ausgangsdaten im GIS eingegangen. Zur Unterstützung der Modellerstellung wird zudem die Bemessung von Versickerungsanlagen genauer erläutert. Mit der Beschreibung der verschiedenen Berechnungsvarianten wird die Methodik abgeschlossen.

Die Abfolge in der Methodik kann in folgende Bearbeitungsschritte aufgeteilt werden:

- die detaillierte Abbildung der Oberfläche des Projektgebiets wird als ein Hauptziel dieser Arbeit angesehen. Am Beginn dieses Vorhabens steht eine ausführliche Überprüfung sowie eine Aufbereitung der Ausgangsdaten, gefolgt von der notwendigen Gebietsbegehung vor Ort inklusive einer ausführlichen Dokumentation der Oberflächenverhältnisse,
- weiteres Aufbereiten bzw. Verfeinern der Ausgangsdaten sowie Hinzufügen der aufgenommenen Oberflächensituation,
- Sichtung sowie Aufbereitung der hydraulisch-hydrologisch Grundlagedaten,
- Erstellung einer vorläufigen Einzugsgebietskarte,
- Plausibilitätsüberprüfung infolge einer zusätzlichen Gebietsbegehung sowie Aufnahme von untergeordneten Teilen des Entwässerungssystems,
- Nachführen der Einzugsgebietskarte, Anpassen auf neuerhobene Datengrundlage sowie Ermittlung weiterer modellrelevanter Abflussparameter,
- Erstellung eines Ausgangsmodells in entsprechender Niederschlag-Abfluss-Simulationssoftware mitsamt der Abbildung von elementaren hydrologischen Prozessen,
- Hinzufügen der bereits im Ausgangsmodell vorhandenen NWB-Maßnahmen gemäß den Bemessungsrichtlinien von Versickerungsanlagen,
- Konzeptionierung sowie Anwendung verschiedener Maßnahmenvarianten und
- Durchführen und Auswerten der Simulationen mit anschließender Gesamtbewertung.

## 2.1 Anwendung der GIS-Software

Im folgenden Unterkapitel soll auf die gesamte GIS-Projektbearbeitung eingegangen werden, die Erstellung der Oberflächenkarte (2.1.1 bis 2.1.3) sowie die Erstellung der Einzugsgebietskarte mitsamt dazugehörigen Abflussparametern (2.1.4 bis 2.1.9).

Die Grundlagendaten, die für die Bearbeitung des Projekts zur Verfügung standen, wurden vom Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau bereitgestellt und beinhalten eine große Anzahl von Raster-, Polygon-, Linien- und Punktdaten. Für die Bearbeitung dieses Projekts war eine Einbeziehung aller vorhandenen Geodaten nicht notwendig. In einem der ersten Schritte ist daher auf Zweckdienlichkeit des Datenmaterials zu prüfen.

Als Grundlagendaten für die Bearbeitung des Projekts in ArcGIS können folgende Bestandteile der Geodatenbank GRAZ\_GRUNDLAGEN angegeben werden:

- digitales Geländemodell des Grazer Stadtgebiets einer Auflösung von 1 m aus dem Jahr 2015,
- Orthofoto des Grazer Stadtgebiets mit einer Auflösung von 25 cm aus dem Jahr 2015,
- Kataster des Grazer Stadtgebiets aus dem Jahr 2016,
- Karte der Bodendurchlässigkeit des Grazer Stadtgebiets aus dem Jahr 2017 und
- Karte der Geländeneigung des Grazer Stadtgebiets aus dem Jahr 2015.

Des Weiteren wurden Daten der Geodatenbank GRAZ\_NWB\_MODELL in die Bearbeitung mit einbezogen, die das unterirdische Entwässerungssystem abbilden:

- Punkt sowie Liniendaten des Grazer Entwässerungssystems mit aktuellem Stand

### 2.1.1 Erstellung der Oberflächenkarte

Eines der Ziele dieser Masterarbeit ist es, eine möglichst detaillierte Karte der Oberfläche des Projektgebiets zu erstellen, die als Grundlage für zukünftige Projekte in diesem Gebiet bzw. für eine Gegenüberstellung der manuellen zu der automatisierten Oberflächenerhebung dienen kann. Um die Oberflächen in einer solchen Detaillierung abbilden zu können, sind nach Lee & Heaney (2003) Ortsbegehungen vor Ort zwingend erforderlich.

Die Polygonflächen der Gebäude sowie Verkehrsflächen, die durch Ausdünnung der Katasterdatei erzeugt worden sind, werden zu einer vorläufigen Oberflächenkarte zusammengefügt. Wie in Abbildung 2-1 ersichtlich, werden durch die Vereinigung von Gebäude und Verkehrsflächen bereits große Teile der versiegelten Fläche abgedeckt, die Genauigkeit der vorhandenen Polygone ist jedoch für den Zweck einer möglichst detaillierten Oberflächenkarte zu gering. Es lassen sich mehrere Abweichungen der Polygone in Form und Verlauf verglichen mit dem Orthofoto feststellen. Die Polygonflächen sind dadurch manuell auf Grundlage des hinterlegten Orthofotos nachzubearbeiten. Sollte es zu Konflikten zwischen Orthofoto und Polygonen kommen, ist das Orthofoto aufgrund höherer Aktualität zu priorisieren.



Abbildung 2-1: Erste Schritte in der Erstellung der Oberflächenkarte – Darstellung der Gebäude- und Verkehrsflächen im nördlichen Bereich des Projektgebiets (ArcGIS)

Gebäudeflächen sind zu großen Teilen nachzubearbeiten bzw. neu zu erstellen, da sie anhand von Katasterabgrenzungen erzeugt worden sind und es damit teilweise zu Abweichungen kommen kann. Es ist darauf hinzuweisen, dass Gebäudeflächen, die aus dem Kataster erzeugt werden, sich auf die Gebäudegrundfläche beziehen, für die Erstellung einer detaillierten Oberflächenkarte mit hydrologischen Bezug jedoch eher Dachflächen von Relevanz sind. Das tendenziell zu geringe Ausmaß der Polygonflächen ist auf die Größe der Dachflächen anzupassen. Die Kategorisierung der Dachflächen erfolgt analog Tabelle 2-1.

Die Verkehrsflächen, auch auf Katastergrundlage, weisen für den gewünschten Zweck im Allgemeinen ebenfalls einen zu geringen Detaillierungsgrad auf. Eine Bearbeitung der vorhandenen Flächen ist daher zwingend erforderlich. Im Zuge der Nachbearbeitung wird damit begonnen, zwischen Landnutzung und den Oberflächen zu differenzieren (siehe Tabelle 2-1).

Das Projektgebiet hat in den letzten beiden Jahren große Veränderungen gesehen. Große Teile der Datengrundlage weisen hingegen ein Alter von mehr als 2 Jahren auf. Daher kommt es hier teilweise zu sehr großen Abweichungen. Wie in Kapitel 1.5 bereits beschrieben, werden im Projektgebiet zur Zeit mehrere Großprojekte verwirklicht, außerdem sind für die nähere Zukunft noch weitere Bautätigkeiten geplant. Um die Oberflächenkarte möglichst aktuell zu halten, sind auch diese neuen Flächen einzubeziehen. Zu diesem Zweck wurde bei den entsprechenden Bauträgerverbänden und anderen Institutionen um Planunterlagen angefragt. Leider konnten nicht für alle neuerrichteten Objekte entsprechende Unterlagen organisiert werden. Mit den vorhandenen Unterlagen kann jedoch eine Georeferenzierung mittels ArcGIS durchgeführt werden. Die noch fehlenden versiegelten Flächen, Park- und Stellflächen und untergeordnete Wege und Straßen, sind der Karte hinzuzufügen. Nicht versiegelte Flächen werden nicht manuell, sondern als Negativ der Versiegelung durch GIS-Operationen automatisiert erstellt. Die Oberfläche ist anhand einer sinnvollen Einteilung in verschiedene Klassen zu kategorisieren. Wie in Tabelle 2-1 ersichtlich, werden den Polygon-Flächen sowohl Oberflächen- als auch Landnutzungstypen zugewiesen, um somit ein möglichst aussagekräftiges Bild der Oberfläche erzeugen zu können.

Tabelle 2-1: Oberflächenkategorisierung modifiziert nach Krebs u. a. (2016a)

Oberflächentyp	Oberflächentyp Code	Landnutzungstyp
<b>Asphalt</b>	A	Sonstige
		Parkplatz
		Bürgersteig
		Straße
<b>Beton</b>	B	Sonstige
		Parkplatz
		Bürgersteig
		Straße
<b>Schotter</b>	S	Sonstige
		Parkplatz
		Bürgersteig
		Straße
<b>Naturstein</b>	NS	Sonstige
		Bürgersteig
<b>Pflasterstein</b>	PS	Sonstige
		Parkplatz
		Bürgersteig
		Straße

ÖBB	Ö	ÖBB
Ziegel/Bahnen	ZB	Dachfläche
Rasen	R	Grünfläche
Rasen/Vegetation	RV	
Vegetation/Rasen	VR	
Vegetation	V	

Die Erstellung der vorläufigen Oberflächenkarte nimmt aufgrund der gewünschten, hohen Detaillierung und der unzureichend genauen Grundlagendaten eine entsprechend lange Bearbeitungszeit in Anspruch. Eine gründliche Aufbereitung und Abarbeitung der vorhandenen Geodaten vor der eigentlichen Begehung des Projektgebiets ist einer komplett nachträglichen Bearbeitung jedoch vorzuziehen, da primär die Begehungs- und Aufnahmezeit deutlich reduziert werden kann.

### 2.1.2 Begehung des Projektgebiets

Mit der Fertigstellung der ersten Bearbeitung der vorhandenen Geodaten kann die eigentliche Begehung vorbereitet werden. Als Grundlage für die Begehung vor Ort werden die vorhandenen Daten derart aufbereitet, dass sich die Aufnahme der Oberfläche in-situ möglichst nur mehr auf Korrektur von Abweichungen der Oberflächen- oder Landnutzungstypen der versiegelten Fläche, sowie Aufnahme der unversiegelten Fläche bezieht. Durch ausführliche Vorarbeit im GIS sollte eine detaillierte Aufnahme der Oberfläche des gesamten Projektgebiets innerhalb eines überschaubaren Zeitrahmens möglich sein.

Als zentrales Hilfsmittel hierbei dient eine übersichtliche Plandarstellung des Projektgebiets, bestehend aus dem Orthofoto und den bereits erstellten Oberflächenobjekten, die somit Informationen über die Flächennutzung und die Art der Oberfläche liefert. Die Plandarstellungen können direkt im GIS erstellt und mit einem sinnvollen Maßstab ( $M \leq 1:1000$ ) ausgegeben werden.

Die Abgrenzung des Aufnahmebereiches erfolgt an drei von vier Seiten durch vorhandene Verkehrsflächen (siehe Kapitel 1.5). Im Westen wird die Aufnahme der Oberfläche besonders aufgrund der Abgrenzung des Gefahrenbereiches der ÖBB Nord-Süd-Trasse eingeschränkt. Über die Umgrenzung hinausgehend werden keine Elemente oder Parameter aufgenommen, da sie in der Modellierung keine Anwendung finden.

Der Aufnahme von nicht versiegelten Flächen (Grünflächen etc.) muss im Zuge der Begehung des Projektgebiets vermehrt Zeit gewidmet werden, da in der Vorarbeit hauptsächlich auf versiegelte Flächen geachtet worden ist. Grünflächen sind laut Tabelle 2-1 einer von vier Klassen zuzuordnen, die die Stärke bzw. Dichte der vorhandenen Vegetation wiedergeben soll. Die Klassifizierung reicht

vom Rasen, leichtem Bewuchs, bis zu Vegetation, der dichtesten Form des Bewuchses (z.B. Hecken). Neben Grünflächen bilden geschotterte Flächen einen wichtigen Teil nicht versiegelter Flächen. In der GIS-Vorarbeit sind Schotterflächen jedoch nicht unbedingt als solche zu identifizieren und könnten somit mit anderen Oberflächentyp eingetragen sein (z.B. Asphalt). Im Zuge der Gebietsbegehung können solche Ungereimtheiten berichtigt werden.

Ein Problem der Oberflächenaufnahme im urbanen Bereich kann durch Abgrenzungen bzw. Umzäunungen entstehen, da nicht alle gewünschten Teilflächen ausführlich untersucht werden können. So ist die Begehung des westlichen Teiles des Gebiets, das zu großen Teilen von den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) belegt wird, nur bedingt möglich. Infolgedessen können auch keine detaillierten Aussagen über die dort vorhandene Oberfläche getroffen werden. Größere Teile des Gebiets der Smart City befinden sich zurzeit noch im Bauzustand, sind aus Sicherheitsgründen umzäunt und können im besten Fall auch nur teilweise begangen werden. In Bereichen offensichtlicher Bautätigkeit ist eine seriöse Einschätzung der zukünftigen Oberfläche nur mittels etwaiger vorhandener Planunterlagen (z.B. Außenanlagengestaltungsplan) vorzunehmen. Besonders im Bereich A kann die Oberflächenbeschaffenheit vieler Grundstücke nur aus der Distanz eingeschätzt werden, da die Grundstücke zumeist eingezäunt sind und ein unerlaubtes Betreten nicht unbedingt anzuraten ist.

Aufgrund des augenscheinlich großen Interesses an Vorgärten und vorhandenen Niederschlagsabflusspfaden muss bei der Oberflächenaufnahme in der kleinräumigen Struktur von Einfamilienhausvierteln auch jederzeit mit Anwohnerkontakt gerechnet werden.

### **2.1.3 Überarbeitung der Oberflächenkarte**

Die bereits im GIS vorhandene Oberflächenkarte ist durch die gewonnenen Erkenntnisse der Begehung des Projektgebiets zu ergänzen sowie gegebenenfalls anzupassen. Dank der detaillierten Vorarbeit kann dabei von verhältnismäßig geringen Aufwand gesprochen werden.

Grünflächen, die zum Zeitpunkt der Erstellung der vorläufigen Oberflächenkarte zur Verwendung bei der Begehung noch nicht in die Oberfläche implementiert waren, werden in der Überarbeitung als „Negativ“ innerhalb der Projektgebietsumgrenzung, mittels der ArcGIS-Operation „Verschneiden (Union)“, erzeugt. Die Zuweisung der Oberflächentypen erfolgt analog der Oberflächenaufnahme vor Ort. Auch eine teilautomatisierte Erstellung der Grünflächen bedarf gründlicher Nachbearbeitung und Kontrolle. Es kann zu Verbindungen von nicht zusammengehörenden Flächen kommen, die somit manuell aufzuspalten sind (Multipart in Singlepart). Zum Abschluss der Nachbearbeitung sollte eine durchgängige Abdeckung der Oberfläche mittels GIS-Polygonen vorhanden sein,

durch die sowohl Landnutzung als auch Oberflächentyp einer jeden Fläche im Projektgebiet eindeutig definiert ist.

### 2.1.4 Erstellung der Einzugsgebietskarte

Um mittels Anwendung der durch GIS aufbereiteten Informationen schlussendlich ein Niederschlags-Abfluss-Simulationsmodell aufbauen zu können, sind neben der detaillierten Abbildung der Oberfläche noch zusätzliche Informationen, z.B. hydraulisch-hydrologische Prozessabläufe innerhalb des EZG, erforderlich.

Die GIS unterstützte Erzeugung der hydraulisch-hydrologischen Grundlagedaten des EZG geschieht vor allem durch Anwendung der Methode-D8 (deterministic eight neighbors) und beruht in ihrer Methodik auf der Arbeit von O'Callaghan & Mark (1984) sowie auf Ergänzungen bzw. Adaptionen seitens Jenson & Domingue (1988) sowie Fairfield & Leymarie (1991). Dabei werden durch Verwendung von vorhandenen Höheninformationen und durch Anwendung mehrerer Rasteroperationen, Entwässerungssystem, Fließrichtung, Abflussakkumulation sowie Einzugsgebiete des gesamten EZG bestimmt.

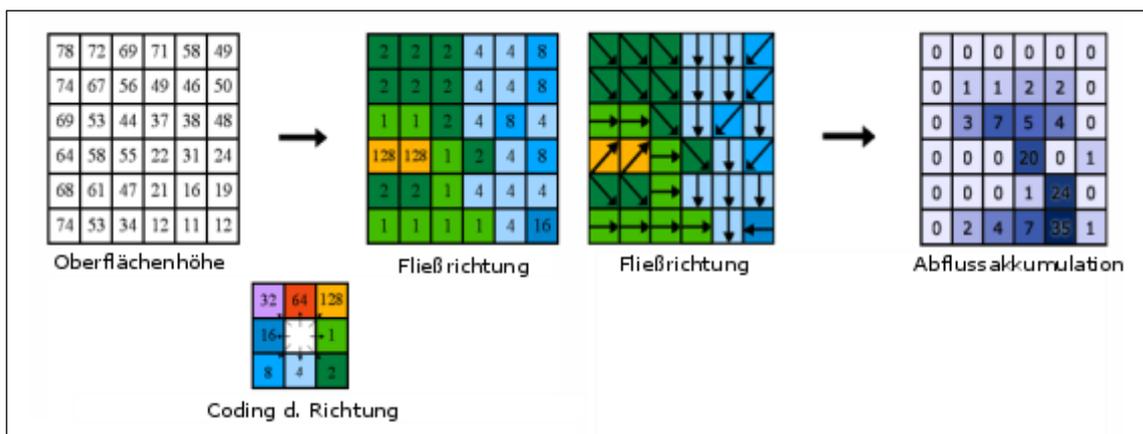


Abbildung 2-2: Veranschaulichung der Anwendung der Methode-D8 – Fließrichtung bzw. Abflussakkumulation (ESRI, 2016) mod.

In Abbildung 2-2 wird die Funktionsweise der Methode-D8 dargestellt. Dabei wird angenommen, dass jede Rasterzelle von acht Nachbarzellen umschlossen wird, auf die der Abfluss erfolgen kann. Kann aufgrund der Höhensituation kein Abfluss stattfinden, wird von einer Senke gesprochen. Durch die Methode-D8 wird somit für jede Zelle innerhalb des EZG-Rasters abhängig von Geländehöhe und Gefällesituation die Ausgaberrichtung von anfallenden Oberflächenabfluss bestimmt, womit sich schlussendlich ein Oberflächenabfluss akkumulieren kann. Durch die Kombination der gewonnenen Information lässt sich die Funktionsweise des Oberflächenentwässerungssystem ermitteln (ESRI, 2016).

### 2.1.5 Aufbereitung des DGM

Als erster Schritt in der Erstellung der hydraulisch-hydrologischen Grundlagedaten ist das vorhandene digitale Geländemodell (Auflösung von 1 m) dementsprechend aufzubereiten, dass es im Stande ist, die an der Oberfläche und im Untergrund gleichzeitig stattfindenden Konzentrations- und Abflussprozesse wiedergeben zu können. Abbildung 2-3 zeigt die Höhensituation des 1m-DGM-Rasters vor Beginn der Rasterbearbeitung, in dem primär natürlich gewachsene Strukturen zu erkennen sind.

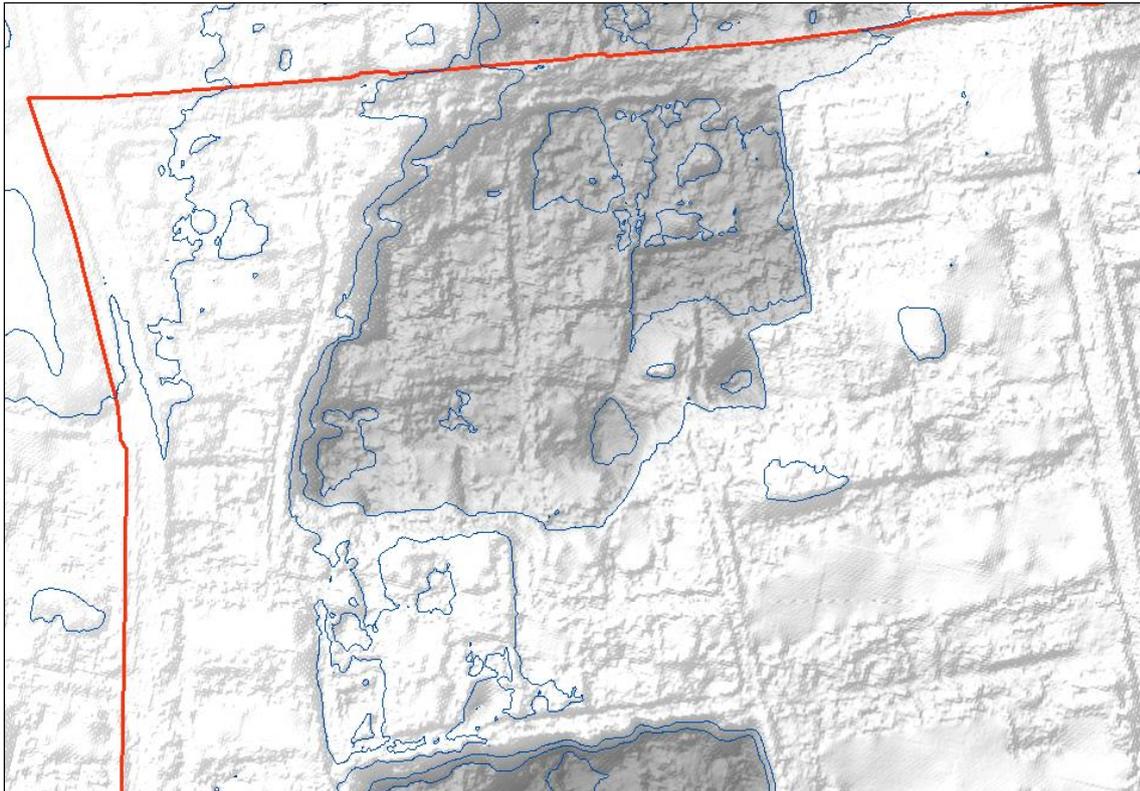


Abbildung 2-3: Darstellung des 1m-DGM-Ausgangsrasters mit Schummerungen und Konturlinien - Umgrenzung des Projektgebiets in Rot (ArcGIS)

Es wird versucht mehrere Strukturlayer in das Ausgangsraster einzuarbeiten, um damit ein passenderes Abbild der Oberfläche zur Verfügung zu haben.

Das Entwässerungssystem (Abbildung 2-4) liegt zumeist gänzlich im Untergrund verborgen, liefert jedoch einen wichtigen Beitrag zur Entwässerung von urbanen Bereichen. Es besteht im Grunde aus Schachtbauwerken, die durch Kanalhaltungen miteinander verbunden werden. Um das Kanalsystem im Raster abbilden zu können, wird entlang der Haltung kleinräumig eingetieft („Einbrennen“ in das Raster).

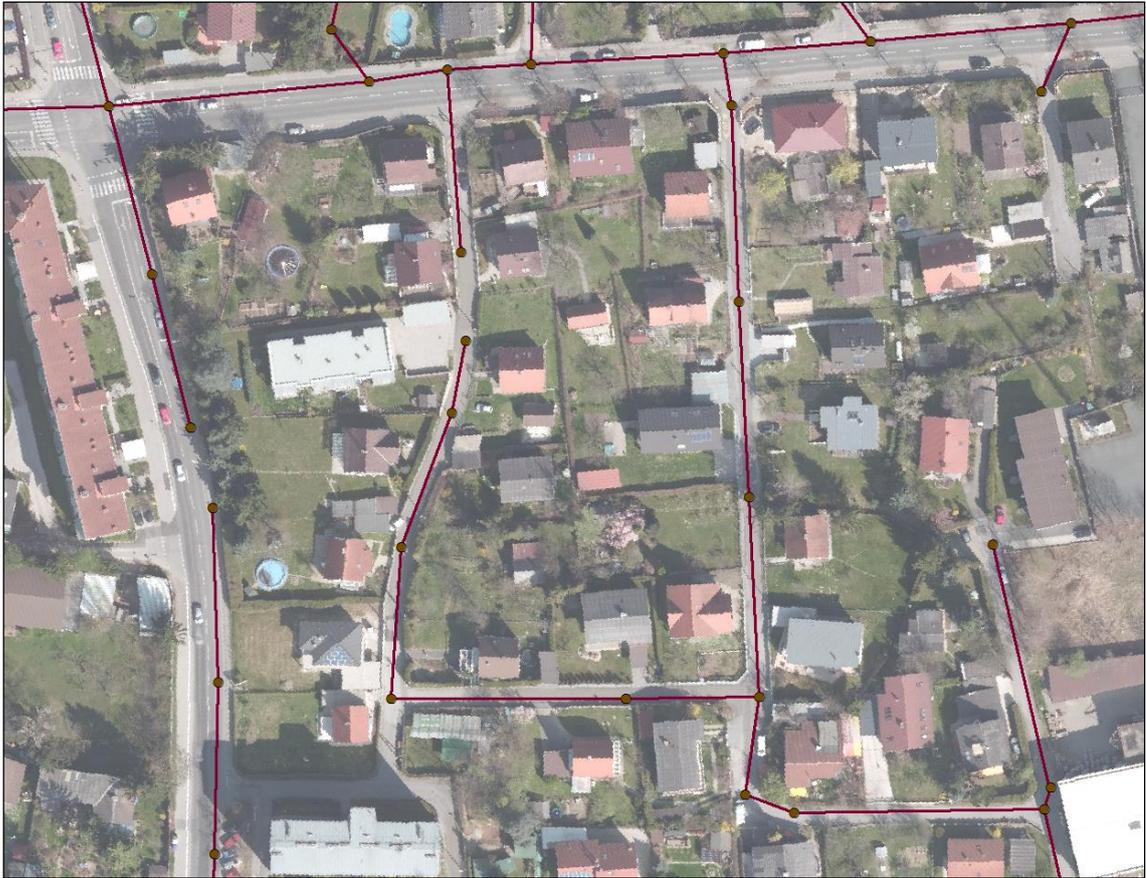


Abbildung 2-4: Darstellung des Ausgangskanalnetzes (Schächte und Haltungen) im nördlichen Bereich des EZG (ArcGIS)

Gebäude sind von hoher hydraulischer Relevanz und stellen bei Oberflächenabfluss somit ein absolutes Hindernis dar, welches durch anheben der Geländehöhe der Gebäudegrundflächen abgebildet wird. Verkehrsflächen höherer Priorität bilden bei konventioneller Querschnittsgestaltung ein gerinneähnliches Profil, das Konzentration und Ableitung von Oberflächenabfluss begünstigt. Die Abbildung dieses Gerinnes im Raster erfolgt durch leichtes Eintiefen der Oberfläche.

Tabelle 2-2: Strukturelemente zur Anpassung des Ausgangsrasters (jeweils Auflösung von 1 m)

Strukturelemente	$\Delta$ Höhe
Kanalhaltungen	-5 m
Kanalschächte	-
Gebäude	+5 m
Straßen mit Entwässerung-QS	-0,2 m

Die Anpassung der Geländehöhe der einzelnen Strukturelemente im Raster erfolgt im, wie in Tabelle 2-2 dargestellten, Umfang. Die Kanalhaltungen sowie Ge-

bäude werden mit fünf Meter eingetieft respektive herausgehoben. Kanalschächte müssen nicht in das Raster „eingebrennt“ werden, sind später jedoch für einen weiteren Bearbeitungsschritt erforderlich. Ein Eintiefen von Verkehrsflächen erfolgt nur bei höherrangigen Straßen, die einen Abflussquerschnitt aufweisen.

Abbildung 2-5 zeigt das modifizierte Kanalnetz nach der Überführung in eine Rasterdatei mit 1m-Auflösung und einem Eintiefungswert von fünf Metern. Die Ergänzung „modifiziert“ gibt an, dass zum Ausgangsnetz zusätzliche hydrologisch relevante Elemente hinzugefügt worden sind (Kapitel 2.1.6 bzw. 2.1.7).

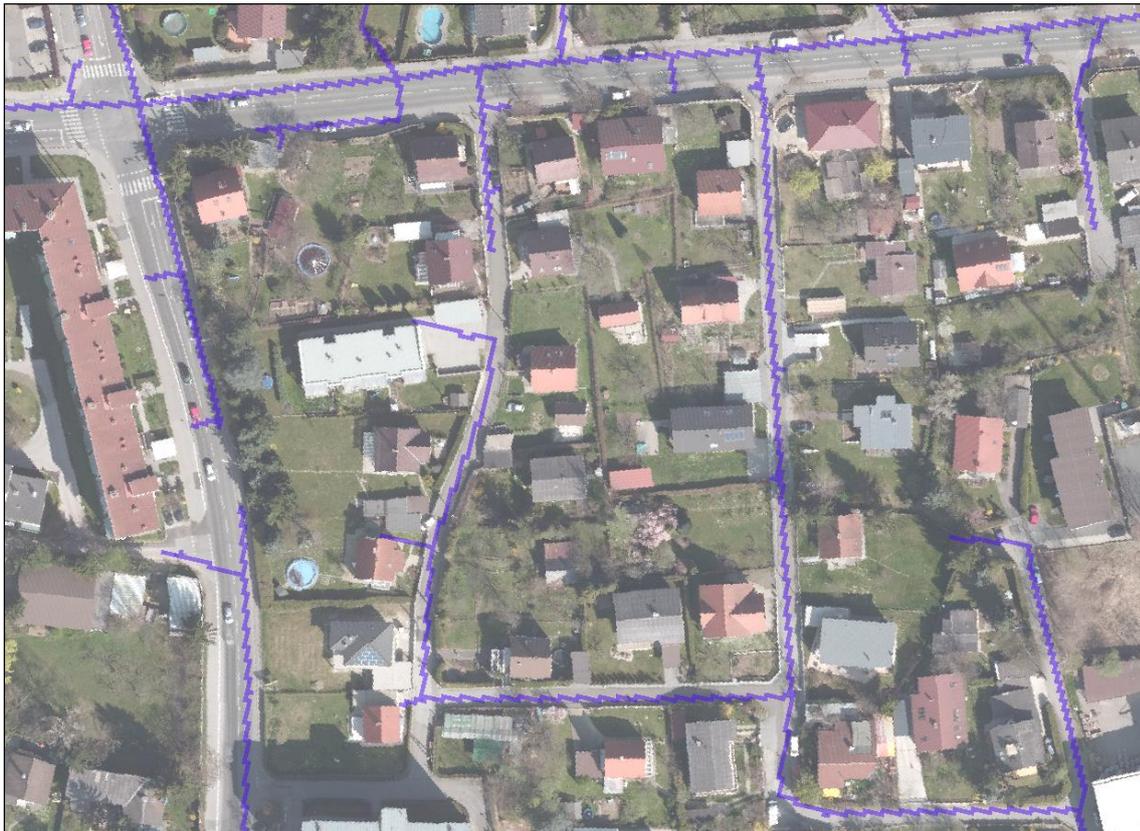


Abbildung 2-5: Überführung des modifizierten Kanalnetzes in eine Rasterdatei im nördlichen Bereich des EZG (ArcGIS)

Die Erstellung der einzelnen Strukturelemente erfolgt in mehreren Teilschritten, die nachfolgend kurz erläutert werden:

- Umwandlung der Eingangsdateien in Raster (z.B. Polygon in Raster) mit samt Auflösungs- und Wertezuweisung,
- Ersetzen der Raster „None“-Werte durch 0 (Raster-Kalkulator),
- Zusammenführen der Strukturlayer (Raster-Kalkulator) und
- Auffüllen etwaiger „Senken“ im Raster.

Abbildung 2-6 zeigt die Höhensituation des 1m-DGM-Rasters nach Bearbeitung mitsamt den hinzugefügten wichtigen Strukturelementen, die nun gut zu erkennen sind.

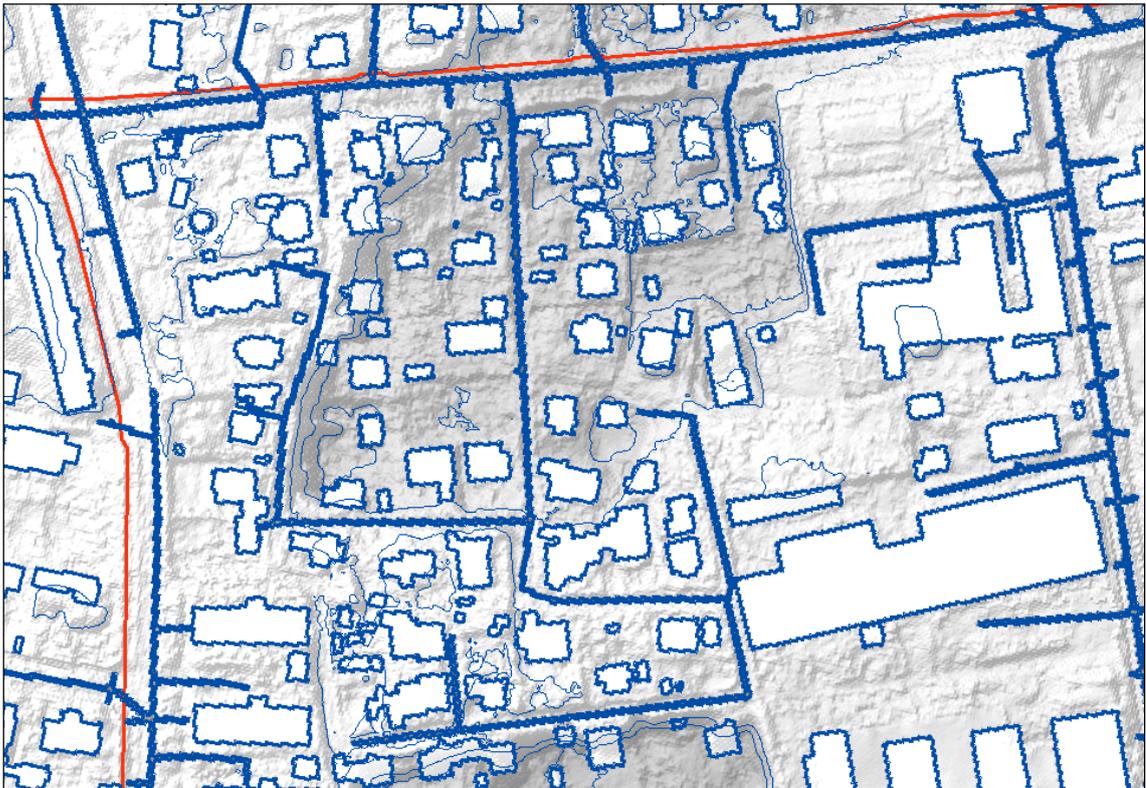


Abbildung 2-6: Darstellung des bearbeiteten 1m-DGM-Rasters mit Schummerungen und Konturlinien im nördlichen Bereich des EZG - Umgrenzung des Projektgebiets in Rot (ArcGIS)

### 2.1.6 Erstellung der Einzugsgebiete

Die Erstellung eines Oberflächenentwässerungsmodells bedingt einer Zuweisung der zu entwässerten Flächen zu Knotenpunkten des Entwässerungssystems. Dafür notwendigen hydrologischen Grundlagen können im GIS mittels nachfolgender Vorgangsweise ermittelt werden. Das im vorigen Kapitel bearbeitete Raster dient als Grundlage zur Anwendung einiger GIS-Hydrologie-Tools. Die Erstellung der Einzugsgebiete erfolgt in mehreren Teilschritten, die nachfolgend kurz erläutert werden:

- Fließrichtung: Rasterdatei, die für jede Zelle die Abflussrichtung festsetzt (steilste Geländeneigung) (Methode-D8),
- Abflussakkumulation: Rasterdatei, die Auskunft über den aufgenommenen Oberflächenabfluss einer jeden Zelle gibt (Verwendung des Fließrichtungsrasters),

- “Pourpoint” zuordnen: Rasterdatei, die die Position von Entwässerungspunkten festsetzt (Verwendung des Abflussakkumulationsrasters),
- Erstellung der Wassereinzugsgebiete aus dem Pourpoint- und dem Fließrichtungsraster und
- Umwandlung des erzeugten Einzugsgebietsrasters in Vektordaten (ermöglicht leichtere Bearbeitung).

In Abbildung 2-7 ist eine erzeugte Rasterdatei ersichtlich, die Auskunft über die Abflussakkumulation im Einzugsgebiet gibt. Es ist gut zu erkennen, dass der Oberflächenabfluss innerhalb des Entwässerungssystems erfolgt und dieses somit die angedachte Funktion erfüllt. Je mehr Zellen in Richtung einer Zelle entwässern, desto stärker ändert sich die farbliche Codierung von Grün zu Rot.



Abbildung 2-7: erzeugte Rasterdatei Abflussakkumulation im nördlichen Bereich des EZG – Darstellung der Abflusspfade in grün bis rot (ArcGIS)

Die in Abbildung 2-8 dargestellten Einzugsgebiete der Oberflächenentwässerung weisen untereinander starke Größenunterschiede auf. Es zeigt sich, dass einige Entwässerungspunkte bloß ein Einzugsgebiet von wenigen Quadratmetern aufweisen, an anderen Punkten jedoch eine sehr viel größere Fläche angeschlossen

ist. Diese Diskrepanz kann teilweise auf natürliche bzw. modifizierte Geländeverhältnisse aber auch auf eine teilweise zu geringe Dichte des Netzes von Entwässerungspunkten (geringe Anzahl von Pourpoints) zurückgeführt werden.

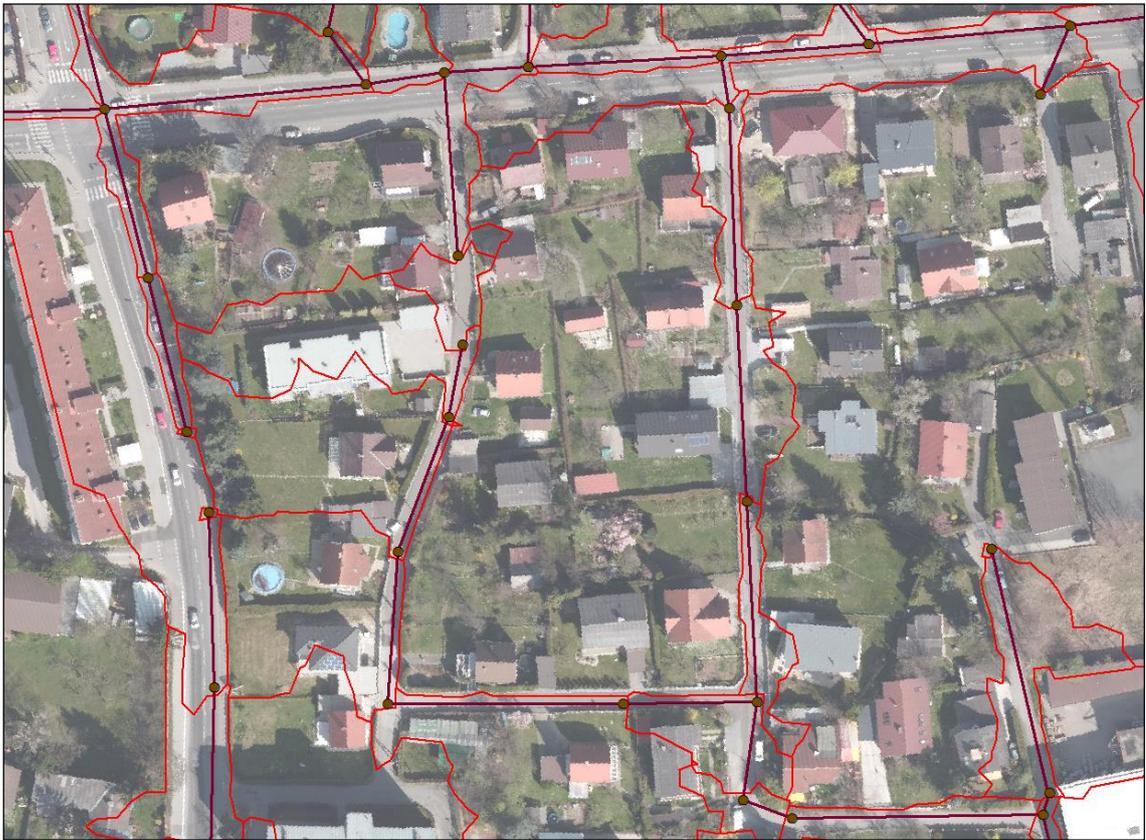


Abbildung 2-8: vorläufige Karte der Einzugsgebiete im nördlichen Bereich des EZG – erstellt durch Verwendung des Grundlagenentwässerungnetzes (ArcGIS)

### 2.1.7 Überprüfung und Anpassung der vorläufigen Einzugsgebietskarte

Die im ersten Schritt erstellten, vorläufigen Einzugsgebiete beruhen auf dem Hauptentwässerungssystem, das im urbanen Gebiet noch durch eine Vielzahl von untergeordneten Entwässerungsschächten und -leitungen ergänzt werden kann. Die untergeordneten Teile des Systems sollen, falls dies möglich ist, auf jeden Fall in die Analyse integriert werden. Da die entsprechende Datengrundlage im Fall des Projektgebiets Waagner-Biro fehlt, kann diese im Zuge einer Begehung erhoben werden.

In Fall der Bearbeitung des gegenständlichen Projekts wurden zwei Begehungen durchgeführt, die Hauptbegehung bei der die Oberflächenaufnahme durchgeführt wurde und eine zweite Begehung bei der die vorläufige Einzugsgebietskarte überprüft und zusätzliche Elemente des Entwässerungssystems aufgenommen wurden. Eventuell kann hier zu bloß eine Hauptbegehung ausreichen, wodurch eine etwas höhere Effizienz zu erwarten ist.

Im Zuge der Zweitbegehung wird versucht, die ausgegebenen Einzugsgebiete auf Plausibilität zu prüfen. Außerdem können zusätzliche Entwässerungspunkte, die nicht in der Datengrundlage enthalten sind, erhoben werden. Darunter fallen hauptsächlich Straßenablaufschächte, nicht enthaltene Schachtbauwerke des Hauptentwässerungssystems sowie, soweit erkennbar, Hausanschlussschächte.

Durch Implementierung der zusätzlich erhobenen Entwässerungspunkte und -leitungen ist davon auszugehen, dass sich Ergebnisdateien lokal stark unterscheiden. Die erstellten und modifizierten Rasterdateien sind demzufolge nachzutragen (Abbildung 2-9). Da die zusätzlich aufgenommenen Systembestandteile jedoch nur in ihrer Lage, ohne ihre hydraulisch-geometrischen Parameter, aufgenommen werden, können diese Bestandteile auch nicht direkt in ein Modell übernommen werden. Um die gewonnenen Informationen dennoch in ein Modell mit einbeziehen zu können, werden die erzeugten Teilflächen des Nebensystems mit dem zugehörigen Hauptentwässerungssystem zusammengeschlossen (Abbildung 2-10). Die Entwässerungsrichtung von Dachflächen und anderen versiegelten Flächen wird gemäß den Erkenntnissen der Begehung ebenfalls angepasst. Der Vergleich von Abbildung 2-8 und Abbildung 2-9 zeigt teilweise große Unterschiede in der GIS- unterstützten Einzugsgebietsermittlung zwischen Haupt- respektive erweiterten Hauptentwässerungssystem.



Abbildung 2-9: Karte der Einzugsgebiete im nördlichen Bereich des EZG – erstellt durch Verwendung des erweiterten Entwässerungsnetzes (ArcGIS)

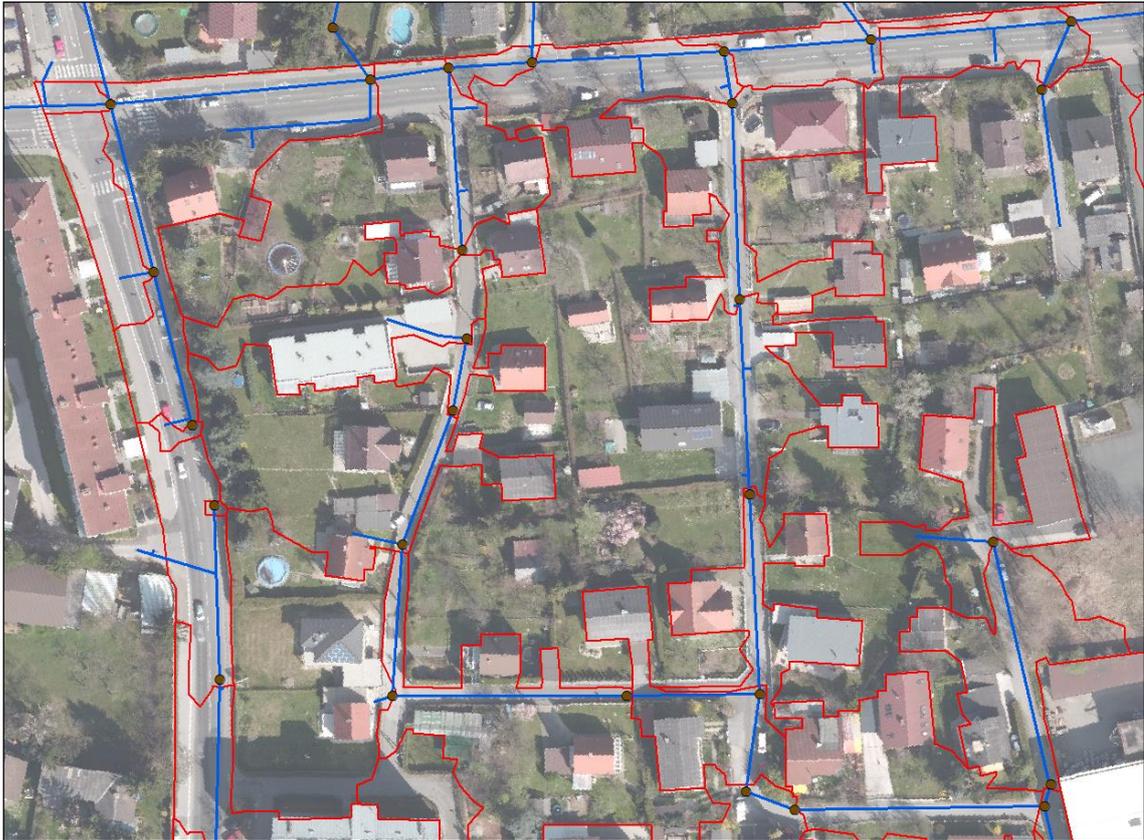


Abbildung 2-10: Karte der Einzugsgebiete im nördlichen Bereich des EZG – erstellt durch Verwendung des erweiterten Entwässerungsnetzes und angepasst an das Hauptentwässerungssystem (ArcGIS)

### 2.1.8 Aufbereitung der Geländeneigung

Die Oberflächen- bzw. Geländeneigung ist ein zum Aufbau eines Modells erforderlicher Parameter (vgl. Gleichung 1-3). Das Projektgebiet Waagner-Biro zeichnet sich im Allgemeinen durch keine allzu großen natürlichen Geländehöhenunterschiede aus. Der größte Teil der Fläche des GPG weist äußerst geringe Geländeneigungen von kleiner zehn Prozent auf. Starke Geländeneigungen treten plausiblerweise hauptsächlich im Nahbereich zur Bahnstrecke, bei Straßenunterführungen, auf. Auch bei Gebäuden sollten erhöhte Geländeneigungen feststellbar sein, diese scheinen jedoch im Ausgangs-DGM bereits herausgefiltert worden zu sein.

In der Karte zeigen sich einige Unregelmäßigkeiten, die im Ausgangs-DGM offensichtlich nicht herausgefiltert werden konnten. Gebäudeneubauten sowie ausgehobene Baugruben führen somit zu starken punktuellen Geländeneigung (bis zu 200 %), wobei letztere nur temporär vorhanden sind. Die Karte der Geländeneigung weist somit eine gewisse Inkonsistenz auf (Filterung), die bei weiterführenden Verwendung (z.B. zonale Statistik) der Grundlagendatei zu Problemen führen kann. Anhand der Anwendung einer Klassifizierung wird versucht die relativen Unterschiede in den Geländeneigungen zu reduzieren, den Einfluss von

Extrema zu begrenzen und somit die Auswertung der Geländeneigungen mittels der GIS-Anwendung „zonaler Statistik“ und den erhobenen Oberflächen (Kapitel 2.1.1) plausibler zu gestalten.

Die Klassifizierung erfolgt dabei in 15 Klassen mit einem Maximum vom 50 %, wobei die Festlegung des Maximums aufgrund der hohen Inkonsistenz der Filterung durchaus der vorliegenden Situation angemessen scheint. Durch ein Festsetzen der maximalen Geländeneigung auf 50 % sowie der allgemeinen Klassifizierung wird der Einfluss von Unregelmäßigkeiten auf die Anwendung der Zonalen Statistik zwar nicht gänzlich ausgeschlossen, es zeigt sich jedoch eine weit aus geringere Beeinflussung (Mittelwertbildung) als bei der Verwendung der Grundlagendatei.

### **2.1.9 Ermittlung der Fließlängen**

Eine möglichst passende Abbildung von Fließlängen des Oberflächenabflusses bildet die Grundlage für eine aussagekräftige Abbildung des Entwässerungssystems zur Niederschlags-Abfluss-Simulation (Kapitel 1.7.2).

Die Ermittlung bzw. Abschätzung der Fließlängen kann bei kleineren bzw. bei Projekten mit einer geringeren Einzelflächenanzahl aufgrund der Wichtigkeit dieses Parameters noch manuell erfolgen. Da im gegenständlichen Projekt jedoch ein relativ großes Einzugsgebiet mit einer hohen Detailierung der Oberfläche und somit einer großen Anzahl von einzelnen Oberflächenelementen vorliegt, ist die Ermittlung dieses Parameters mittels einer oder mehrerer GIS-Operationen anzuraten. Für die Ermittlung der Fließlängen im Zuge dieses Projekt werden Vereinfachungen des Abflussprozesses vorgenommen:

- Als Fließlänge jeder Teilfläche wird die direkte Distanz (Luftlinie) zwischen den Koordinaten des Auslaufpunktes und des dazu am weitesten entfernten Punktes dieser Teilfläche angenommen.
- Der Oberflächenabfluss bewegt sich fiktiv über die gesamte Fließlänge zum Auslaufpunkt auf derselben Teilfläche. Im Modell kommt es damit im Allgemeinen zu keinem „Teilfläche-Teilfläche-Abfluss“.

Als Grundlage zur Erzeugung der Teilflächenfließlängen dienen die in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Karten der Oberfläche sowie der Einzugsgebiete. Die Ermittlung der Teilflächenfließlängen erfolgt in mehreren Teilschritten, die nachfolgend kurz erläutert werden:

- Erstellung eines gleichmäßigen Rasters (5 m) über das gesamte Projektgebiet, das vor allem größere Teilflächen aufteilt,
- Verschneidung dieses Rasters mit der Oberflächen- bzw. Teileinzugskarte,

- Erstellung der Flächenschwerpunkte dieser Verschneidung (Abbildung 2-11),



Abbildung 2-11: Darstellung der Zonenschwerpunkte im nördlichen Bereich des EZG (ArcGIS)

- Darstellung bzw. Erzeugung der xy-Koordinaten der Flächenschwerpunkte sowie der Auslaufpunkte innerhalb der Attributstabelle und
- Erzeugung der Fließlängen der vorhandenen Elemente durch Anwendung des Field Calculators mittels Gleichung 2-1 (Pythagoras).

$$FL = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

Gleichung 2-1

Nach Pythagoras

mit:

FL ... Fließlänge, in m

$\Delta x$  ... Differenz in der x-Koordinate, in m

$\Delta y$  ... Differenz in der y-Koordinate, in m

Um nun die maximale Fließlänge innerhalb einer Teilfläche ermitteln zu können, wird das GIS-Tool „zonale Statistik“ angewandt. Dafür ist es notwendig, die vorhandene Punktdaten in eine Rasterdatei umzuwandeln. Die dadurch erzeugte

Statistik weist mehrere Wertespalten auf, wobei die Spalte „Range“, nach punktuell-manueller Kontrolle, eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten aufweist.

## 2.2 Bemessung von Versickerungsanlagen

Das folgende Kapitel versucht einen Überblick der zurzeit angewandten Methodik der Bemessung von Versickerungsanlagen gemäß entsprechender Normierungen zu geben. Die Auslegung und Bemessung von Anlagen der Versickerung von anfallenden Oberflächenwasser hat im Allgemeinen gemäß den Vorgaben des RB 45 sowie ÖNORM B 2506 zu erfolgen (Kapitel 1.3.5). Die nachfolgende Übersicht, der für die Auslegung einer Sickermulde erforderlichen Gleichungen, wurde der ÖNORM B 2506-1 (Austrian Standards Institute, 2013) entnommen. In ebenjener Literatur kann ausführlich über das Vorgehen in der Bemessung verschiedener NWB-Maßnahmen nachgelesen werden.

Die in Gleichung 2-2 mit Gleichung 2-3 ermittelte abflusswirksame berechnete Fläche dient als erster Grundparameter zur Bemessung.

$$A_{ent} = A_{red} + A_{va} \quad \text{Gleichung 2-2}$$

mit:

$$A_{red} = \sum (A_n * a_n) \quad \text{Gleichung 2-3}$$

mit:

$A_{ent}$  ... abflusswirksame berechnete Gesamtfläche, in  $m^2$

$A_{red}$  ... Entwässerungsfläche, in  $m^2$

$A_{va}$  ... berechnete Fläche der Versickerungsanlage, in  $m^2$

$A_n$  ... Horizontalprojektion der jeweiligen Teilentwässerungsfläche, in  $m^2$

$a_n$  ... jeweiliger zugehöriger Abflussbeiwert gemäß Tabelle 1

Gleichung 2-4 beschreibt den Zufluss zur Sickeranlage und kann zur Auslegung der Zuflussleitung herangezogen werden.

$$Q = \frac{r_{T(n)} A_{red}}{10000} \quad \text{Gleichung 2-4}$$

mit:

$Q$  ... Zufluss von  $A_{red}$  zur Sickeranlage, in l/s

$r_{T(n)}$  ... Regenspende bezogen auf eine bestimmte Jährlichkeit und Regendauer, in l(s ha)

$A_{red}$  ... Entwässerungsfläche, in  $m^2$

Die Versickerungsrate pro Flächeneinheit  $q_v$  bezogen auf  $A_{ent}$  kann durch Gleichung 2-5 ermittelt werden.

$$q_V = v_f \beta D \frac{A_s}{A_{ent}} 60000 \quad \text{Gleichung 2-5}$$

mit:

Der Faktor 60000 resultiert aus der Umrechnung von Minute auf Sekunde sowie von Kubikmeter auf Liter.

$q_r$  ... Regenhöhe, in mm; entspricht  $h$  in mm aus der eHYD-Datenreihe (entspricht l/m<sup>2</sup>)

$D$  ... Regendauer entsprechend der eHYD-Datenreihe (Dauerstufe), in min

$v_f$  ... Sickergerwindigkeit gemäß Tabelle 2, in m/s

$\beta$  ... Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung einer Verschlämmung

$A_s$  ... gewählte bzw. zur Verfügung stehende wirksame Sickerfläche, in m<sup>2</sup>

$A_{ent}$  ... abflusswirksame berechnete Gesamtfläche, in m<sup>2</sup>

Gleichung 2-6 beschreibt die erforderliche Speicherhöhe als Differenz der Regenhöhe und der Versickerungsrate.

$$q_S = q_r - q_V \quad \text{Gleichung 2-6}$$

Das erforderliche Speichervolumen kann durch Gleichung 2-7 ermittelt werden.

$$V_S = \frac{q_S}{1000} A_{ent} \quad \text{Gleichung 2-7}$$

mit:

$q_r$  ... Regenhöhe, in mm; entspricht  $h$  in mm aus der eHYD-Datenreihe (entspricht l/m<sup>2</sup>)

$q_V$  ... Versickerungsrate pro Flächeneinheit, in mm (entspricht l/m<sup>2</sup>)

$q_S$  ... erforderliche Speicherkapazität pro Flächeneinheit, in mm (entspricht l/m<sup>2</sup>)

$V_S$  ... erforderliches Speichervolumen, in m<sup>3</sup>

$A_{ent}$  ... abflusswirksame berechnete Gesamtfläche, in m<sup>2</sup>

Die erforderliche Stauhöhe der Sickeranlage kann durch Gleichung 2-8 ermittelt werden.

$$h_S = \frac{V_S}{A_S} \quad \text{Gleichung 2-8}$$

mit:

$h_S$  ... Stauhöhe, in m

$V_S$  ... erforderliches Speichervolumen, in m<sup>3</sup>

$A_S$  ... gewählte bzw. zur Verfügung stehende wirksame Sickerfläche, in m<sup>2</sup>

Die Vorgaben der ÖNORM B 2506 werden im Zuge der Implementierung von Muldensickeranlagen und Sickerschächten auf das Niederschlags-Abfluss-Modell angewandt. Da es von bestehenden Anlagen der Versickerung oft nicht ausreichend Unterlagen gibt (angeschlossene Flächen, Ausführung etc.) und aufgrund der großen Anzahl von zu implementierenden Maßnahmen im Gesamteinzugsgebiet kann nicht für jede einzelne im Modell abgebildete Maßnahme eine Bemessung im Sinne der ÖNORM B 2506 vorgenommen werden. Es ist darauf hinzuweisen, dass eine Versickerung in kontaminiertes Oberbodenmaterial, wie

es möglicherweise im Gebiet rund um die Smart City Waagner-Biro vorkommen kann, im Sinne des WRG keinesfalls zulässig und daher kategorisch auszuschließen ist. Sollte für diesen Bereich eine konkrete Umsetzung von NWB-Maßnahmen angedacht werden, ist aufgrund des Verdachts auf Kontamination eine ausführliche Bodenerkundung anzustellen.

## 2.3 Anwendung der Niederschlags-Abfluss-Simulationssoftware

So wie in Kapitel 1.7 der theoretische Aufbau der Modellierungssoftware betrachtet worden ist, wird im folgenden Unterkapitel versucht auf die Erstellung des Modells näher einzugehen. Für die Durchführung dieser Masterarbeit wird SWMM als Modellierungssoftware gewählt, welche sowohl im akademischen als auch kommerziellen Bereich Anwendung findet und deshalb auch auf eine breite Palette an spezifischer Literatur zurückgegriffen werden kann. Zur Projektbearbeitung und als Modellierungsumgebung steht PCSWMM von CHI Water zur Verfügung, das, aufbauend auf SWMM, zusätzliche Funktionen und eine benutzerfreundlichere Oberfläche bietet.

Eine ausführlichere Beschreibung des Aufbaus und der in SWMM ablaufenden Prozesse kann in Kapitel 1.7 oder in verwiesener Literatur (z.B. Rossman, 2004) nachgelesen werden.

### 2.3.1 Erstellung des Ausgangsmodells

#### Importieren der Datengrundlage

Grundlage des Modells sind Großteils Daten, die bereits in der GIS-Bearbeitung verwendet und oder im GIS erstellt wurden. So stellt die Oberflächenkarte (Kapitel 2.1.4) zusammen mit der Einzugsgebietskarte und dem Bestand des unterirdischen Entwässerungssystems das Grundgerüst des Modells dar.

Wird in der GIS-Bearbeitung bereits auf die Datenüberführung in die Modellierungssoftware Rücksicht genommen, kann die Modellerstellungsdauer deutlich verkürzt werden. Bei übereinstimmenden IDs der Schachtbauwerke des Entwässerungssystems und der Einzugsgebiete können die Einzugsgebiete somit bereits beim Import des SHP-Files mit einem großen Teil der zugehörigen Entwässerungspunkte verbunden werden.

Neben den Entwässerungspunkten sind die Fließlänge, die Geländeneigung, Landnutzung- und Oberflächentyp weitere zentrale Parameter der Einzugsgebiete, die in SWMM direkt aus dem SHP-File übernommen werden können. Da neben der Größe der Teilflächen auch bereits die maximale Fließlänge bekannt ist, kann der wichtige Abflussparameter „Width“ direkt daraus berechnet werden. Das Entwässerungssystem mitsamt zugehörigen Parametern liegt bereits innerhalb einer SWMM-Datei vor und muss daher nicht importiert werden.

#### Parameterzuweisung

Parameter wie der Versiegelungsgrad I, die Rauigkeit  $n_0$  und der Oberflächen- bzw. Interzeptionspeicher D könnten auch bereits im GIS definiert werden, wurden in dieser Arbeit aber erst mit Hilfe von SWMM zugewiesen. Dabei erfolgt die Zuweisung anhand des Oberflächentyps modifiziert nach der Variante ( $V_1$ ) in

Krebs u. a. (2016a). In Tabelle 2-3 sind die auf das Modell angewandten Oberflächenparameter ersichtlich, Asphalt- (A) und Beton- (B) bzw. Grünflächen (R - V) weisen dabei einen Versiegelungsgrad (VG) von 100 respektive 0 % auf. Schotterflächen weisen im Modell einen VG von 25 % auf, wobei versiegelte Flächen mit den Asphalt Parameterset abgebildet werden. Naturstein- bzw. Pflastersteinflächen (NS, PS) werden mit einem VG von 91 % abgebildet, wobei durchlässige Flächenanteile dabei mit dem Parameterset von Schotter (S) abgebildet werden. Die Flächen der ÖBB (Ö) werden analog PS, NS jedoch mit einen etwas geringeren VG von 75 % abgebildet. Dachflächen (ZB) werden ebenfalls mit einem VG von 100 % abgebildet und weisen außerdem keinerlei Oberflächen- bzw. Interzeptionspeicher auf.

Tabelle 2-3: Oberflächenparameter modifiziert nach Krebs u. a. (2016a)

<b>Oberflächentyp</b>	<b>D [mm]</b>	<b>n<sub>0</sub> [-]</b>	<b>I [%]</b>
A	0,39	0,011	100
B	0,39	0,011	100
S	2,54	0,020	25
NS	1,01	0,012	91
PS	1,01	0,012	91
ZB	0	0,012	100
Ö	1,01	0,012	75
R	4,98	0,150	0
RV	4,22	0,238	0
VR	3,59	0,326	0
V	4,18	0,300	0

### 2.3.2 Infiltration

Wie bereits in Kapitel 1.7.3 erläutert, sind in SWMM mehrere Ansätze implementiert, die den Infiltrationsprozess vereinfacht abbilden können.

In dieser Arbeit findet der Ansatz nach Green-Ampt Anwendung, wobei erforderliche Eingabeparameter entsprechend der Bodenklassifizierung Oram (2012) oder Krebs u. a. (2014) entnommen werden können.

Für das Projektgebiet wurden keine detaillierten Bodenuntersuchungen ange stellt bzw. liegen keine dementsprechenden Unterlagen vor, dennoch kann gemäß GIS-Unterlagen von einer sehr guten Versickerungsfähigkeit des Untergrunds ausgegangen werden (Abbildung 2-12).

Demzufolge werden die Bodenkennwerte des Projektgebiets in der Simulation in einem Bereich guter Versickerungsleistung angesetzt.



Abbildung 2-12: Karte der Bodendurchlässigkeit – Projektgebiet rot umrandet (ArcGIS)

Es ist hier anzumerken, dass die Wechselwirkung zwischen Infiltration und Evapotranspiration (Wasserbilanz) nicht im Zentrum dieser Arbeit steht, sondern primär die Reduktion bzw. Verzögerung des Systemabflusses. Dahingehend wird im Modell auf die Implementierung eines Grundwasserspeichers verzichtet. Auf Grund dieses nicht berücksichtigten Speichers können Änderungen der Bodenfeuchte nur eingeschränkt, hauptsächlich während eines Niederschlagsereignisses, miteinbezogen werden. Hydrogeologische Wechselwirkungen zwischen der Oberfläche und dem Boden finden zwar statt, werden tendenziell aber aufgrund des nicht modellierten Grundwasserspeichers verminderte Evapotranspirationswerte aufweisen. Es wird davon ausgegangen, dass es jedoch zu kaum einer Beeinflussung des Systemabflusses kommt, da die Gesamtverluste in etwa gleichbleiben.

Außerdem soll angemerkt werden, dass die rechtliche Zulässigkeit der Versickerung von anfallenden Niederschlagswässern im Projektgebiet anhand mehrerer rechtlicher Vorgaben zu überprüfen ist (z.B. WRG oder QZV Chemie GW vgl. 1.3.5). Für bestimmte Bereiche entlang der Waagner-Biro-Straße kann aufgrund der Grundstücksvornutzungen von einer gewissen „Kontamination“ des Oberbodens ausgegangen werden. Womit eine Versickerung über ebenjene „kontaminierten“ Bodenpassagen vermutlich nicht zulässig wäre. Die Überprüfung der Zulässigkeit von NWB-Maßnahmen, die Niederschlagswässer in den Oberboden einbringen, hat in der Planungs- und Umsetzungsphase stattzufinden und hat den Vorgaben des WRG zu genügen. Wird im Zuge der Bodenuntersuchung ein Versickern durch bestimmte Bodenpassagen ausgeschlossen, müssen alternative Lösungsansätze (z.B. Sickerschacht) gefunden werden.

### 2.3.3 Evapotranspiration

Die Effekte der Evapotranspiration (ET) werden in dieser Arbeit mithilfe der in SWMM integrierten Ermittlungsmethode nach Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985; Rossman & Huber, 2016a) erzeugt. Die dazu notwendigen Eingangsdaten, Tageshöchst- sowie Tagestiefsttemperaturen, können SWMM durch eine externe Klimadatei übergeben werden. Als Grundlage steht eine durchgehende Temperaturmessung im Bereich Graz in einer einminütigen Auflösung zur Verfügung. Da, wie bereits erwähnt, kein Grundwasserspeicher (Aquifer) eingefügt wurde, kann nur ein Teil der Gesamt-ET (Oberflächen-ET) stattfinden. Kapillares Aufsteigen von Feuchtigkeit aus einem unterirdischen Speicher ist nicht möglich (Boden-ET), es kommt zu einer Unterschätzung der Gesamt-ET. Da der Betrag der Boden-ET jedoch bereits im Infiltrationsterm enthalten ist, zeigt sich keine Änderung in der Wasserbilanz bzw. des Systemabflusses.

### 2.3.4 Niederschlag

Niederschlag kann als einer der wichtigsten Eingangsparameter und als die treibende Kraft in der Niederschlags-Abfluss-Simulation angesehen werden. In SWMM können künstlich erzeugte Modellregen (z.B. Euler II) sowie tatsächlich gemessene Ereignisse über kurze (Einzelereignis) wie auch lange Zeitspannen (Langzeitserie) simuliert werden (Rossman & Huber, 2016a).

Für die Untersuchung dieses Projekts steht eine lückenlose zehn Jahresniederschlagsserie der Messstation Graz-Universität in fünfminütiger Auflösung zur Verfügung (Abbildung 2-13).

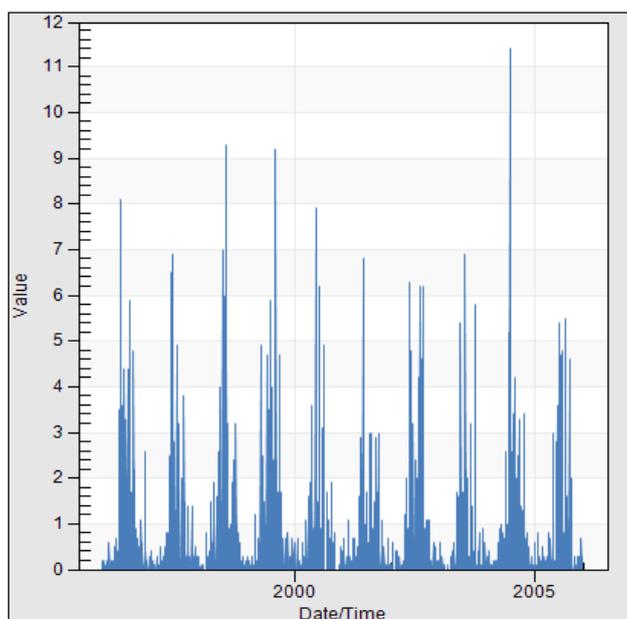


Abbildung 2-13: zehn Jahresniederschlagsserie (1996 bis 2006) gemessen in Graz-Universität (PCSWMM)

Für detailliertere Betrachtungen werden Einzelereignisse innerhalb der Langzeitserie herausgegriffen. Neben dem Ereignis mit der größten Niederschlagshöhe der zehn Jahres Serie (Ereignis 1),  $h = 124,1$  mm, werden auch Ereignis 25 und 31 im Zuge einer Einzelereignissimulation detaillierter betrachtet (Tabelle 2-4).

Tabelle 2-4: Auszug der Niederschlagsereignisse – geordnet gem. Niederschlagshöhe  $h$  – ebenfalls abzulesen die Dauerstufe  $D$ , die maximale Intensität  $I$  sowie die Wiederkehrzeit  $T$

	Datum Beginn	Zeit Beginn	Datum Ende	Zeit Ende	Höhe [mm]	D [h]	max. I [mm/5 min]	T [a]
1	20.08.2005	15:50	21.08.2005	15:35	124,1	23,75	5,5	20
2	10.07.1999	20:00	11.07.1999	12:00	78,7	16,00	3,7	4
3	11.08.2002	08:50	11.08.2002	16:40	56,7	7,83	3,1	3
25	04.05.2000	18:35	04.05.2000	21:25	31,7	2,8	3,6	~1,5
31	28.07.1998	00:35	28.07.1998	01:00	31,1	0,42	9,3	~ 8
775	08.03.2004	12:45	08.03.2004	13:40	1,1	0,92	0,1	<< 1

### 2.3.5 NWB- Maßnahmen

Die Vorteile und der Aufbau von naturnahen NWB-Maßnahmen wurden bereits in den Kapitel 1.4 respektive 1.7.4 ausführlich behandelt. Die Implementierung ebenjener Maßnahmen kann in SWMM auf mehrere Arten erfolgen, wobei eine Abbildung mithilfe des „LID-Editors“ die direkteste Möglichkeit darstellt. In dieser MA wird demnach auch versucht primär auf die Anwendung des „LID-Editors“ zurückzugreifen.

Die Anwendung der Norm erfolgt in dieser Masterarbeit unter Zuhilfenahme eines von der ÖWAV herausgegebenen Excel-Worksheets (ÖWAV, 2015), dass die Vorgaben der Norm bzw. des AB 138 hinterlegt hat.

#### Speichermulden

Die Abbildung der Speichermulden erfolgt in dieser Masterarbeit nicht mittels des von SWMM im LID-Editor angebotenen „LID-Typs“ „Vegetative Swale“, da sich diese in Voruntersuchungen als ungeeignet für den angedachten Zweck herausgestellt hat (Transport- anstatt Speichermulde). Demzufolge wird versucht die Rückhalte- und Versickerungswirkung der Speichermulden durch ein Erhöhen des Oberflächenspeichers inkl. Interzeptionspeicher abzubilden.

Es ist anzumerken, dass Mulden auch mithilfe des LID-Typs „Bio-Retention Cell“ abgebildet werden könnten. Für eine muldenähnliche Funktionsweise, die vor allem als Speicher an der Oberfläche fungiert, müsste die unterirdische Speicherwirkung sowie die unterirdische Systementwässerung des LID-Typs „Bio-Retention Cell“ als sehr gering angesetzt werden.

Mulden oder andere Retentionsanlagen, die zur vorübergehenden Speicherung von Niederschlagswasser dienen, sollen in der Regel eine Tiefe von 0,3 m nicht überschreiten (Geiger & Dreiseitl, 2001; DWA, 2005). Dahingehend werden in dieser Masterarbeit nur Mulden mit einer Tiefe von 0,3 m in das Modell integriert. Sind größere Muldentiefen erwünscht bzw. notwendig, können diese gemäß RB 45 (ÖWAV, 2015) jedoch auch ausgeführt werden, da weder im RB noch in der ÖNORM B 2506-1 (Austrian Standards Institute, 2013) eine Maximaltiefe festgesetzt wird. Aufgrund der erhöhten Gefährdung sind gegebenenfalls Muldenumzäunungen vorzusehen.

Wie bereits in Kapitel 2.2 ausgeführt, hat die Bemessung von Bodenfilter- und Retentionsanlagen gemäß den Vorgaben des Regelblatt 45 (ÖWAV, 2015), der ÖNORM B 2506-1 (Austrian Standards Institute, 2013) oder des Arbeitsblatt 138 (DWA, 2005) zu erfolgen. Die Mulden sollen dabei analog des Schemas Sickermulde ohne Drainagerohr (ÖNORM B 2506-1) ausgeführt und unter Anwendung folgender Parameter bemessen werden:

- Sickerfähigkeit Bodenfilter:  $1 \cdot 10^{-05}$  m/s
- Zuschlagsfaktor: 1,0
- Sicherheitsbeiwert: 1,0
- ehyd-Gitterpunkt: 5214
- Bemessungsjährlichkeit: 20
- Einstauhöhe: 0,30 m

Im Allgemeinen erfolgt die Bemessung von Anlagen bei Projekten mit meist überschaubarer Gebietsgröße. Da der Arbeitsaufwand in dieser Masterarbeit, aufgrund der vergleichsweise enormen Gebietsgröße, bei Durchführung einer Bemessung für jedes Grundstück einzeln unverhältnismäßig hoch wäre, wird versucht notwendige Flächen gemäß des vorhandenen Versiegelungsgrads zuzuweisen, wobei die entsprechenden Faktoren gemäß der Norm ermittelt wurden (Tabelle 2-5). So ist bei 50 % VG und einer Gesamtfläche von 200 m<sup>2</sup>, eine Muldenfläche von 25 m<sup>2</sup> erforderlich, womit sich ein Faktor von 0,125 (12,5 %) errechnen lässt. Die Bandbreite der Faktoren reicht von ~18 % bis ~7 % bei stark versiegelten respektive kaum versiegelten Bereichen.

Tabelle 2-5: Faktor erforderliche Muldenfläche pro entwässerter Fläche bei einer Muldentiefe von 0,3 m – vorhanden Muldenfläche steht in der Klammer

<b>VG [%]</b>	<b>A<sub>Versiegelt</sub> [m<sup>2</sup>]</b>	<b>A<sub>Grünfläche</sub> bzw. (A<sub>Mulde</sub>) [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Faktor [-]</b>
Max. ~82,6	100	21 (21)	0,174
~75	100	35 (21,5)	0,159
~62,5	100	60 (23)	0,144
~50	100	100 (25)	0,125
~37,5	100	166 (28)	0,105
~25	100	304,7 (34,7)	0,086
~12,5	100	700 (55)	0,069

Die Muldenabbildung in SWMM soll eine „Storage-Node“-ähnliche Funktionsweise widerspiegeln, da dieser den Speichervorgang einer tatsächlichen Mulde recht gut wiedergibt. Dahingehend werden beide Arten der Modellierung in SWMM gegenübergestellt. Wobei sich zeigt, dass Oberflächenspeicher einen erhöhten Wert (> 300 mm) benötigt, um ähnliche Ergebnisse wie ein vergleichbarer „Storage-Node“ liefern zu können (Tabelle 2-6). Die Muldenflächen im Modell werden demnach mit einem Oberflächenspeicher von ~387,3 mm abgebildet.

Tabelle 2-6: Vergleich der Implementierung einer Mulde mit 0,3 m Tiefe

<b>VG [%]</b>	<b>A<sub>Versiegelt</sub> [m<sup>2</sup>]</b>	<b>A<sub>Grünfläche</sub> [m<sup>2</sup>]</b>	<b>A<sub>Versicker</sub> [m<sup>2</sup>]</b>	<b>V<sub>Speicher</sub> [m<sup>3</sup>]</b>	<b>h<sub>StorageN</sub> [mm]</b>	<b>h<sub>obersp</sub> [mm]</b>
~75	300	35	65	19,4	300	387,5
~50	100	75	25	7,5	300	387
~25	30	89	11	3,3	300	387,4

## Gründächer

Die Abbildung der Gründächer erfolgt mittels des von SWMM im LID-Editor angebotenen LID-Typs „Green Roof“, indem der Aufbau und die vorhandenen Parameter einzeln angegeben werden können. Im Modell werden Parameter nach Krebs u. a. (2016b) angewandt (Tabelle 2-7).

Tabelle 2-7: Gründachparameter nach Krebs u. a. (2016b) mod.

<b>SWMM-Objekt</b>	<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
<b>Oberfläche</b>	Bermen Höhe [mm]	30
	Vegetationsanteil [-]	0,10
	Rauhigkeit nach Manning [-]	0,168
	Gefälle [%]	8
<b>Boden</b>	Schichtstärke [mm]	100
	Porosität [-]	0,41
	Feldkapazität [-]	0,29
	Welkepunkt [-]	0,02
	hydraulische Leitfähigkeit [mm/h]	37,90
	Leitfähigkeitsgefälle [-]	40
	Saughöhe [mm]	61,30
<b>Drainagematte</b>	Dicke [mm]	3,80
	Rauhigkeit nach Manning [-]	0,01
	Porenanteil [-]	0,41

Verkehrsflächen mit Versickerungsfähigkeit (PPS)

Die Abbildung der PPS erfolgt mittels des von SWMM im LID-Editor angebotenen LID-Typs „Permeable Pavement“. Im Modell werden Parameter nach Zhang & Guo (2015) angewandt (Tabelle 2-8).

Tabelle 2-8: PPS Parameter nach (Zhang &amp; Guo, 2015) mod.

<b>SWMM-Objekt</b>	<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>
<b>Oberfläche</b>	Speicherhöhe [mm]	1,50
	Vegetationsanteil [-]	0
	Rauhigkeit nach Manning [-]	0,015
	Gefälle [%]	1
<b>Belag</b>	Schichtstärke [mm]	1 - 200
	Porenanteil [-]	0,16
	Versiegelungsanteil [-]	0
	Durchlässigkeit [mm/h]	254
	Kolmationsfaktor [-]	0
<b>Speicher</b>	Schichtstärke [mm]	450
	Porenanteil [-]	0,63
	Filtrationsrate [mm/h]	3,30
	Kolmationsfaktor [-]	0
<b>Drainage</b>	Drainagekoeffizient	1000
	Drainageexponent	0,50
	Drainagenversatz [mm]	0 - 400

## Sickerschächte

Die Bemessung sowie Ausführung von Sickerschächten ist, ähnlich wie bei Mulden, durch das RB 45 (ÖWAV, 2015) bzw. die ÖNORM B 2506-1 (Austrian Standards Institute, 2013) geregelt.

Schachtversickerungen werden in dieser Masterarbeit nicht als Instrumente der Verbesserung der Abflusssituation gesehen, sondern kommen nur zur Wiedergabe des zurzeit vorliegenden Systems zur Anwendung. Die 74 im Modell implementierten Schächte wurden teilweise gemäß angeforderten Unterlagen eingebaut, durch die zwar zumeist Tiefe und Dimension hervorgehen, jedoch nicht die angeschlossenen Flächen oder gewählte Bemessungsereignisse. Aufgrund von obengenannten Gründen wurde bei vorhandenen Angaben nur die Lage und Dimension beibehalten und das Volumen gemäß ÖNORM B 2506-1 und entsprechend der angeschlossenen Flächen neu ermittelt.

Die Schachtversickerungsanlagen sollen dabei analog des Schema Sickerschacht (Versickerung über die Schachtsohle) mit Kiesfilter (ÖNORM B 2506-1) ausgeführt und gemäß folgenden Parametern bemessen werden:

- Sickerfähigkeit Filter:  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s
- Sicherheitsbeiwert: 0,50
- Stufenfilter: 0,50 m
- Sickerfähigkeit des anstehenden Untergrunds:  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s
- Abstand Sohle Sickerschacht zu Baugrubensohle: 0,50 m
- Porenvolumen Schotterkörper: 25,00 %
- ehyd-Gitterpunkt: 5214
- Bemessungsjährlichkeit: 20

Die Sickerfähigkeit des Filters ist mit  $5 \cdot 10^{-4}$  m/s kleiner als  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s, dem Grenzwert gemäß DWA-A 138. Der anstehende Untergrund weist mit  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s hingegen eine höhere Sickerfähigkeit auf.

### 2.3.6 Hydraulisch-hydrologische Anpassungen im Modell

Um ein aussagekräftiges Ausgangsmodell zu erhalten, sind weitere hydraulisch-hydrologische Parameter anzupassen, die anhand von detaillierten Datenerhebungen oder anderen Überlegungen als zweckmäßig angesehen werden.

Das unterirdische Entwässerungssystem ist im Vergleich zur GIS-Einzugsgebietskarte an einigen Stellen anzupassen. Aufgrund des numerischen Lösungsverfahrens sind bestimmte Randbedingungen (z.B. Courant-Friedrichs-Lewy Abk. CFL) einzuhalten, um eine stabile Berechnung und plausible Ergebnisse sicherstellen zu können.

Die Einhaltung der CFL (Gleichung 2-9) ermöglicht stabile Lösungen der De-Saint-Venant-Gleichungen indem Zeitschritte nicht größer gewählt werden sollen, als die Durchflusszeit einer dynamischen Welle in kurzen Haltungsabschnitten (Rossman, 2017).

$$\Delta t \leq \frac{L}{|\bar{U} + c|} \quad \text{Gleichung 2-9}$$

$$c = \sqrt{g \bar{A} / \bar{W}} \quad \text{Gleichung 2-10}$$

mit:

$L$  ... *Haltungslänge (m)*

$\bar{U}$  ... *durch. Fließgeschwindigkeit. entlang Haltung (m/s)*

$\bar{A}$  ... *durch. Querschnittsfläche entlang Haltung (m<sup>2</sup>)*

$\bar{W}$  ... *durch. „Width“ der Wasseroberfläche entlang Haltung (m)*

$g$  ... *Erdbeschleunigung (m/s<sup>2</sup>)*

Zufolge CFL sind entweder kleine Zeitschritte anzuwenden oder kurze Haltungslängen zu vermeiden, wobei letzteres bei umfangreichen Projekten, wie bei dieser Masterarbeit, sinnvoller scheint. Da im Entwässerungssystem des Ausgangsdatensatzes Haltungen mit sehr kurzen Längen vorhanden sind, muss das System an jenen Stellen angepasst werden. Haltungen kleiner zehn Meter werden, nach vorheriger Überprüfung der hydraulischen Machbarkeit, mit anliegenden Haltungen zusammengefasst.

Generell wird angenommen, dass bei Projekten, die in den letzten 15 Jahren errichtet worden sind, bereits NWB-Maßnahmen eingesetzt wurden, da eine Ausführung ohne diese nicht bewilligungsfähig gewesen wäre. Es wird somit angenommen, dass nur durch eine Abkopplung bestimmter Flächen eine gute Abbildung des Gesamteinzugsgebietsabflussverhaltens erreicht werden kann.

Für folgende Teilgebiete bzw. Projekte wird davon ausgegangen, dass sie ganzheitlich vom Entwässerungssystem abgekoppelt sind. Anfallende Meteorwässer werden in Sickerschächten oder anderen Maßnahmen der NWB aufgefangen

und beeinflussen die Abflusssituation innerhalb der MW-Kanalisation nur mehr geringfügig:

- **Helmut List Halle** – Sickerschächte
- **Science Tower** – Sickerschacht
- **Cool City** – Sickerschächte
- **Bereich Wohnanlage ÖWG-Wohnwerk** – Sickerschächte und Mulden  
Einsatz eines gründachähnlichen Systems im unterkellerten Hofbereich
- **Wohnanlage GWS Dreierschützengasse** – Sickerschächte
- **Wohnanlage GGW Waldertgasse** – Sickerschächte
- **Parkplatz Siemens** – Mulde für westlichen Teilbereich
- **Neubauten im Bereich des EZG EFH** – Sickerschächte
- **Gebäudeneubau AP-Straße 78** – Sickerschächte und Gründach
- **Hofermarkt AP-Straße** – Abkoppeln der versiegelten Flächen – Hinzufügen von Mulden und Sickerschächten

Bei mehreren Teilbereichen kommt es zur Systemabkopplung versiegelter Flächen ohne die anfallenden Meteorwässer durch Maßnahmen der NWB aufzufangen. Diese Bereiche haben in der Regel bereits sehr lange Bestand, Maßnahmen müssen daher nicht zwingend nachgerüstet werden womit Meteorwässer zu meist direkt auf anliegenden Grünflächen geleitet bzw. dort auch zur Versickerung gebracht werden:

- weite Teile des Bestands im **Bereich des EZG EFH**
- **Kleingartenanlage** im Süden des Projektgebiets
- **Flächen im Osten des Projektgebiets entlang der Bahntrasse**
- **Wohnanlage Waagner-Biro-Straße 66-86** Eisenbahnersiedlung (teilweise)

## 2.4 Berechnungsszenarien

Dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit der Konzeptionierung sowie der Erstellung der Berechnungsszenarien. Der zum Zeitpunkt der Untersuchung vorliegende Zustand wird im Ausgangsmodell (IST) abgebildet und setzt sich im Wesentlichen aus den in den Kapiteln 2.3.1 bis 2.3.6 angeführten Bestandteilen zusammen. Durch das Hinzufügen von zusätzlichen naturnahen NWB-Maßnahmen in das Ausgangsmodell wird versucht, die Abflusssituation im Projektgebiet zu verbessern und mögliche Ausführungsvarianten mit hohem Potenzial aufzuzeigen.

Tabelle 2-9: Auflistung der Berechnungsszenarien sowie Kurzbeschreibung der Änderungen zur Referenzvariante (Maßnahmen)

Variante	Bezeichnung	Kurzbeschreibung der Maßnahmen
0	IST	Ausgangsmodell
1	50P_duVf	PPS auf 50 % der möglichen Flächen
2	100P_duVf	PPS auf 100 % der möglichen Flächen
3	50P_Gd	Gründachsysteme auf 50 % der möglichen Flächen
4	100P_Gd	Gründachsysteme auf 100 % der möglichen Flächen
5	50P_Gd_duVf	Gründachsysteme sowie PPS auf 50 % der möglichen Flächen
6	100P_Gd_duVf	Gründachsysteme sowie PPS auf 100 % der möglichen Flächen
7	Mu	Muldensystem auf 100 % der möglichen Flächen
8	Mu_Gd_duVf	Muldensystem auf 100 % der möglichen Flächen sowie ergänzende Maßnahmen (Gründach- bzw. PPS)

Die Szenariensimulation erfolgt unter Verwendung einer durchgehenden 10-Jahres-Niederschlagsserie (1996 bis 2006) und dreier Einzelereignisse (EE<sub>1</sub>, EE<sub>25</sub> und EE<sub>31</sub>). Aufgrund der sehr langen Berechnungszeiten, der anfallenden Datenmengen und der generellen Bearbeitbarkeit bzw. Auswertbarkeit der Berechnungsergebnisse werden bei der Simulation der durchgehenden 10-Jahres-Niederschlagsserie im Vergleich zu den Einzelereignissen größere Zeitschritte verwendet (Tabelle 2-10). Es ist darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse der Langzeitserie und der Einzelereignisse aufgrund der unterschiedlichen Berechnungszeitschritte nur bedingt miteinander vergleichbar sind. Auf eventuelle Ergebnisabweichungen diesbezüglich wird in Kapitel 3.3 noch näher eingegangen.

Tabelle 2-10: verwendete Simulationszeitschritte

	<b>Langzeitserie</b>	<b>Einzelereignisse</b>
<b>Reporting</b>	00:05:00	00:00:30
<b>Runoff: Dry Weather</b>	00:15:00	00:00:30
<b>Runoff: Wet Weather</b>	00:01:00	00:00:15
<b>Routing</b>	30 s	5 s

#### 2.4.1 Durchlässige Verkehrsflächen

In den Varianten 1 und 2 werden 50 respektive 100 % der möglichen Verkehrsflächen in PPS umgebaut. Die Möglichkeit einer PPS-Implementierung wird neben rechtlichen Reglementierungen (RB 45) auch von bereits ausgeführten NWB-Maßnahmen eingeschränkt. Bereits abgekoppelte versiegelte Flächen haben kaum Einfluss auf die Abflusssituation, womit zusätzliche Maßnahmen zumindest im Sinne der mengenmäßigen Abflussreduktion nicht notwendig sind.

Die Vorgaben des RB 45 gelten im Allgemeinen für eher gering verschmutzte Wässer, die nicht als Abwasser im Sinne §1 Abs. 3 Z 1 AAEV gelten. Die Bestimmung des Grads der Verschmutzung erfolgt bei Verkehrsflächen in Abhängigkeit der Herkunftsfläche bzw. anhand gemittelter Verkehrsstärken, wobei die Anwendung der ÖNORM B 2506 zur Bemessung von Sickeranlagen von befestigten Flächen bis zu max. 5000 DTV als zulässig gilt.

Für die Implementierung von PPS werden daher nur Flächen < 5000 DTV herangezogen (Abbildung 2-14). Gemäß den vorhandenen Geoinformationen dürfen Maßnahmen der NWB der Verkehrsflächen der Peter-Tunner-Gasse, der Waagner-Biro-Straße, der Dreierschützengasse, der Eggenberger Straße und große Teile der Alten Poststraße nicht im Sinne der ÖNORM B 2506 bemessen werden. Sollte die Errichtung von PPS-Maßnahmen bei Verkehrsflächen höherer DTV notwendig bzw. erwünscht sein, kann anhand weiterführenden Regelungen vorgegangen werden:

- RVS 04.04.11 - Gewässerschutz an Straßen

- ÖNORM B 5102 - Reinigungsanlagen für Regenwasser von Verkehrsflächen
- ÖNORM EN 1433 - Entwässerungsrinnen für Verkehrsflächen

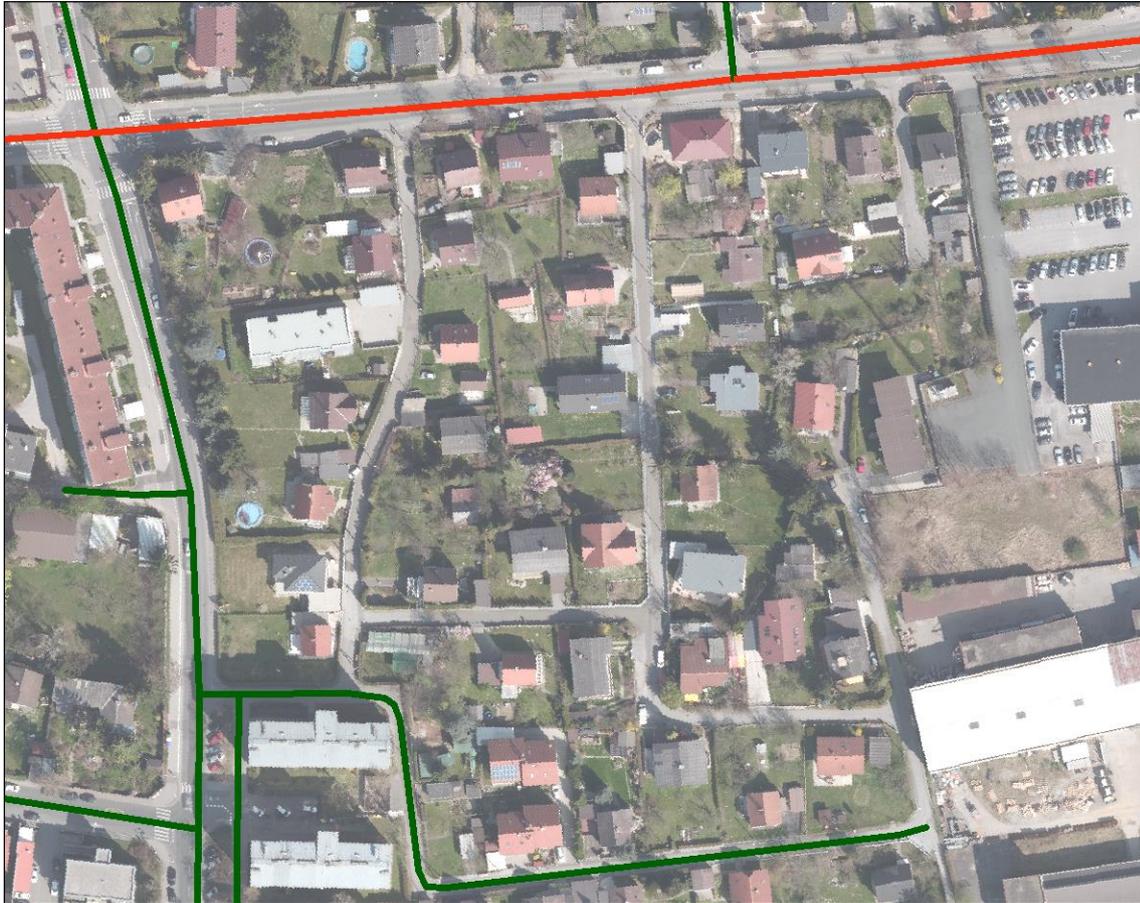


Abbildung 2-14: Darstellung der Verkehrsstärken im nördlichen Bereich des EZG – zulässige Fläche im Sinne der ÖNORM B 2506 in Grün (ArcGIS)

Eine großflächige Implementierung von PPS kann langfristig, besonders im Gebieten dichter Bebauung als ein realistisches Szenario angesehen werden, da etwaige Systemanpassungen im Zuge von umfassenden Sanierungs- bzw. Erneuerungsarbeiten nach Enden des Lebenszyklus der Verkehrsflächen und bei entsprechendem politischen Willen durchgeführt werden könnten.

#### 2.4.2 Gründächer

In den Varianten 3 und 4 werden 50 % respektive 100 % der möglichen Dachflächen in Gründächer umgebaut. Die Möglichkeit einer Gründach-Implementierung wird primär anhand der Dachneigung und der vorhandenen Unterkonstruktion eingeschränkt. Gemäß RB 45 wird in Flächentyp (F1 bis F5) eingeteilt, wobei Dachflächen zumeist gekoppelt mit entsprechenden NWB-Maßnahmen ausgeführt werden.

Ähnlich der Ausführung von PPS ist die zusätzliche Errichtung von Gründachanlagen bei bereits vorhandenen NWB-Maßnahmen nicht unbedingt sinnvoll, da bereits abgekoppelte versiegelte Flächen kaum Einfluss auf die Abflusssituation haben und zusätzliche Maßnahmen somit zumindest im Sinne der mengenmäßigen Abflussreduktion nicht notwendig sind. Für die Umsetzung von zusätzlichen Gründachanlagen kommen in dieser Masterarbeit nur Dächer mit einer Neigung von  $< 45^\circ$  in Frage, da diese leichter umsetzbar scheinen.

Die Dachflächen bzw. die dazugehörigen Gebäude im Projektgebiet sind im Gegensatz zu den Verkehrsflächen zu großen Teilen nicht im Besitz der öffentlichen Hand, womit bei gleichbleibenden gesetzlichen Rahmenbedingungen eine Umsetzung als recht unwahrscheinlich angesehen werden kann. Falls eine Erhöhung der Gründachabdeckung gewünscht wird, müssen somit gewisse finanzielle Anreize (Kanalgebührensplitting etc.) geschaffen werden, die ein Nachrüsten nahelegen.

### 2.4.3 Speichermulden

In Variante 7 wird versucht, anfallenden Oberflächenabfluss mithilfe von Sickermulden zu reduzieren. Dabei werden erforderliche Muldenflächen für Teilbereiche, die eine natürliche Einheit bilden gemäß RB 45 bzw. ÖNORM B 2506 ermittelt. Es werden dabei nur Mulden mit einer Maximaltiefe von 0,3 m angewandt.

Im Zuge der Implementierung der errechneten Muldenflächen wird im Allgemeinen darauf geachtet, dass:

- Mulden vorzugsweise auf Grünflächen situiert werden,
- bei unzureichender Grünflächengröße diese auch auf versiegelter Oberfläche angeordnet werden können (Oberflächenentsiegelung) und
- Muldenflächen die Nutzung der Grundstücke möglichst nicht beeinträchtigen (d.h. beispielsweise bei Kfz-Stellplätzen Fläche reduzieren).

Ähnlich der bereits oben genannten Maßnahmen ist eine zusätzliche Errichtung von Muldenflächen bei bereits vorhandenen NWB-Maßnahmen nicht unbedingt notwendig. Muldenflächen können mittels Bodenfiltern im Gegensatz zu anderen NWB-Maßnahmen jedoch eine außerordentliche Reinigungswirkung erzielen und können somit auch bei stärker verschmutzten Wässern zum Einsatz kommen (siehe RB 45).

Außerdem sind Speichermulden anderen NWB-Maßnahmen im Sinne der Wirtschaftlichkeit weit überlegen und sollen daher bei ausreichenden Platzverhältnissen als primäre Ausführungsvariante gesehen werden. Im innerstädtischen Bereich hingegen und bei anderen hochverdichteten Gebieten sind die erforderlichen Platzverhältnisse jedoch oft nicht gegeben.

Die Problematik mit der Umsetzung von Muldenflächen ist ähnlich der Umsetzung von Gründachanlagen. Da sich Speichermulden auf öffentlichen Gründen oft nur schwer realisieren lassen ohne die Funktionsfähigkeit von Flächen zu beeinträchtigen, hat eine großflächige Umsetzung dieser dezentralen NWB-Maßnahme zu großen Teilen auf Privatbesitz zu erfolgen. Diese Veränderung im Bestand scheint ohne entsprechendes Anreizsystem jedoch nicht sehr wahrscheinlich.

### **2.4.4 Maßnahmenkombination**

In den vorangegangenen Varianten zeigt sich die Effektivität der Einzelmaßnahmen und damit ihre individuelle Wirksamkeit. Damit können Kombinationen zusammengestellt werden, die in jedem Fall höhere Wirkungsgrade als ein singuläres Maßnahmenpaket aufweisen.

#### Teilausbau

Mit Teilausbau wird ähnlich wie bei den Einzelmaßnahmenvarianten eine teilweise Abdeckung der möglichen (verfügbaren) Flächen mittels mehrerer Maßnahmen bezeichnet. In Variante 5 werden 50 % der verfügbaren Verkehrs- und Dachflächen umgebaut bzw. umgerüstet, womit bereits sehr große Teilflächen abgedeckt wären.

#### Totalausbau

Unter Totalausbau kann im Sinne der bereits beschriebenen Maßnahmen eine vollkommene Abdeckung der verfügbaren Flächen mittels mehrerer Maßnahmen verstanden werden.

- In Variante 6 wird, ähnlich der Variante 5, eine Kombination aus PPS und Gründachanlagen durchgeführt, wobei eine 100 % Abdeckung der verfügbaren Flächen angesetzt wird.
- Variante 8 inkludiert Variante 7 und setzt neben einer großflächigen Muldenanwendung zusätzliche PPS und Gründachflächen ein, wobei letztere Maßnahmen hauptsächlich in Gebieten unzureichender Grünflächenverfügbarkeit eingesetzt werden. Diese Variante stellt somit eine umfassende Kombination der Maßnahmen dar und kann als Maßnahmenmaximum angesehen werden.

### **2.4.5 Sensitivitätsszenario IST-Zustand**

In diesem Szenario soll die Sensitivität der Simulationsergebnisse hinsichtlich abweichenden Hydraulikparametern der Oberfläche näher betrachtet werden. Zu diesem Zweck werden die Parametersets des Ausgangszustands ( $S_0$ ) abgeän-

dert und eigenständig simuliert. Die zusätzlichen Simulationsergebnisse, der Parametersets  $S_1$  und  $S_2$ , werden dann mit den Ergebnissen von  $S_0$  verglichen, um Differenzen der VR und SR aufzuzeigen.

Die innerhalb der Sensitivitätsanalyse angewandten Parametersets sind Tabelle 2-11 zu entnehmen.

Tabelle 2-11: Analyse der Sensitivität der Oberflächenparameter modifiziert nach Krebs u. a. (2016a) – Oberflächenspeicher D, Rauigkeit nach Manning für den Oberflächenabfluss  $n_0$  und Versiegelungsgrad I

Oberflächentyp	$S_0$			$S_1$			$S_2$		
	D [mm]	$n_0$ [-]	I [%]	D [mm]	$n_0$ [-]	I [%]	D [mm]	$n_0$ [-]	I [%]
A	0,39	0,011	100	0,30	0,010	100	0,50	0,012	91
B	0,39	0,011	100	0,30	0,010	100	0,50	0,012	91
S	2,54	0,020	25	2,00	0,019	38	3,00	0,030	12
NS	1,01	0,012	91	0,80	0,011	100	1,20	0,020	86
PS	1,01	0,012	91	0,80	0,011	100	1,20	0,020	86
ZB	0	0,012	100	0	0,007	100	0,10	0,014	100
Ö	1,01	0,012	75	1,01	0,012	75	1,01	0,012	75
R	4,98	0,168	0	4,82	0,150	0	5,00	0,200	0
RV	4,22	0,238	0	4,00	0,170	0	5,00	0,300	0
VR	3,59	0,326	0	3,00	0,200	0	5,00	0,500	0
V	4,18	0,300	0	2,00	0,250	0	5,00	0,660	0

Das Parameterset  $S_1$  sollte auf eine Verschlechterung der hydraulischen Situation hinauslaufen, da D verringert und I erhöht wird. Die Simulation des Parameterset  $S_2$  sollte mit erhöhten D- und verringerten I-Werten eine Verbesserung der Ergebnisse bewirken (erhöhte VR und SR).

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen sind Kapitel 3.5 zu entnehmen.

#### 2.4.6 Weitere mögliche Szenarien

Verschiedene Maßnahmenpakete würden einen großen Arbeitsaufwand bedeuten. Die Umsetzung solcher Pakete bedarf oft einer noch höheren Detailierung und würde daher den Umfang dieser MA übersteigen.

##### Punktmaßnahmen

Punktuelle Maßnahmen weisen eine verhältnismäßig geringe Fläche und geringe einseitigen Ausdehnung auf. Innerhalb des Anwendungsbereiches von NWB-Maßnahmen fallen primär Sickerschächte oder Bioretentionszonen unter diese Definition:

- Die Anwendung von Sickerschächten bietet vor allem innerhalb dicht bebauter Gebiete oft die einzige Möglichkeit für die Abkopplung versiegelter Flächen vom Entwässerungssystem. Diese Maßnahmen werden jedoch auch angewandt, weil oberflächennah sehr geringe Versickerungseigenschaften vorliegen oder eine Oberflächenversickerung aus anderen Gründen nicht erwünscht oder möglich ist (z.B. Oberbodenkontamination).
- Maßnahmen der Bioretention können im Gegensatz zu Sickerschachtanlagen eine außerordentlich gute Reinigung belasteter Oberflächenabflüsse bieten (Hunt W. F. u. a., 2008). Außerdem weisen sie ähnlich wie Gründachanlagen positive Effekte bezüglich des lokalen Stadtklimas auf (CNT, 2011).

Größere Bioretentionszonen könnten, mit hohen Retentionsvolumina ausgestattet, den zentralen Abschlusspunkt einer Aneinanderreihung von mehreren naturnahen NWB-Maßnahmen bilden (z.B. kleinerer Mulden, Gründächer, PPS).

### Linearmaßnahmen

Bei linearen Maßnahmen liegt im Allgemeinen ein hohes Länge/Breite-Verhältnis vor. Innerhalb des Anwendungsbereiches von naturnahen NWB-Maßnahmen werden damit primär verkehrsflächenbegleitende Maßnahmen (Mulden, Bioretentionsstreifen etc.) angesprochen. Entlang ausreichend breiter Verkehrsflächen z.B. der Eggenberger Straße oder Teilen der Alten Poststraße könnten durch umfangreiche Querschnittsumgestaltung entsprechende Flächen umgesetzt werden. Die Versickerung von Straßenabflüssen hat abhängig von der durchschnittlichen Verkehrsstärke gemäß rechtlicher Vorgaben zu erfolgen (Kapitel 2.4.1).

### Zukunftsszenario (Smart-City)

Wie bereits in Kapitel 1.5.3 ausgeführt, werden im Projektgebiet in naher Zukunft noch weitere umfangreiche Umgestaltungen bzw. Neuerrichtungen ausgeführt. Die geplanten Projekte zielen dabei zunächst auf zurzeit brachliegende Flächen oder Flächen von vermeintlich geringerer Relevanz ab.

- Die Errichtung der Gebäudeanlagen auf den Baufeld Nord-Mitte im Nord-Osten des Projektgebiets soll mit 2022 abgeschlossen sein.
- Für die Flächen der Kleingartenanlagen im Süden des Projektgebiets gibt es zwar noch keine allzu konkreten Pläne, eine Rahmen- bzw. Konzeptplanung für diesen Bereich ist allerdings bereits fertiggestellt. Dabei werden anstelle der Kleingartenanlage mehrgeschossige Wohnbauprojekte errichtet.

- Die Neubebauung der Brachfläche entlang der Starhembergasse ist bereits in einem fortgeschrittenen Stadium der Entwicklung und sollte entsprechend der Unterlagen stattfinden.

## 2.5 Ergebnisauswertung

Die Effektivität von NWB-Maßnahmen kann auf unterschiedliche Arten festgestellt werden, dabei ist zwischen qualitativen und quantitativen Parametern zu unterscheiden (z.B. Ahiablame u. a., 2012). In dieser Masterarbeit soll es primär zu einem Vergleich der quantitativen Abflussparameter der verschiedenen Varianten, Szenarien und EZGs kommen. Die Reduktion des Abflussvolumens (VR) wird zusammen mit der Reduktion der auftretenden Abflussspitze (SR) als Hauptparameter zur Beurteilung der Maßnahmeneffektivität angewandt. Eine Auswertung der zeitlichen Verschiebung der Abflussspitzen (z.B. Palla & Gnecco, 2015) findet in dieser Masterarbeit keine Anwendung, da sich im Zuge der Untersuchung bei allen Varianten und Szenarien nur unwesentliche Verschiebungen ( $\leq 1$  min) gezeigt haben. Referenzgrundlage aller Vergleiche ist die Variante 0 IST, auf die sich alle Angaben über gegebenenfalls stattfindende Reduktionen (R) (Gleichung 2-11) beziehen. Um eine Vergleichbarkeit der Effektivität der NWB-Maßnahmen der einzelnen EZG zu ermöglichen, wurde mit  $R_F$  ein Parameter eingeführt, der erzielte Reduktionen auf das Verhältnis von EZG-Gesamtfläche zur angewandten NWB-Maßnahmenflächen bezieht (Gleichung 2-12). Die erzielten Ergebnisse der drei Haupteinzugsgebiete und des Gesamtprojekts können somit miteinander verglichen werden.

$$R = \frac{(X_0 - X_x)}{X_0} * 100 \quad \text{Gleichung 2-11}$$

mit:

$R$ ... Reduktion des Abflussvolumens bzw. der Abflussspitze (%)

$X_0$ ... Referenzwert der Variante 0 IST Abflussvolumen bzw. Abflussspitze ( $m^3$  bzw.  $m^3/s$ )

$X_x$ ... Wert der entsprechenden Maßnahmenvariante Abflussvolumen bzw. Abflussspitze ( $m^3$  bzw.  $m^3/s$ )

$$R_F = \frac{R}{\left( \frac{A_{NWB}}{A_{EZG}} * 100 \right)} \quad \text{Gleichung 2-12}$$

mit:

$R_F$ ... Reduktion unter Einbezug des Flächenverhältnis NWB zu EZG (-)

$A_{NWB}$ ... im EZG angewandte NWB-Maßnahmenfläche (ha)

$A_{EZG}$ ... Gesamtfläche des EZG (ha)

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Das folgende Kapitel zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Oberflächenerhebung, der ausgeführten Simulationen und stellt Vergleiche der Ergebnisse der einzelnen Berechnungsszenarien, wie in Kapitel 2.4 aufgelistet, an. Neben unterschiedlichen Maßnahmenkombinationen werden auch unterschiedliche Simulationszeiträume bzw. Niederschlagsereignisse betrachtet. Die angewandten Maßnahmen sowie etwaige Kombinationen sind in Kapitel 2.4.1 bis 2.4.4 ersichtlich.

Wie bereits im Kapitel 2.5 angeführt, soll es in dieser Masterarbeit vordergründig zu einem Vergleich der quantitativen Abflussparameter der verschiedenen Varianten, Szenarien und Einzugsgebiete (EZG) kommen. Dabei soll die Reduktion des Abflussvolumens (VR) zusammen mit der Reduktion der auftretenden Abflussspitze (SR) als Hauptparameter zur Beurteilung der Maßnahmeneffektivität angewandt werden. Referenzgrundlage aller Vergleiche ist die Variante 0 IST, auf die sich alle Angaben über gegebenenfalls stattfindende Reduktionen (R) beziehen. Außerdem wird zur besseren Vergleichbarkeit der Parameter  $R_F$  eingeführt.

Die angeführten Werte wurden direkt aus dem PCSWMM- „Table“ übernommen und können in den beigelegten Berechnungsergebnissen (SWMM-File) nachgeschlagen werden. Die angeführten Volumina werden dabei bereits aufsummiert dargestellt, die maximalen Spitzenabflüsse sind für jeden Auslauf einzeln angegeben. Zur Ermittlung der maximalen Abflussspitze des gesamten EZG ist das Abflussmaximum bei gleichen Zeitpunkt zu ermitteln.



und relativen Flächenanteile der einzelnen Landnutzungstypen sowie Oberflächentypen abgelesen und folglich auch der Grad der Versiegelung der entsprechenden Bereiche ermittelt werden (Tabelle 3-2).

In der Analyse des Projektgebiets zeigt sich bereits ein fortgeschrittener Zustand der Oberflächenversiegelung. Größere Teilbereiche des Gesamtgebiets weisen dabei eine fast vollkommene Versiegelung auf. Dem gegenüber stehen hingegen auch noch größere Bereiche mit geringen VG.

Mit der Fertigstellung der Oberflächenkarte ist die erste Teilaufgabe dieser Masterarbeit erfüllt, die gewonnenen Erkenntnisse sind Teil des hydraulisch-hydrologischen Modells (Kapitel 2.1.4).

Tabelle 3-1: Ergebnisse der Oberflächenerhebung gemäß Oberflächenkarte (GIS) - für das gesamte Projektgebiet (GPG) und ausgewählte Teilgebiete (A, E<sub>1</sub> und F<sub>2</sub>) nach Krebs u. a. (2016a) mod.

			A		E <sub>1</sub>		F <sub>2</sub>		GPG	
Oberflächentyp	Oberflächentyp Code	Landnutzungstyp	A <sub>absolut</sub> [m <sup>2</sup> ]	A <sub>relativ</sub> [%]	A <sub>absolut</sub> [m <sup>2</sup> ]	A <sub>relativ</sub> [%]	A <sub>absolut</sub> [m <sup>2</sup> ]	A <sub>relativ</sub> [%]	A <sub>absolut</sub> [m <sup>2</sup> ]	A <sub>relativ</sub> [%]
Asphalt	A	Sonstige	42,18	0,062	0,00	0,000	5259,70	12,817	8606,75	1,231
Asphalt	A	Parkplatz	3247,15	4,811	1804,92	4,661	4566,94	11,129	38260,74	5,474
Asphalt	A	Bürgersteig	2813,79	4,169	1421,10	3,669	3361,01	8,190	37708,41	5,394
Asphalt	A	Straße	12507,72	18,530	11141,20	28,768	6522,77	15,894	173338,2	24,797
∑ Asphalt			18610,84	27,572	14367,22	37,098	19710,41	48,030	257914,1	36,897
Beton	B	Sonstige	18,09	0,027	0,00	0,000	18,09	0,044	60,82	0,009
Beton	B	Parkplatz	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000
Beton	B	Bürgersteig	81,14	0,120	0,00	0,000	75,65	0,184	229,64	0,033
Beton	B	Straße	106,35	0,158	0,00	0,000	0,00	0,000	318,34	0,046
∑ Beton			205,58	0,305	0,00	0,000	93,74	0,228	608,80	0,087
Schotter	S	Sonstige	614,59	0,911	0,00	0,000	1182,61	2,882	67168,84	9,609
Schotter	S	Parkplatz	624,65	0,925	292,35	0,755	1218,05	2,968	8539,82	1,222
Schotter	S	Bürgersteig	34,68	0,051	0,00	0,000	12,82	0,031	513,43	0,073
Schotter	S	Straße	1556,46	2,306	759,36	1,961	0,00	0,000	5109,05	0,731
∑ Schotter			2830,38	4,193	1051,71	2,716	2413,48	5,881	81331,14	11,635
Naturstein	NS	Sonstige	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000

## Ergebnisse und Diskussion

Naturstein	NS	Bürgersteig	29,48	0,044	0,00	0,000	0,00	0,000	29,48	0,004
$\Sigma$ Naturstein			29,48	0,044	0,00	0,000	0,00	0,000	29,48	0,004
Pflasterstein	PS	Sonstige	820,92	1,216	0,00	0,000	67,50	0,164	4162,60	0,595
Pflasterstein	PS	Parkplatz	1168,58	1,731	0,00	0,000	758,15	1,847	8322,20	1,191
Pflasterstein	PS	Bürgersteig	362,13	0,537	0,00	0,000	84,24	0,205	2742,26	0,392
Pflasterstein	PS	Straße	705,81	1,046	0,00	0,000	0,00	0,000	2381,58	0,341
$\Sigma$ Pflasterstein			3057,44	4,530	0,00	0,000	909,89	2,217	17608,63	2,519
ÖBB	Ö	ÖBB	0,00	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	4867,60	0,696
Ziegel/Bahnen	ZB	Dachfläche	16315,59	24,172	20956,22	54,111	12702,99	30,954	145286,8	20,784
Rasen	R	Grünfläche	8512,60	12,612	1249,12	3,225	3392,74	8,267	107303,8	15,351
Rasen/Vegetation	RV	Grünfläche	13963,91	20,688	816,92	2,109	1701,14	4,145	67201,19	9,614
Vegetation/Rasen	VR	Grünfläche	1595,60	2,364	180,39	0,466	113,62	0,277	3988,17	0,571
Vegetation	V	Grünfläche	2376,65	3,521	106,29	0,274	0,00	0,000	12876,73	1,842
$\Sigma$ Grünfläche			26448,77	39,184	2352,71	6,075	5207,49	12,689	191369,8	27,377
$\Sigma$ GPG			67498,06	100,000	38727,85	100,000	41037,99	100,000	699016,5	100,000

Tabelle 3-2: Ergebnisse der Oberflächenerhebung gemäß Oberflächenkarte (GIS) – Oberflächentypen, Versiegelungsgrad und Flächenanteile für das gesamte Projektgebiet und ausgewählte Teilgebiete (Krebs u. a., 2016a) mod.

Oberflächentyp	Versiegelungsgrad [%]	A		E <sub>1</sub>		F <sub>2</sub>		GPG	
		A <sub>absolut</sub> [ha]	A <sub>relativ</sub> [%]						
Grünfläche	0	2,645	39,2	0,235	6,1	0,521	12,7	19,137	27,4
Schotter	25	0,283	4,2	0,105	2,7	0,241	5,9	8,133	11,6
ÖBB	25	0,000	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,487	0,7
Asphalt	100	1,861	27,6	1,437	37,1	1,971	48,0	25,791	36,9
Beton	100	0,021	0,3	0,000	0,0	0,009	0,2	0,061	0,1
Naturstein	91	0,003	0,0	0,000	0,0	0,000	0,0	0,003	0,0
Pflasterstein	91	0,306	4,5	0,000	0,0	0,091	2,2	1,761	2,5
Dachfläche	100	1,632	24,2	2,096	54,1	1,270	31,0	14,529	20,8
Σ A		6,750	100,0	3,873	100,0	4,104	100,0	69,902	100,0
Σ VG		57,3	%	91,9	%	82,7	%	63,1	%

### 3.2 Langzeitsimulation

Im folgenden Unterkapitel werden die Ergebnisse einer Langzeitsimulation des Berechnungsmodells dargelegt. Die angewandte Niederschlagsserie (Kapitel 2.3.4) bietet dabei eine durchgehende Ereignisaufzeichnung von 1996 bis 2006 und beinhaltet mehrere hydrologisch interessante Einzelereignisse, die als Einzelereignisse mittels eigenständiger Simulation abgehandelt werden (Kapitel 3.3).

Um die ermittelten Ergebnisse der Langzeitsimulation möglichst anschaulich darstellen zu können, finden unterschiedliche Diagramme sowie eine abschließende Ergebnissauflistung in tabellarischer Form Anwendung.

In Abbildung 3-2 sind die Auswertungsergebnisse hinsichtlich der Reduktion von Abflussvolumen für das Gesamtprojektgebiet (GPG) bei einer 10-Jahresniederschlagsserie dargestellt. Dabei ist das auftretende Abflussvolumen auf der Ordinate und die untersuchten Szenarien bzw. die unterschiedlichen Ausläufe auf der Abszisse aufgetragen. Es lässt sich gut erkennen, dass der Auslauf OUT ES am stärksten beansprucht wird. Der Kanalstrang in der Eggenberger Straße (ES) wird mit mehr als doppelt so viel Volumen durchflossen als die Stränge der Alten Poststraße (AP) oder der Peter-Tunner-Gasse (PT). Für den Auslauf OUT ES zeigt sich bei der Variante 8 ( $V_8$ ) die stärkste VR des anfallenden Abflusses,  $V_2$ ,  $V_6$  und  $V_7$  weisen jedoch bereits deutliche Reduktionen auf. Bei OUT AP zeichnen sich die stärksten Reduktionen ebenfalls bei  $V_8$  und  $V_6$  ab, wobei  $V_2$ ,  $V_5$  und  $V_7$  bereits gute Ergebnisse liefern. Das Reduktionsbild bei OUT PT ist ähnlich zu OUT AP und zeigt die größte Reduktion ebenfalls bei  $V_8$ . Das ebenfalls untersuchte Potenzial zur Reduktion der Abflussspitzen ist in Abbildung 3-3 ersichtlich, bei der der auftretende Spitzenabfluss auf der Ordinate und die untersuchten Szenarien bzw. die unterschiedlichen Ausläufe auf der Abszisse aufgetragen sind. Im Vergleich zur Reduktion der Abflussvolumina zeigen sich bei den Abflussspitzen tendenziell geringere Reduktionen. Für den Auslauf OUT ES lassen sich bei den  $V_6$  und  $V_8$  die stärksten Reduktionen feststellen,  $V_2$  und  $V_7$  weisen jedoch auch schon ansehnliche Reduktionen auf. Für OUT AP zeigen sich sehr geringe Unterschiede zwischen  $V_1$  und  $V_2$  bzw.  $V_3$  und  $V_4$ ,  $V_8$  weist auch hier die höchsten Reduktionen auf. Die Auswertung der  $V_6$  bis  $V_8$  zeigen für OUT PT beinahe idente Ergebnisse in der SR.

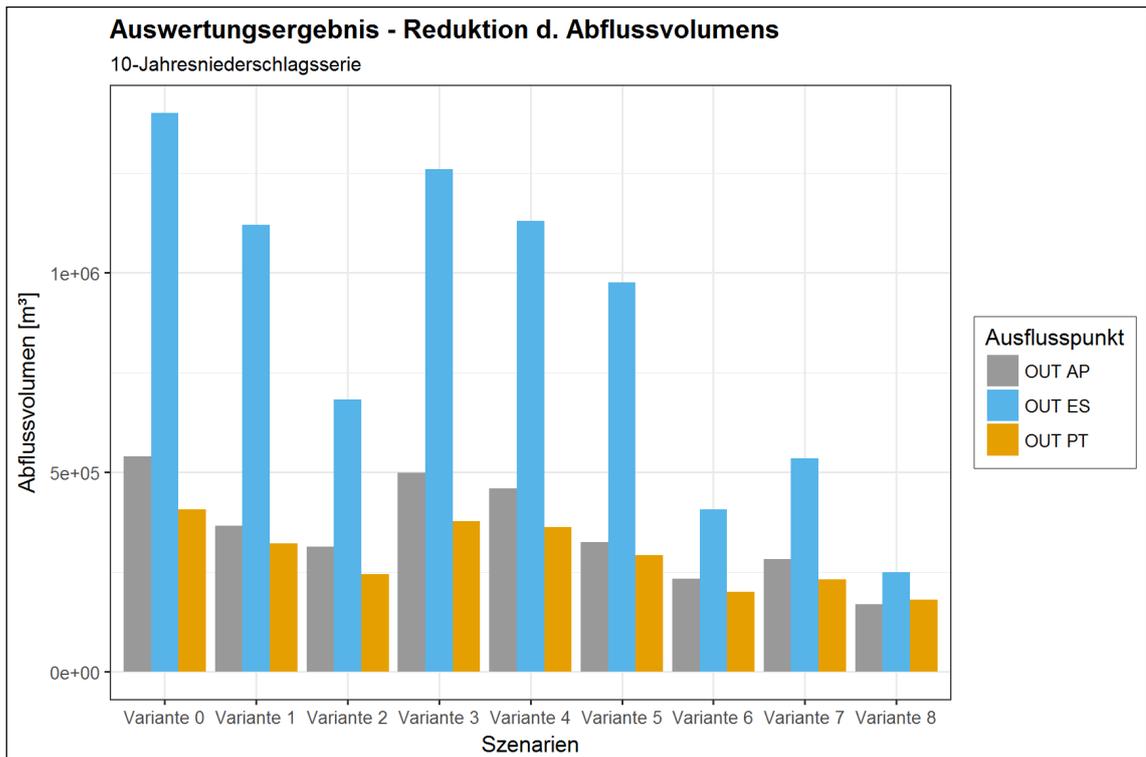


Abbildung 3-2: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Abflussvolumens im GPG bei einer 10-Jahresniederschlagsserie

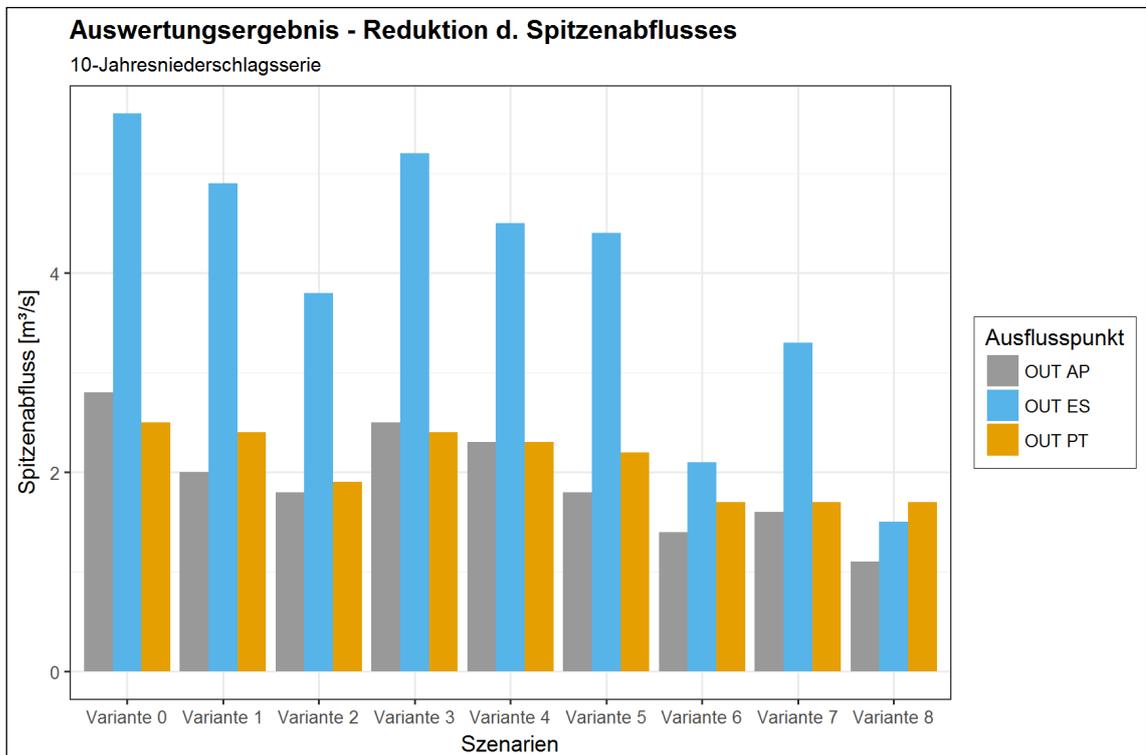


Abbildung 3-3: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Spitzenabflusses im GPG bei einer 10-Jahresniederschlagsserie

Die Ergebnisse der Simulation einer 10-Jahresniederschlagsserie sind in Tabelle 3-3 dargestellt. Dabei sind die verschiedenen Szenarien sowie deren ermittelte Abflussvolumina und Spitzenabflüsse den Zeilen, die Ausläufe und deren zugehörige Effektivitätsparameter den Spalten zugeordnet. Die Ergebnisse der Simulation zeigen kurz zusammengefasst für das Referenzszenario 0 IST für die 10-Jahresniederschlagsserie bei OUT ES, OUT PT und OUT AP ein Abflussvolumen von 1,4 Mio. m<sup>3</sup>, 0,407 Mio. m<sup>3</sup> und respektive 0,54 Mio. m<sup>3</sup> und somit ein Gesamtabflussvolumen des EZG von 2,35 Mio. m<sup>3</sup>. Dabei werden Spitzenabflüsse von 5,6; 2,5 bzw. 2,8 m<sup>3</sup>/s sowie 10,7 m<sup>3</sup>/s für das gesamte Projektgebiet erreicht.

Wie bereits in Kapitel 2.5 erwähnt, erfolgt die Auswertung der Ergebnisse vor allem über die Analyse der Effektivitätsparameter  $R$  und  $R_F$ .

Der Parameter  $R$  zeigt dabei ein recht deutliches Bild, da die höchsten Reduktionswerte unabhängig der EZG bei den Varianten 2 bzw. 6 bis 8 erreicht werden können. Am stärksten können Abflussvolumen und Spitzenabfluss dabei für das EZG ES reduziert werden. Da in ebenjenem EZG jedoch auch die größten Maßnahmenflächen angewandt wurden (4,46 ha bei  $V_2$ ), soll im Zuge einer weiteren Ergebnisauswertung auf den flächenunabhängigen Parameter  $R_F$  zurückgegriffen werden, der somit eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Maßnahmen und EZG ermöglicht. Für den Parameter  $R_F$  kann folgendes festgestellt werden:

Bei OUT ES zeigen sich mit  $\sim 0,8$  bis  $\sim 1,5$  ähnlich niedrige Ergebnisse der Varianten 1 bis 6, stärker Reduktionen sind bei  $V_7$  und  $V_8$  mit  $\sim 10$  bzw.  $\sim 2$  zu beobachten. Für OUT PT zeigt sich im Vergleich zu OUT ES ein etwas differenzierteres Bild der Variantenergebnisse da  $V_4$  besonders niedrige Wert aufweist. Die höchsten Effektivitätswerte sind wiederum bei  $V_7$  und  $V_8$  mit  $\sim 17$  bzw.  $\sim 4$  zu erkennen. Bei OUT AP zeigen sich bis auf  $V_7$  durchwegs bessere Ergebnisse als in den anderen Auslaufpunkten wobei  $V_4$  im Vergleich zu OUT PT deutlich besser funktioniert. Ähnlich den anderen Auslaufpunkten zeigen sich die höchsten Effektivitätswerte bei  $V_7$  und  $V_8$  mit  $\sim 9$  bzw.  $\sim 4$ . Die deutlich besten Ergebnisse ( $R_F$ ) können somit mit 17,1 bzw. 12,6 bei OUT PT im Zuge der Variante 7 erreicht werden.

Tabelle 3-3: Ergebnisse der Simulation einer 10-Jahresniederschlagsserie (1996 bis 2006) – Abflussvolumen, Spitzenabfluss, Reduktion (R) sowie Reduktionen bezogen auf das Verhältnis von Gesamtfläche des EZG zur angewandten NWB-Maßnahmenflächen (R<sub>F</sub>) der drei Auslaufpunkte (OUT ES, OUT PT, OUT AP sowie des GPG) – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Maßnahmeneffektivität (R bzw. R<sub>F</sub>)

Variante	OUT ES	R [%]	R <sub>F</sub> [-]	OUT PT	R [%]	R <sub>F</sub> [-]	OUT AP	R [%]	R <sub>F</sub> [-]	GPG	R [%]	R <sub>F</sub> [-]
0_IST	33,22 ha			14,18 ha			18,41 ha			65,81 ha		
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1400000	/	/	407000	/	/	540000	/	/	2347000	/	/
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	5,6	/	/	2,5	/	/	2,8	/	/	10,7	/	/
1_50P_duVf	4,46 ha		13,41 %	1,30 ha		9,13 %	2,57 ha		13,96 %	8,32 ha		12,64 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1120000	20,0	1,5	322000	20,9	2,3	366000	32,2	2,3	1808000	23,0	1,8
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	4,9	11,6	0,9	2,4	7,6	0,8	2,0	27,6	2,0	9,2	14,8	1,2
2_100P_duVf	11,38 ha		34,26 %	2,24 ha		15,80 %	3,28 ha		17,82 %	16,90 ha		25,68 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	682000	51,3	1,5	244000	40,0	2,5	313000	42,0	2,4	1239000	47,2	1,8
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	3,8	32,3	0,9	1,9	24,2	1,5	1,8	34,5	1,9	7,2	32,7	1,3
3_50P_Gd	2,98 ha		8,97 %	0,61 ha		4,30 %	0,86 ha		4,65 %	4,45 ha		6,76 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1260000	10,0	1,1	377000	7,4	1,7	499000	7,6	1,6	2136000	9,0	1,3
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	5,2	7,1	0,8	2,4	6,4	1,5	2,5	9,3	2,0	10,0	7,4	1,1
4_100P_Gd	5,73 ha		17,23 %	1,65 ha		11,64 %	1,33 ha		7,22 %	8,71 ha		13,23 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1130000	19,3	1,1	363000	10,8	0,9	460000	14,8	2,1	1953000	16,8	1,3
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	4,5	18,5	1,1	2,3	9,5	0,8	2,3	16,5	2,3	9,0	16,5	1,2
5_50P_Gd_duVf	7,44 ha		22,38 %	1,91 ha		13,43 %	3,43 ha		18,61 %	12,77 ha		19,40 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	976000	30,3	1,4	292000	28,3	2,1	325000	39,8	2,1	1593000	32,1	1,7
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	4,4	20,7	0,9	2,2	14,8	1,1	1,8	36,4	2,0	8,1	24,4	1,3
6_100P_Gd_duVf	17,11 ha		51,49 %	3,89 ha		27,43 %	4,61 ha		25,04 %	25,61 ha		38,91 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	407000	70,9	1,4	200000	50,9	1,9	233000	56,9	2,3	840000	64,2	1,7
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	2,1	62,0	1,2	1,7	34,5	1,3	1,4	51,6	2,1	4,7	56,5	1,5
7_Mu	2,03 ha		6,11 %	0,36 ha		2,52 %	0,96 ha		5,21 %	3,35 ha		5,09 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	535000	61,8	10,1	231000	43,2	17,1	283000	47,6	9,1	1049000	55,3	10,9
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	3,3	40,8	6,7	1,7	31,8	12,6	1,6	42,7	8,2	6,2	42,4	8,3
8_Mu_Gd_duVf	13,08 ha		39,37 %	1,82 ha		12,82 %	3,00 ha		16,30 %	17,90 ha		27,20 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	249000	82,2	2,1	181000	55,5	4,3	169000	68,7	4,2	599000	74,5	2,7
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,5	72,3	1,8	1,7	35,0	2,7	1,1	60,9	3,7	3,9	63,3	2,3

### 3.3 Einzelereignissimulation

In diesem Unterkapitel sollen einige hydrologisch interessante Einzelereignisse (EE) ausführlicher betrachtet werden. Da bei EE über einen vergleichsweise kurzen Zeitraum simuliert wird, können weitaus kleinere Zeitschritte angesetzt und somit Ergebnisse mit einer feineren Auflösung gewonnen werden.

#### 3.3.1 Einzelereignis 1

Das Einzelereignis 1 (vgl. Kapitel 2.3.4) ist für den Zeitraum der vorhandenen Niederschlagsdaten (1996 bis 2006) das Ereignis mit der größten Niederschlagshöhe, bei dem bei einer Dauer von in etwa 24 h 124 mm Niederschlag anfallen. Das in Abbildung 3-4 dargestellte Niederschlagsprofil des EE<sub>1</sub> weist die höchste Ereignisintensität mit >60 mm/h um 22:00 Uhr auf. Unterhalb in selbiger Abb. sind die Modellabflüsse der Ausläufe aufgetragen. Dabei ist im Allgemeinen eine deutlich stärkere Belastung des Auslaufs OUT ES zu erkennen, der zum Zeitpunkt der höchsten Niederschlagsintensität mit >3 m<sup>3</sup>/s entlastet.

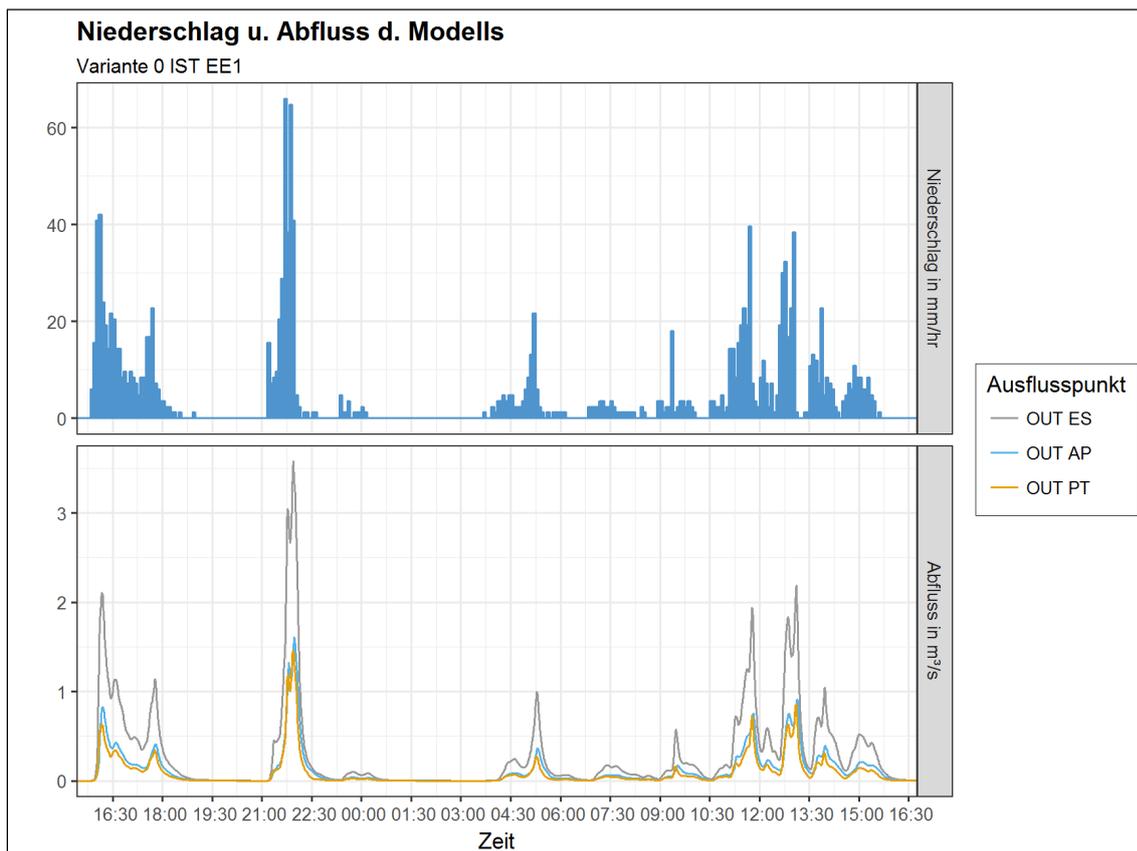


Abbildung 3-4: Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Modells (Variante 0 IST EE<sub>1</sub>)

Das  $EE_1$  wurde, wie bereits in Kapitel 2.4 erwähnt, aus verschiedenen Gründen mit zur Langzeitsimulation abweichenden Zeitschritten simuliert. Für die Referenzvariante (0 IST) zeigt sich beim Vergleich der Ergebnisse der Einzelereignissimulation zur Langzeitsimulation für das EZG ES eine Abweichung im Abflussvolumen von -0,3 % und in der Abflussspitze von 8,9 %. Bei EZG PT bzw. EZG AP sind 0,0 % bzw. 0,3 % Abweichung im Volumen und 3,6 % bzw. 5,2 % Abweichung in der Spitze zu erkennen.

In der Gegenüberstellung der Abflussgraphen mehrerer Varianten sollen die Wirkungsweise der durchgeführten Maßnahmen anschaulich dargestellt werden. Dabei ist der auftretende Abfluss auf der Ordinate und der zeitliche Verlauf auf der Abszisse aufgetragen. Hierbei ist noch anzumerken, dass die Skalen der untereinander aufgetragenen Ausläufe aus Gründen der Darstellung unterschiedlich gewählt wurden.

In Abbildung 3-5 ist der Vergleich der Gebietsabflüsse der Varianten 1 und 2 (PPS) zu der Referenzvariante  $V_0$  ersichtlich. Besonders bei OUT ES kann eine gute Wirkung der Maßnahmen beobachtet werden. Für OUT PT und AP zeigen sich etwas geringere Reduktionen der Spitzenabflüsse. Die in Abbildung 3-6 dargestellten Abflussgraphen zeigen den Einfluss der in das Modell implementierten Gründachanlagen beim Niederschlagsereignis  $EE_1$ . Dabei lässt sich im Allgemeinen nur eine äußerst geringe Verbesserung der Abflusssituation im Vergleich zur  $V_0$  feststellen. Für Auslauf OUT PT zeigen sich beinahe idente Abflussgraphen, für OUT ES und OUT AP lassen sich etwas größere Reduktionen erkennen. Abbildung 3-7 zeigt die Wirkung der Maßnahmenkombinationen der Varianten 5 und 6. Die positiven Effekte auf das Abflussverhalten der EZG anhand großflächige Muldenimplementierung sind in Abbildung 3-8 gut zu erkennen. Besonders bei  $V_8$  können deutliche Abflussreduktionen bei den Ausläufen OUT ES und AP festgestellt werden.

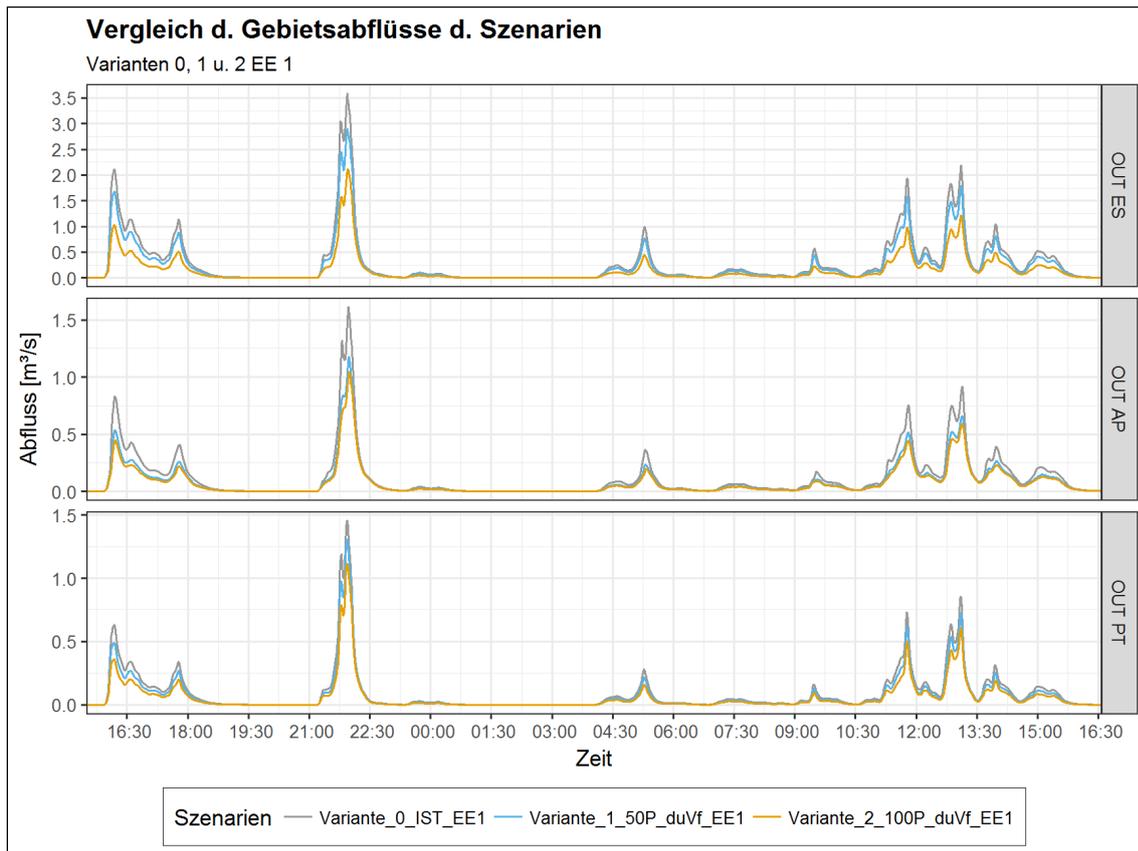


Abbildung 3-5: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 1 und 2 EE<sub>1</sub>

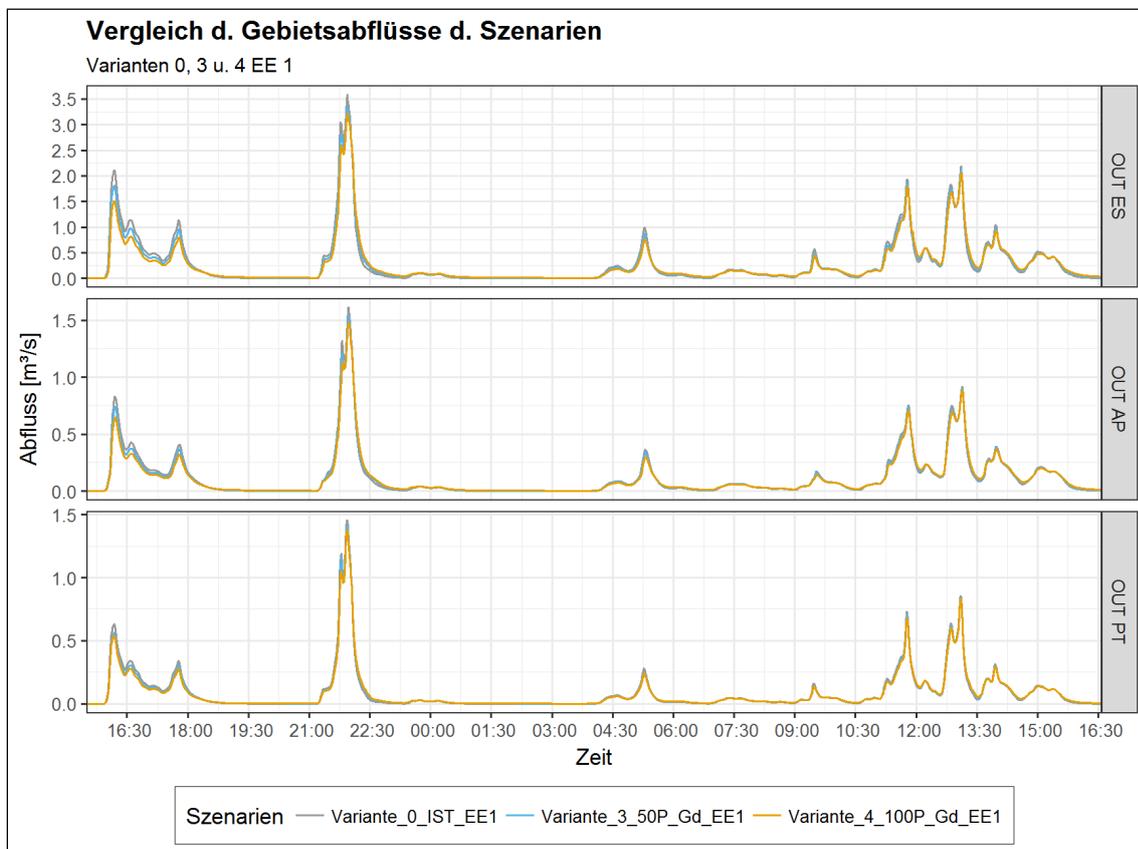


Abbildung 3-6: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 3 u. 4 EE<sub>1</sub>

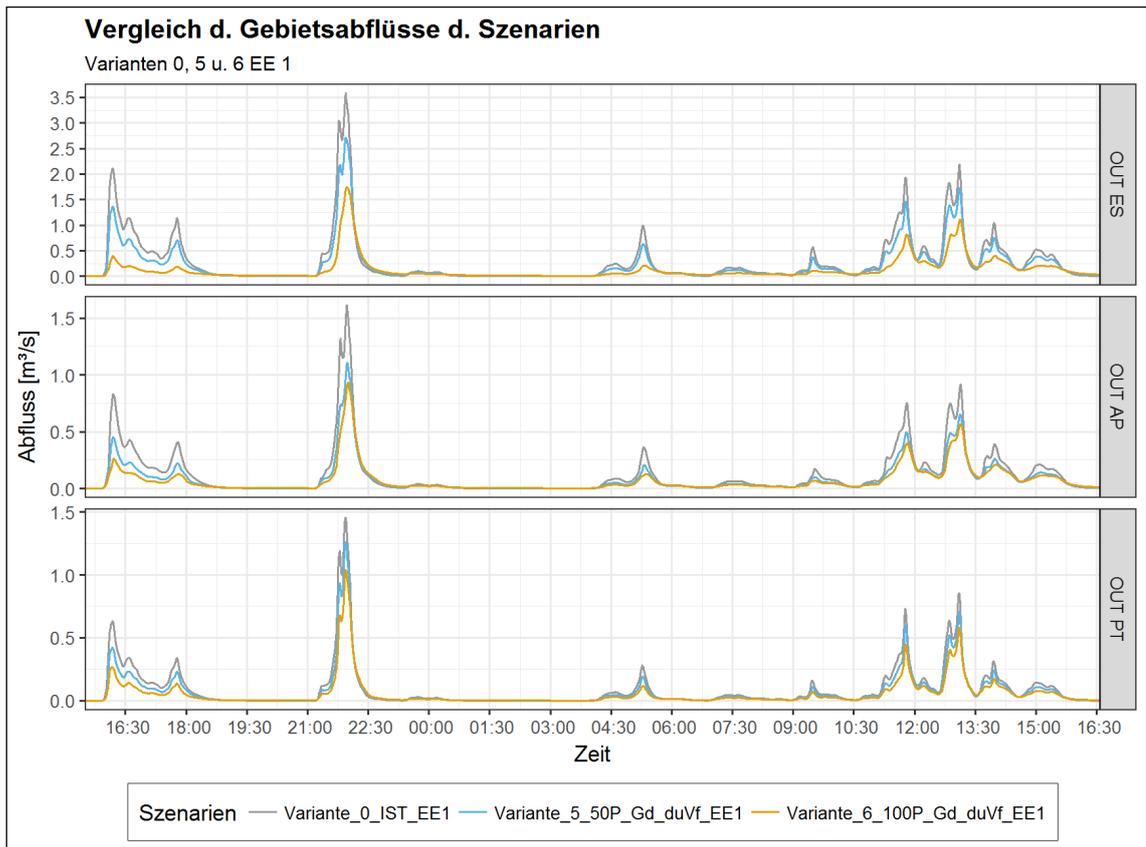


Abbildung 3-7: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 5 und 6 EE<sub>1</sub>

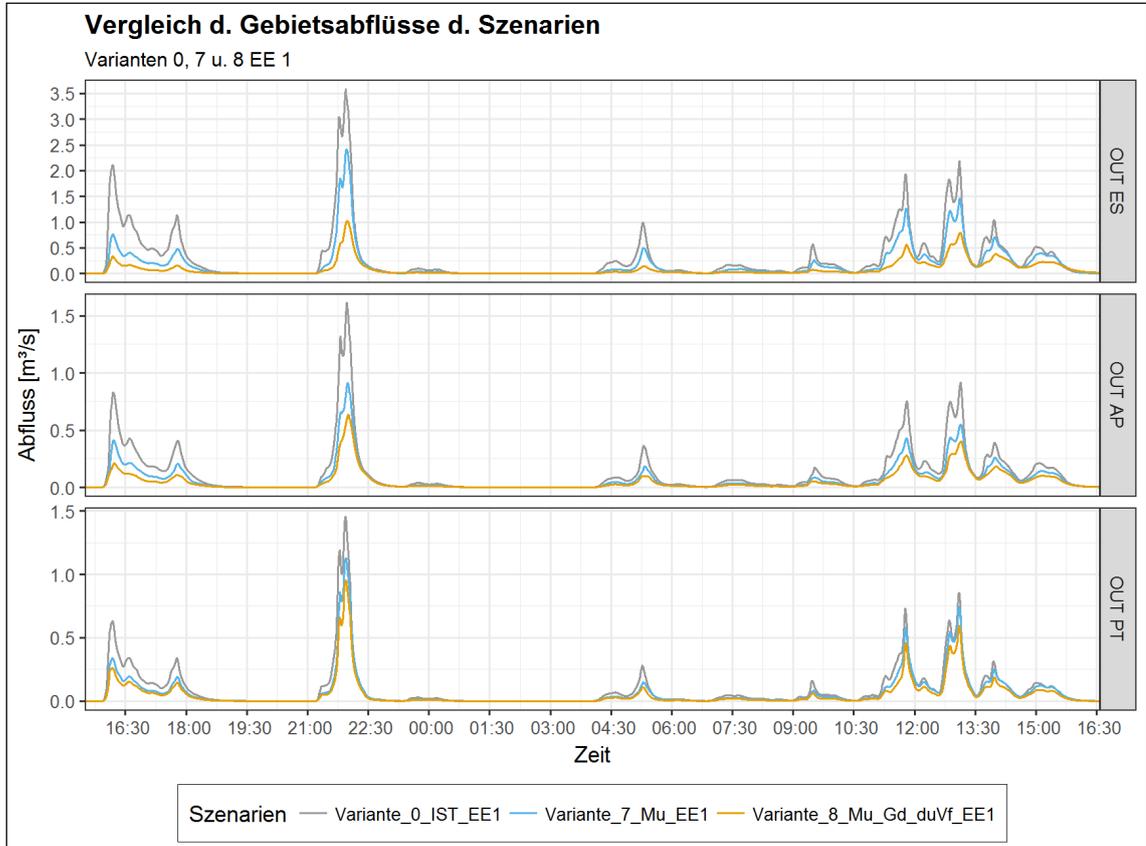


Abbildung 3-8: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 7 und 8 EE<sub>1</sub>

Um die ermittelten Ergebnisse des EE<sub>1</sub> möglichst anschaulich darstellen zu können, finden unterschiedliche Diagramme sowie eine abschließende Ergebnisaufstellung in tabellarischer Form Anwendung. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt ähnlich der Langzeitniederschlagserie wie bereits in Kapitel 3.2 ausführlich beschrieben.

Die in Abbildung 3-9 dargestellten Auswertungsergebnisse hinsichtlich der Reduktion von Abflussvolumen bei EE<sub>1</sub>. Die ermittelten Reduktionen der Abflussspitzen bei EE<sub>1</sub> können Abbildung 3-10 entnommen werden. Dabei zeigen sich bei V<sub>8</sub> bereits ähnlich große Werte bei OUT ES und PT.

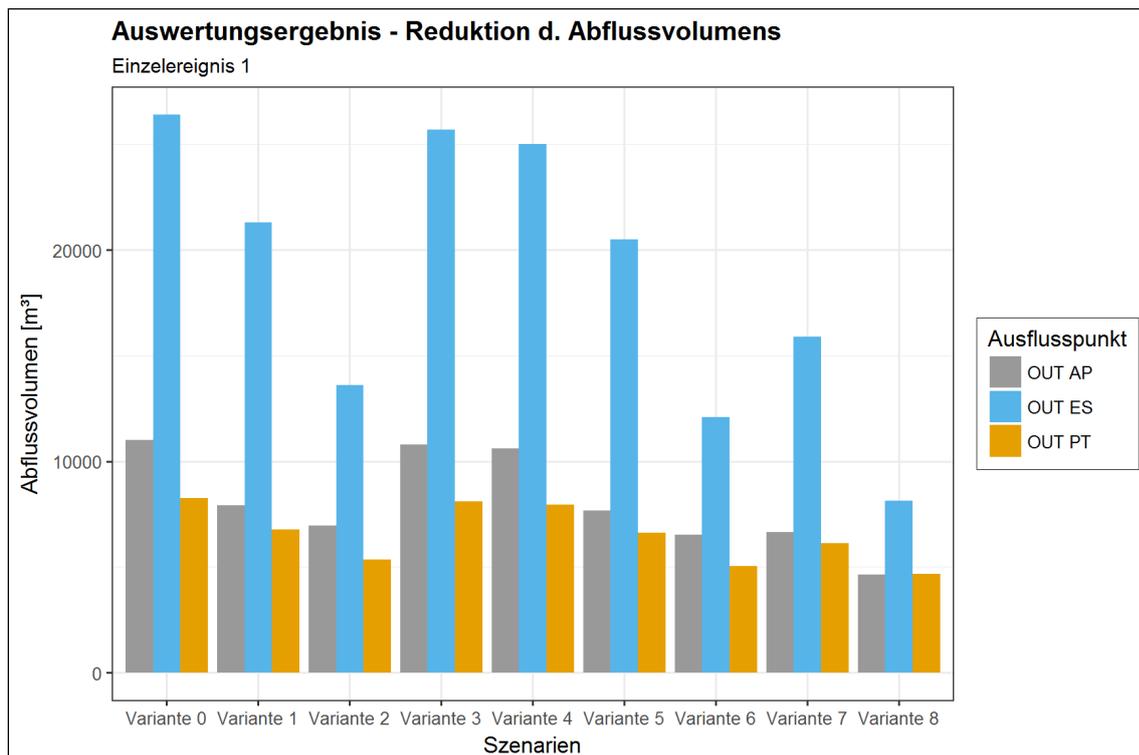


Abbildung 3-9: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Abflussvolumens im GPG bei Einzelereignis 1

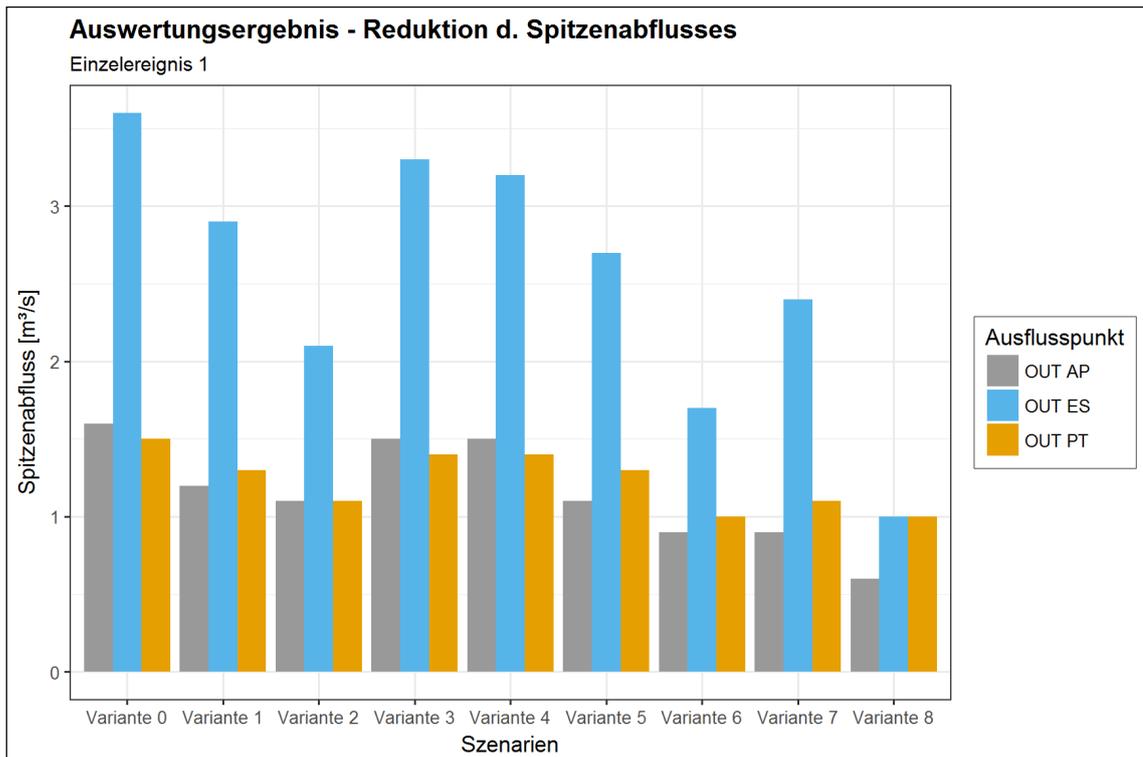


Abbildung 3-10: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Spitzenabflusses im GPG bei Einzelereignis 1

Die Ergebnisse der Simulation des EE<sub>1</sub> sind in Tabelle 3-4 dargestellt. Dabei sind die verschiedenen Szenarien sowie deren ermittelte Abflussvolumina und Spitzenabflüsse den Zeilen, die Ausläufe und deren zugehörige Effektivitätsparameter den Spalten zugeordnet. Die Ergebnisse der Simulation zeigen kurz zusammengefasst für das Referenzszenario 0 IST EE<sub>1</sub> bei OUT ES, OUT PT und OUT AP ein Abflussvolumen von 26 400 m<sup>3</sup>, 8 260 m<sup>3</sup> respektive 11 000 m<sup>3</sup> und somit ein Gesamtabflussvolumen des EZG von 45 660 m<sup>3</sup>. Dabei werden Spitzenabflüsse von 3,6; 1,5 bzw. 1,6 m<sup>3</sup>/s sowie 6,5 m<sup>3</sup>/s für das gesamte EZG erreicht.

Um die ermittelten Effektivitätsparameter der Einzugsgebiete und Maßnahmenkombinationen untereinander vergleichen zu können, wird in der weiteren Analyse vor allem auf  $R_F$  zurückgegriffen (vgl. Kapitel 2.5).  $R_F$  zeigt für EE<sub>1</sub> folgendes Bild:

Über alle Szenarien und Einzugsgebiete hinweg zeigen sich für V<sub>3</sub> und V<sub>4</sub> die deutlich geringsten Reduktionen. Für das Einzugsgebiet ES können durch V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub>, V<sub>8</sub> gute Ergebnisse erreicht werden, für V<sub>3</sub> und V<sub>4</sub> zeigt sich eine geringe Reduktion. Ähnlich OUT ES zeigt auch OUT PT eine geringe Effektivität der Variante 3 und 4 während V<sub>7</sub> und V<sub>8</sub> deutlich höhere Werte zeigen. Bei OUT AP zeigen sich bis auf V<sub>7</sub> etwas bessere Ergebnisse als bei OUT ES und PT. V<sub>3</sub> und V<sub>4</sub> weisen auch hier sehr geringe Werte auf. Die insgesamt höchsten Werte ( $R_F$ ) werden mit ~10 bei OUT PT im Zuge der Variante 7 erreicht.

Tabelle 3-4: Ergebnisse der Simulation des Einzelereignis 1 – Abflussvolumen, Spitzenabfluss, Reduktion (R) sowie Reduktionen bezogen auf das Verhältnis von Gesamtfläche des EZG zur angewandten NWB-Maßnahmenflächen (R<sub>F</sub>) der drei Auslaufpunkte (OUT ES, OUT PT, OUT AP sowie des GPG) – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Maßnahmeneffektivität (R bzw. R<sub>F</sub>)

Variante	OUT ES	R [%]	R <sub>F</sub> [-]	OUT PT	R [%]	R <sub>F</sub> [-]	OUT AP	R [%]	R <sub>F</sub> [-]	GPG	R [%]	R <sub>F</sub> [-]
0_IST	33,22 ha			14,18 ha			18,41 ha			65,81 ha		
Volumen [m <sup>3</sup> ]	26400	/	/	8260	/	/	11000	/	/	45660	/	/
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	3,6	/	/	1,5	/	/	1,6	/	/	6,5	/	/
1_50P_duVf	4,46 ha		13,41 %	1,30 ha		9,13 %	2,57 ha		13,96 %	8,32 ha		12,64 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	21300	19,3	1,4	6770	18,0	2,0	7910	28,1	2,0	35980	21,2	1,7
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	2,9	19,3	1,4	1,3	10,2	1,1	1,2	27,1	1,9	5,2	19,4	1,5
2_100P_duVf	11,38 ha		34,26 %	2,24 ha		15,80 %	3,28 ha		17,82 %	16,90 ha		25,68 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	13600	48,5	1,4	5370	35,0	2,2	6960	36,7	2,1	25930	43,2	1,7
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	2,1	41,1	1,2	1,1	22,8	1,4	1,1	35,0	2,0	4,2	36,0	1,4
3_50P_Gd	2,98 ha		8,97 %	0,61 ha		4,30 %	0,86 ha		4,65 %	4,45 ha		6,76 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	25700	2,7	0,3	8100	1,9	0,5	10800	1,8	0,4	44600	2,3	0,3
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	3,3	6,7	0,7	1,4	3,2	0,8	1,5	4,7	1,0	6,2	4,5	0,7
4_100P_Gd	5,73 ha		17,23 %	1,65 ha		11,64 %	1,33 ha		7,22 %	8,71 ha		13,23 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	25000	5,3	0,3	7940	3,9	0,3	10600	3,6	0,5	43540	4,6	0,4
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	3,2	10,4	0,6	1,4	5,4	0,5	1,5	8,0	1,1	6,0	7,9	0,6
5_50P_Gd_duVf	7,44 ha		22,38 %	1,91 ha		13,43 %	3,43 ha		18,61 %	12,77 ha		19,40 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	20500	22,3	1,0	6610	20,0	1,5	7680	30,2	1,6	34790	23,8	1,2
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	2,7	24,4	1,1	1,3	13,5	1,0	1,1	31,4	1,7	5,0	23,2	1,2
6_100P_Gd_duVf	17,11 ha		51,49 %	3,89 ha		27,43 %	4,61 ha		25,04 %	25,61 ha		38,91 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	12100	54,2	1,1	5040	39,0	1,4	6520	40,7	1,6	23660	48,2	1,2
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,7	51,3	1,0	1,0	28,4	1,0	0,9	42,3	1,7	3,6	44,2	1,1
7_Mu	2,03 ha		6,11 %	0,36 ha		2,52 %	0,96 ha		5,21 %	3,35 ha		5,09 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	15900	39,8	6,5	6140	25,7	10,2	6650	39,5	7,6	28690	37,2	7,3
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	2,4	32,6	5,3	1,1	22,4	8,9	0,9	43,5	8,3	4,4	32,3	6,4
8_Mu_Gd_duVf	13,08 ha		39,37 %	1,82 ha		12,82 %	3,00 ha		16,30 %	17,90 ha		27,20 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	8140	69,2	1,8	4690	43,2	3,4	4650	57,7	3,5	17480	61,7	2,3
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,0	71,6	1,8	1,0	34,2	2,7	0,6	60,7	3,7	2,5	61,1	2,2

### 3.3.2 Einzelereignis 25

Das Einzelereignis 25 (vgl. Kapitel 2.3.4) ist für den Zeitraum der vorhandenen Niederschlagsdaten (1996 bis 2006) das Ereignis mit der 25.größten Niederschlagshöhe, bei dem bei einer Dauer von in etwa 2,8 h 31,7 mm an Niederschlag anfallen. Das in Abbildung 3-11 dargestellte Niederschlagsprofil des EE<sub>25</sub> weist die höchste Ereignisintensität mit >40 mm/h um 19:20 Uhr auf. Unterhalb, in selbiger Abb., sind die Modellabflüsse der Ausläufe aufgetragen. Dabei ist im Allgemeinen eine deutlich stärkere Belastung des Auslaufs OUT ES zu erkennen (Variante 0), der zum Zeitpunkt der höchsten Niederschlagsintensität mit >2,0 m<sup>3</sup>/s entlastet.

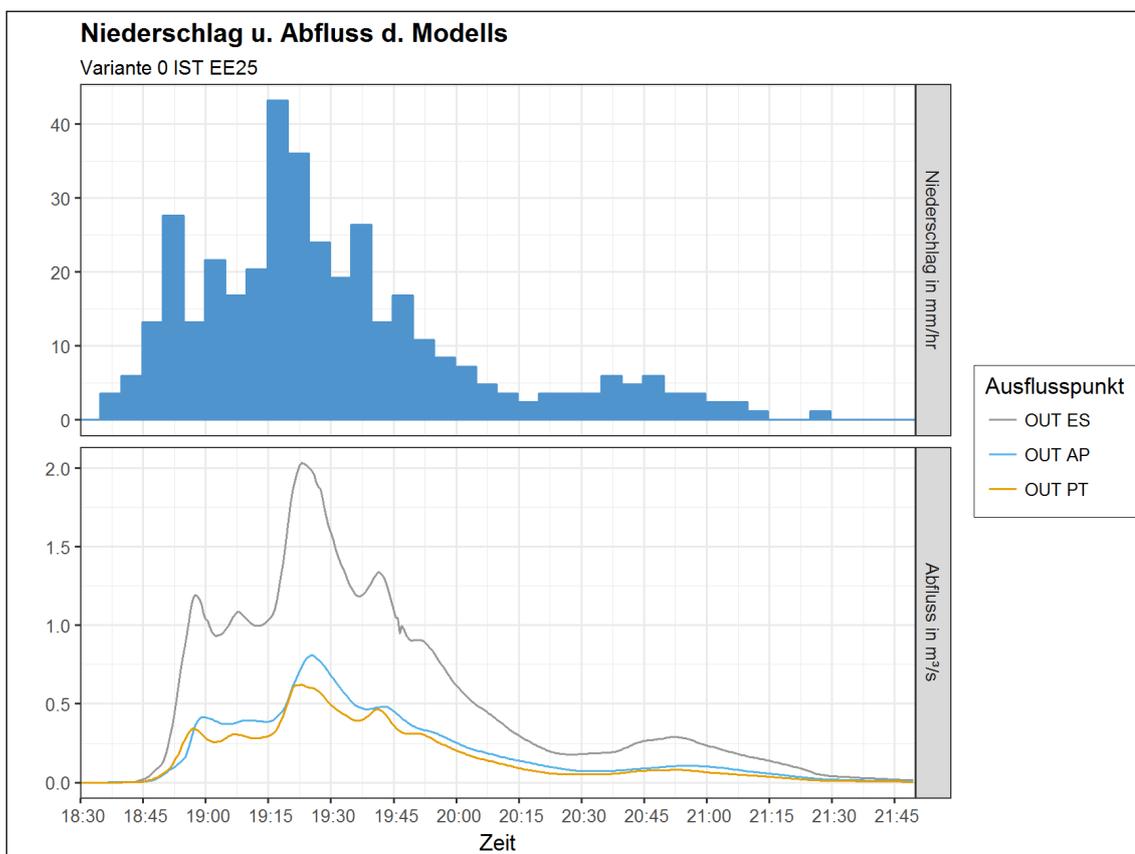


Abbildung 3-11: Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Modells (Variante 0 IST EE<sub>25</sub>)

Das EE<sub>25</sub> wurde, wie bereits in Kapitel 2.4 erwähnt, aus verschiedenen Gründen mit zur Langzeitsimulation abweichenden Zeitschritten simuliert. Für die Referenzvariante (0 IST) zeigt sich beim Vergleich der Ergebnisse der Einzelereignissimulation zur Langzeitsimulation für das EZG ES eine Abweichung im Abflussvolumen von 0,5 % und in der Abflussspitze von 2,0 %. Bei EZG PT bzw. EZG AP sind 0,3 % bzw. 0,5 % Abweichung im Volumen und 3,1 % bzw. 0,4 % Abweichung in der Spitze zu erkennen.

In der folgenden Gegenüberstellung der Abflussgraphen mehrerer Szenarien sollen die Wirkungsweise der durchgeführten Maßnahmen anschaulich dargestellt werden. Dabei ist der auftretende Abfluss auf der Ordinate und der zeitliche Verlauf auf der Abszisse aufgetragen. Hierbei ist noch anzumerken, dass die Skalen der untereinander aufgetragenen Ausläufe aus Gründen der Darstellung unterschiedlich gewählt wurden. Die Beschreibung erfolgt ähnlich des vorangegangenen Einzelereignisses.

Abbildung 3-12 zeigt den Vergleich der Gebietsabflüsse der Varianten 1 und 2 (PPS) zu der Referenzvariante  $V_0$ . Bei OUT ES kann eine etwas bessere Wirkung der Maßnahmen beobachtet werden als bei OUT PT und AP. Der in Abbildung 3-13 dargestellte Einfluss der in das Modell implementierten Gründachanlagen beim Niederschlagsereignis  $EE_{25}$  scheint weitaus geringer als anhand von PPS, wobei bei OUT ES noch die größten Reduktionen erzielt werden können. Abbildung 3-14 zeigt die Wirkung von Maßnahmenkombinationen der Varianten 5 und 6, wobei OUT ES durch  $V_6$  eine starke Dämpfung aufweist. Die positiven Effekte auf das Abflussverhalten der EZG anhand großflächige Muldenimplementierung sind in Abbildung 3-15 gut zu erkennen. Durch die Anwendung von  $V_8$  können deutlichen Abflussreduktionen bei den Ausläufen OUT ES und AP festgestellt werden.

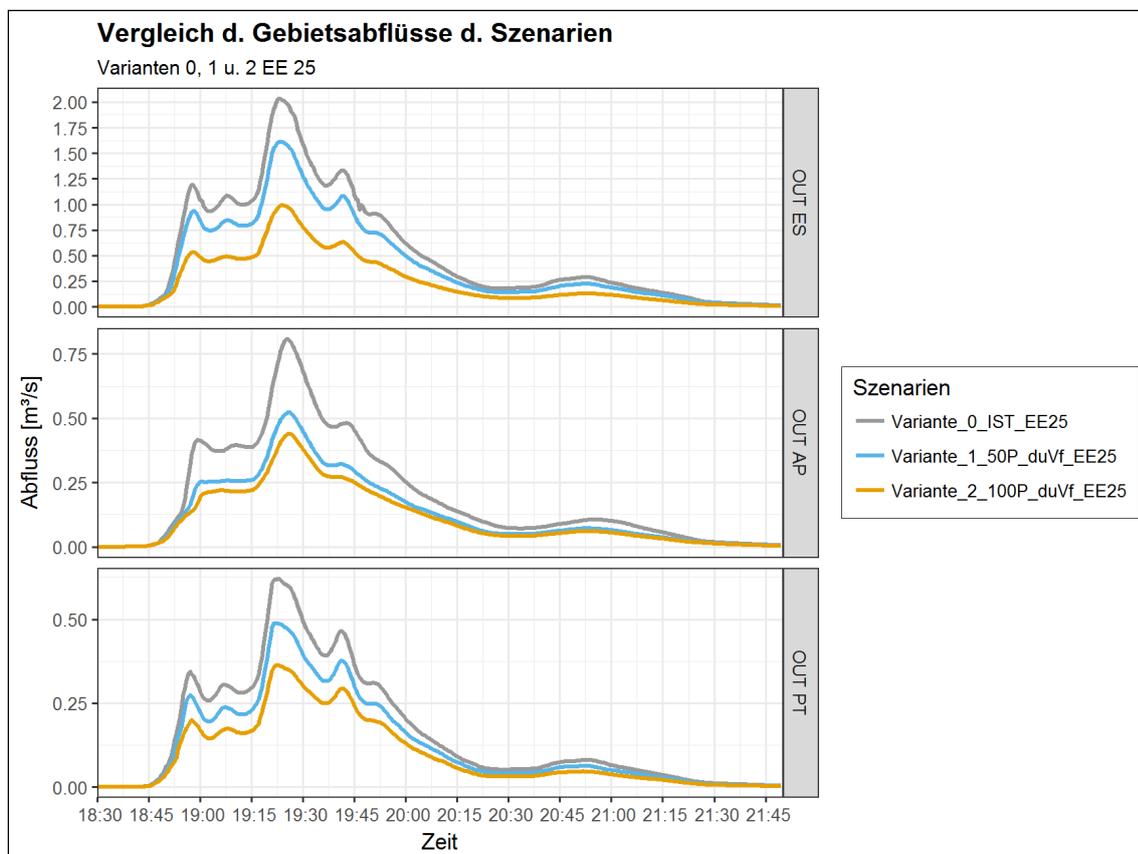


Abbildung 3-12: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 1 und 2  $EE_{25}$

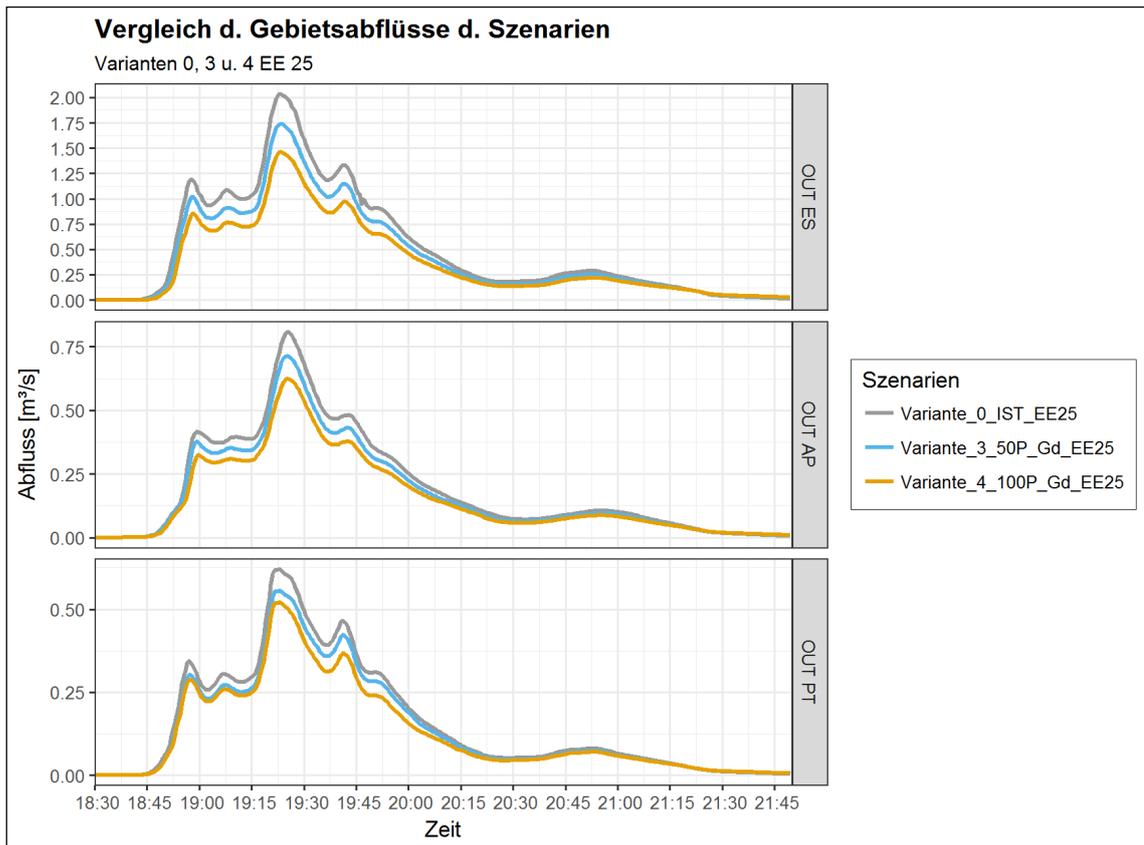


Abbildung 3-13: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 3 und 4 EE<sub>25</sub>

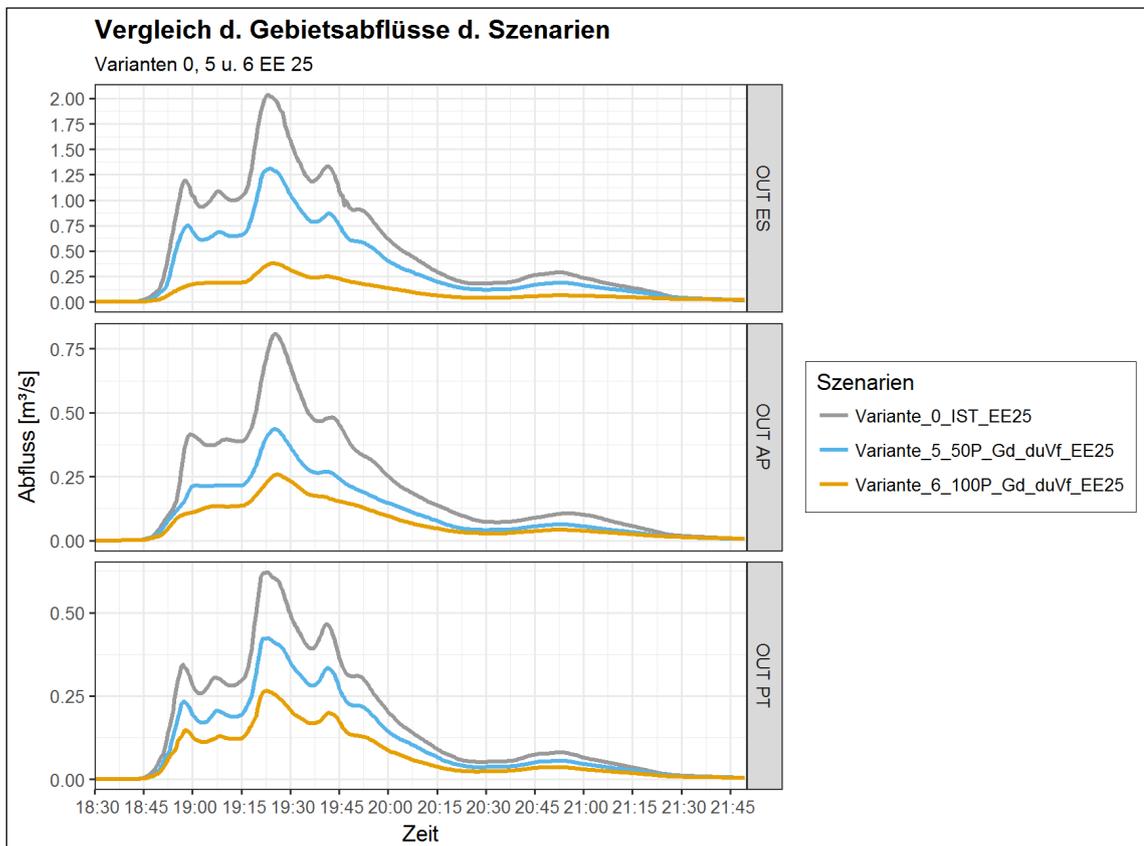


Abbildung 3-14: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 5 und 6 EE<sub>25</sub>

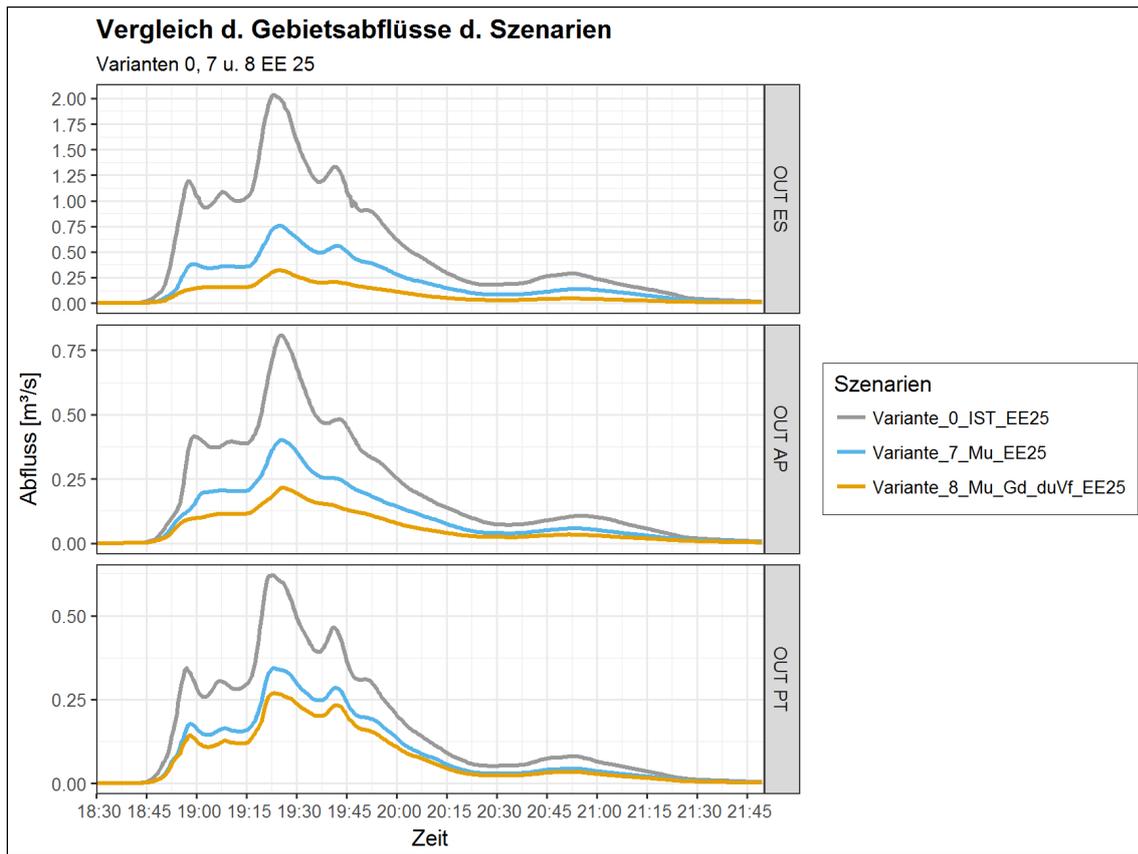


Abbildung 3-15: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 7 und 8 EE<sub>25</sub>

Um die ermittelten Ergebnisse des EE<sub>25</sub> möglichst anschaulich darstellen zu können, finden unterschiedliche Diagramme sowie eine abschließende Ergebnisaufstellung in tabellarischer Form Anwendung. Die Auswertung der Ergebnisse des Einzelereignisses 25 erfolgt ähnlich den vorangegangenen Ergebnis-kapiteln.

Die in Abbildung 3-16 dargestellten Auswertungsergebnisse hinsichtlich der Reduktion von Abflussvolumen bei EE<sub>25</sub>, deuten auf ähnlich gute Ergebnisse der Varianten 6 und 8 sowie V<sub>2</sub> und V<sub>7</sub>. Bei Variante 8 können die stärksten Reduktionen festgestellt werden außerdem zeigen die abgegebenen Volumina der drei Ausläufe bzw. EZG eine ähnliche Größenordnung. Die ermittelten Reduktionen der Abflussspitzen bei EE<sub>25</sub> können Abbildung 3-17 entnommen werden. Die Varianten 6 und 8 zeigen wiederum das größte Potenzial wobei V<sub>8</sub> bereits ähnlich große Werte bei OUT ES und PT aufweist.

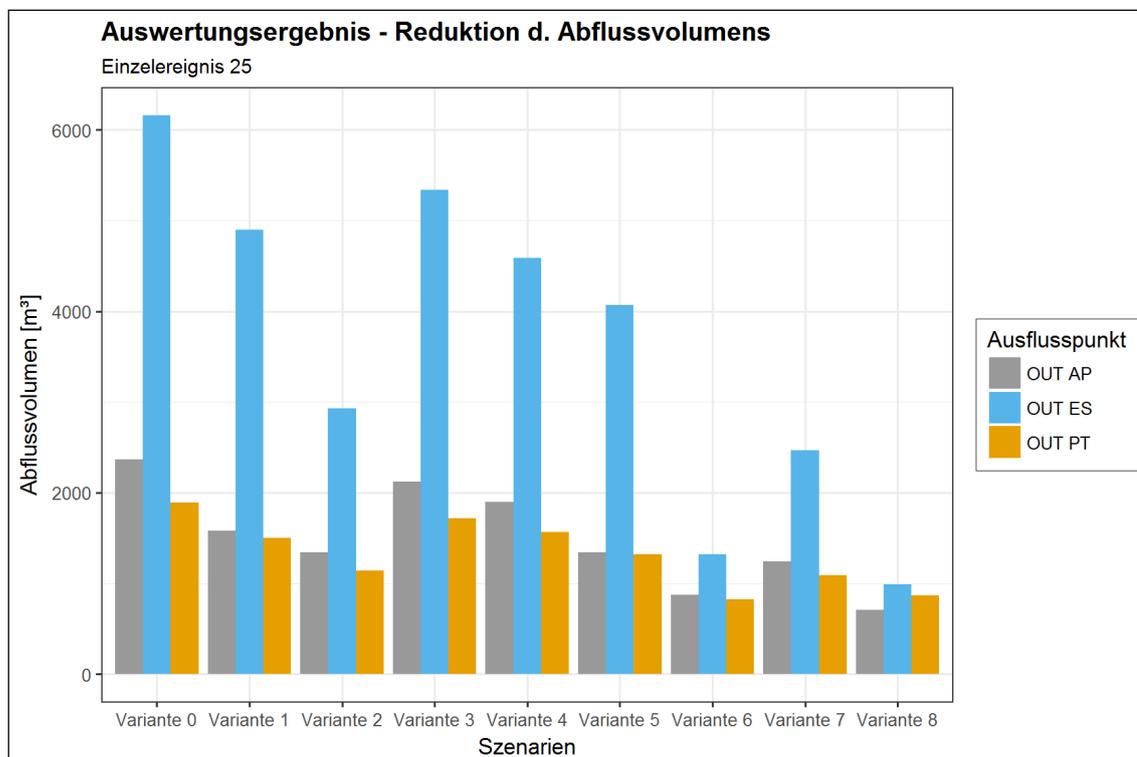


Abbildung 3-16: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Abflussvolumens im GPG bei Einzelereignis 25

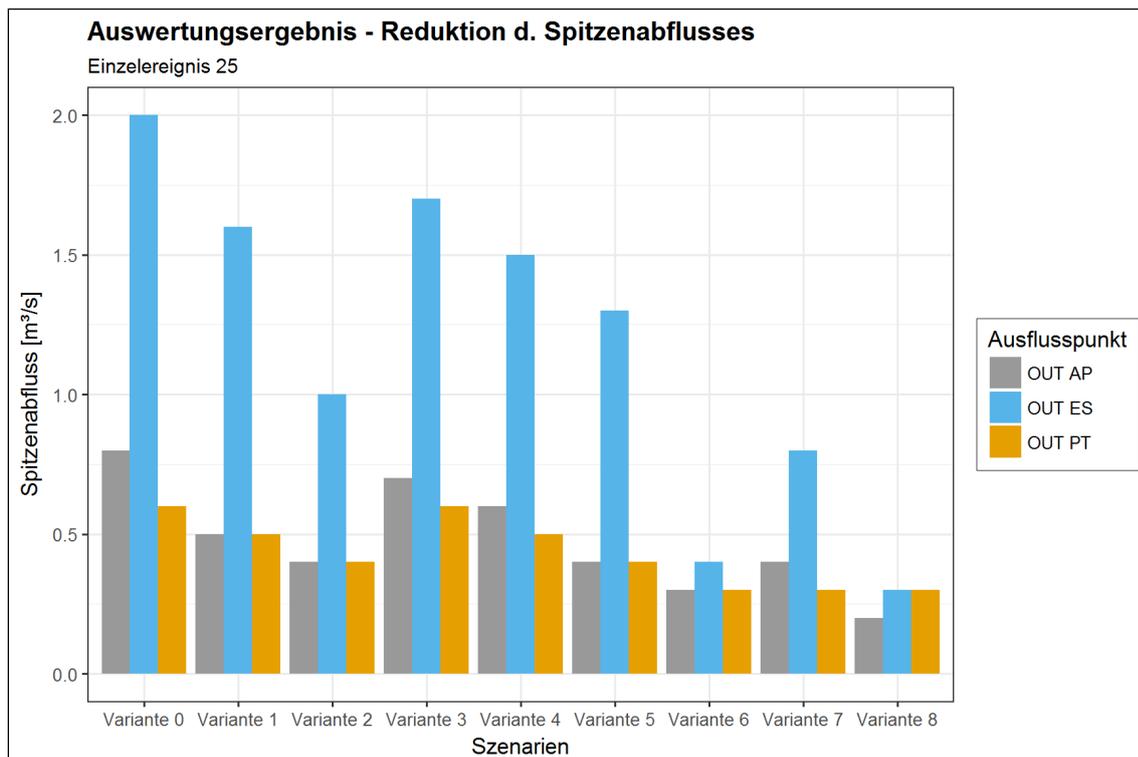


Abbildung 3-17: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Spitzenabflusses im GPG bei Einzelereignis 25

Die Ergebnisse der Simulation des EE<sub>25</sub> sind in Tabelle 3-5 dargestellt. Dabei sind die verschiedenen Szenarien sowie deren ermittelte Abflussvolumina und Spitzenabflüsse den Zeilen, die Ausläufe und deren zugehörige Effektivitätsparameter den Spalten zugeordnet. Die Ergebnisse der Simulation zeigen kurz zusammengefasst für das Referenzszenario 0 IST EE<sub>25</sub> bei OUT ES, OUT PT und OUT AP ein Abflussvolumen von 6 160 m<sup>3</sup>, 1 890 m<sup>3</sup> respektive 2 370 m<sup>3</sup> und somit ein Gesamtabflussvolumen des Projektgebiets von 10 420 m<sup>3</sup>. Dabei werden Spitzenabflüsse von 2,0; 0,6 bzw. 0,8 m<sup>3</sup>/s sowie 3,4 m<sup>3</sup>/s für das gesamte Projektgebiet erreicht. Um die ermittelten Effektivitätsparameter der Einzugsgebiete und Maßnahmenkombinationen untereinander vergleichen zu können, wird in der weiteren Analyse vor allem auf R<sub>F</sub> zurückgegriffen (vgl. Kapitel 2.5). R<sub>F</sub> zeigt für EE<sub>25</sub> folgendes Bild: Bei OUT ES zeigen sich mit ~1,5 ähnlich niedrige Ergebnisse der Varianten 1 bis 6 und etwas deutlicher Verbesserungen bei V<sub>7</sub> und V<sub>8</sub> mit ~10 respektive ~2,1. Für OUT PT können bei V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub> und V<sub>5</sub> etwas höhere Werte als bei V<sub>3</sub> und V<sub>6</sub> festgehalten werden wobei V<sub>4</sub> deutlich darunterliegt. Die höchsten Effektivitätswerte zeigen sich wiederum bei V<sub>7</sub> und V<sub>8</sub> mit ~17 bzw. ~4. Bei OUT AP zeigen sich durchgehend gute Ergebnisse, bei V<sub>4</sub> sind außerdem im Vergleich zu OUT PT deutlich höherer Wert zu erkennen. Ähnlich den anderen Auslaufpunkten zeigen sich die höchsten Effektivitätswerte bei V<sub>7</sub> und V<sub>8</sub> mit ~9,3 bzw. ~4,4. Die besten Ergebnisse (R<sub>F</sub>) werden somit mit ~17 bei OUT PT im Zuge der Variante 7 erreicht.

Tabelle 3-5: Ergebnisse der Simulation des Einzelereignis 25 – Abflussvolumen, Spitzenabfluss, Reduktion (R) sowie Reduktionen bezogen auf das Verhältnis von Gesamtfläche des EZG zur angewandten NWB-Maßnahmenflächen ( $R_F$ ) der drei Auslaufpunkte (OUT ES, OUT PT, OUT AP sowie des GPG) – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Maßnahmeneffektivität ( $R$  bzw.  $R_F$ )

Variante	OUT ES	R [%]	$R_F$ [-]	OUT PT	R [%]	$R_F$ [-]	OUT AP	R [%]	$R_F$ [-]	GPG	R [%]	$R_F$ [-]
0_IST	33,22 ha			14,18 ha			18,41 ha			65,81 ha		
Volumen [m <sup>3</sup> ]	6160	/	/	1890	/	/	2370	/	/	10420	/	/
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	2,0	/	/	0,6	/	/	0,8	/	/	3,4	/	/
1_50P_duVf	4,46 ha		13,41 %	1,30 ha		9,13 %	2,57 ha		13,96 %	8,32 ha		12,64 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	4900	20,5	1,5	1500	20,6	2,3	1580	33,3	2,4	7980	23,4	1,9
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,6	20,8	1,5	0,5	21,1	2,3	0,5	35,3	2,5	2,6	24,0	1,9
2_100P_duVf	11,38 ha		34,26 %	2,24 ha		15,80 %	3,28 ha		17,82 %	16,90 ha		25,68 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	2930	52,4	1,5	1140	39,7	2,5	1340	43,5	2,4	5410	48,1	1,9
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,0	51,3	1,5	0,4	41,5	2,6	0,4	45,7	2,6	1,8	48,1	1,9
3_50P_Gd	2,98 ha		8,97 %	0,61 ha		4,30 %	0,86 ha		4,65 %	4,45 ha		6,76 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	5340	13,3	1,5	1720	9,0	2,1	2120	10,5	2,3	9180	11,9	1,8
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,7	14,6	1,6	0,6	10,5	2,4	0,7	12,1	2,6	3,0	12,6	1,9
4_100P_Gd	5,73 ha		17,23 %	1,65 ha		11,64 %	1,33 ha		7,22 %	8,71 ha		13,23 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	4590	25,5	1,5	1570	16,9	1,5	1900	19,8	2,7	8060	22,6	1,7
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,5	28,1	1,6	0,5	16,1	1,4	0,6	23,0	3,2	2,6	24,7	1,9
5_50P_Gd_duVf	7,44 ha		22,38 %	1,91 ha		13,43 %	3,43 ha		18,61 %	12,77 ha		19,40 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	4070	33,9	1,5	1320	30,2	2,2	1340	43,5	2,3	6730	35,4	1,8
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,3	35,7	1,6	0,4	31,8	2,4	0,4	46,2	2,5	2,2	37,0	1,9
6_100P_Gd_duVf	17,11 ha		51,49 %	3,89 ha		27,43 %	4,61 ha		25,04 %	25,61 ha		38,91 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1320	78,6	1,5	824	56,4	2,1	871	63,2	2,5	3015	71,1	1,8
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,4	81,4	1,6	0,3	57,4	2,1	0,3	68,0	2,7	0,9	74,0	1,9
7_Mu	2,03 ha		6,11 %	0,36 ha		2,52 %	0,96 ha		5,21 %	3,35 ha		5,09 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	2470	59,9	9,8	1090	42,3	16,8	1240	47,7	9,1	4800	53,9	10,6
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,8	62,7	10,3	0,3	44,5	17,6	0,4	50,2	9,6	1,5	56,1	11,0
8_Mu_Gd_duVf	13,08 ha		39,37 %	1,82 ha		12,82 %	3,00 ha		16,30 %	17,90 ha		27,20 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	989	83,9	2,1	870	54,0	4,2	707	70,2	4,3	2566	75,4	2,8
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,3	84,3	2,1	0,3	56,8	4,4	0,2	73,2	4,5	0,8	76,6	2,8

### 3.3.3 Einzelereignis 31

Das Einzelereignis 31 (vgl. Kapitel 2.3.4) ist für den Zeitraum der vorhandenen Niederschlagsdaten (1996 bis 2006) das Ereignis mit der 31. größten Niederschlagshöhe, bei dem bei einer Dauer von in etwa 25 min 31,1 mm an Niederschlag anfallen. Das in Abbildung 3-18 dargestellte Niederschlagsprofil des EE<sub>31</sub> weist die höchste Ereignisintensität mit >100 mm/h um 00:50 Uhr auf. Unterhalb in selbiger Abb. sind die Modellabflüsse der Ausläufe aufgetragen. Dabei ist im Allgemeinen eine deutlich stärkere Belastung des Auslaufs OUT ES zu erkennen, der zum Zeitpunkt der höchsten Niederschlagsintensität mit > 5 m<sup>3</sup>/s entlastet.

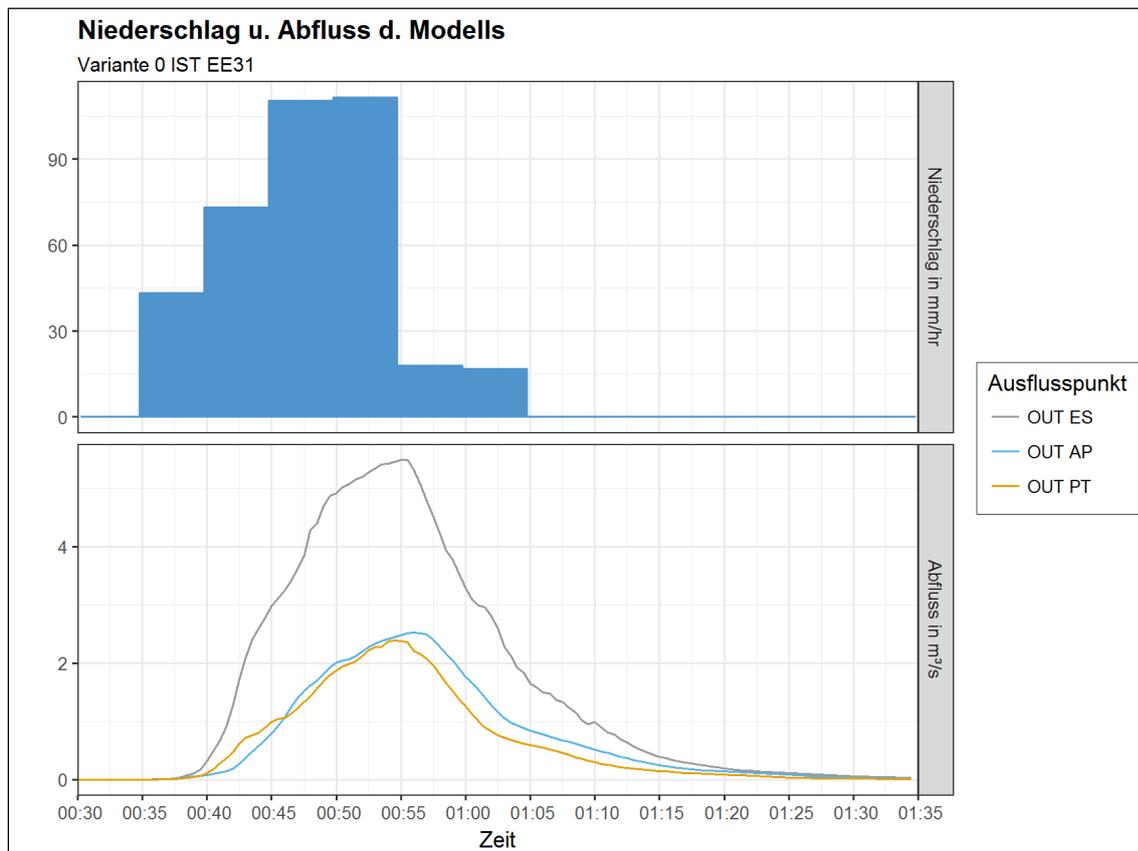


Abbildung 3-18: Niederschlags-Abfluss-Verhalten des Modells (Variante 0 IST EE<sub>31</sub>)

Das EE<sub>31</sub> wurde, wie bereits in Kapitel 2.4 erwähnt, aus verschiedenen Gründen mit zur Langzeitsimulation abweichenden Zeitschritten simuliert. Für die Referenzvariante (0 IST) zeigt sich beim Vergleich der Ergebnisse der Einzelereignissimulation zur Langzeitsimulation für das EZG ES eine Abweichung im Abflussvolumen von 0,0 % und in der Abflussspitze von 0,3 %. Bei EZG PT bzw. EZG AP sind -1,2 % bzw. -0,2 % Abweichung im Volumen und 0,5 % bzw. 1,1 % Abweichung in der Spitze zu erkennen.

In der folgenden Gegenüberstellung der Abflussgraphen mehrerer Szenarien sollen die Wirkungsweise der durchgeführten Maßnahmen anschaulich dargestellt werden. Dabei ist der auftretende Abfluss auf der Ordinate und der zeitliche Verlauf auf der Abszisse aufgetragen. Hierbei ist noch anzumerken, dass die Skalen der untereinander aufgetragenen Ausläufe aus Gründen der Darstellung unterschiedlich gewählt wurden.

In Abbildung 3-19 ist der Vergleich der Gebietsabflüsse der Varianten 1 und 2 (PPS) zur Referenzvariante dargestellt. Besonders bei OUT ES und AP können durch angewandte Maßnahmen starke Abflussreduktionen erreicht werden. Die Wirkung von Gründachanlagen während des EE<sub>31</sub> ist in Abbildung 3-20 dargestellt. Die Reduktion kann durchgehend als relativ gering angesehen werden. Besonders bei OUT PT lassen sich nur sehr geringe Unterschiede zur Referenzvariante erkennen. Maßnahmen in diesen Bereich haben aufgrund einer bereits in V<sub>0</sub> angenommen Abkopplung der Dachflächen vom Entwässerungssystem kaum Einfluss. Der in Abbildung 3-21 dargestellte Vergleich der Varianten 5 und 6 zur V<sub>0</sub> zeigt bei OUT ES die deutlichste Verbesserungen, wobei bei OUT AP ähnliche jedoch etwas geringere Ergebnisse erzielt werden. Bei OUT PT kann ebenfalls eine Verbesserung festgestellt werden, die hingegen deutlich geringer ist. Der Einfluss von Mulden auf die Gebietsabflüsse ist (Varianten 7 und 8) in Abbildung 3-22 ersichtlich. Die vorgenommenen Entsiegelungs- sowie Flächenabkopplungen führen bei OUT ES zu deutlichen Abflussreduktionen. Bei OUT AP kommt es zu Reduktionen in einer ähnlichen Größenordnung. OUT PT weist geringer Reduktionen auf, außerdem kann der Abfluss von V<sub>7</sub> auf V<sub>8</sub> kaum zusätzlich reduziert werden.

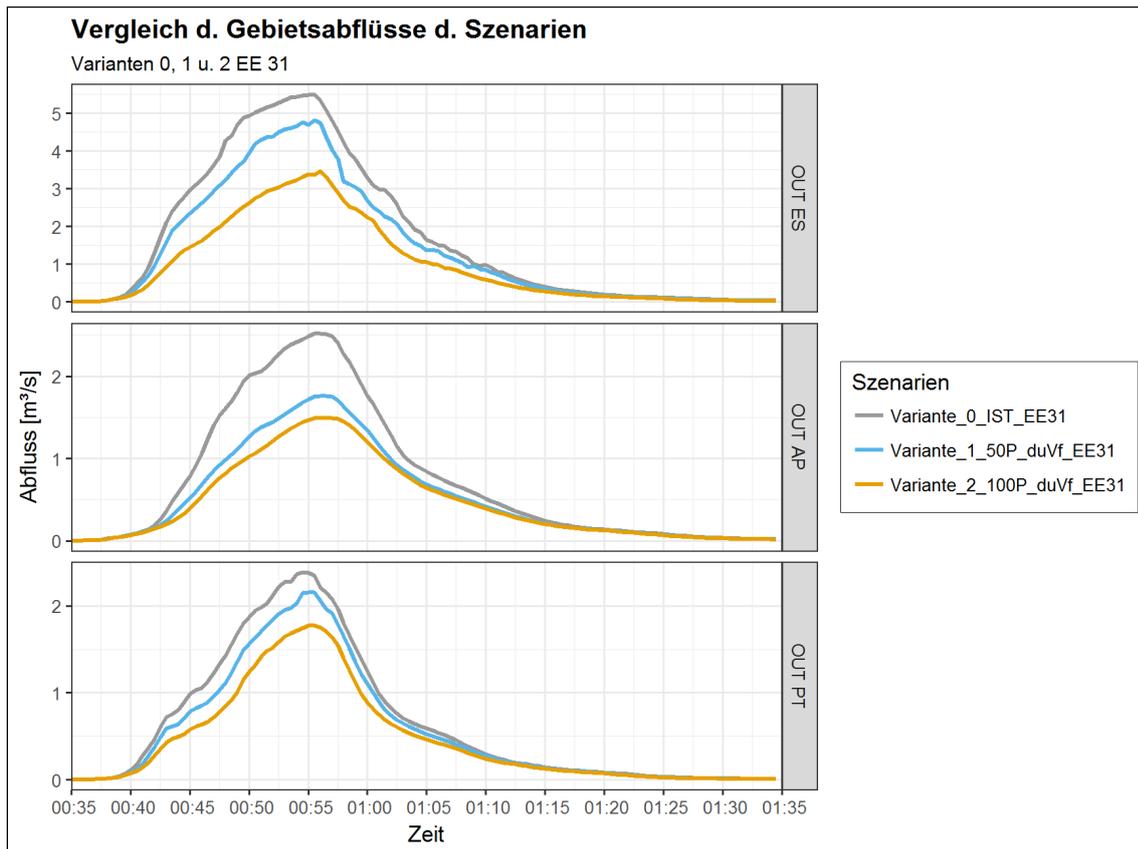


Abbildung 3-19: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 1 und 2 EE<sub>31</sub>

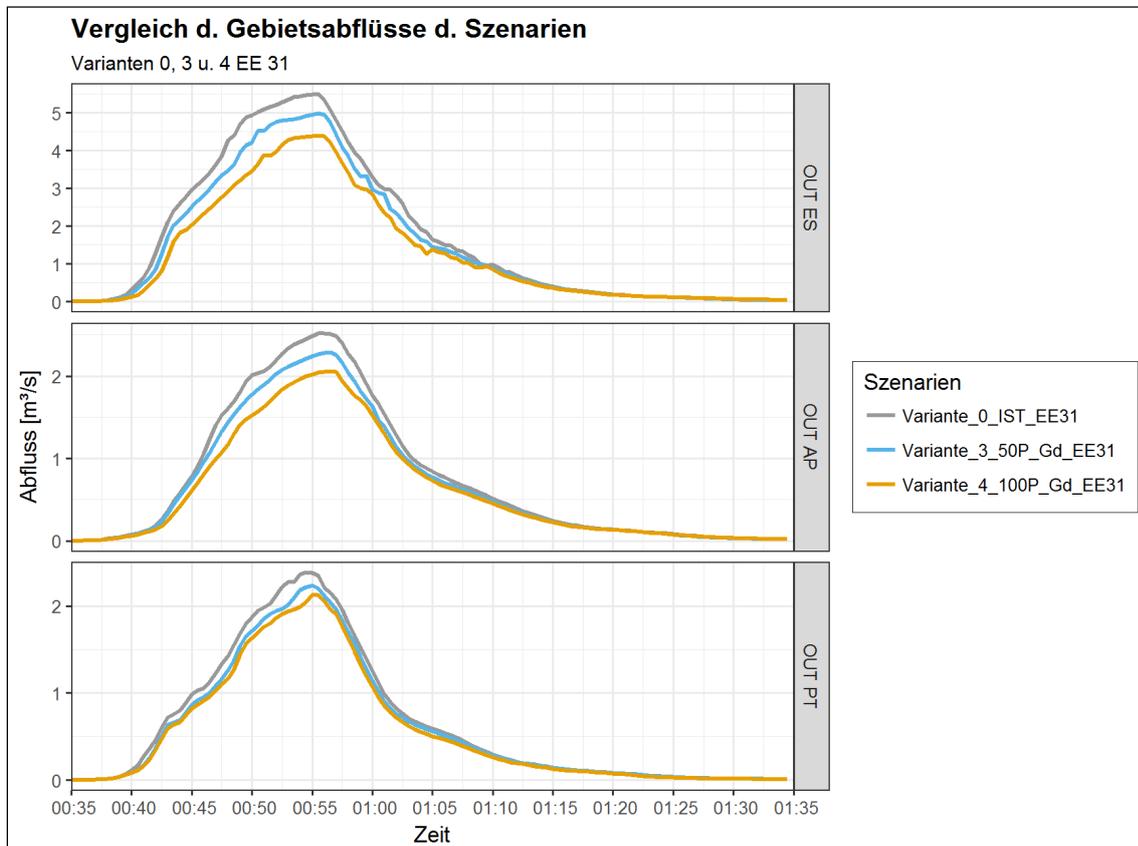


Abbildung 3-20: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 3 und 4 EE<sub>31</sub>

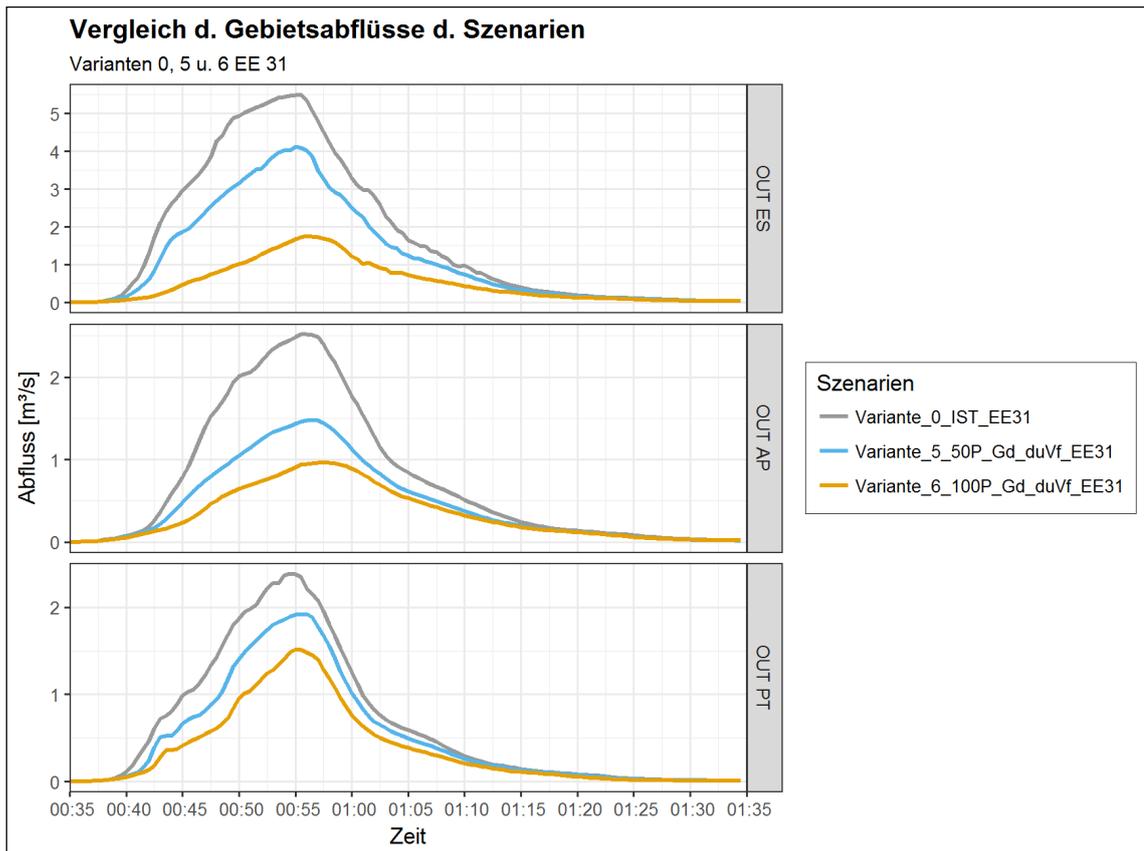


Abbildung 3-21: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 5 und 6 EE<sub>31</sub>

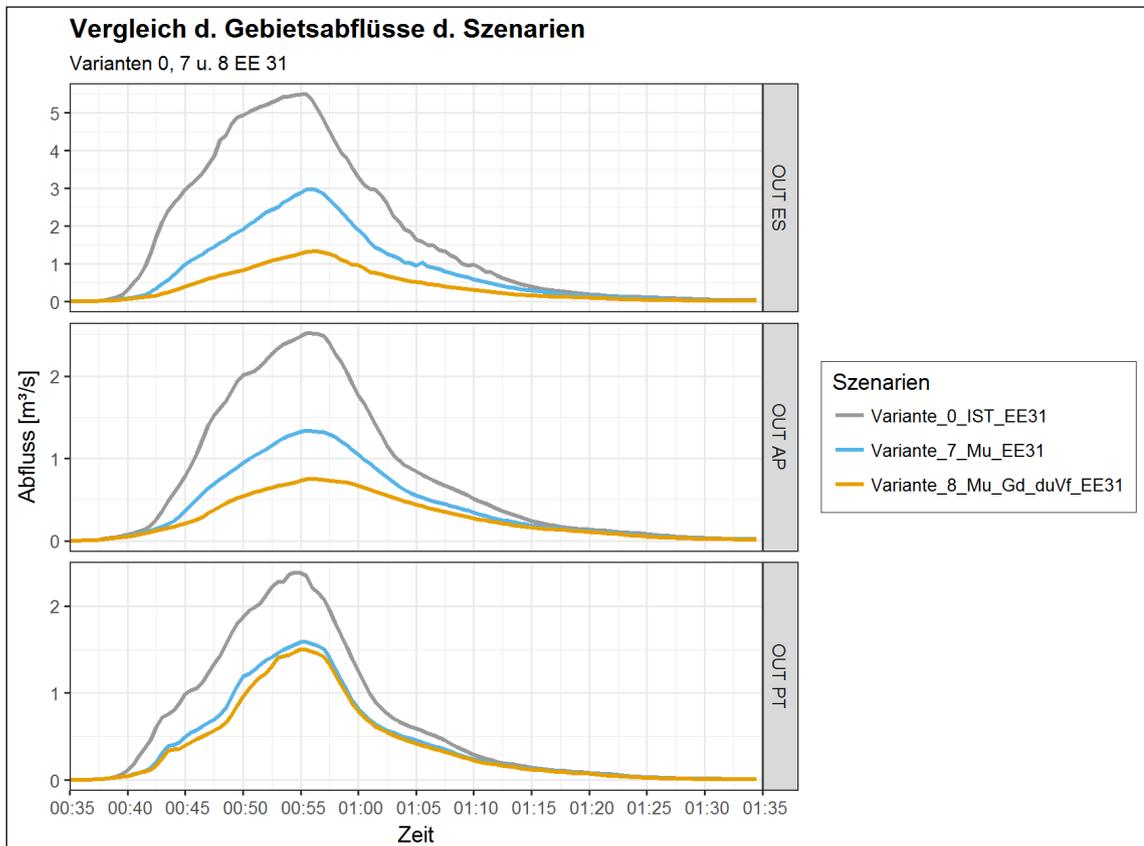


Abbildung 3-22: Abflussganglinien der Ausläufe der Varianten 0, 7 und 8 EE<sub>31</sub>

Um die ermittelten Ergebnisse des EE<sub>31</sub> möglichst anschaulich darstellen zu können, finden unterschiedliche Diagramme sowie eine abschließende Ergebnisaufstellung in tabellarischer Form Anwendung. Die Auswertung der Ergebnisse des Einzelereignisses 31 erfolgt ähnlich den vorangegangenen Ergebniskapiteln.

Die in Abbildung 3-23 dargestellten Auswertungsergebnisse hinsichtlich der Reduktion von Abflussvolumen bei EE<sub>31</sub> zeigen für die Varianten 6 und 8 ähnliche Ergebnisse, wobei V<sub>8</sub> noch etwas besser scheint. Die ermittelten Reduktionen der Abflussspitzen bei EE<sub>31</sub> können Abbildung 3-24 entnommen werden.

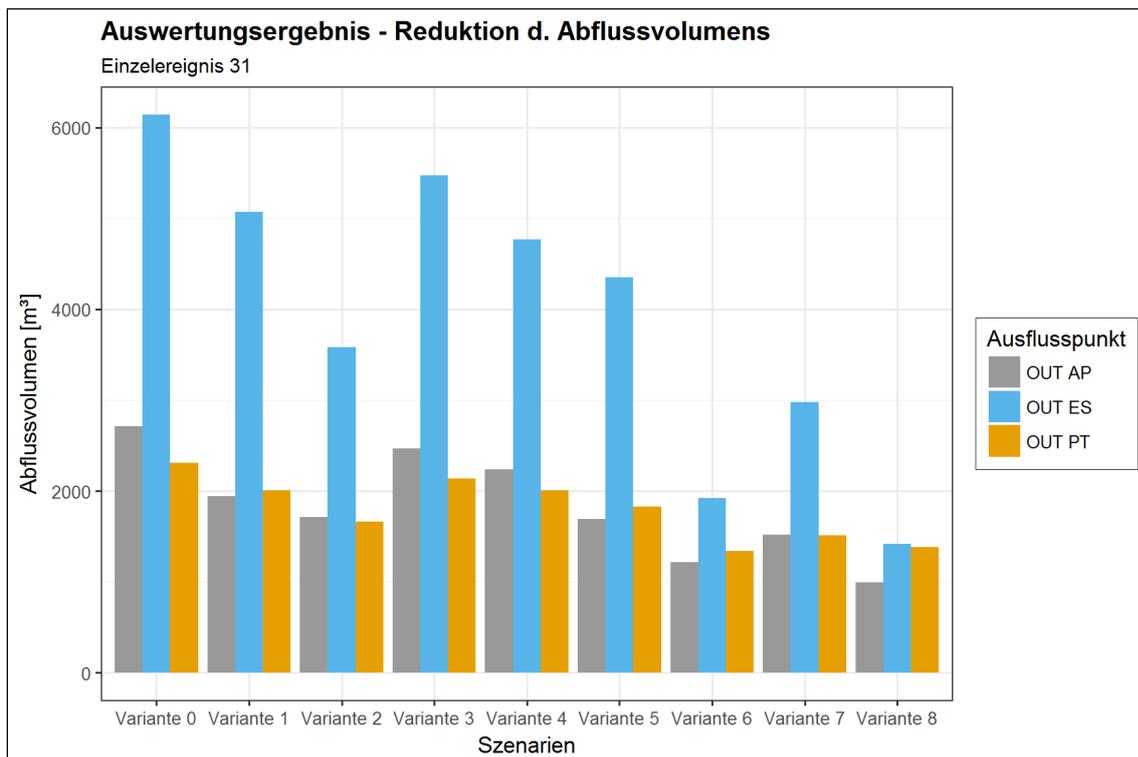


Abbildung 3-23: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Abflussvolumens im GPG bei Einzelereignis 31

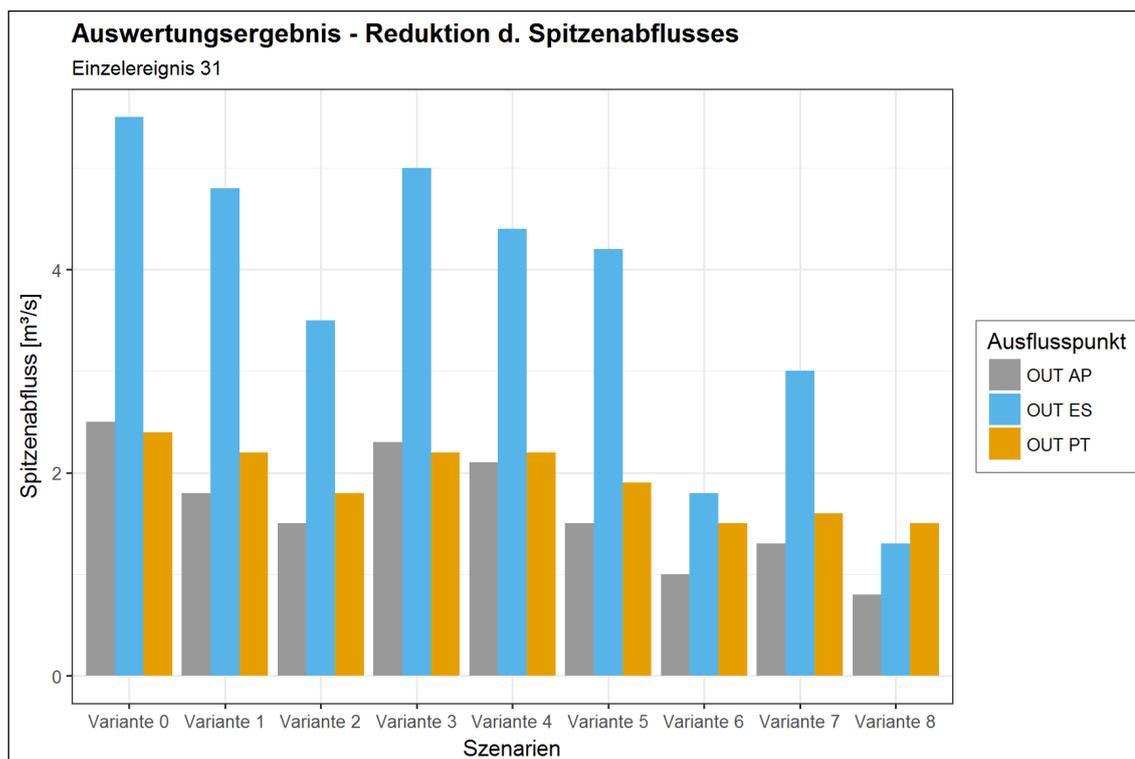


Abbildung 3-24: Ergebnis der Auswertung hinsichtlich Reduktion des Spitzenabflusses im GPG bei Einzelereignis 31

Die Ergebnisse der Simulation des EE 31 sind in Tabelle 3-6 dargestellt. Dabei sind die verschiedenen Szenarien sowie deren ermittelte Abflussvolumina und Spitzenabflüsse den Zeilen, die Ausläufe und deren zugehörige Effektivitätsparameter den Spalten zugeordnet. Die Ergebnisse der Simulation zeigen kurz zusammengefasst für das Referenzszenario 0 IST EE<sub>31</sub> bei OUT ES, OUT PT und OUT AP ein Abflussvolumen von 6 140 m<sup>3</sup>, 2 310 m<sup>3</sup> respektive 2 710 m<sup>3</sup> und somit ein Gesamtabflussvolumen des Projektgebiets von 11 160 m<sup>3</sup>. Dabei werden Spitzenabflüsse von 5,5; 2,4 bzw. 2,5 m<sup>3</sup>/s sowie 10,4 m<sup>3</sup>/s für das gesamte Projektgebiet erreicht. Um die ermittelten Effektivitätsparameter der Einzugsgebiete und Maßnahmenkombinationen untereinander vergleichen zu können, wird in der weiteren Analyse vor allem auf  $R_F$  zurückgegriffen (vgl. Kapitel 2.5).  $R_F$  zeigt für EE<sub>31</sub> folgendes Bild: Bei OUT ES zeigt sich mit 0,9 bis 1,3 ein ähnliches Bild der Ergebnisse der Varianten 1 bis 6 sowie etwas deutlichere Verbesserungen bei V<sub>7</sub> und V<sub>8</sub> mit ~8 bzw. ~2. Für OUT PT zeigt sich im Vergleich zu OUT ES ein etwas differenzierteres Bild der Variantenergebnisse. So sind bei V<sub>2</sub> und V<sub>3</sub> etwas höhere Werte als V<sub>1</sub> bzw. V<sub>4</sub> zu erkennen. Bei V<sub>5</sub> und V<sub>6</sub> hingegen sind ähnliche Werte abzulesen. Die höchsten Effektivitätswerte zeigen sich wiederum bei V<sub>7</sub> und V<sub>8</sub> mit ~13 bzw. ~3. Bei OUT AP zeigen sich bis auf V<sub>7</sub> durchwegs bessere Ergebnisse als bei den anderen Einzugsgebieten. Ähnlich den anderen Auslaufpunkten zeigen sich die höchsten Effektivitätswerte bei V<sub>7</sub> und 8 mit ~8,5 bzw. ~4. Die besten Ergebnisse ( $R_F$ ) können mit ~13,5 bei OUT PT im Zuge der Variante 7 erreicht werden.

Tabelle 3-6: Ergebnisse der Simulation des Einzelereignis 31 – Abflussvolumen, Spitzenabfluss, Reduktion (R) sowie Reduktionen bezogen auf das Verhältnis von Gesamtfläche des EZG zur angewandten NWB-Maßnahmenflächen (R<sub>F</sub>) der drei Auslaufpunkte (OUT ES, OUT PT, OUT AP sowie des GPG) – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Maßnahmeneffektivität (R bzw. R<sub>F</sub>)

Variante	OUT ES	R [%]	R <sub>F</sub> [-]	OUT PT	R [%]	R <sub>F</sub> [-]	OUT AP	R [%]	R <sub>F</sub> [-]	GPG	R [%]	R <sub>F</sub> [-]
0_IST	33,22 ha			14,18 ha			18,41 ha			65,81 ha		
Volumen [m <sup>3</sup> ]	6140	/	/	2310	/	/	2710	/	/	11160	/	/
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	5,5	/	/	2,4	/	/	2,5	/	/	10,4	/	/
1_50P_duVf	4,46 ha		13,41 %	1,30 ha		9,13 %	2,57 ha		13,96 %	8,32 ha		12,64 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	5070	17,4	1,3	2010	13,0	1,4	1940	28,4	2,0	9020	19,2	1,5
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	4,8	12,4	0,9	2,2	8,2	0,9	1,8	30,1	2,2	8,7	16,0	1,3
2_100P_duVf	11,38 ha		34,26 %	2,24 ha		15,80 %	3,28 ha		17,82 %	16,90 ha		25,68 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	3580	41,7	1,2	1660	28,1	1,8	1710	36,9	2,1	6950	37,7	1,5
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	3,5	36,9	1,1	1,8	25,2	1,6	1,5	40,8	2,3	6,7	35,3	1,4
3_50P_Gd	2,98 ha		8,97 %	0,61 ha		4,30 %	0,86 ha		4,65 %	4,45 ha		6,76 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	5470	10,9	1,2	2140	7,4	1,7	2470	8,9	1,9	10080	9,7	1,4
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	5,0	9,2	1,0	2,2	6,1	1,4	2,3	9,2	2,0	9,5	8,8	1,3
4_100P_Gd	5,73 ha		17,23 %	1,65 ha		11,64 %	1,33 ha		7,22 %	8,71 ha		13,23 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	4770	22,3	1,3	2010	13,0	1,1	2240	17,3	2,4	9020	19,2	1,4
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	4,4	19,8	1,1	2,2	10,0	0,9	2,1	18,2	2,5	8,6	17,3	1,3
5_50P_Gd_duVf	7,44 ha		22,38 %	1,91 ha		13,43 %	3,43 ha		18,61 %	12,77 ha		19,40 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	4350	29,2	1,3	1830	20,8	1,5	1690	37,6	2,0	7870	29,5	1,5
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	4,2	23,7	1,1	1,9	19,4	1,4	1,5	41,3	2,2	7,5	27,9	1,4
6_100P_Gd_duVf	17,11 ha		51,49 %	3,89 ha		27,43 %	4,61 ha		25,04 %	25,61 ha		38,91 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1920	68,7	1,3	1340	42,0	1,5	1220	55,0	2,2	4480	59,9	1,5
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,8	68,0	1,3	1,5	36,1	1,3	1,0	61,7	2,5	4,2	59,6	1,5
7_Mu	2,03 ha		6,11 %	0,36 ha		2,52 %	0,96 ha		5,21 %	3,35 ha		5,09 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	2980	51,5	8,4	1510	34,6	13,7	1520	43,9	8,4	6010	46,1	9,1
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	3,0	45,5	7,5	1,6	33,2	13,2	1,3	46,8	9,0	5,9	43,2	8,5
8_Mu_Gd_duVf	13,08 ha		39,37 %	1,82 ha		12,82 %	3,00 ha		16,30 %	17,90 ha		27,20 %
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1420	76,9	2,0	1380	40,3	3,1	993	63,4	3,9	3793	66,0	2,4
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,3	75,7	1,9	1,5	36,7	2,9	0,8	70,1	4,3	3,6	65,6	2,4

### 3.3.4 Ergebniszusammenstellung und Vergleich

Zusätzlich zu den einzelnen Auswertungen der Langzeitsimulation und der Einzelereignisse sollen durch die Zusammenstellung der Ergebnisse in Tabelle 3-7 zusätzlich etwaige Zusammenhänge aufgezeigt werden können. Wie bereits in den eigenständigen Auswertungen der Langzeitniederschlagsserie sowie den Einzelereignissen kommt auch hier primär der Effektivitätsparameter  $R_F$  zur Anwendung.

Da die Einzugsgebiete unterschiedliche Oberflächenparameter bzw. andere hydraulische Randbedingungen aufweisen, sollen im Zug dieser Analyse vor allem dieselben Einzugsgebiete bei unterschiedlichen Niederschlagsereignissen miteinander verglichen werden. Ein direkter Vergleich des Effektivitätsparameters  $R_F$  von z.B. OUT ES und OUT PT ist hauptsächlich aufgrund der großen Unterschiede im Versiegelungsgrad und der Bebauung nicht unbedingt zielführend.

In der Analyse der Ergebniszusammenstellung sind folgende Zusammenhänge zu erkennen:

Für das Einzugsgebiet ES zeigt sich bei den Varianten 1 und 2 das PPS unabhängig des Niederschlagsereignisses ein sehr ähnliches Reduktionsvermögen des anfallenden Volumens. Bei Ereignissen höherer Intensitäten ist hingegen mit einer tendenziell geringeren Reduktion der Abflussspitze zu rechnen. Die Varianten 3 und 4 beinhalten ausschließlich Gründach-Maßnahmen und zeigen für dieses EZG bei großen Niederschlagshöhen kaum VR und nur eine geringe SR. Bei Ereignissen mit geringeren Niederschlagshöhen zeigt sich eine ähnliche Effektivität wie bei PPS.  $V_5$  und  $V_6$  zeigen als Maßnahmenkombination von Gründächern und PPS eine dem Durchschnitt beider Maßnahmen entsprechende Werte auf. Variante 7 kann vor allem in der Langzeitserie überzeugen, bei großen Niederschlagshöhen lassen sich niedrigere Werte beobachten.  $V_8$ , eine Maßnahmenkombinationsvariante, zeigt ähnliche Tendenzen wie  $V_3$ ,  $V_4$  und  $V_7$ . Das EZG PT weist im Vergleich zu EZG ES eine deutlich unterschiedliche Oberflächenstruktur auf und zeigt daher auch ein anderes Bild in der Analyse. PPS-Maßnahmen zeigen dabei tendenziell etwas höhere Effektivität als bei EZG ES. Die Effektivität von Gründach-Maßnahmen ist im Vergleich zu anderen Niederschlagsereignissen noch etwas geringer als dies bei EZG ES der Fall ist. Die Effektivität von Mulden ist besonders bei der Langzeitserie und bei  $EE_{25}$  außerordentlich hoch. Beim EZG AP zeigen sich über alle Niederschlagsereignisse durchwegs gute Ergebnisse der Maßnahmeneffektivität. PPS zeigen bei  $EE_1$  ähnlich gute Ergebnisse wie bei  $EE_{31}$ . Gründächer können bei großen Niederschlagshöhen auch hier kaum bessere Ergebnisse liefern, bei anderen Ereignissen zeigen sich im Vergleich zu anderen EZG jedoch etwas bessere Effektivitätswerte.  $V_7$  kann wiederum besonders bei der Langzeitserie sowie bei  $EE_{25}$  überzeugen. In der Betrachtung des GPG zeigen sich durch den großen Flächenanteil

von EZG ES vermehrt Ähnlichkeiten zu diesem. PPS-Maßnahmen weisen geringere Effektivität bei hohen Niederschlagsintensitäten auf. Bei hohen Niederschlagshöhen können durch Gründächer keine guten Ergebnisse erzielt werden. Variante 7 zeigt sehr gute Effektivität bei der Langzeitserie und beim  $EE_{25}$  und etwas schlechtere Ergebnisse bei  $EE_1$  und  $EE_{31}$ .

Zusätzlich können folgende Zusammenhänge festgehalten werden:

PPS weisen über die untersuchten Niederschlagsereignisse eine recht konstante Effektivität auf, zeigen jedoch bei höheren Intensitäten durchaus Schwächen auf. Da bei dieser Maßnahme keinerlei Retentionsraum vorhanden ist, zeigt ein über die Infiltrationsrate hinausgehender Abfluss ähnliche Eigenschaften wie bei konventioneller Verkehrsflächenstruktur. Aufgrund ihrer Funktionsweise zeigen Gründachanlagen deutlich bessere Ergebnisse bei Niederschlagsereignissen geringerer Intensität bzw. kleineren Niederschlagshöhen. Bei besonders großen Niederschlagshöhen ( $EE_1$ ) zeigt sich eine deutlich schlechtere Wirkung der Maßnahmen, da das System „vollläuft“, d.h. der vorhandene Retentionsraum ist komplett gefüllt. Da es bei dieser Maßnahme zu keinerlei Infiltrationsprozessen kommen kann und Evapotranspirationseffekte zu geringfügig ausfallen, wird Niederschlag, der über die Kapazität der Gründachanlage hinausgeht, direkt abgeschlagen. Beim Anspringen des Notüberlaufs herrscht daher eine ähnliche hydraulische Situation als dies bei versiegelten Dachanlagen der Fall wäre. Speichermulden können angeordnet werden, um zwischen versiegelte Flächen und das Entwässerungssystem geschaltet werden zu können. Durch Anordnung von Mulden kann die direkte Abflusswirksamkeit versiegelter Flächen erheblich eingedämmt werden. Es zeigt sich eine große Maßnahmeneffektivität bezogen auf die benötigte Fläche. Die Verfügbarkeit von ausreichend Freiflächen ist als ein Problem von Muldenanlagen zu erkennen. In Einzugsgebieten mit hoher Oberflächenversiegelung z.B. ES können nicht ausreichend Freiflächen zur Verfügung gestellt werden, um wirksame Abflussreduktionen sicherstellen zu können.

Tabelle 3-7: Zusammenstellung der Auswertungsergebnisse – Reduktionen bezogen auf das Verhältnis von Gesamtfläche des EZG zur angewandten NWB-Maßnahmenflächen ( $R_F$ ) der drei Auslaufpunkte (OUT ES, OUT PT, OUT AP sowie des GPG) – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Maßnahmeneffektivität ( $R_F$ )

Variante	Langzeitserie $R_F$				$EE_1 R_F$				$EE_{25} R_F$				$EE_{31} R_F$			
	OUT ES	OUT PT	OUT AP	GPG	OUT ES	OUT PT	OUT AP	GPG	OUT ES	OUT PT	OUT AP	GPG	OUT ES	OUT PT	OUT AP	GPG
1_50P_duVf																
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1,5	2,3	2,3	1,8	1,4	2,0	2,0	1,7	1,5	2,3	2,4	1,9	1,3	1,4	2,0	1,5
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,9	0,8	2,0	1,2	1,4	1,1	1,9	1,5	1,5	2,3	2,5	1,9	0,9	0,9	2,2	1,3
2_100P_duVf																
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1,5	2,5	2,4	1,8	1,4	2,2	2,1	1,7	1,5	2,5	2,4	1,9	1,2	1,8	2,1	1,5
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,9	1,5	1,9	1,3	1,2	1,4	2,0	1,4	1,5	2,6	2,6	1,9	1,1	1,6	2,3	1,4
3_50P_Gd																
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1,1	1,7	1,6	1,3	0,3	0,5	0,4	0,3	1,5	2,1	2,3	1,8	1,2	1,7	1,9	1,4
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,8	1,5	2,0	1,1	0,7	0,8	1,0	0,7	1,6	2,4	2,6	1,9	1,0	1,4	2,0	1,3
4_100P_Gd																
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1,1	0,9	2,1	1,3	0,3	0,3	0,5	0,4	1,5	1,5	2,7	1,7	1,3	1,1	2,4	1,4
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,1	0,8	2,3	1,2	0,6	0,5	1,1	0,6	1,6	1,4	3,2	1,9	1,1	0,9	2,5	1,3
5_50P_Gd_duVf																
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1,4	2,1	2,1	1,7	1,0	1,5	1,6	1,2	1,5	2,2	2,3	1,8	1,3	1,5	2,0	1,5
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	0,9	1,1	2,0	1,3	1,1	1,0	1,7	1,2	1,6	2,4	2,5	1,9	1,1	1,4	2,2	1,4
6_100P_Gd_duVf																
Volumen [m <sup>3</sup> ]	1,4	1,9	2,3	1,7	1,1	1,4	1,6	1,2	1,5	2,1	2,5	1,8	1,3	1,5	2,2	1,5
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,2	1,3	2,1	1,5	1,0	1,0	1,7	1,1	1,6	2,1	2,7	1,9	1,3	1,3	2,5	1,5
7_Mu																
Volumen [m <sup>3</sup> ]	10,1	17,1	9,1	10,9	6,5	10,2	7,6	7,3	9,8	16,8	9,1	10,6	8,4	13,7	8,4	9,1
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	6,7	12,6	8,2	8,3	5,3	8,9	8,3	6,4	10,3	17,6	9,6	11,0	7,5	13,2	9,0	8,5
8_Mu_Gd_duVf																
Volumen [m <sup>3</sup> ]	2,1	4,3	4,2	2,7	1,8	3,4	3,5	2,3	2,1	4,2	4,3	2,8	2,0	3,1	3,9	2,4
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	1,8	2,7	3,7	2,3	1,8	2,7	3,7	2,2	2,1	4,4	4,5	2,8	1,9	2,9	4,3	2,4

### 3.4 Wirtschaftlichkeit von NWB-Maßnahmen

In diesem Unterkapitel soll, wie bereits einleitend in Kapitel 1.4.4 erwähnt, zusätzlich zu der in Kapitel 3.2 und 3.3 dargelegten Maßnahmeneffektivität ein Wirtschaftlichkeitsparameter eingeführt werden, der die Kosten der verschiedenen NWB-Maßnahmen mit den ermittelten Effektivitätswerten in Verbindung bringt. Die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit soll sich vereinfacht nur auf Kosten der Errichtung beziehen, da die Durchführung einer Kostenvergleichsrechnung oder Lebenszyklusanalyse für den Zweck dieser Masterarbeit zu aufwändig scheint.

Grundlage der Wirtschaftlichkeitsabschätzung, der implementierten NWB-Maßnahmen, sind aus der Literatur gewonnene Werte, wie in Tabelle 3-8 aufgelistet. Dabei ist anzumerken, dass ebenjene Werte durch Anwendung eines Akkumulationsfaktors (AFAKE - Gleichung 3-1) mit einem Zinssatz von 2 % auf Stand 2018 verzinst wurden. Die angeführten Werte in US\$ wurden mittels einem Faktor 0,83 in €-Werte übertragen.

$$\text{AFAKE} = (1 + i)^n$$

Gleichung 3-1

Kostenbarwertmethode (DWA, 2012)

Tabelle 3-8: Errichtungskosten (EK) NWB-Maßnahmen, Betriebskosten (BK) und Nutzungsdauer (ND) nach Gantner (2002), Montalto u. a. (2007) und StadtLABOR Graz (2017)

NWB-Maßnahme	EK/m <sup>2</sup>	MW	EK/m <sup>2</sup> 2018 [€]	BK	ND	Ref.	Ref. Jahr
PPS-Asphalt	67- 85 US\$	76,0	80,0	-	-	Montalto	2006
PPS-Beton	28- 90 US\$	59,0	62,1	1-2 %	-	Montalto	2006
Gründach Neubau	69- 165 US\$	117,0	123,2	10-16 %	-	Montalto	2006
Gründach Umbau	95- 276 US\$	185,0	194,7	6-11 %	-	Montalto	2006
Speichermulden	19-45 €	32,0	43,9	0,25 bis 1,75 €/m <sup>2</sup> a	20 - 80	Gantner	2002
Gründach intensiv	95 €	95,0	130,4	0,50 bis 5,00 €/m <sup>2</sup> a	40	Gantner	2002
Gründach extensiv	12,5- 50 €	31,3	42,9	0,50 bis 5,00 €/m <sup>2</sup> a	40	Gantner	2002
Gründach intensiv	50 bis ... €	-	-	4 bis ... €/m <sup>2</sup>	-	StadtLabor Graz	2017
Gründach biodivers	15 bis ... €	-	-	1 bis ... €/m <sup>2</sup>	-	StadtLabor Graz	2017
Gründach extensiv	15-25 €	-	-	1 bis 2 €/m <sup>2</sup>	-	StadtLabor Graz	2017

In Tabelle 3-8 sind mehrere NWB-Maßnahmen mitsamt zugehörigen Wirtschaftlichkeitsparameter aufgelistet, wobei nicht alle in der durchgeführten Analyse verwendet werden. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird davon ausgegangen, dass Asphalt-PPS mit Errichtungskosten von 80 €/m<sup>2</sup> zur Anwendung kommt.

Die offensichtlich deutlich günstigere Ausführung in Beton wird nicht in Betracht gezogen, da im Projektgebiet hauptsächlich asphaltierte Verkehrsflächen vorhanden sind (Tabelle 3-1). Als Errichtungskosten für extensive Dachbegrünung sollen Kosten von 42,9 €/m<sup>2</sup> angenommen werden. Nach Montalto u. a. (2007) können auch deutlich höhere Kosten ins besonders bei Dachumbau oder nach Gantner (2002) bei intensiver Begrünung anfallen. Für die Errichtung der ange-dachten Muldenanlagen wird mit Kosten von 43,9 €/m<sup>2</sup> gerechnet.

Die Ergebnisse der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind in Tabelle 3-9 ersichtlich. Für die Umsetzung der verschiedenen Planungsszenarien muss demnach mit Errichtungskosten von 1,47 bis 17,2 Mio. € gerechnet werden.

Die Speichermuldenvariante V<sub>7</sub> weist neben den besten Effektivitätswerten (Tabelle 3-7) auch die deutlich besten Wirtschaftlichkeitswerte auf. Zur Reduktion von einem Prozent Abflussvolumen bzw. Abflussspitze muss bei Anwendung von Speichermulden somit auf das gesamte Projektgebiet mit ~30.000 € gerechnet werden. Für die Errichtung von Gründachanlagen sind demnach ~200.000 € pro Prozent Volumen bzw. Spitzenreduktion zu veranschlagen wobei mit höheren Kosten gerechnet werden muss, falls auch Ereignisse mit hoher Niederschlags-höhe besser zwischengespeichert werden sollen. Die Errichtungskosten von PPS sind mit ~300.000 € pro Prozent Volumen bzw. Spitzenreduktion deutlich höher als bei den anderen NWB-Maßnahmen.

Eine Maßnahmenkombination wie z.B. Variante 8 liefert neben guten Effektivitätswerten mit ~150.000 bis ~180.000 € pro Prozent Volumen bzw. Spitzenreduktion auch ausgeglichene Wirtschaftlichkeitswerte.

Tabelle 3-9: Analyse der Wirtschaftlichkeit der NWB-Maßnahmen für das Gesamtprojektgebiet (GPG) bei unterschiedlichen Niederschlagsereignissen – Gesamtkosten bzw. Kosten pro Reduktion in € bzw. 10k €/‰ – farblich codiert von Rot zu Grün (weniger gut zu gut) die ermittelte Errichtungskosten pro Prozent Reduktion

Variante	GPG Langzeitserie		GPG EE <sub>1</sub>		GPG EE <sub>25</sub>		GPG EE <sub>31</sub>	
	R [%]	Gesamtkosten [€] bzw. Wirtschaftlichkeit [10k €/‰]	R [%]	Gesamtkosten [€] bzw. Wirtschaftlichkeit [10k €/‰]	R [%]	Gesamtkosten [€] bzw. Wirtschaftlichkeit [10k €/‰]	R [%]	Gesamtkosten [€] bzw. Wirtschaftlichkeit [10k €/‰]
1_50P_duVf		€ 6.656.058		€ 6.656.058		€ 6.656.058		€ 6.656.058
Volumen [m <sup>3</sup> ]	23,0	29,0	21,2	31,4	23,4	28,4	19,2	34,7
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	14,8	45,0	19,4	34,3	24,0	27,8	16,0	41,7
2_100P_duVf		€ 13.520.117		€ 13.520.117		€ 13.520.117		€ 13.520.117
Volumen [m <sup>3</sup> ]	47,2	28,6	43,2	31,3	48,1	28,1	37,7	35,8
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	32,7	41,4	36,0	37,5	48,1	28,1	35,3	38,3
3_50P_Gd		€ 1.907.314		€ 1.907.314		€ 1.907.314		€ 1.907.314
Volumen [m <sup>3</sup> ]	9,0	21,2	2,3	82,2	11,9	16,0	9,7	19,7
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	7,4	25,9	4,5	42,3	12,6	15,1	8,8	21,7
4_100P_Gd		€ 3.734.406		€ 3.734.406		€ 3.734.406		€ 3.734.406
Volumen [m <sup>3</sup> ]	16,8	22,2	4,6	80,4	22,6	16,5	19,2	19,5
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	16,5	22,6	7,9	47,3	24,7	15,1	17,3	21,6
5_50P_Gd_duVf		€ 8.563.372		€ 8.563.372		€ 8.563.372		€ 8.563.372
Volumen [m <sup>3</sup> ]	32,1	26,7	23,8	36,0	35,4	24,2	29,5	29,0
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	24,4	35,1	23,2	36,8	37,0	23,2	27,9	30,7
6_100P_Gd_duVf		€ 17.254.523		€ 17.254.523		€ 17.254.523		€ 17.254.523
Volumen [m <sup>3</sup> ]	64,2	26,9	48,2	35,8	71,1	24,3	59,9	28,8
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	56,5	30,5	44,2	39,0	74,0	23,3	59,6	29,0
7_Mu		€ 1.470.748		€ 1.470.748		€ 1.470.748		€ 1.470.748
Volumen [m <sup>3</sup> ]	55,3	2,7	37,2	4,0	53,9	2,7	46,1	3,2
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	42,4	3,5	32,3	4,6	56,1	2,6	43,2	3,4
8_Mu_Gd_duVf		€ 11.246.516		€ 11.246.516		€ 11.246.516		€ 11.246.516
Volumen [m <sup>3</sup> ]	74,5	15,1	61,7	18,2	75,4	14,9	66,0	17,0
Spitzenabfluss [m <sup>3</sup> /s]	63,3	17,8	61,1	18,4	76,6	14,7	65,6	17,2

### 3.5 Sensitivitätsanalyse

Dieses Unterkapitel soll die Ergebnisse der durchgeführten Analyse der Sensitivität des aufgestellten Modells wiedergeben und gewonnene Erkenntnisse und Zusammenhänge aufzeigen. Der Analyseaufbau ist dabei dem Kapitel 2.4.5 zu entnehmen.

Die ermittelten Differenzen werden auf das Referenzszenario  $V_{0\text{IST}}$  bezogen und sind in Tabelle 3-10 aufgelistet.

Die Auswertung des Sensitivitätsszenarios  $S_1$  zeigt eine Zunahme des Volumenabflusses von 5,0 % für das Einzugsgebiet ES. Bei den EZG PT und AP zeigt sich eine etwas stärkere Zunahme des Abflussvolumens von 8,8 bzw. 8,7 %. Bei Betrachtung über das Gesamtprojektgebiet (GPG) kann somit eine Zunahme von 6,5 % festgestellt werden. Neben dem Abflussvolumen ist auch die Abflussspitze zu betrachten. Dabei zeigt sich für das EZG ES ein erhöhter Spitzenabfluss von 4,6 % und für das EZG PT eine Erhöhung von 1,9 %. Das Gebiet AP reagiert besonders sensitiv auf die durchgeführte Parameteranpassung und zeigt eine Erhöhung um 11,1 %. Mit 5,7 % ist für das GPG ein erhöhter Spitzenabfluss zu erkennen.

$S_2$  hingegen zeigt für das EZG ES eine Reduktion des Abflussvolumens um 5,0 % bei gleichbleibendem Spitzenabfluss. Für das EZG PT kann mit 14,3 % eine große Reduktion des Abflussvolumens festgestellt werden und mit 6,1 % auch eine deutliche Reduktion des Spitzenabflusses im Projektgebiet. Die Auswertung für das EZG AP zeigte eine geringfügige Reduktion des Abflussvolumens, jedoch ist mit 3,1 % auch eine Zunahme des Spitzenabflusses zu erkennen. Für das GPG ist mit etwa 6 % eine starke VR festzuhalten, für den Spitzenabfluss können nur geringe Änderungen festgestellt werden.

Tabelle 3-10: Analyse der Sensitivität der Variante 0 IST-Zustand

Variante	OUT ES	$\Delta$ [%]	OUT PT	$\Delta$ [%]	OUT AP	$\Delta$ [%]	GPG	$\Delta$ [%]
<b>S<sub>0</sub></b>								
<b>V [m<sup>3</sup>]</b>	14*10 <sup>5</sup>	/	4*10 <sup>5</sup>	/	5,4*10 <sup>5</sup>	/	23,5*10 <sup>5</sup>	/
<b>S [m<sup>3</sup>/s]</b>	5,6	/	2,5	/	2,8	/	10,7	/
<b>S<sub>1</sub></b>								
<b>V [m<sup>3</sup>]</b>	14,7*10 <sup>5</sup>	5,0	4,4*10 <sup>5</sup>	8,8	5,9*10 <sup>5</sup>	8,7	25*10 <sup>5</sup>	6,5
<b>S [m<sup>3</sup>/s]</b>	5,8	4,6	2,6	1,9	3,1	11,1	11,4	5,7
<b>S<sub>2</sub></b>								
<b>V [m<sup>3</sup>]</b>	13,3*10 <sup>5</sup>	-5,0	3,5*10 <sup>5</sup>	-14,3	5,4*10 <sup>5</sup>	-0,9	22,1*10 <sup>5</sup>	-5,7
<b>S [m<sup>3</sup>/s]</b>	5,6	0,0	2,4	-6,1	2,9	3,1	10,7	-0,5

Die Auswertung der beiden durchgeführten Sensitivitätsvarianten 1 und 2 zeigt zusammengefasst folgende Ergebnisse:

Bei  $S_1$  lässt sich bei Betrachtung des GPG eine Erhöhung des Abflussvolumens und des Spitzenabflusses von rund 6 % feststellen. Das Einzugsgebiet AP reagiert dabei mit rund 10 % am deutlichsten auf etwaige Anpassungen der Oberflächenparameter. Für  $S_2$  sind im Vergleich zu  $S_1$  tendenziell etwas geringere Änderungen festzustellen. Die Änderung im anfallenden Abflussvolumen ist für das GPG mit in etwa 6 % noch ähnlich zu  $S_1$ . Bei den Spitzenabflüssen zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede. Für das EZG AP können kaum Verbesserungen im Abflussvolumen und sogar Verschlechterungen im Spitzenabfluss festgestellt werden. Die deutlichsten Verbesserungen von Abflussvolumen und Spitzenabfluss in  $S_2$  können für das EZG PT festgehalten werden, bei dem mit 14,3 % eine starke Reduktion des Abflussvolumens zu erkennen ist.

Für das EZG ES können keine allzu starken Änderungen im Abfluss festgestellt werden. Im Vergleich zu den anderen EZG kann es ein gleichmäßiges Ergebnis vorweisen und ist demnach, in Bezug auf Abänderung der Oberflächenparameter, als das EZG mit der geringsten Sensitivität festzuhalten. Für das Einzugsgebiet PT können sowohl in  $S_1$  als auch  $S_2$  starke Abflussänderungen festgestellt werden. Die starken Veränderungen in  $S_2$  können dabei vor allem durch den hohen Grünflächenanteil und deren Parameterverbesserung erklärt werden. Daher muss für dieses EZG auch eine starke Sensitivität der Grünflächenparameter festgehalten werden. Das Einzugsgebiet AP ist als sensitives Einzugsgebiet auszuweisen. Es zeigt bei  $S_1$  deutliche Veränderungen, bei  $S_2$  muss sogar eine leichte Erhöhung des Spitzenabflusses festgestellt werden. Die Erhöhung der Oberflächenrauigkeit und der Muldenspeicher zeigen für das EZG AP, vermutlich wegen der langgezogenen Form und der Abflusszentrierung auf die Alte Poststraße, einen eher nachteiligen Einfluss auf den stattfindenden Abfluss.

### 3.6 Diskussion

In diesem Unterkapitel sollen die Ergebnisse dieser Masterarbeit mit Ergebnissen vergleichbarer Arbeiten verglichen und diskutiert werden. Dabei soll hauptsächlich auf erzielbare Maßnahmeneffektivität hinsichtlich Reduktion der quantitativen Abflussparameter (VR und SR) beurteilt werden. Bei Li u. a. (2017) können die Ergebnisse mehrerer Effektivitätsuntersuchungen von NWB-Einzelmaßnahmen und Maßnahmenkombination ausgelesen werden. Ein großer Teil der interessanten Ergebnisse kann leider nicht in die Diskussion miteinbezogen werden, da sie nur in chinesischer Sprache verfügbar ist.

Eine Kalibrierung des Modells, in der zur Überprüfung der Plausibilität bzw. zur Modellanpassung Simulationsergebnisse und tatsächlich gemessene Abflusswerte gegenübergestellt werden, war aufgrund fehlender Abflussmessdaten leider nicht möglich. Eine Kalibrierung ist im Allgemeinen immer anzustreben, da sich bestimmte Aussagen (z.B. Feststellung von Überstausicherheit oder Berechnung des Weiterleitungswirkungsgrads) nur dadurch wirklich seriös treffen lassen. Außerdem kann über die Messungsauswertung auf den Anschlussgrad an das MW-Entwässerungssystem geschlossen und das Modell anschließend dahingehend modifiziert werden. Zum Erlangen der gewünschten Modellaussagen dieser Masterarbeit (Reduktion der quantitativen Abflussparameter) war eine Kalibrierung jedoch nicht zwingend erforderlich, aufgrund fehlender Datenlage auch nicht möglich, da im Allgemeinen keine Absolut- sondern nur Relativvergleiche der Maßnahmenvarianten angestellt wurden. Demzufolge sind die Ergebnisse, die in dieser Masterarbeit durchgeführten Maßnahmenvariantensimulation, mit einer gewissen Unsicherheit behaftet.

#### 3.6.1 Durchlässige Verkehrsflächen (PPS)

Straßen und Verkehrsflächen bedecken große Teile des urbanen Raumes (Palla & Gnecco, 2015) und sind ein wichtiger Teil der städtischen Infrastruktur. Als Teil der Grauen Infrastruktur werden Straßen oft auf ihre rein bau- und verkehrssicherheitstechnische Funktion reduziert, womit die Versiegelung der Straßenoberfläche in mehreren Punkten als sinnvoll zu erachten ist. Laut Sieker (1996) werden im urbanen Raum allerdings oft weitaus mehr Flächen versiegelt, als notwendig wären. PPS, als Teil der naturnahen NWB, ermöglicht eine durchlässige Oberfläche womit die Flächenversiegelung und Abflussproblematik im urbanen Raum reduziert werden kann.

Guan u. a. (2015a) untersuchten die Effektivität von mehreren NWB-Einzelmaßnahmen und zeigen den Einfluss von Maßnahmenkombinationen auf. Das untersuchte EZG befindet sich im Stadtgebiet von Espoo (südliches Finnland) und hat in der Zeit von 2001 bis 2006 durch vermehrte Bautätigkeit eine Veränderung der EZG-Hydrologie erfahren. Bei einer Gesamtfläche von 12,3 ha weist es dabei vor

Beginn der Bautätigkeit 1,5 %, währenddessen 22,3 % und im Endzustand 38,7 % VG auf. Genauere Angaben zum Projektgebiet und dem Modellaufbau können Guan u. a. (2015b) entnommen werden. In das Modell wurden zur Beurteilung der Maßnahmeneffektivität rund 1,3 ha PPS integriert, womit der VG auf ca. 28 % reduziert werden konnte. Für einen Vergleich der Auswertungsergebnisse zu dieser Masterarbeit wird neben  $V_{2\text{ GPG EE }25}$  (ca. 32 % VG) auch noch die  $V_{1\text{ PT EE }25}$  herangezogen, da dieses einen deutlich geringeren VG bzw. Verkehrsflächenanteil aufweist und daher auch weniger PPS-Maßnahmen angewandt werden müssen. Durch den Einsatz von PPS ließ sich bei Guan u. a. (2015a) eine Reduktion der Abflussspitze von bis zu 34,1 % sowie eine Reduktion des Abflussvolumens um bis zu 34,5 % feststellen. Damit zeigt sich im Vergleich zu  $V_{2\text{ GPG EE }25}$  eine Differenz der VR von rund 13 % (48,1 %) und der SR von rund 13 % (48,1 %). Für  $V_{1\text{ PT EE }25}$  lässt sich eine Abweichung der VR von rund 1 % und der SR von ebenfalls rund 1 % feststellen. Für das GPG zeigen sich somit recht deutliche Abweichungen, beim EZG PT sind jedoch sehr ähnliche Ergebnisse festzustellen. Es ist hier anzumerken, dass das im Zentrum der Auswertung von Guan u. a. (2015a) gestandene Niederschlagsereignis  $E_1$  mit 2,6 mm nur eine sehr geringe Niederschlagshöhe hat. Die untersuchten Ereignisse dieser Masterarbeit weisen alle deutlich größere Niederschlagshöhen auf. Leider sind in der Arbeit nicht auch alle weiteren Ereignisse in der Form von  $E_1$  ausgewertet worden, da besonders die Auswertungsergebnisse von  $E_5$  für eine Gegenüberstellung mit dieser Masterarbeit interessant gewesen wären. Außerdem ist bei den PPS-Parametern mit 1000 bzw. 500 mm/h bei Oberflächen bzw. Speicherschicht eine deutlich höhere Durchlässigkeit festzuhalten.

Jato-Espino u. a. (2016) versuchten durch den Einsatz verschiedener NWB-Maßnahmen das Auftreten von Überflutungen durch Überlastung des Entwässerungssystems für ein 31,40 ha großes EZG in Donostia (Spanien) zu verhindern. Als Modelleingangsgröße wurde ein künstlich erzeugter Modellregen („Alternating Block Method“) verwendet, dessen hydrologische Parameter einer Wiederkehrzeit von zehn Jahren entsprechen. Es sind keine weiterführenden Angaben bezüglich Niederschlagshöhe bzw.-Intensität, Oberflächenkategorisierung, dem VG, der Versiegelungsgradreduktion oder angeschlossener Flächen aufgeführt, dahingehend lassen sich die Ergebnisse dieser Untersuchung auch nur bedingt mit dieser Masterarbeit vergleichen. Jato-Espino u. a. (2016) zeigten durch den Einsatz von 7500 m<sup>2</sup> (VR\*Eff.) PPS eine VR von 67,6 % bei einer Effektivität von 0,138 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. In dieser Masterarbeit hingegen lässt sich z.B. bei  $V_2$ , bei hoher PPS Anwendung, je nach Ereignis und EZG eine VR von rund 30 bis 50 % (also deutlich geringer) feststellen.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse dieser Masterarbeit hinsichtlich dem Einsatz von PPS mit den Arbeiten von Guan u. a. (2015a) und Jato-Espino u. a.

(2016) zeigt Abweichungen von 1 bis 50 % in VR bzw. SR. Da die Vergleichsarbeiten jedoch teilweise recht deutliche Unterschiede in der Beschaffenheit des EZG, der an die Maßnahme angeschlossenen Fläche oder der Niederschlagscharakteristik aufweisen, lassen sich die Ergebnisse auch nur bedingt miteinander vergleichen.

### 3.6.2 Gründächer

Neben Verkehrsflächen stellen Dachflächen den größten Anteil der Gesamtfläche im urbanen Raum (Palla & Gnecco, 2015; Krebs u. a., 2016a). Für großflächige Gründachanwendungen wäre somit ausreichend Fläche vorhanden, wodurch neben einer Vielzahl von qualitativen Verbesserungen auch eine Entschärfung der Abflussproblematik stattfinden könnte.

In der Arbeit von Palla & Gnecco (2015) wurde der hydrologische Einfluss einer großflächigen Implementierung von Grüner Infrastruktur eines EZG der Stadt Genua (Italien) untersucht. Neben der Anwendung von großen Gründachflächen wurden auch größere PPS-Flächen in die Analyse miteinbezogen. Als Effektivitätsparameter der angestellten Variantenstudien dienten die Reduktion der Abflussspitze und des Abflussvolumens sowie die Verzögerung des Hydrographen. Da diese Arbeit unübersehbare Parallelen zur durchgeführten Masterarbeit aufweist und auch als eine der Vorlagen zur Erstellung der Masterarbeit gedient hat, wird versucht die erzielten Ergebnisse ausführlich gegenüberzustellen. Das EZG bei Palla & Gnecco (2015) weist eine Fläche von 5,5 ha bei einem VG von 60 % auf. Es wurden vier Varianten der Implementierung von naturnahen NWB-Maßnahmen untersucht, durch die maximal eine Reduktion der EIA um 36 % erzielt wurde. Die in der Analyse verwendeten Niederschlagsereignisse mit einer Wiederkehrzeit von 2, 5 und 10 Jahren wurden ausgehend von gemessenen Niederschlag der Messstation Genoa Villa Cambiaso (1990 bis 2013) durch die Chicago-Methode aufbereitet. Die simulierten Ereignisse weisen mit ~150, ~220 und ~270 mm/h deutlich höhere Intensitäten als die in dieser Masterarbeit simulierte Niederschlagsereignisse (max. I bei EE<sub>31</sub> mit ~115 mm/h vgl. Abbildung 3-18) auf. Um die Ergebnisse ansatzweise miteinander vergleichbar machen zu können, wird für EE<sub>31</sub> unter der Annahme eines linearen Verhaltens der ermittelten hydrologischen Leistungsfähigkeiten (Palla & Gnecco, 2015) extrapoliert. Bei einem Ereignis von I=115 mm/h ist somit bei einer EIA-Reduktion von 21 bzw. 36 % eine SR von 25 bzw. 49 % und ein VR von 14 bzw. 26 % festzustellen. Zum Zweck des Vergleichs der Ergebnisse stellen sich für das Gesamtprojektgebiet Variante 5 und 6 mit 18,5 bzw. 37 % EIA-Reduktion (gemäß Tabelle 3-1) als geeignete Vergleichsvarianten heraus. Variante 3 bzw. 4 würden sich zwar aufgrund der Maßnahmenzusammensetzung besser zum Vergleich eignen, jedoch können die Ergebnisse der 11 % EIA-Reduktionsvariante keinesfalls linear extrapoliert werden. Neben dem Vergleich von V<sub>5 EE 31</sub> mit V<sub>III</sub> (EIA-Reduktion 21 %),

wird auch  $V_{6\text{EE}31}$  mit  $V_{IV}$  (EIA-Reduktion 36 %) verglichen. Für das GPG zeigen sich dabei folgende Abweichungen ( $\Delta$ ) der simulierten Maßnahmeneffektivität: Im Vergleich von  $V_{5\text{EE}31}$  zu  $V_{III}$  zeigt sich eine Abweichung der Maßnahmeneffektivität von 28 zu 25 ( $\Delta$  3 %) beim Spitzenabfluss und 29,5 zu 14 ( $\Delta$  15,5 %) beim Abflussvolumen. Im Vergleich von  $V_{6\text{EE}31}$  zu  $V_{IV}$  zeigt sich eine Abweichung der Maßnahmeneffektivität von 60 zu 36 ( $\Delta$  24 %) beim Spitzenabfluss und 60 zu 26 ( $\Delta$  34 %) beim Abflussvolumen. Für das GPG sind demnach recht deutliche Unterschiede in der Maßnahmeneffektivität zu erkennen, obwohl es zu einer recht ähnlichen EIA-Reduktion kommt. Abschließend sollen noch die Ergebnisse des EZG PT (Ausgangsversiegelungsgrad ca. 48 %) in den Vergleich miteinbezogen werden, das bei der Variante 6 mit rund 28 % EIA-Reduktion eine schlechte Passung ( $V_{III}$  od.  $V_{IV}$ ) aufweist. Im Vergleich von  $V_{6\text{EE}31}$  zu  $V_{IV}$  zeigt sich eine Abweichung der Maßnahmeneffektivität von 36,1 zu 36 ( $\Delta$  0 %) beim Spitzenabfluss und 42,0 zu 26 ( $\Delta$  16%) beim Abflussvolumen. Die Ergebnisse des EZG PT zeigen eine deutlich bessere Anpassung an die Ergebnisse von Palla & Gnecco (2015). Die Reduktion des Spitzenabflusses liegt dabei in einem ähnlichen Bereich, für die Reduktion des Abflussvolumens sind hingegen ähnlich große Abweichungen zu erkennen. Es ist anzumerken, dass bei Palla & Gnecco (2015) weitaus mehr Gründachflächen als PPS-Flächen Anwendungen fanden, in dieser Masterarbeit werden jedoch weitaus mehr PPS als Gründachflächen angewandt. Das EZG hat mit 31 % Dach- und 28 % Verkehrsflächen sowie 28 % bzw. 12 % Grün- bzw. landwirtschaftlich genutzte Flächen auch eine etwas andere Oberflächenstruktur im Vergleich zum Projektgebiet Waagner-Biro. Dieses weist mit 21 % Dach- und 37 % Verkehrsflächen sowie 27 % bzw. 11 % Grün- bzw. Schotterflächen einen recht großen Unterschied im Dachfläche-zu-Verkehrsfläche-Verhältnis auf. Außerdem ist eine völlig unterschiedliche Gefällesituation festzustellen, da das Waagner-Biro Viertel sehr flach und das EZG in Genua eher steil ist. Daneben weisen die Parameter der in der Simulation angewandten NWB-Maßnahmen einige Abweichungen auf. Bei den Gründachanlagen weichen neben der Feldkapazität von 0,43 zu 0,19 auch noch die hydraulische Leitfähigkeit von 1000 zu 37,9 mm/h (Faktor 25) recht deutlich ab. Bei Palla & Gnecco (2015) zeigte sich somit eine weitaus schnellere Ableitfähigkeit des ausgeführten Gründaches. Bei PPS ist bei Palla & Gnecco (2015) ebenfalls eine deutlich höhere Durchlässigkeit von 9000 zu 254 mm/h (Faktor 35) auszumachen. Aufgrund der geringen Anwendungsflächen, lediglich 5 % der Gesamtfläche, sollten PPS jedoch einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Ergebnisse von Variante IV haben. Die Auswertungen von Palla & Gnecco (2015) weisen trotz Unterschieden im EZG, dem VG und den Parametern der NWB-Maßnahmen zumindest für die SR recht ähnliche Ergebnisse auf. Bei den ermittelten VR sind hingegen starke Unterschiede in der hydrologischen Leistungsfähigkeit der Maßnahmen festzustellen.

Bei der Auswertung der Effektivität der Gründachanlagen stellten Guan u. a. (2015a) für eine Anwendungsfläche von 1,26 ha und einer Reduktion des VG auf ca. 28 % eine VR von 39,1 % und eine SR von 41,9 % fest. Im Vergleich zur Variante 4, mit einer Abdeckung von 100 % des Gründachpotenzials, zeigt sich für das EZG ES, mit einem hohen Dachflächenanteil, eine Abweichung von rund 13 % (25,5 %) VR und rund 14 % SR (28,1 %). Bei allen anderen Gründachvarianten sind noch deutlich höhere Ergebnisabweichungen festzustellen. Die weit aus höheren Ergebnisse können zumindest teilweise durch die sehr geringe Niederschlagshöhe des von Guan u. a. (2015a) ausgewerteten Niederschlagsereignisses  $E_1$  erklärt werden.

Deutsch & Whitlow (2005) wollten durch ihre Arbeit die quantitativen und qualitativen Vorteile von Niederschlagswasserabfluss bei einer großflächigen Gründachanwendung für das Stadtgebiet von Washington D.C. aufzeigen. Dabei wurden für die Potenzialanalyse nur Gebäude mit einer Grundfläche größer 900 m<sup>2</sup> herangezogen. Auf das gesamte Projektgebiet ergaben sich somit eine Gesamtfläche der Gründachanlagen von ca. 700 ha, das entspricht in etwa 29 % der Gebäudegesamtfläche der Stadt. In der Ergebnisauswertung über den Zeitraum von einem Jahr zeigten sich eine Reduktion des Abflussvolumens von bis zu 5,8 %. Außerdem war eine deutliche Reduktion des abgeschlagenen MÜ-Volumens zu erkennen. Eine Reduktion des Spitzenabflusses wurde von Deutsch & Whitlow (2005) nicht ausführlicher betrachtet. In dieser Arbeit wurden nur sehr große Dachflächen in die Potenzialanalyse miteinbezogen, eine Machbarkeit von Gründächern wurde für diese Masterarbeit jedoch bei bereits deutlich kleineren Flächen angenommen. Dahingehend wird das Ergebnis von Deutsch & Whitlow (2005) mit der Variante 3 dieser Masterarbeit verglichen, die eine Abdeckung von 50 % des Potenzial für Gründachanlagen und damit ca. 30 % der Gebäudegesamtfläche des Projektgebiet darstellt. Die Ergebnisse der Langzeitsimulation zeigen dabei eine Reduktion des Abflussvolumens von 9,0 %. Die Abweichung zu Deutsch & Whitlow (2005) ist mit rund 3 % nicht besonders groß, die Ergebnisse können somit als ähnlich betrachtet werden.

In der Arbeit von Versini u. a. (2016) wurde der potenzielle Einfluss auf das Niederschlagsabflussverhalten von zwei urbanen Einzugsgebieten untersucht. Neben der Reduktion von Abflussvolumen und Abflussspitze wurde für die ausgewählten Einzugsgebiete Chatillon und Boulogne-Billancourt auch die Reduktion von entlasteten MW-Überlaufvolumen betrachtet. Die Untersuchung wurde mit einer gemessenen Langzeitniederschlagsserie (1993 bis 2011) durchgeführt wobei 35 problematische Ereignisse genauer betrachtet worden sind. Dabei traten akkumulierte Niederschlagshöhen von 2,6 bis 120 mm, Intensitäten von 2,5 bis 41 mm/h und somit Wiederkehrzeiten von einem Monat bis größer zehn Jahre auf. Die Auswertungsergebnisse der hydrologischen Indikatoren (Abflussspitze

und Abflussvolumen) wurden dabei auf die aktuelle Situation bezogen und können wie folgt wiedergegeben werden: Für das EZG Chatillon zeigten sich bei Ausnützung des Dachbegrünungspotenzial von 12,5 bis 100 % eine Reduktion des Abflussvolumens von 0,3 bis 13,1 % und eine Reduktion des Spitzenabflusses von 2,4 bis 36,5 %. Bei der Auswertung der Ergebnisse des EZG Boulogne war bei Ausführung von 100 % des Dachbegrünungspotenzial eine etwas höhere Reduktion des Abflussvolumens von 1,1 bis 14,3 % zu erkennen. Außerdem konnte das Volumen der Mischwasserüberläufe deutlich reduziert (60 %) werden. Genauere Angaben über den Aufbau der simulierten Dachbegrünung lassen sich Versini u. a. (2015) entnehmen. Eine ausführliche Beschreibung der Oberflächensituation oder dem Versiegelungsgrad des EZG konnten der Arbeit nicht entnommen werden, somit lassen sich die Ergebnisse auch nur teilweise mit den Ergebnissen dieser Masterarbeit vergleichen. Aus den Unterlagen geht außerdem nicht klar hervor bei welchen Ereignissen mit welchen Ergebnissen zu rechnen ist, dahingehend ist der angegebene Maximalwert mit Vorsicht zu genießen. Es wird daher auch eher die Bandbreite der Reduktionswerte betrachtet. Für einen Vergleich mit dem GPG wird die Variante 4 herangezogen, die ebenfalls eine 100 % Abdeckung des Potenzial für Gründachanlagen im Projektgebiet Waagner-Biro darstellt. Bei V<sub>4</sub> zeigt sich eine Reduktion des Abflussvolumens um 2 bis 23 % und eine Abflussspitzenreduktion 5 bis 25 %. Der Vergleich zu den Ergebnissen von Versini u. a. (2016) zeigt somit bei der Reduktion des Abflussvolumens eine Differenz von ca. 5 % (6,7 bzw. 7,7 zu 12,5 %) und bei der Reduktion der Abflussspitze eine Differenz von ebenfalls ca. 5 % (19,5 zu 15 %). Die Ergebnisse von Versini u. a. (2016) zeigen somit für die großflächige Anwendung von Gründachanlagen einen sehr ähnlichen Wertebereich der hydrologischen Indikatoren der Maßnahmeneffektivität (Abflussspitze und Abflussvolumen).

Der Vergleich der Simulationsergebnisse dieser Masterarbeit hinsichtlich dem Einsatz von Gründächern mit den Arbeiten von Palla & Gnecco (2015), Guan u. a. (2015a), Deutsch & Whitlow (2005) und Versini u. a. (2016) zeigt teilweise ähnliche Ergebnisse mit nur 3 bzw. 5 % Abweichung, aber auch Abweichungen von 14 bzw. 34 % in VR bzw. SR. Da die Vergleichsarbeiten weisen jedoch teilweise recht deutliche Unterschiede in der Beschaffenheit des EZG, der an die Maßnahme angeschlossenen Fläche oder der Niederschlagscharakteristik auf.

### 3.6.3 Speichermulden

Durch den Einsatz von abgesenkten Grünflächenzonen kann anfallender Regenwasserabfluss aufgenommen, infiltriert und verzögert wieder abgegeben werden. Bei Speichermulden kommt es zu einer flächenförmigen Versickerung über eine belebte Bodenschicht, womit eine biologische Reinigung der Zulaufwässer erreicht werden kann (Geiger & Dreiseitl, 2001; Dietz, 2007). Die Leistungsfähigkeit von Speichermulden hängt primär von der ausgeführten Einstautiefe, dem Speichervolumen, der an die Maßnahme angeschlossenen Fläche und der Infiltrationsfähigkeit des Bodens ab. Um nun einen aussagekräftigen Vergleich der Auswertungsergebnisse anstellen zu können, sollte neben diesen Parametern auch noch eine vergleichbare Berechnung der Maßnahme stattgefunden haben.

Jia u. a. (2015a) zeigten die Fähigkeit von Bioretentionszonen und Speichermulden die Quantität und Qualität von anfallenden Niederschlagsabfluss zu beeinflussen. Dabei wurden verschiedenen naturnahe NWB-Maßnahmen aneinandergereiht, um den Abfluss versiegelter Sportflächen aufzunehmen. Das Verhältnis von NWB-Maßnahmenfläche zu angeschlossener Fläche betrug dabei rund 3 %. Der Aufbau der Speichermulden zeigte 0,25 m Oberbodenstärke, 0,15 m Speichertiefe, eine geringe Neigung von nur 0,5 %, Längen von 15 bis 36 m sowie Breiten von 2 und 4 m. Für die Auswertung wurden für den Zeitraum von Mai 2012 bis September 2013 zehn Niederschlagsereignisse mit Höhen von 18 bis 105 mm und Maximalintensitäten von 23 bis 97 mm/h herausgegriffen. Die ausgeführten Speichermulden zeigten dabei durchschnittlich eine VR von 36,2 und eine SR von 44,3 %. Etwas höhere Werte konnten im Durchschnitt für den Einsatz von Bioretentionszonen mit 62 % VR und 66 % SR festgestellt werden. Wird die Effektivität von Speichermulden mittels den, bereits erwähnten, 3 % Flächenverhältnis beurteilt, können erzielte Reduktionen bei einer Muldentiefe von 0,15 m als durchaus beachtlich angesehen werden. Im Vergleich zur  $V_7^{EE25}$  dieser Masterarbeit zeigen sich für den Einsatz von Speichermulden mit einer Tiefe von 0,3 m, bei einem über das gesamte EZG betrachteten Verhältnis von NWB-Maßnahmenfläche zu angeschlossener Fläche von rund 3 bis 6 %, VR von 42 bis 59 % und SR von 45 bis 62 %. Der Vergleich zu den gemessenen Ergebnissen von Jia u. a. (2015a) zeigt somit eine tendenziell zu geringe Leistungsfähigkeit der Speichermulden in  $V_7$ . Im Modell können für Speichermulden eventuell etwas höhere Retentionsparameter angesetzt werden, da bei Jia u. a. (2015a) Mulden mit einer Einstautiefe von 15 cm vergleichsweise hohe Abflussreduktionen aufzeigten.

### 3.6.4 Maßnahmenkombinationen

Bei Maßnahmenkombination ist generell zu unterscheiden ob ausgeführte Maßnahmen „parallel“ oder „seriell“ wirken. Das soll mit anderen Worten heißen, dass parallel eingesetzte Maßnahmen kaum Synergieeffekte nutzbar machen können. Bei einer Aneinanderreihung verschiedener Maßnahmen mit einem seriellen Aufbau, wird Abfluss von einer Maßnahme auf die nächste geleitet. Es entsteht somit eine regelrechte Retentions- und Infiltrationsstraße, deren Aufbau sehr gute Ergebnisse liefern kann (z.B. bei Guan u. a. (2015a) mit 78 bis 92 % SR und 67 bis 78 % VR bei Kombination von PPS und Speichereinheiten).

Die Maßnahmenkombinationen für das GPG Waagner-Biro hingegen wurden zu großen Teilen als nebeneinander wirkend ausgelegt. Im Modell findet im Allgemeinen kein Teilfläche-Teilfläche Abfluss statt, es kann daher auch nur begrenzt zu einer Kombination der Maßnahmenwirkung kommen. Die Umsetzung von aneinandergereihten, naturnahen NWB-Maßnahmen bedarf im Allgemeinen einer manuellen Festlegung von Entwässerungspunkten, wäre daher für das GPG mit einem immensen Arbeitsaufwand verbunden gewesen und wurde daher auch nicht in dieser Form umgesetzt.

## **4 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick**

### **4.1 Zusammenfassung**

Durch die voranschreitende Urbanisierung kommt es im städtischen Raum zu einer Zunahme der Oberflächenversiegelung. Im Zuge von Niederschlagsereignissen können somit auf diesen Flächen keine natürlichen hydrogeologischen Austauschprozesse (z.B. Infiltration, Evapotranspiration) mehr stattfinden, womit es im urbanen Raum notwendig wird, verschiedenste Niederschlagsmanagementmaßnahmen (z.B. Entwässerung) vorzusehen. Durch die Kombination von Flächenversiegelung und kanalisierter Ableitung des Niederschlagsabflusses entstehen dem aufnehmenden Gewässer wasserwirtschaftlich-ökologische Nachteile, wie der Verschärfung von Hochwasserabflüssen, erhöhten Schadstoffeinträgen und der Reduktion der Grundwasserneubildung. Durch den Einsatz von naturnahen NWB-Maßnahmen kann jedoch die Infiltration, die Evapotranspiration sowie die Oberflächenretention von Niederschlagswasser gesteigert werden, womit sich das im Entwässerungssystem zum Abfluss kommende Niederschlagswasser reduzieren und die allgemeine Abflussproblematik etwas entschärfen lässt.

Für das Projektgebiet Waagner-Biro mit einer Fläche von rund 69 ha soll durch die Anwendung von naturnahen NWB-Maßnahmen eine positive Beeinflussung des Niederschlags-Abfluss-Verhaltens mitsamt der Reduktion quantitativer Abflussparameter (Abflussvolumen und -spitze) erzielt werden können. In der Erhebung der Oberfläche konnte für das GPG (Gesamtprojektgebiet) ein Versiegelungsgrad, mit ca. 37 % Asphalt-, rund 21 % Dach- und 2 % Pflasterflächen, von rund 60 % festgestellt werden. Die restliche Gebietsfläche setzt sich aus ca. 27 % Grünflächen, rund 12 % Schotterflächen und 1 % Flächen der ÖBB zusammen. Einzelne Teilbereiche des Projektgebiets weisen jedoch deutlich höhere Versiegelungsgrade mit bis zu 91 % auf. Die hydrologische Analyse zeigt eine Aufteilung des GPG in drei Haupteinzugsgebiete, das flächengrößte EZG Eggenberger Straße und die Einzugsgebiete Alte Poststraße sowie Peter-Tunner-Gasse. Kleinere Teilflächen im Osten des Projektgebiets entwässern in Richtung der Bahntrasse und wurden nicht in die Auswertung miteinbezogen. Die Ermittlung der Effektivität der angewandten NWB-Maßnahmen hinsichtlich der Reduktion quantitativer Abflussparameter erfolgte mittels eines dynamisches Niederschlags-Abfluss-Simulationsmodells (SWMM). Ausgehend vom jetzigen Gebietszustand wurden, um die Abflusssituation im Projektgebiet zu verbessern und mögliche Ausführungsvarianten mit hohem Potenzial aufzuzeigen, mehrere NWB-Maßnahmenvarianten konzipiert. Die Szenariensimulation erfolgte unter Verwendung von einer durchgehenden zehn Jahresniederschlagsserie (1996 bis

2006) und drei hydrologisch interessanten Einzelereignissen (EE<sub>1</sub>, EE<sub>25</sub> und EE<sub>31</sub>). Bei der Auswertung zeigten sich folgende Ergebnisse:

Für PPS-Maßnahmen können bei der Umsetzung von 100 % des Anwendungspotenzials je nach EZG-Beschaffenheit und Niederschlagscharakteristik eine VR von 28,1 bis 52,4 % und eine SR von 22,8 % bis 51,3 % festgestellt werden. Bei Gründächern sind für die Umsetzung von 100 % des Anwendungspotenzial je nach EZG-Beschaffenheit und Niederschlagscharakteristik eine VR von 3,6 % bis 25,5 % und eine SR von 5,4 % bis 28,1 % zu erwarten. Für Speichermulden können bei der Umsetzung von 100 % des Anwendungspotenzial je nach EZG-Beschaffenheit und Niederschlagscharakteristik eine VR von 25,7 % bis 61,8 % und eine SR von 22,4 % bis 62,7 % festgestellt werden. Bei Maßnahmenkombinationen mit Speichermulden sind für die Umsetzung von 100 % des Anwendungspotenzial je nach EZG-Beschaffenheit und Niederschlagscharakteristik eine VR von 40,3 % bis 83,9 % und eine SR von 31,8 % bis 84,3 % zu erwarten. Die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit zeigt für PPS  $31 \cdot 10^4 \text{ €/} \%$  bzw.  $37 \cdot 10^4 \text{ €/} \%$ , für Gründächer  $35 \cdot 10^4 \text{ €/} \%$  bzw.  $27 \cdot 10^4 \text{ €/} \%$ , Speichermulden  $4 \cdot 10^4 \text{ €/} \%$  bzw.  $4 \cdot 10^4 \text{ €/} \%$  und für Maßnahmenkombinationen  $16 \cdot 10^4 \text{ €/} \%$  bis  $29 \cdot 10^4 \text{ €/} \%$  bzw.  $17 \cdot 10^4 \text{ €/} \%$  bis  $30 \cdot 10^4 \text{ €/} \%$  VR bzw. SR und somit Gesamterichtungskosten von ca. 1,5 Mio. € bis 17,2 Mio. €.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass in der Modellsimulation durch den Einsatz von Speichermulden eine hohe Maßnahmeneffektivität bei geringen Errichtungskosten erzielt werden konnte und sich somit eine hohe Wirtschaftlichkeit zeigt. Als Großer Nachteil von Speichermulden ist die Flächenverfügbarkeit zu sehen, indem Mulden rund 10 bis 20 % der zu entwässerten Fläche messen sollten. Im urbanen Bereich, bei Versiegelungsgraden jenseits 75 %, sind kaum öffentliche Freiflächen für die Errichtung von Speichermulden vorhanden. PPS und Gründächer weisen aufgrund fehlender Infiltrations- oder Retentionskomponenten im Vergleich zur Anwendung von Speichermulden zwar eine etwas geringere Effektivität auf, eignen sich jedoch besonders für den Einsatz im urbanen Raum. Aus diesen Gründen wird für das Projektgebiet Waagner-Biro eine Kombination aus durchlässigen Verkehrsflächen, Gründachanlagen und Speichermulden zusammen mit weiteren NWB-Maßnahmen zur Reduktion der urbanen Abflussproblematik vorgeschlagen.

Es ist hier nochmals hinzuweisen, dass es bei Speichermulden und PPS zu Versickerungseffekten in die obersten Bodenschichten und folglich in das Grundwasser kommt und somit die Vorgaben des WRG erfüllt werden müssen. Eine Versickerung in kontaminiertes Bodenmaterial, wie es möglicherweise im Gebiet rund um die Smart City Waagner-Biro vorkommen kann, ist in rechtlicher Sicht keinesfalls zulässig. Sollte für diesen Bereich eine konkrete Umsetzung von NWB-Maßnahmen angedacht werden, ist aufgrund des Verdachts auf Kontamination eine ausführliche Bodenerkundung anzustellen.

## 4.2 Schlussfolgerungen

Für das Projektgebiet zeigt sich mit rund 60 % ein hoher Versiegelungsgrad, wobei Gebiete um die Daun- bzw. Laudongasse noch deutlich höhere VG aufweisen. Dahingehend kommen bestimmte NWB-Maßnahmen für die Anwendung in mehreren Bereichen aufgrund unzureichender Verfügbarkeit von öffentlichen Freiflächen kaum infrage.

Durchlässige Verkehrsflächen zeigen eine gute Wirkung bei unterschiedlichen Niederschlagscharakteristiken, bei höheren Intensitäten ist jedoch eine abnehmende Wirkung zu erkennen, da PPS keinerlei oberirdischen Retentionsraum aufweist. Die vorhandenen Porenspeicher werden durch die auftretende Infiltration gefüllt, durch Evaporation kann gespeichertes Wasser auch wieder an die Umgebung abgegeben werden. Neben der quantitativen Abflussreduktion soll gemäß mehreren Literaturquellen durch den Einsatz von PPS auch eine qualitative Verbesserung des Abflusses möglich sein.

Bei Gründachanlagen sind aufgrund ihres Aufbaus und ihrer Funktionsweise bessere Ergebnisse bei Niederschlagsereignissen geringerer Intensität bzw. kleineren Niederschlagshöhen zu erkennen. Besonders bei Starkregenereignissen kann es jedoch zum Erreichen des Retentionsmaximums kommen, wobei die Maßnahme durch einen Notüberlauf vor einer hydraulischen Überlastung geschützt wird. Da es bei dieser Maßnahme zu keinerlei Infiltration kommen kann, entfällt ein besonders bei Kurzzeitbetrachtungen wichtiger Teil der Abflussreduktion, was sich durch eine etwas geringere Effektivität bemerkbar macht. Evapotranspirationseffekte können jedoch ungehindert stattfinden und bei großflächiger Anwendung damit zur Verbesserung des Stadtklimas beitragen.

Bei Speichermulden kommt es zu einer Retention des aufgenommenen Abflusses, bei außerdem stattfindenden Infiltrations- und Evapotranspirationseffekten. Die zu erwartende Maßnahmeneffektivität hängt dabei primär von der gewählten Einstautiefe und der vorhandenen Bodendurchlässigkeit ab. Die Maßnahme kann zwischen versiegelte Flächen und das Entwässerungssystem geschaltet werden, um eine direkte Abflusswirksamkeit zu unterbinden. Anhand der bewachsenen Oberbodenpassage soll bei Speichermulden auch eine qualitative Verbesserung des Abflusses feststellbar sein. Die Anwendungsmöglichkeit dieser Maßnahme hängt neben rechtlichen Vorgaben auch von der Verfügbarkeit von öffentlichen Freiflächen ab, die im Projektgebiet Waagner-Biro, trotz verhältnismäßig wenig dichter Verbauung, teilweise schon nicht gegeben war.

### 4.3 Ausblick

Das Projektgebiet Waagner-Biro hat in den letzten Jahren bereits eine große Veränderung gesehen und wird im kommenden Jahrzehnt auch noch weiter angepasst. Es bildet durch seine große Oberflächenvariabilität, das dynamische Gebietswachstum und hydrologischen Randbedingungen ein interessantes Untersuchungsgebiet der Niederschlagswasserbewirtschaftung.

Zusätzlich zu den in dieser Arbeit konzipierten Maßnahmen, bieten sich durchaus noch weitere Möglichkeiten der Effektivitätsanalyse unterschiedlichster Maßnahmenkombinationen. Neben einer Zukunftsvariante mit fertiggestellter Smart City können auch Maßnahmenpakete auf und entlang der Hauptverkehrsflächen und eine Detailmaßnahmenplanung auf Grundstücksmaßstab sinnvoll sein. Wie bereits erwähnt, konnte leider keine Modellkalibrierung durchgeführt werden, womit den Ergebnissen der durchgeführten Maßnahmenvariantensimulation eine gewisse Bandbreite einzuräumen ist. Um die Aussagekraft des Modells jedoch noch weiter verbessern zu können, ist es notwendig eine oder idealerweise mehrere Messungen im Bereich des Waagner-Biro Viertels durchzuführen. Da sich das GPG in drei EZG aufteilt, wären für eine Abdeckung des gesamten Modells drei Durchflussmessungen an den Modellausläufen notwendig. Dabei stellt sich jedoch die Frage, inwieweit die an das Projektgebiet angrenzenden Flächen, die nicht in das Modell integriert wurden, vom gemessenen Durchfluss abgezogen werden können oder ob das Modell in Nord-, West- und Südrichtung in unbestimmten Ausmaß zu erweitern ist. Ein wichtiger Teil der Modellierung ist es, den Einfluss der verwendeten Parameter auf das Simulationsergebnis aufzuzeigen, um somit die effektive Ergebnisschwankungsbreite einschätzen zu können. Hierbei wird von einer Sensitivitätsanalyse gesprochen. Eine solche wurde zwar in stark vereinfachter Form für die Oberflächenparameter durchgeführt und zeigt dabei eine Schwankungsbreite bis max. 14 %, sollte idealerweise jedoch weitaus ausführlicher angewandt werden. Neben der Analyse der Oberflächenparameter könnte auch die Sensitivität der NWB-Maßnahmenparameter oder der hydraulischen Parameter des Entwässerungssystems untersucht werden. Außerdem könnte bei konkreteren Umsetzungsplänen eine ausführlichere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der NWB-Maßnahmen sinnvoll sein. Neben der Analyse und eines Vergleichs mehrerer Kostenansätze aus der Literatur könnten Herstellungskosten auch direkt von ausführenden Betrieben oder Herstellern (Nachkalkulation der Herstellung) bezogen werden. Idealerweise könnte auch eine gewisse Preisvariabilität je nach Größe der ausgeführten Maßnahmenflächen ermittelt werden.

Die in dieser Masterarbeit ausgearbeiteten Maßnahmenvarianten und festgestellten Ergebnisse können somit als Bezugspunkt für weiterführende Untersuchungen des Waagner-Biro Viertels im Bereich der NWB herangezogen werden.

---

## Literaturverzeichnis

- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2012) Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water, Air, & Soil Pollution*, **223**(7), 4253–4273.
- Alley, W. M. & Veenhuis, J. E. (1983) Effective Impervious Area in Urban Runoff Modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, **109**(2), 313–319.
- Assinger, C. (2012) Niederschlagswasserbewirtschaftung Analyse, Möglichkeiten und Empfehlungen für Graz.
- Austrian Standards Institute (2013) ÖNORM B 2506-1: Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Teil 1: Anwendung, hydraulische Bemessung, Bau und Betrieb.
- Austrian Standards Institute (2012) ÖNORM B 2506-2: Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Teil 2: Qualitative Anforderungen an das zu versickernde Regenwasser sowie Anforderungen an Bemessung, Bau und Betrieb von Reinigungsanlagen.
- Austrian Standards Institute (2016) ÖNORM B 2506-3: Regenwasser-Sickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Teil 3: Filtermaterialien.
- Bähr, J. (2011) Einführung in die Urbanisierung. Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung: Urbanisierung. [online] <https://www.berlin-institut.org/online-handbuchdemografie/bevoelkerungsdynamik/auswirkungen/urbanisierung.html> (Zugegriffen 18. Jänner 2018).
- basemap.at Karte (2017) [online] [https://www.basemap.at/application/index.html?{"center": \[1715645.1425592438, 5954443.239281525\], "zoom": 16, "rotation": 0, "layers": "1000000000"}](https://www.basemap.at/application/index.html?{) (Zugegriffen 7. August 2017).
- BMLFUW (2017a) Altlasten WFS Service - MAP\_PUBLIC. Altlastenkataster des Ministeriums für ein lebenswertes Österreich. [online] [https://secure.umweltbundesamt.at/altlasten-service/map\\_public.xhtml](https://secure.umweltbundesamt.at/altlasten-service/map_public.xhtml) (Zugegriffen 26. September 2017).
- BMLFUW (1993) RIS - Gesamte Rechtsvorschrift für Allgemeine Abwasseremissionsverordnung - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 27.09.2017. [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010977> (Zugegriffen 27. September 2017).
- BMLFUW (2010) RIS - Gesamte Rechtsvorschrift für Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom

- 27.09.2017. [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20006738> (Zugegriffen 27. September 2017).
- BMLFUW (1959) RIS - Gesamte Rechtsvorschrift für Wasserrechtsgesetz 1959 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 31.08.2017. [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010290> (Zugegriffen 31. August 2017).
- BMLFUW (2017b) *Wasserrechtsgesetz 1959 (WRG 1959), BMLFUW*, [online] [https://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht\\_national/wasserrechtsgesetz/WRG1959.html](https://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht_national/wasserrechtsgesetz/WRG1959.html) (Zugegriffen 27. September 2017).
- BMLFUW, Muschalla, D., Gruber, G., & Scheucher, R. (2014) ECOSTORMA-Handbuch: ökologische und ökonomische Maßnahmen der Niederschlagswasserbewirtschaftung.
- BMUB (2015) *Hochwasser-schutzfibel*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin. [online] <https://www.fibund.de/Inhalt/Themen/Hochwasser/> (Zugegriffen 29. Jänner 2018).
- Bostijancic, K. M. (2013) Urbaner Überflutungsschutz – Fallstudie „Glesingerstraße“.
- Bundeskammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten (2016) ARCHITEKTURWETTBEWERB. [online] <http://www.architekturwettbewerb.at/competition.php?id=1833&part=> (Zugegriffen 14. August 2017).
- CNT (2011) The Value of Green Infrastructure: A Guide to Recognizing Its Economic, Environmental and Social Benefits. Center for Neighborhood Technology. [online] <http://www.cnt.org/publications/the-value-of-green-infrastructure-a-guide-to-recognizing-its-economic-environmental-and>.
- Deutsch, B. & Whitlow, H. (2005) RE-GREENING WASHINGTON, DC: A Green Roof Vision based on quantifying Storm Water and Air Quality Benefits.
- Dietz, M. E. (2007) Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions. *Water, Air, and Soil Pollution*, **186**(1–4), 351–363.
- Drake, J., Bradford, A., & Van Seters, T. (2014) Winter Effluent Quality from Partial-Infiltration Permeable Pavement Systems. *Journal of Environmental Engineering*, **140**(11), 04014036.
- DWA (2005) Arbeitsblatt DWA-A 138, Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser.
- DWA (Hrsg.) (2012) *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien)*, DWA, Hennef.

- Elliott, A. H. & Trowsdale, S. A. (2007) A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, **22**(3), 394–405.
- EPA, U. S. E. P. A. (2007) Reducing Stormwater Costs through Low Impact Development (LID) Strategies and Practices.
- ESRI (2016) Funktionsweise von „Fließrichtung“—Hilfe | ArcGIS for Desktop. [online] <http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-direction-works.htm> (Zugegriffen 4. Oktober 2017).
- EU-Parlament und Rat (2000) Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG), BMLFUW. [online] [https://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-eu-international/eu\\_wasserrecht/Wasserrahmen-RL.html](https://www.bmlfuw.gv.at/wasser/wasser-eu-international/eu_wasserrecht/Wasserrahmen-RL.html) (Zugegriffen 26. September 2017).
- Even, S., Poulin, M., Mouchel, J.-M., Seidl, M., & Servais, P. (2004) Modelling oxygen deficits in the Seine River downstream of combined sewer overflows. *Ecological Modelling*, **173**(2), 177–196.
- Fairfield, J. & Leymarie, P. (1991) Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research* Vol.27, No.5, 709–717.
- Fassman, E. & Blackbourn, S. (2010) Urban Runoff Mitigation by a Permeable Pavement System over Impermeable Soils. *Journal of Hydrologic Engineering*, **15**(6), 475–485.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005) Global Consequences of Land Use. *Science*, **309**(5734), 570–574.
- Gantner, K. (2002) Nachhaltigkeit urbaner Regenwasserbewirtschaftungsmethoden.
- Geiger, W. & Dreiseitl, H. (2001) *Neue Wege für das Regenwasser: Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebieten*, Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München.
- Getter, K. L., Rowe, D. B., & Andresen, J. A. (2007) Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, **31**(4), 225–231.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008) Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, **319**(5864), 756–760.
- Gromaire, M. C., Garnaud, S., Saad, M., & Chebbo, G. (2001) Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. *Water Research*, **35**(2), 521–533.

- Gruber, G., Winkler, S., & Pressl, A. (2004) Quantification of pollution loads from CSOs into surface water bodies by means of online techniques. *Water Science and Technology*, **50**(11), 73–80.
- Guan, M., Sillanpää, N., & Koivusalo, H. (2015a) Assessment of LID practices for restoring pre-development runoff regime in an urbanized catchment in southern Finland. *Water Science and Technology*, **71**(10), 1485–1491.
- Guan, M., Sillanpää, N., & Koivusalo, H. (2015b) *Modeling and assessment of hydrological changes in a developing urban catchment*,
- Hargreaves, G. H. & Samani, Z. A. (1985) Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, **1**(2), 96–99.
- Hooper, D. U., Chapin, F. S., Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J. H., Lodge, D. M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A. J., Vandermeer, J., & Wardle, D. A. (2005) Effects of Biodiversity on Ecosystem Functioning: A Consensus of Current Knowledge. *Ecological Monographs*, **75**(1), 3–35.
- Howard, L. (1818) *Luke Howard and The Climate of London - Mills - 2008 - Weather - Wiley Online Library*. [online] <http://online-library.wiley.com/doi/10.1002/wea.195/full> (Zugegriffen 17. August 2017).
- Hunt W. F., Smith J. T., Jadlocki S. J., Hathaway J. M., & Eubanks P. R. (2008) Pollutant Removal and Peak Flow Mitigation by a Bioretention Cell in Urban Charlotte, N.C. *Journal of Environmental Engineering*, **134**(5), 403–408.
- Hunt, W. F., Traver, R. G., Davis, A. P., Emerson, C. H., Collins, K. A., & Stagge, J. H. (2010) Low impact development practices: designing to infiltrate in urban environments. *Effects of urbanization on groundwater: an engineering case-based approach for sustainable development*, 308–343.
- IPCC, I. P. on C. (1996) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Jato-Espino, D., Charlesworth, S. M., Bayon, J. R., & Warwick, F. (2016) Rainfall–Runoff Simulations to Assess the Potential of SuDS for Mitigating Flooding in Highly Urbanized Catchments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **13**(1), 149.
- Jayasooriya, V. M. & Ng, A. W. M. (2014) Tools for Modeling of Stormwater Management and Economics of Green Infrastructure Practices: a Review. *Water, Air, & Soil Pollution*, **225**(8), 2055.
- Jenson, S. K. & Domingue, J. O. (1988) Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and remote sensing*, **Vol.54**(No.11), 1593–1600.

- Jia, H., Wang, X., Ti, C., Zhai, Y., Field, R., N Tafuri, A., Cai, H., & L Yu, S. (2015a) *Field monitoring of a LID-BMP treatment train system in China*,
- Jia, H., Yao, H., Tang, Y., Yu, S. L., Field, R., & Tafuri, A. N. (2015b) LID-BMPs planning for urban runoff control and the case study in China. *Journal of Environmental Management*, **149**, 65–76.
- Kainz, H., Kauch, E. P., Fuchs-Hanusch, D., & Gruber, G. (2012) *Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft: Trinkwasser, Abwasser, Abfall und Recycling*, Manz, Wien.
- kleine Zeitung (2015) Der Krieg in der Steiermark. *kleinezeitung.at*. [online] <http://dossiers.kleinezeitung.at/der-krieg-in-der-steiermark-fb5e7585-3d6b-4470-8ed8-0ef5e5fdc735> (Zugegriffen 8. August 2017).
- Klima- und Energiefonds (2013) Smart City Graz. [online] <http://www.smartcities.at/stadt-projekte/smart-cities/smart-future-graz/> (Zugegriffen 9. August 2017).
- Krebs, G., Kokkonen, T., Setälä, H., & Koivusalo, H. (2016a) Parameterization of a Hydrological Model for a Large, Ungauged Urban Catchment. *Water*, **8**(10), 443.
- Krebs, G., Kokkonen, T., Valtanen, M., Setälä, H., & Koivusalo, H. (2014) Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, **512**, 482–497.
- Krebs, G., Kuoppamäki, K., Kokkonen, T., & Koivusalo, H. (2016b) Simulation of green roof test bed runoff. *Hydrological Processes*, **30**(2), 250–262.
- Le Viol, I., Mocq, J., Julliard, R., & Kerbiriou, C. (2009) The contribution of motorway stormwater retention ponds to the biodiversity of aquatic macroinvertebrates. *Biological Conservation*, **142**(12), 3163–3171.
- Lee, J. G. & Heaney, J. P. (2003) Estimation of Urban Imperviousness and its Impacts on Storm Water Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **129**(5), 419–426.
- Li, N., Yu, Q., Wang, J., & Du, X. (2017) *The effects of low impact development practices on urban stormwater management*,
- Lucius, I., Caratas, R. D. und D., WWF Donau-Karpaten Programm, May, F., Steinert, J., Torkler, P., & WWF Deutschlang (2011) *Grüne Infrastruktur, Nachhaltige Investitionen zum Nutzen für Mensch und Natur*. [online] [http://www.surf-nature.eu/fileadmin/SURFNATURE/Publications/GreenInfrastructure\\_DE.pdf](http://www.surf-nature.eu/fileadmin/SURFNATURE/Publications/GreenInfrastructure_DE.pdf) (Zugegriffen 6. Dezember 2017).
- Magistrat Graz (2011) SYNERGIS WebOffice Sicherheitsstadtplan Graz. [online] <https://geodaten.graz.at/WebOffice/synserver?project=Sicherheitsstadtplan&view=KBK&client=core> (Zugegriffen 24. August 2017).

- Montalto, F., Behr, C., Alfredo, K., Wolf, M., Arye, M., & Walsh, M. (2007) Rapid assessment of the cost-effectiveness of low impact development for CSO control. *Landscape and Urban Planning*, **82**(3), 117–131.
- Newman, A. P., Coupe, S. J., Smith, H. ., Puehmeier, T., & Bond, P. C. (2006) *The Microbiology of permeable pavements*.
- Nnadi, E. O., Newman, A. P., Coupe, S. J., & Mbanaso, F. U. (2015) Stormwater harvesting for irrigation purposes: An investigation of chemical quality of water recycled in pervious pavement system. *Journal of Environmental Management*, **147**, 246–256.
- O’Callaghan, J. F. & Mark, D. M. (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, **28**(3), 323–344.
- Oke, T. R. (1982) The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **108**(455), 1–24.
- Oram, B. (2012) Estimation of green-ampt infiltration parameters. [online] <http://www.water-research.net/Waterlibrary/Stormwater/greenamp.pdf>.
- ÖWAV (2009) ÖWAV-Regelblatt 11: Richtlinien für die abwassertechnische Berechnung und Dimensionierung von Abwasserkanälen.
- ÖWAV (2007) ÖWAV-Regelblatt 19: Richtlinien für die Bemessung von Mischwasserentlastungen.
- ÖWAV (2015) ÖWAV-Regelblatt 45: Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund.
- Palla, A. & Gnecco, I. (2015) Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, **528**, 361–368.
- Qin, H., Li, Z., & Fu, G. (2013) The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, **129**, 577–585.
- Rossman, L. A. (2017) *Storm Water Management Model Reference Manual - Volume II -Hydraulics*.
- Rossman, L. A. (2004) *Storm Water Management Model; User´s manuel; Version 5.0*.
- Rossman, L. A. & Huber, W. C. (2016a) *Storm Water Management Model Reference Manual - Volume I - Hydrology*.
- Rossman, L. A. & Huber, W. C. (2016b) *Storm Water Management Model Reference Manual - Volume III - Water Quality*.
- Scholz, M., Charlesworth, S. M., & Coupe, S. J. (2014) „Drainage Benefits of Porous, Permeable and Pervious Paving“ in C. A. B. A. of Sustainability

- und S. M. C. R. in U. P. Geography (Hrsg.), *Water Resources in the Built Environment*. John Wiley & Sons, Ltd, 302–318. [online] <http://online-library.wiley.com/doi/10.1002/9781118809167.ch23/summary> (Zugegriffen 8. Jänner 2018).
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., & Gustafsson, L.-G. (2008) The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system. *Journal of Hydrology*, **350**(1), 100–113.
- Sieker, F. (Hrsg.) (1996) *Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten: Grundlagen, Leitfaden und Anwendungsbeispiele ; mit 20 Tabellen*, expert-Verl, Renningen-Malmsheim.
- Smart Future Graz | [www.gat.st](http://www.gat.st) (2012) [online] <http://www.gat.st/news/smart-future-graz> (Zugegriffen 10. August 2017).
- Stadtbaudirektion Graz Smart City Graz. [online] <http://www.smartcitygraz.at/> (Zugegriffen 8. August 2017).
- Stadtbaudirektion Graz (2017) Willkommen bei der Stadtbaudirektion - Stadtentwicklung Graz - Stadtentwicklung Graz. [online] <http://www.stadtentwicklung.graz.at/> (Zugegriffen 8. August 2017).
- StadtLABOR Graz (2017) Living Green City Endbericht - Bauteilkatalog.
- United Nations (2005) *World Urbanization Prospects The 2005 Revision*.
- Versini, P.-A., Jouve, P., Ramier, D., Berthier, E., & Gouvello, B. de (2016) Use of green roofs to solve storm water issues at the basin scale – Study in the Hauts-de-Seine County (France). *Urban Water Journal*, **13**(4), 372–381.
- Versini, P.-A., Ramier, D., Berthier, E., & de Gouvello, B. (2015) Assessment of the hydrological impacts of green roof: From building scale to basin scale. *Journal of Hydrology*, **524**, 562–575.
- Vijayaraghavan, K. (2016) Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **57**(Supplement C), 740–752.
- Yuan, F. & Bauer, M. E. (2007) Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, **106**(3), 375–386.
- Zhan, W. & Chui, T. F. M. (2016) Evaluating the life cycle net benefit of low impact development in a city. *Urban Forestry & Urban Greening*, **20**, 295–304.
- Zhang, S. & Guo, Y. (2015) SWMM Simulation of the Storm Water Volume Control Performance of Permeable Pavement Systems. *Journal of Hydrologic Engineering*, **20**(8), 06014010.