



Lena Johnscher, B.Eng

Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung
Auswirkungen auf den urbanen Wasserhaushalt

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geotechnical and Hydraulic Engineering

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

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

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Johannes Leimgruber, BSc

Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau

Graz, November 2016

Kontakt:
Lena Johnscher
lena.johnscher@gmx.de

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene 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

Für das erfolgreiche Gelingen dieser Arbeit, möchte ich zunächst meinem Betreuer und Begutachter Herrn Prof. Dirk Muschalla danken. Von ihm kam der Themenvorschlag für diese Arbeit. Trotz der neuen Herausforderung in dem für mich noch sehr unbekanntem Bereich der Modellierung, hat mich seine Fürsprache und sein Vertrauen letztendlich von der Aufgabe überzeugt. Im Laufe der Arbeit konnte er mir immer wieder mit neuen Anregungen weiterhelfen.

Durch die zusätzliche Unterstützung und wichtigen Hinweise meines Betreuers Johannes Leimgruber, füllte sich die Arbeit Schritt für Schritt mit Inhalt. Außerdem half er mir bei der Einarbeitung, in die für die Modellierung verwendete Software SWMM. Die von Gerald Krebs zur Verfügung gestellten Modelle, die er bereits für seine Dissertation erstellt hatte, erleichterten die weiteren Arbeitsschritte. Während der gesamten Bearbeitungszeit übermittelten mir die beiden die nötigen Informationen, die für das erfolgreiche Simulieren der Testeinzugsgebiete noch fehlten. Ich möchte mich hiermit ganz herzlich für die Hilfe und die gute Betreuung bedanken.

Außerdem möchte ich meinen Eltern und Geschwistern für ihre Unterstützung während der vielen Jahre des Studiums danken. Ohne ihre Hilfe, wäre mir auch das Erlebnis in Graz zu studieren und hier ein neues Zuhause zu finden, verwehrt geblieben. Trotz meiner doch teils spontanen und impulsiven Entscheidungen, hatte ich nie das Gefühl, dass sie an mir zweifeln würden.

Vielen Dank auch an meine „Ersatzfamilie“, bestehend aus meinem Onkel, Tante und meinen drei Cousins, die mir den Start in Graz um Vieles erleichterten.

Weiterer Dank gebührt allen meinen Freunden, die mich bis hierhin begleitet haben. Ich möchte mich bedanken bei Andrea, Jan, Otti, Freunde die trotz der nun doch großen Entfernung, noch ein Teil meines Lebens sind. Ihr gebt mir bei jedem Besuch in Nürnberg das Gefühl, dass ich nie weg war. Vielen Dank für eure treue Freundschaft.

Besonderer Dank gilt auch Bine & Philipp, die mich seit dem 2.Semester in Graz jeden Tag begleiten. Ihr wart in der Zeit Freunde und gleichzeitig Familie.

Vielen Dank an alle weiteren Freunde und Studienkollegen/innen, die ich während meiner Studienzeit kennenlernen durfte. Ihr wart ausschlaggebend für diese unvergessliche Zeit.

Kurzfassung

Die bisherige Siedlungswasserwirtschaft hat bei der Planung der Entwässerungssysteme das Ziel, den Niederschlag möglichst schnell von den Siedlungs- und Verkehrsflächen abzuleiten, um eine Nutzung dieser Flächen bei jeder Witterung zu gewährleisten. In Trenn- und Mischsystemen fließt dabei immer auch ein Großteil nicht oder nur gering verschmutztes Regenwasser mit ab. Das direkte Einleiten des Regenwassers in die Kanalisation führt zu einer Störung des natürlichen Wasserkreislaufes. Der hohe Versiegelungsgrad in Städten verhindert ein Versickern des Niederschlags vor Ort und verschärft die Hochwasserabflüsse. Gleichzeitig wird die Wasserzufuhr in den Grundwasserleiter unterbunden.

Seit einigen Jahren gibt es Alternativen zur Niederschlagswasserbewirtschaftung, die zudem die Wiederherstellung eines natürlichen Wasserkreislaufes versprechen. Mit dem Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftungssysteme wird die Möglichkeit geschaffen, den Niederschlag zu versickern, zu verdunsten, zurückzuhalten und als Brauchwasser zu nutzen oder zeitverzögert abzuleiten. Dadurch werden die Gewässer geschont, die Grundwasserneubildung gesteigert und die biologische Vielfalt gesichert. Das verdunstete Wasser erhöht die Luftfeuchtigkeit, die wiederum die Temperatur senkt und den Staub in der Luft binden kann.

In dieser Arbeit werden die rechtlichen Grundlagen für den Umgang mit Regenwasser und der Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftungssysteme dargelegt. Auf Basis der Wasserbilanz werden Möglichkeiten und Ziele der Regenwasserbewirtschaftung aufgezeigt. Mittels der Software SWMM werden an drei Einzugsgebieten unterschiedlicher Infrastruktur je nach Möglichkeit Regentonnen, Versickerungsgräben, Gründächer und teildurchlässige Bodenbeläge angewendet. Die naturnahen Regenwasserbewirtschaftungssysteme erzielten eine Verbesserung der Wasserbilanz, indem sie den Oberflächenabfluss reduzierten und die Versickerung sowie die Verdunstung steigerten. Die resultierenden Wasserbilanzen und die anschließende Kostenrechnung können als Entscheidungshilfe für den zukünftigen Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen herangezogen werden.

Abstract

The main objective of conventional urban water management is the efficient drainage of stormwater from built up areas to ensure the functionality under all weather conditions. In separated and combined sewer systems a large amount of non-polluted or only slightly polluted stormwater runs off, too. The direct discharge of stormwater into the sewage system affects the natural water cycle. High levels of imperviousness in urban areas prevent the water from infiltrating locally and enhance flooding. At the same time groundwater recharge is reduced.

Since several years, there have been alternatives to conventional stormwater management that aim to restore the natural water cycle. These alternatives, often referred to as Low Impact Development (LID), utilize infiltration, evaporation, retention, stormwater harvesting, and attenuation. As a result, the waterbodies are protected from damage, groundwater recharge increases and the biological diversity is enhanced. The evaporated water increases air humidity, in turn reduces air temperature, and can prevent the dust in the air.

This thesis aims to provide an insight into the legislation of stormwater management and the use of stormwater control systems. Based on the water balance, opportunities and goals of LIDs are explained. By using the Stormwater Management Model (SWMM), rain barrels, vegetative swales, green roofs and permeable pavements were applied to three catchment areas with a varying degree of urbanization. The applied LIDs achieved an improvement of the water balance, by reducing runoff and by increasing infiltration and evaporation. The resulting water balance and the final costs evaluation can be used as a decision support for the future use of LID-based stormwater management.

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Jedoch möchte ich ausdrücklich festhalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für beide Geschlechter zu verstehen sind.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis.....	XII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung	3
2 Rechtliche Grundlagen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung.....	4
2.1 EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL).....	5
2.2 Wasserrechtsgesetz (WRG).....	5
2.3 ÖWAV-Regelblatt 45	7
2.4 DWA-Arbeitsblatt A 138.....	10
2.5 Gelbdruck DWA-A 102	11
3 Die Wasserbilanz	13
3.1 Zusammensetzung der Wasserbilanz	13
3.2 Die Wasserbilanz in urbanen Gebieten	15
4 Die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung	18
4.1 Möglichkeiten der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung	19
4.2 Ziele der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung.....	21
4.2.1 Ökonomische Ziele	21
4.2.2 Wasserhaushaltsbezogene Ziele	23
4.3 Kritische Anmerkungen zur Verwendung naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen.....	35
5 Methodik.....	37
5.1 Bilanzierung dreier Einzugsgebiete	38
5.1.1 Verwendetes Programm SWMM 5.1.....	38
5.1.2 Beschreibung der Einzugsgebiete	39
5.1.3 Simulationsgrundlage	42
5.1.4 Datengrundlage	49

5.1.5	Einfügen der LIDs	51
5.1.6	Definition des Anwendungsbereiches der LIDs.....	61
5.1.7	Datenmodifizierung zur weiteren Auswertung.....	63
6	Ergebnisse	65
6.1	Ergebnisse der Bestimmung des Anwendungsbereiches der LIDs	65
6.2	Ergebnisse der Wasserbilanzen	72
6.2.1	Aufstellung der Wasserbilanzen im Einzugsgebiet 1	72
6.2.2	Aufstellung der Wasserbilanzen im Einzugsgebiet 2	75
6.2.3	Aufstellung der Wasserbilanzen im Einzugsgebiet 3	78
6.3	Ergebnisse der Wirkungsweise	80
7	Diskussion der Ergebnisse.....	81
7.1	Diskussion der Wirkungsweise	81
7.2	Diskussion der prozentualen Änderung.....	83
7.2.1	Einzugsgebiet 1 und 2	85
7.2.2	Einzugsgebiet 3	85
8	Kostenrechnung	87
8.1	Herstellungskosten	87
8.2	Wirtschaftlichkeit.....	91
8.3	Mögliche Kosteneinsparungen	91
9	Schlussfolgerungen, Zusammenfassung und Ausblick	95
	Literaturverzeichnis.....	99
	Anhang A.....	i
A.1.	Ergebnisdaten nach Simulationsdurchlauf	i

Abkürzungsverzeichnis

BMP	best management practice
D	Grundstückzufahrten (Driveways)
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V
E	Evaporation
EPA	US Environmental Protection Agency
ET	Evapotranspiration
EZG	Einzugsgebiet
GOK	Geländeoberkante
GR	Gründach (Green Roof)
GW	Grundwasser
HAD	Hydrologischer Atlas
JDTV	jährlicher durchschnittlicher Tagesverkehr
LfU	Bayrisches Landesamt für Umwelt
LID	low impact development
N-A-Modellierung	Niederschlag-Abfluss-Modellierung
ÖN	Österreichische Norm
ÖWAV	Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband
P	Gehweg (Pavement)
P	Niederschlag (Precipitation)
PL	Parkplatz (parkin lot)
PP	teildurchlässige Fläche (Permeable Pavement)
R	Oberflächenabfluss (Runoff)
RB	Regentonne (Rain Barrel)
ΔS	Speicheränderung
SWMM	storm water management model
VS	Versickerungsgraben (Vegetative Swale)
WRG	Wasserrechtsgesetz
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Bewilligungspflicht beim Einbringen von Regenwasser durch Versickern (OEWAV, 2015)	6
Abbildung 2-2: Schema des Bodenwasserhaushaltes mit Wasserhaushaltsgrößen (DWA, 2016)	12
Abbildung 3-1: Darstellung der Niederschlagsaufteilung in die Bestandteile der Wasserbilanz auf einer natürlichen, durchlässigen Fläche	13
Abbildung 3-2: Vergleich des Abflussverhaltens auf unversiegelten, natürlichen Flächen (links) mit dem auf befestigten Flächen in urbanen Gebieten (rechts) (LfU, 2016)	15
Abbildung 3-3: Abflussverhalten abhängig vom Versiegelungsgrad (Bernard and Tuttle, 1998).....	16
Abbildung 4-1: Die Elemente der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung (LfU, 2016).....	19
Abbildung 4-2: Abflussverhalten einer Flächenversickerung mit teildurchlässiger Pflasterung (angelehnt an (McCutcheon, 2013))	24
Abbildung 4-3: Abflussverhalten einer Versickerungsanlage, hier: Muldenversickerung und Rohr-Rigolen System (angelehnt an (McCutcheon, 2013))	25
Abbildung 4-4: Abflussverhalten eines Gründaches (angelehnt an (Pendl, 2009))	27
Abbildung 4-5: Abflussverhalten technischer Anlagen der Regenwasserbewirtschaftung (links) Fassadenbegrünung, (rechts) Bioretention (angelehnt an (McCutcheon, 2013))	28
Abbildung 4-6: Versickerung und Retention bei einem Rohr-Rigolen-System (angelehnt an (McCutcheon, 2013)).....	30
Abbildung 4-7: Retention von Regenwasser mittels Regentonne (angelehnt an (McCutcheon, 2013))	30
Abbildung 4-8: Wirkung naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen und konventioneller Entwässerung auf den Wasserhaushalt (Sieker, et al., 2009)	32
Abbildung 4-9: Zusammensetzung des Direktabflusses (UCAR, 2016).....	36
Abbildung 5-1: Übersicht von Lahti mit den Einzugsgebieten 1-3 (Googlemaps, Zugriff am 24.7.2016)	40
Abbildung 5-2: Darstellung Einzugsgebiet 1: Bebauungs- und Flächeneinteilungsplan (<i>links</i> : Googlemaps, Zugriff am 24.7.2016, <i>rechts</i> : adaptiert (Krebs, 2016))	40

Abbildung 5-3: Darstellung Einzugsgebiet 2: Bebauungs- und Flächeneinteilungsplan (<i>links</i> : Googlemaps, Zugriff am 24.7.2016, <i>rechts</i> : adaptiert (Krebs, 2016))	41
Abbildung 5-4: Darstellung Einzugsgebiet 3: Bebauungs- und Flächeneinteilungsansicht (<i>links</i> : Googlemaps, Zugriff am: 24.7.2016, <i>rechts</i> : adaptiert (Krebs, 2016))	41
Abbildung 5-5: Ermittlung des abflusswirksamen Niederschlags (Muschalla et al., 2015).....	42
Abbildung 5-6: Schematische Darstellung des Oberflächenabflusses (Christen et al., 2016)	43
Abbildung 5-7: Schema des Infiltrationsvorganges nach Green-Ampt (a) Profil bei Sättigung der oberflächennahen Schicht;(b) Profil nach der „ponding Zeit“ (oberirdischer Abfluss hat begonnen) (Koch, 2003)	44
Abbildung 5-8: Grundwasserkörper in PCSWMM; unterteilt in obere (ungesättigt) und untere (gesättigt) Zone (modifiziert nach (Rossman and Huber, 2016))	45
Abbildung 5-9: „Re-Routing“ nach Huber (2001), Abfluss über unterschiedliche Teilflächen bevor er in die Kanalisation geleitet wird ((Rossmann and Huber, 2016), modifiziert)	49
Abbildung 5-10: gemessene Niederschlagsereignisse im Jahr 2009.....	50
Abbildung 5-11: Teillayer der unterschiedlichen LIDs (x notwendig, o optional) (James et al., 2010).....	52
Abbildung 5-12: LID Control Editor zum Definieren der Eigenschaften (McCutcheon, 2013)	52
Abbildung 5-13: Auszug einer „Reported-Datei“ nach der Modellsimulation in SWMM 5.0	63
Abbildung 6-1: über LIDs entwässerte Teileinzugsflächen im Einzugsgebiet 1, <i>links oben</i> : Gründach, <i>rechts oben</i> : teildurchlässige Flächen, <i>links unten</i> : Versickerungsgraben, <i>rechts unten</i> : Regentonnen	66
Abbildung 6-2: über LIDs entwässerte Teileinzugsflächen im Einzugsgebiet 2, <i>links oben</i> : Gründach, <i>rechts oben</i> : teildurchlässige Flächen, <i>links unten</i> : Versickerungsgraben, <i>rechts unten</i> : Regentonnen	68
Abbildung 6-3: Anwendung der LIDs auf Teileinzugsflächen im Einzugsgebiet 3	70
Abbildung 6-4: Wasserbilanzaufstellung in [mm] und in [%] im Ursprungszustand und im adaptierten Zustand im Einzugsgebiet 1	73
Abbildung 6-5: Änderung der prozentualen Wasserbilanzkomponenten im Einzugsgebiet 1	74

Abbildung 6-6: Wasserbilanzaufstellung in [mm] und in [%] im Ursprungszustand und im adaptierten Zustand im Einzugsgebiet 2	76
Abbildung 6-7: Änderung der prozentualen Wasserbilanzkomponenten im Einzugsgebiet 2	77
Abbildung 6-8: Wasserbilanzaufstellung in [mm] und in [%] im Ursprungszustand und im adaptierten Zustand im Einzugsgebiet 3	79
Abbildung 6-9: Änderung der prozentualen Wasserbilanzkomponenten im Einzugsgebiet 3	79
Abbildung 6-10: Änderung der Wasserbilanz in [mm] je 100 m ² entwässerter Fläche je LID.....	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Auflistung und Einteilung der Niederschlagsabflüsse in Abhängigkeit von der Herkunftsfläche (OEWAV, 2015).....	8
Tabelle 2-2:	Herkunftsflächen und die damit verbundenen Entwässerungsanlagen (OEWAV, 2015).....	9
Tabelle 4-1:	Anlagen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung (Muschalla et al., 2014).....	20
Tabelle 4-2:	Auswirkungen naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen auf die Wasserbilanz (Literaturrecherche). Prozentanteile an Oberflächenabfluss, Verdunstung, Versickerung, GW-Neubildung, und Retention vom Gesamtniederschlag (Niederschlag = 100%).....	33
Tabelle 5-1:	Bodenparameter für verschiedene Bodentypen (Rawls et al., 1983).....	46
Tabelle 5-2:	Grundwasser Parameter.....	47
Tabelle 5-3:	Grundwasserhöhen	48
Tabelle 5-4:	Einflussfaktoren der Niederschlagswasserbewirtschaftung (Assinger, 2012)	53
Tabelle 5-5:	Wahl der LID-Parameter	55
Tabelle 6-1:	Flächen und Anzahl der vorhandenen Dächer und der über ein Gründach zu entwässernde Dächer im EZG 1	67
Tabelle 6-2:	Flächen und Anzahl der Parkflächen und Gehwege und die, die über eine teildurchlässige entwässert wurden im EZG 1	67
Tabelle 6-3:	Flächen und Anzahl der Parkplätze und die, die über Versickerungsgräben entwässerte Parkflächen im EZG 1	67
Tabelle 6-4:	Flächen und Anzahl der vorhandenen Dächer und der über ein Gründach zu entwässernde Dächer im EZG 2	69
Tabelle 6-5:	Flächen und Anzahl der Parkflächen und Gehwege und die, die über eine teildurchlässige entwässert wurden im EZG 2	69
Tabelle 6-6:	Flächen und Anzahl der Parkplätze und die, die über Versickerungsgräben entwässerte Parkflächen im EZG 2.....	69
Tabelle 6-7:	Flächen und Anzahl der vorhandenen Dächer und der über ein Gründach zu	71
Tabelle 6-8:	Flächen und Anzahl der Grundstückzufahrten und die, die über eine teildurchlässige entwässert wurden im EZG 3	71
Tabelle 7-1:	Zusammenfassung der Ergebnisse: Änderung der prozentualen Wasserbilanzkomponenten in den Einzugsgebieten 1-3	84
Tabelle 8-1:	Übersicht der Kosten für Material, Herstellung sowie Wartung und Pflege für naturnahe Regenwasserbewirtschaftungssysteme, und für eine Beton- oder Asphaltfläche	88

Tabelle 8-2:	Kosten für Herstellung, Wartung und Pflege der naturnahen Regenwasserbewirtschaftungssysteme in den Einzugsgebieten 1-3 über eine Nutzungsdauer von 30 Jahren	90
Tabelle 8-3:	Kosten für Herstellung und Betrieb über 30 Jahre, abzüglich der Niederschlagswassergebühr von 1,30 €/m ²	93

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Das ursprüngliche Prinzip der Wasserentsorgung bildet das „End-of-pipe¹“-System (Sieker et al., 1996), bei dem das Wasser möglichst schnell, meist unterirdisch, in das Transportsystem aus Rohren und Kanälen eingeleitet und anschließend bis zu einem Vorfluter (Gewässer) oder einer Kläranlage geführt wird. Für stark verunreinigtes Wasser bzw. Abwasser aus Industrie und Haushalten ist diese Entsorgung beizubehalten und entspricht dem Stand der Technik. Bei der Regenwasserbewirtschaftung ist allerdings seit einigen Jahren ein Wandel im Umgang mit dem Niederschlagswasser zu erkennen (Sieker et al., 1996).

Das Mischwassersystem, bei dem das Regenwasser zusammen mit dem Schmutzwasser über die Kanalisation abgeführt wird, bringt einige Probleme mit sich. Hierbei ist zunächst anzuführen, dass eine Kläranlage bzw. das gesamte Wasserentsorgungsnetz zu einem Zeitpunkt ausgelegt und gebaut wird, an dem das Siedlungsgebiet eine bestimmte Größe und Einwohnerzahl aufweist. Sobald sich das Siedlungsgebiet vergrößert oder die Abflussmenge durch die wachsende Bevölkerung erhöht, ist die Stadt gezwungen, das Entwässerungssystem zu erweitern, was erheblichen baulichen sowie finanziellen Aufwand mit sich bringt (Assinger, 2012).

Durch das Fehlen versickerungsfähiger Flächen kann das Regenwasser nur an der Oberfläche abfließen und verschärft die Hochwasserabflüsse. Große Wassermengen in der Kanalisation können zu einer Überlastung der Mischwasserüberläufe und einem direkten Schadstoffeintrag in die Gewässer durch das ungereinigte Niederschlagswassers führen (Sieker et al., 1996).

Zudem ist Wasser ein wichtiger Rohstoff, dessen nachhaltiger Umgang anzustreben ist. Nicht oder nur gering verschmutztes Regenwasser kann gesammelt und anschließend zur Bewässerung oder als Brauchwasser genutzt werden. Das sonst dafür genutzte Trinkwasser kann eingespart und die durch die Trinkwassergebühr anfallenden Kosten verringert werden.

Für den Menschen bedeutet ein zu geringes Wasservorkommen in den Städten eine Minderung des Wohlbefindens. In heißen Sommermonaten heizen sich asphaltierte und betonierte Flächen schneller auf, als das bei einer Wiese der Fall wäre. Die abgestrahlte Wärme von Gebäuden und Verkehrsflächen führt zu einer Erhöhung der Temperatur in den Städten im Vergleich zu den Temperaturen auf dem Land unter gleichen klimatischen Bedingungen. Der Grund liegt darin, dass Grünflächen die Sonnenenergie nicht in Wärme umwandeln, sondern zur Photosynthese und Verdunstung des aufgenommenen Regenwassers verbrauchen. Verdunstetes Wasser erhöht die Luftfeuchtigkeit, die wiederum die Temperatur senkt und zusätzlich die

¹ Ursprüngliche Technik der Abwasserreinigung. Dadurch wird das entstandene Abwasserproblem nicht am Ort der Entstehung behandelt, sondern es wurde versucht kurz vor der Einleitung in ein Gewässer das Problem zumeist zentral zu lösen.

Staubbelastung in den Städten herabsetzt (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2010). Die Schaffung von Grünflächen in urbanen Gebieten kann damit den sogenannten „Heat Island“- Effekt reduzieren.

Ein weiterer Gesichtspunkt ist, dass durch das sofortige Abführen von nicht oder nur leicht verschmutzten Regenwasser in die Kanalisation, das Wasser dem natürlichen Wasserkreislauf entzogen wird. Das natürliche Gleichgewicht der Wasserbilanz, das sich aus Verdunstung, Versickerung und Oberflächenabfluss zusammensetzt, ist verschoben. Des Weiteren sinken die Grundwasserneubildungsraten (Assinger, 2012) sowie gegebenenfalls die notwendige Bodenfeuchte für das Pflanzenwachstum (Siegele and Zingerle, 2013). Grünflächen bilden durch Mulden und durch das Speicherpotential des Bodens wichtige Retentionsräume, die in den Städten vermehrt fehlen. Retention und eine zeitverzögerte Ableitung von Niederschlagswasser können bei der Abflachung von Abflussspitzen helfen (Sieker et al., 1996).

Die Ressource Wasser wird durch das weitere Versiegeln der Flächen in urbanen Gebieten immer mehr aus dem Stadtbild verdrängt. Seit einigen Jahren wurden deshalb neue Alternativen zur Regenwasserbewirtschaftung entwickelt, die sich an einer Annäherung an eine Wasserbilanz, wie sie sich in einem unbebauten Einzugsgebiet zusammensetzen würde, versuchen.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen naturnaher Regenwasserbewirtschaftung auf die Wasserbilanz heraus zu arbeiten. Ein nachhaltiger Umgang mit Regenwasser und dessen Zurückführen in den Wasserkreislauf sind hierfür ausschlaggebend. Es werden bereits realisierte Entwässerungsanlagen aufgezeigt und deren Wirkungsweise hinsichtlich einer Annäherung an einen natürlichen Wasserhaushalt dargelegt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden anhand von drei Einzugsgebieten unterschiedliche Möglichkeiten der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung zunächst modelliert und dann über den Zeitraum eines Jahres simuliert. Anschließend erfolgt eine Wasserbilanzgegenüberstellung zwischen dem Ausgangszustand mit der bestehenden Entwässerung über die Kanalisation und dem modifizierten Zustand mit naturnahen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen. Zusammenfassend sind folgende Punkte Inhalt dieser Arbeit:

- Rechtliche Grundlagen für den Umgang mit Regenwasser
- Ziele und Auswirkungen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung
- Die Wasserbilanz und welches unterstützende Potential in der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung liegt
- Bilanzierung dreier Einzugsgebiete unter den Gesichtspunkten:
 - Wasserbilanzvergleich zwischen dem Ausgangszustand und dem mit naturnaher Regenwasserbewirtschaftung modifiziertem Zustand
 - Berechnung der Wirkungsweise der verwendeten Regenwasserbewirtschaftungssysteme (Versickerungsflächen, Dachbegrünung, Regenwassernutzung) auf die Wasserbilanz
 - möglicher Einsatzbereich von vier gewählten Regenwasserbewirtschaftungssystemen in drei verschiedenen, siedlungsstruktureller Einzugsgebiete
- Abschließende Kostenaufstellung für den Einbau und Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen und der möglichen Einsparung der Trink- und Abwassergebühren

2 Rechtliche Grundlagen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung

Die Niederschläge aus bebauten und unbebauten Gebieten werden bei Starkregenereignissen in der Regel mit dem Ziel, das Wasser möglichst rasch von den Nutzflächen abzuleiten, über das Kanalnetz abgeführt (Sieker et al., 1996).

Der Einsatz alternativer Maßnahmen im Umgang mit Niederschlagswasser, zu denen die Entsiegelung befestigter Flächen, das Abkoppeln von Dachflächen, die Regenwassernutzung und die dezentralen Versickerungsanlagen, wie Flächen-, Mulden-, Rigolen- und Schachtversickerungen zählen, bieten hier geeignete und notwendige Möglichkeiten.

In Deutschland fällt neben dem anfallenden Schmutzwasser aus Haushalten und Industrie auch gesammeltes Niederschlagswasser, das von bebauten oder befestigten Flächen abfließt, gemäß §2 Abs.1 unter das Abwasserabgabengesetz (AbwAG, 1976). In Österreich wird das Einleiten von Niederschlagswasser, welches mit Schadstoffen von der Landoberfläche eines Einzugsgebietes belastet ist, nach dem Abwasseremissionsverordnung geregelt. Vor dem Einleiten in ein Fließgewässer sind belastete Niederschlagswässer zu reinigen, wenn dadurch eine Veränderung der Wasserbeschaffenheit zu erwarten ist (§3 Abs.4) (Bundeskanzleramt der Republik Österreich, 1996). Der Umgang und die Bewirtschaftung von Niederschlagswässern sind somit an bestimmte rechtliche Grundlagen gebunden.

Für Bau und Planung von Regenwasserbewirtschaftungsanlagen sowie den Schutz und Erhalt der Wasserqualität von Gewässern und Grundwasser sind im Folgenden die aufgeführten Regelwerke maßgebend:

- EU-Wasserrahmenrichtlinie
- Wasserrechtsgesetz
- ÖWAV-Regelblatt 45
- DWA-Arbeitsblatt A 138
- Gelbdruck DWA A 102

Auf die bauliche Ausführung von Versickerungsanlagen wird in dieser Arbeit nur am Rande eingegangen. Grundsätzlich sind in Österreich für Auslegung, Berechnung und Ausführung von Versickerungsanlagen nachfolgende Regelwerke zu befolgen:

- ÖN B2506-1 „Regenwassersickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen – Anwendung, hydraulische Bemessung, Bau und Betrieb“
- ÖN B2506-2 „Regenwassersickeranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen – Qualitative Anforderung an das zu versickernde Regenwasser, Bemessung, Bau und Betrieb von Reinigungsanlagen“

2.1 EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL)

Die 2000 veröffentlichte Wasserrahmenrichtlinie (Wasserrahmenrichtlinie, 2000) legt die Umweltziele für europäische Oberflächengewässer, Grundwasser und Meere fest. Sie fordert den Schutz aller Gewässer sowie eine Verbesserung des ökologischen und chemischen Zustandes, mit Erreichen eines „guten Zustandes“ bis 2015 und die Vermeidung einer Verschlechterung des Wasserhaushalts. Aus dieser Forderung heraus ist die Versickerung von Regenwasserabflüssen der Versiegelung bzw. dem Bau von konventionellen Abflusssystemen vorzuziehen, um sich dem natürlichen Wasserhaushalt anzunähern.

Die WRRL beschreibt die konkreten Ziele wie folgt:

- Ein "guter ökologischer Zustand" und ein guter chemischer Zustand für die natürlichen Oberflächengewässer (Art.4.1 WRRL),
- ein gutes ökologisches Potenzial und guter chemischer Zustand für künstliche und natürliche, aber erheblich veränderte Gewässer (Art.4.1 WRRL) sowie
- ein guter chemischer und mengenmäßiger Zustand des Grundwassers (Art.4.1 WRRL).

Bezüglich des „guten Zustandes“ des Grundwassers sind folgende Anforderungen gebunden:

- einschlägige Überwachung des Grundwassers
- festgesetzte Schwellenwerte dürfen an keiner Messstelle des Grundwassers überschritten werden
- sind Schwellenwerte überschritten, müssen geeignete Untersuchungen durchgeführt werden.

Die Zulässigkeit des Einleitens von Niederschlagswasser in Oberflächengewässer oder in den Grundwasserleiter ist folglich an die mitgeführten Schadstoffe und deren Gehalt im Niederschlag gebunden.

Die zu überprüfenden Parameter zum Erreichen und Überwachen des „guten chemischen Zustands“ und „mengenmäßigen Zustands“ werden in Anhang V der Richtlinie definiert.

Um einen guten Zustand des Grundwasserkörpers zu erreichen und zu erhalten, werden Bewirtschaftungspläne verlangt, die auch die Bewilligungspflicht für das direkte oder indirekte Einleiten von Schadstoffen in das Grundwasser beinhalten.

2.2 Wasserrechtsgesetz (WRG)

Dieses Bundesgesetz bildet die Grundlage für alle Wasserrechtsbescheide und Verordnungen in Österreich. Das Wasserrechtsgesetz (Bundeskanzleramt der Republik Österreich, 2013) unterscheidet öffentliche und Privatgewässer, wobei Privatgewässer nach §3 Abs.1, wenn nicht anders rechtlich erworben, dem Grundeigentümer ge-

hören. Dazu zählen auch unterirdische Gewässer und auf dem Grundstück gesammeltes Niederschlagswasser. Das Wasserrechtsgesetz bildet die Grundlage für die Bewirtschaftung von Gewässern und wasserwirtschaftlicher Planungen. Ebenso wie die WRRL spricht es sich für die nachhaltige Bewirtschaftung, den Erhalt und der Vermeidung einer Verschlechterung des ökologischen und chemischen Zustandes der Gewässer aus. Außerdem soll das Grundwasser jederzeit Trinkwasserqualität aufweisen.

§30 befasst sich mit der Reinhaltung und dem Schutz aller Gewässer und des Grundwassers im Rahmen des öffentlichen Interesses.

Zusammenfassend behandelt es drei große Themenkreise:

- die Benutzung der Gewässer
- den Schutz und die Reinhaltung der Gewässer
- den Schutz vor den Gefahren des Wassers

Das Einleiten von Stoffen in den Grundwasserleiter ist erlaubt, wenn eine Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu erwarten ist.

Versickerungsanlagen unterliegen demnach der Bewilligungspflicht, wenn durch das Einbringen von Stoffen in festem, flüssigem oder gasförmigem Zustand Gewässer unmittelbar oder mittelbar in deren Beschaffenheit (§30 Abs.3) beeinträchtigt werden.

Ausnahmen bilden der Gemeingebrauch (§8) sowie die ordnungsgemäße land- und forstwirtschaftliche Bodennutzung (§32 Abs.8), solange von ihnen nur eine geringfügige Einwirkung ausgeht. Dies gilt bis zum Beweis des Gegenteils nicht als Beeinträchtigung (Larcher, 2009). Abbildung 2-1 gibt einen Überblick, unter welchen Umständen das Versickern von Niederschlagsabflüssen bewilligungspflichtig ist.

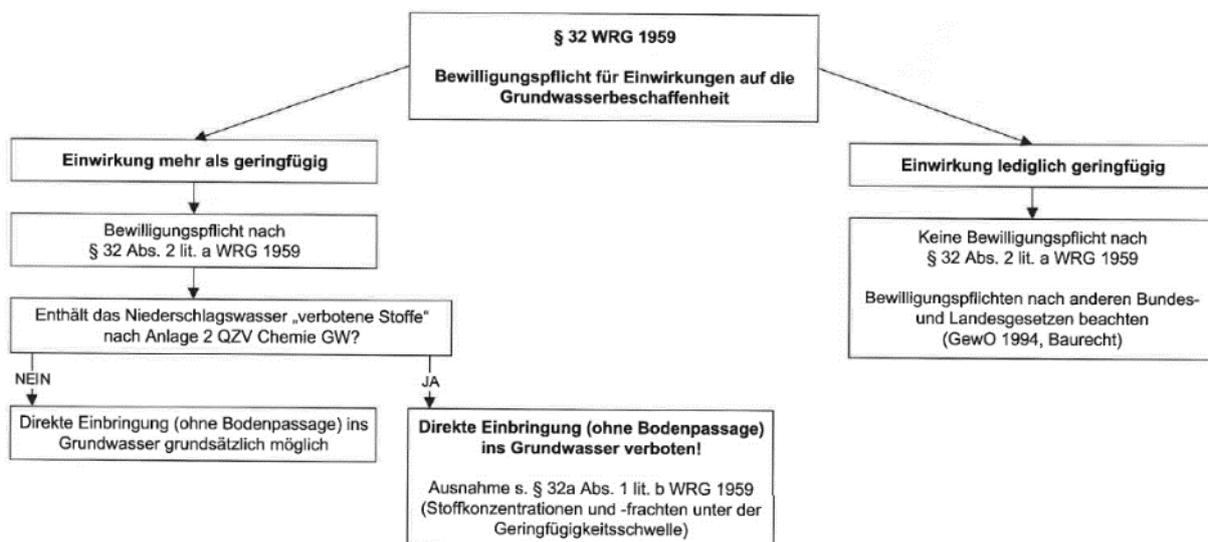


Abbildung 2-1: Bewilligungspflicht beim Einbringen von Regenwasser durch Versickern (OEWA, 2015)

2.3 ÖWAV-Regelblatt 45

Das 2015 vom österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverband verfasste Regelblatt 45 (ÖEWAV, 2015) legt den Stand der Technik für Oberflächenentwässerungen durch Versickerung zum nachhaltigen Schutz des Grundwassers fest. Es richtet sich an Behörden und Personenkreise, die sich mit der Planung und dem Bau von Maßnahmen zur Vermeidung oder Reduzierung von Schadstoffeinträgen in das Grundwasser beschäftigen.

Aufgrund der sinkenden Grundwasserneubildung in Siedlungsgebieten ist es laut ÖWAV-Regelblatt 45 anzustreben, dass unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten das Niederschlagswasser durch Versickerung in den Grundwasserleiter eingebracht wird.

Es werden Niederschlagsabflüsse von verschiedenen Herkunftsflächen, wie beispielsweise Dachflächen, befahrene Flächen und Parkflächen, kategorisiert. Dabei wurde bei den Untersuchungen vor allem der Bestandteil an Schadstoffen mit festgelegten Schwellenwerten aus der Qualitätszielverordnung Chemie GW (BGBl.II.98/2010, 2010) beachtet, ab der eine Versickerung eine Verschlechterung des Zustandes bewirkt. Hinzukommen die aus der Atmosphäre herausgewaschenen Staube und Gase sowie der Anteil an Tierexkrementen (z. B. durch Tauben) und der damit steigende Phosphoranteil und die mögliche bakterielle Belastung. Das direkte Einbringen, ohne Versickerungspassage, ist für bestimmte Stoffe, die in der Qualitätszielverordnung Chemie GW festgelegt sind, verboten. Die Stoffe bzw. Stoffgruppen sind in Anlage 2 der Qualitätszielverordnung Chemie GW aufgeführt, wobei vor allem Mineralöle, Kohlenwasserstoffe, PAK und Cadmiumverbindungen zu nennen sind (ÖEWAV, 2015).

Tabelle 2-1 zeigt die unterschiedlichen Flächentypen F1 bis F5, abhängig von möglichen Belastungen mit Inhaltstoffen. Tabelle 2-2 bewertet mögliche Entwässerungssysteme. Je nach Herkunftsfläche des Niederschlages ist eine bestimmte Reinigungsleistung der Anlage erforderlich.

Tabelle 2-1: Auflistung und Einteilung der Niederschlagsabflüsse in Abhängigkeit von der Herkunftsfläche (OEWA, 2015)

Flächentyp	Art der Fläche
F1	<ul style="list-style-type: none"> • Dachflächen (Glas-, Grün-, Kies- und Tondächer, zementgebundene und kunststoffbeschichtete Deckungen), gering verschmutzt. • Alle anderen Dachflächenmaterialien und Terrassen (gering verschmutzt) mit einem Gesamtflächenanteil nicht größer als 200 m² projizierter Fläche. • Rad- und Gehwege. • Nicht befahrene Vorplätze und Zufahrten für Einsatzfahrzeuge.
F2	<ul style="list-style-type: none"> • Dachflächen und Terrassen, gering verschmutzt, die nicht dem Flächentyp F1 zugeordnet werden können. • Parkflächen für Pkw nicht größer als 20 Parkplätze bzw. 400 m² (Abstellflächen inkl. Zufahrt). • Parkflächen für Pkw größer als 20 Parkplätze und nicht größer als 75 Parkplätze bzw. 2.000 m² (Abstellflächen inkl. Zufahrt) mit nicht häufigem Fahrzeugwechsel (Wohnhausanlagen, Mitarbeiterparkplätze bei Betrieben, Park-and-Ride-Anlagen und Parkplätze mit ähnlich geringem Fahrzeugwechsel). • Fahrflächen mit einer JDTV bis 500 Kfz/24 h bzw. Gleisanlagen bis 5.000 Bto mit Ausnahme der freien Strecke.
F3	<ul style="list-style-type: none"> • Parkflächen für Pkw größer als 20 Parkplätze und nicht größer als 75 Parkplätze bzw. 2.000 m² (Abstellflächen inkl. Zufahrt) mit häufigem Fahrzeugwechsel (z. B. Kundenparkplätze von Handelsbetrieben, wie z. B. Einkaufsmärkte). • Parkflächen für Pkw größer 75 Parkplätze und nicht größer als 1.000 Parkplätze. • Fahrflächen mit einer JDTV von 500 bis 15.000 Kfz/24 h bzw. Gleisanlagen größer 5.000 Bto mit Ausnahme der freien Strecke. • Park- und Stellflächen für Lkw, sofern eine wesentliche Verschmutzung des Niederschlagswassers durch Emissionen aus den Fahrzeugen (z. B. Verluste von Kraft- und Schmierstoffen, Frostschutzmitteln, Flüssigkeiten aus Brems- oder Klimatisierungssystemen etc.) mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann. • Lager- und Manipulationsflächen sowie Umschlagplätze (Terminals), sofern eine wesentliche Verschmutzung des Niederschlagswassers durch Ladegutverlust oder Manipulation (Tätigkeiten auf diesen Flächen) mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann.
F4	<ul style="list-style-type: none"> • Parkflächen für Pkw größer 1.000 Parkplätze (z. B. Einkaufszentren). • Betriebliche Fahrflächen mit einer JDTV über 15.000 Kfz/24 h (Straßen mit in der Regel mehr als zwei Fahrstreifen). • Betriebliche Fahrflächen, Plätze und Flächen mit starker Verschmutzung z. B. durch Landwirtschaft, Fuhrunternehmen und Märkte.
F5	<ul style="list-style-type: none"> • Park- und Stellflächen, sofern eine wesentliche Verschmutzung des Niederschlagswassers durch Emissionen aus den Fahrzeugen nicht mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann. • Lager- und Manipulationsflächen sowie Umschlagplätze (Terminals), sofern eine wesentliche Verschmutzung des Niederschlagswassers durch Ladegutverlust oder Manipulation (Tätigkeiten auf diesen Flächen) nicht mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann. • Dachflächen, stark verschmutzt (z. B. in Industriezonen mit hohen Emissionen). • Sonstige Flächen, stark verschmutzt.

Tabelle 2-2: Herkunftsflächen und die damit verbundenen Entwässerungsanlagen (OE-WAV, 2015)

FLÄCHENTYP gemäß Tab. 2	Systeme mit mineralischem Filter		Systeme mit Rasen			Systeme mit Bodenfilter		Systeme mit technischem Filter		
	Sickerschacht	Unterirdischer Sickerkörper (Rigolenversickerung)	Rasenfläche	Rasenmulde	Rasenbecken	Bodenfilter in Mulden-/Rinnenform	Bodenfilter in Beckenform	Sickerschacht mit technischem Filter	Technischer Filter in Mulden-/Rinnenform	Technischer Filter in Beckenform
F1	M	M	x	x	x	x	x	x	x	x
F2	-	-	x	x	x	x	x	M	x	x
F3	-	-	M ²⁾	-	-	x	x	i. B.	M	M
F4	-	-	-	-	-	x	x	i. B.	M	M
F5	-	-	-	-	-	i. B.	i. B.	i. B.	i. B.	i. B.

Empfohlen (x): Die Anwendung dieser Entwässerungssysteme ist für den jeweiligen Flächentyp aus Sicht des Grundwasserschutzes anzustreben

Zulässig (M): Diese Entwässerungssysteme stellen aus Sicht des Grundwasserschutzes die Mindestanforderung dar und können für den jeweiligen Flächentyp zur Anwendung kommen

Zulässig nach individueller Beurteilung (i.B.): Diese Entwässerungssysteme können den jeweiligen Flächentyp nur dann zur Anwendung kommen, wenn ein gesonderter Nachweis der erforderlichen Reinigungsleistung vorliegt.

Nicht zulässig (-): Diese Entwässerungssysteme dürfen für den jeweiligen Flächentyp nicht zur Anwendung kommen

²⁾ gilt bei Fahrflächen mit einer JDTV von 500 bis 15.000 Kfz/24h, mit einer Entwässerung flächig über eine Böschung

Demnach ist beim Versickern in einen Grundwasserleiter auf eine ausreichende Reinigung des Regenwassers mittels Bodenpassage oder Anlagen für eine ausreichende Vorreinigung zu achten. Mögliche Reinigungsverfahren in Abhängigkeit von der Qualität des Niederschlags bezüglich des Schadstoffgehalts werden im Regelblatt 45 ebenfalls beschrieben.

2.4 DWA-Arbeitsblatt A 138

In Deutschland wurde für die bauliche Ausführung naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen das von der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. herausgegebene Arbeitsblatt DWA-A 138 (DWA, 2005) entwickelt.

Das DWA-A 138 befasst sich mit „*Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser*“. Hierbei unterscheidet das Regelwerk Niederschlagsabflüsse von durchlässigen und undurchlässigen Flächen sowie die Abflüsse von Dach- und Verkehrsflächen. Das Arbeitsblatt empfiehlt zur Ableitung des Niederschlagswassers statt einer Einleitung in die Kanalisation, das Versickern in den anstehenden Boden und sieht in der „Rückführung des Niederschlagswassers in den natürlichen Wasserkreislauf ein ökologisch, wasserwirtschaftlich und technisch sinnvolles Ziel.“

Nach DWA-A 138 werden die Niederschlagsabflüsse nach drei Verschmutzungsgraden, hinsichtlich ihrer Stoffkonzentration unterschieden:

- unbedenklich,
- tolerierbar,
- nicht tolerierbar.

Als *unbedenklich* bezeichnete Niederschläge dürfen ohne Vorbehandlungsmaßnahmen durch die ungesättigte Zone versickert werden, da von einer so geringen Schadstoffbelastung ausgegangen wird, dass keine Beeinträchtigung des Grundwassers angenommen wird.

Tolerierbare Abflüsse können nach ausreichender Vorbehandlung oder geeigneter Reinigungsprozesse im Untergrund in einer Versickerungsanlage versickert werden. Dabei kann das Durchlaufen einer Oberbodenzone je nach Beschaffenheit als ausreichender Reinigungsschritt gesehen werden.

Nicht tolerierbare Niederschlagsabflüsse dürfen nicht ohne Vorbehandlung versickert werden und sollten in das Kanalnetz eingeleitet werden (DWA, 2005).

Im Vordergrund für die Versickerungserlaubnis von Regenwasser steht der Schutz des Grundwassers. Regenwasser darf versickert werden, wenn keine Beeinträchtigung für das Grundwasser besteht. Voraussetzung hierfür ist entweder eine geringe Belastung des zu versickernden Wassers oder eine ausreichende Reinigung, z. B. durch eine Oberbodenschicht.

Die Oberbodenschicht ist dabei so auszubilden, „dass sämtliche in den Sickerraum der Anlage eingebauten Materialien im Dauerbetrieb der Anlage keine nachteiligen Veränderungen des Sicker- und Grundwassers hervorrufen können“ (DWA, 2005).

Dabei sind zum Schutz von Boden und Grundwasser vor allem die Durchlässigkeit, Mächtigkeit sowie die chemische, physikalische oder biologische Leistungsfähigkeit des Sickerraumes ausschlaggebend.

Für die wirtschaftliche Entwässerung sieht das Regelblatt einen relevanten Durchlässigkeitsbeiwert k_f etwa in einem Bereich von 1×10^{-3} bis 1×10^{-6} m/s.

Die mit dem Wasser in den Boden eingebrachten Schadstoffe werden durch chemische und biologische Abbauprozesse entfernt. Das Filtrationspotential des Bodenkörpers hängt vorwiegend von der Körnung und vom vorhandenen pH-Wert ab. Bei einem pH-Wert zwischen 6 und 8 können Schwermetalle am effektivsten gebunden werden (Bundesverband Boden, 1999).

2.5 Gelbdruck DWA-A 102

Der im April 2016 erarbeitete Gelbdruck des DWA-A 102 (DWA, 2005) gilt als Planungshilfe und soll eine Auswahl standortgerechter Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung ermöglichen. Als vorrangiges Ziel beschreibt es den Gewässerschutz bezogen auf die Regenwasserabflüsse in Siedlungsgebieten. Das Arbeitsblatt setzt zwei Zielgrößen bei der Bewirtschaftung von Regenwasserabflüssen fest:

- die *hydrologische* Zielgröße im Sinne einer Annäherung an einen natürlichen Wasserhaushalt,
- die *stoffbezogene* Zielgröße, die sich auf die Schadstoffbelastung des Niederschlagsabflusses bezieht.

Die Bewertung der Verschmutzung von Niederschlagsabflüssen von bebauten und befestigten Flächen erfolgt auf der Grundlage des Stoffaufkommens unterschiedlicher Herkunftsflächen. Hierzu werden die Belastungen in drei Kategorien unterteilt:

- Belastungskategorien I (gering belastetes Niederschlagswasser),
- Belastungskategorie II (mäßig belastetes Niederschlagswasser)
- Belastungskategorie III (stark belastetes Niederschlagswasser).

In die Belastungskategorien fließen vorrangig die Kriterien Flächennutzung und Harvarierisiko (z. B. Ölnfälle, Brandfälle mit belastetem Löschwasser, Fehleinschüttungen) ein. Um eine Einleitung in ein Oberflächengewässer oder ein Versickern ins Grundwasser zu ermöglichen, werden nötige Behandlungsmaßnahmen für mäßig bis stark belastete Niederschlagsabflüsse aufgezeigt.

Unter Berücksichtigung der WRRL und des WHG sollen Regenwasserabflüsse getrennt vom Schmutzwasser abgeführt und behandelt werden. Das Arbeitsblatt bezieht sich in seinen Regelungen sowohl auf das Misch- wie auch auf das Trennsystem.

Ebenso sieht es die „Veränderungen des örtlichen Wasserhaushaltes in mengenmäßiger und stofflicher Hinsicht“ als Emissionskriterium. Als Zielgrößen zum Erhalt des

Wasserhaushalte (s. Abbildung 2-2) gelten die Bestandteile Grundwasserneubildung, Verdunstung (Evaporation, Transpiration, Interzeptionsverdunstung) und Oberflächenabfluss (beinhaltet auch den Zwischenabfluss). Diese werden im bebauten sowie im unbebauten Zustand verglichen. Als unbebauter Zustand gilt die nächstliegende unbebaute Kulturfläche.

Das Arbeitsblatt spricht sich für den Erhalt der Vegetation und Flächenversickerungen, die nach DWA-A 138 auszuführen sind, aus, um den Oberflächenabfluss zu reduzieren und die Zielgrößen zu steigern.

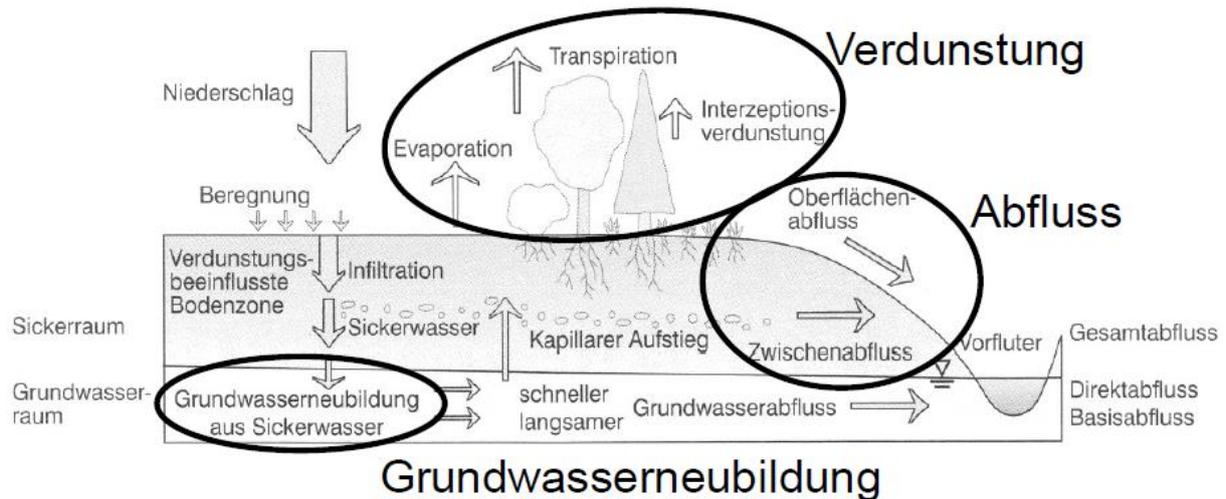


Abbildung 2-2: Schema des Bodenwasserhaushaltes mit Wasserhaushaltsgrößen (DWA, 2016)

Das Arbeitsblatt beinhaltet Berechnungsgrundlagen und Eingangsgrößen zum lokalen Wasserhaushalt und Stoffaustrag aus Niederschlagswässern.

Bei der Umsetzung der Maßnahmen sollen ökologische, technische und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden, um eine Annäherung an den natürlichen Wasserhaushalt zu erzielen.

3 Die Wasserbilanz

Mit der Einführung der Regenwasserbewirtschaftung rückt neben dem Ziel einer komfortablen Entwässerung der Erhalt eines natürlichen Wasserhaushalts in den Vordergrund. Immer mehr Regelwerke sprechen sich unter dem Gesichtspunkt einer geordneten Wasserwirtschaft für den Erhalt des natürlichen Wasserkreislaufes aus (OEWAV, 2015). Ziel ist eine gute Annäherung an den un bebauten Zustand und der damit ursprünglichen Wasserbilanz.

3.1 Zusammensetzung der Wasserbilanz

Die Wasserbilanz setzt sich aus den Komponenten Niederschlag, Versickerung, Speicherung bzw. Retention sowie der Evapotranspiration, das die Verdunstung vom Boden (Evaporation) als auch die Verdunstung von Pflanzen (Transpiration) einschließt, zusammen (s. Abbildung 3-1). Die Wasserbilanz kann mit folgender Formel beschrieben werden:

$$P = R + ET \pm \Delta S$$

Gleichung 2-1

mit:

P: Niederschlag (Precipitation), *R*: Oberflächenabfluss (Runoff), *ET*: Evapotranspiration, ΔS : Speicheränderung (Storage)

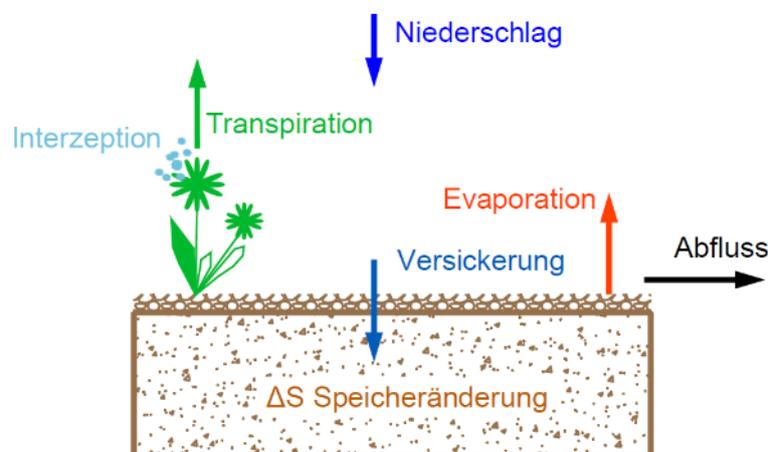


Abbildung 3-1: Darstellung der Niederschlagsaufteilung in die Bestandteile der Wasserbilanz auf einer natürlichen, durchlässigen Fläche

R: Oberflächenabfluss

Der Oberflächenabfluss ist der Anteil des Niederschlags, der weder versickert noch verdunstet wird. Zum Oberflächenabfluss kommt es außerdem, wenn der Boden bereits gesättigt ist und kein weiteres Wasser aufnehmen kann.

ET: Verdunstung/Evapotranspiration

Die Verdunstung, wie sie in der Wasserbilanz verstanden wird, setzt sich aus zwei Teilen zusammen (s. Abbildung 3-1): zum einen aus dem Anteil der Verdunstung von der Boden- und Wasseroberfläche, die als Evaporation bezeichnet wird, zum anderen der Teil, der bei Bäumen und anderen Pflanzen über die Blätter an die Atmosphäre abgegeben wird. Diese Art der Verdunstung wird als Transpiration bezeichnet. In Fachkreisen werden diese beiden Bestandteile der Verdunstung unter dem Begriff der Evapotranspiration zusammengefasst.

 ΔS : Speicheränderung/Retention

Unter der Speicherung und Retention wird das zeitweise Zurückhalten und die mögliche gedrosselte Ableitung des Niederschlags verstanden. Im natürlichen Zustand geschieht das durch das Versickern des Regenwassers in den Boden und dessen Speicherkapazität abhängig vom Porenanteil. Zusätzliche Vertiefungen im Gelände, wie Mulden und Gräben, können Wasser sammeln und somit zurückhalten, um es anschließend zu versickern. Einen zusätzlichen Rückhalt bietet die Interzeption. Der Niederschlag bleibt an der Pflanzenoberfläche haften und kann von dort aus verdunsten oder zeitverzögert auf den Boden gelangen.

Versickerung/Infiltration

Als Infiltration bezeichnet man das Eindringen des Niederschlagwassers von der Oberfläche in den Boden. Die Infiltrationsrate ist zu Beginn abhängig von der Bodenbenetzung, der Vegetation und den Kapillarkräften des Untergrundes (Dyck and Peschke, 1995). Durch die Versickerung des Niederschlags wird die Anreicherung des Grundwassers gewährleistet. Schließlich stellt das Grundwasservorkommen auch die Trinkwasserversorgung sicher. Hinzukommt, dass das Ökosystem im Boden stabil gehalten wird, indem Pflanzen und Organismen das lebensnotwendige Wasser erhalten.

In der Wasserbilanzgleichung erhöht die versickerte Niederschlagsmenge die Evapotranspirationsmenge ET, der restliche Anteil schlägt sich in der Speichermenge ΔS nieder.

3.2 Die Wasserbilanz in urbanen Gebieten

Im Falle eines Regenereignisses zeigt die Abbildung 3-2 die Niederschlagsaufteilung auf einer unbefestigten Fläche (links) und einer befestigten Fläche (rechts)

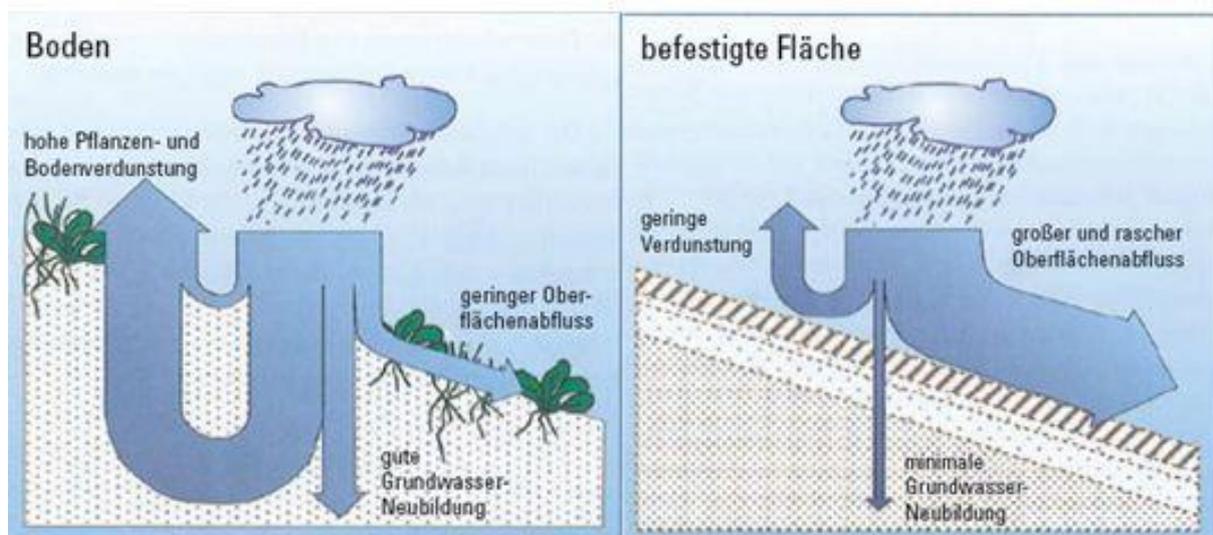


Abbildung 3-2: Vergleich des Abflussverhaltens auf unversiegelten, natürlichen Flächen (links) mit dem auf befestigten Flächen in urbanen Gebieten (rechts) (LfU, 2016)

Natürliche Einzugsgebiete haben in der Regel einen sehr geringen Anteil an Oberflächenabfluss (Sieker, 2001). Die Evapotranspiration, Versickerung und Grundwasserneubildung schwanken in ihren Anteilen je nach Bewuchs, Topographie, Untergrund und klimatischen Verhältnissen des zu entwässernden Gebietes (Siegele and Zingerle, 2013). Durch Boden und Vegetation können hohe Wassermengen verdunsten. Außerdem bilden Pflanzen einen natürlichen Widerstand, wodurch die Abflussgeschwindigkeit reduziert wird.

Im Vergleich dazu sind auf versiegelten Flächen die Anteile der Verdunstung und Versickerung und die damit zusammenhängende Grundwasserneubildung viel geringer. Der größte Teil des anfallenden Regenwassers fließt mit erhöhter Geschwindigkeit an der Oberfläche ab.

Durch den anhaltenden Flächenverbrauch für Siedlungen, Gewerbegebiete und Verkehrsflächen wird der Boden immer stärker versiegelt (s. Abbildung 3-3). Mit einer steigenden Versiegelung wird das Versickern des Wassers unterbunden. Das Wasser gelangt nur schwer oder gar nicht unter die bebaute Oberfläche. Die Tiefenversickerung wird gemindert, wodurch dem Grundwasserleiter kein neues Wasser zugeführt wird. In natürlichen Gebieten versickern bis zu 50 % des Regenwassers, wobei in stark bebauten Gegenden sich der versickernde Anteil nur noch auf 15 % beläuft. Wasser gilt als ein lebensnotwendiger Rohstoff, mit dem nachhaltig umgegangen werden muss. Das Versickern von Regenwasser unterstützt die Anreicherung des Grundwassers, das uns unter anderem als wichtige Trinkwasserquelle dient.

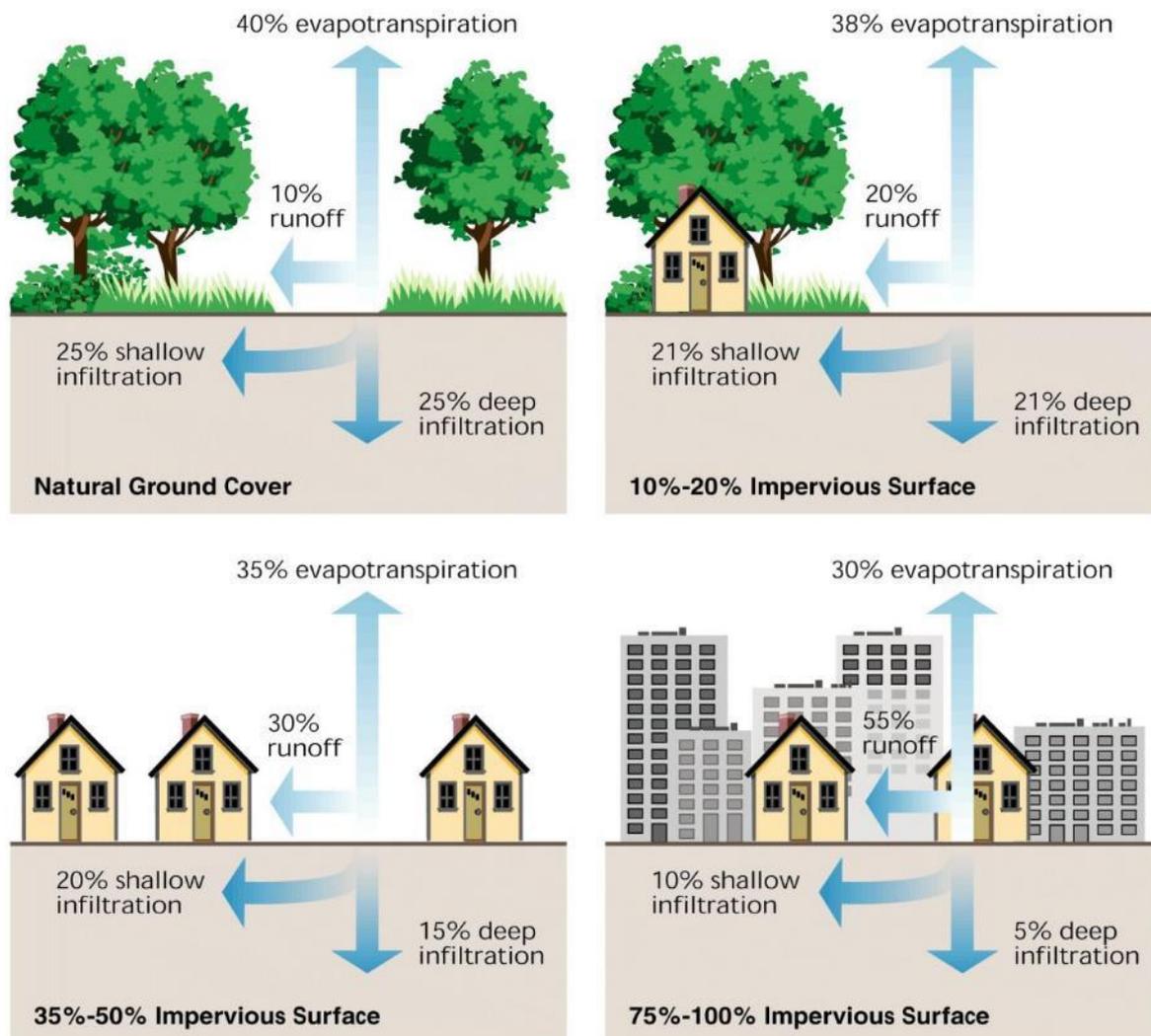


Abbildung 3-3: Abflussverhalten abhängig vom Versiegelungsgrad (Bernard and Tuttle, 1998)

Das Zunehmen versiegelter Flächen verringert gleichzeitig den Anteil an Grünflächen. Pflanzen sind ein wichtiger Faktor, um die Verdunstung des Regenwassers zu steigern. Zudem ist es bekannt, dass in ländlichen Gebieten die Temperaturen im Sommer wesentlich kühler ausfallen als in den Städten. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen heizen sich Dächer sowie Beton- und Asphaltflächen schneller auf und speichern die Wärme länger. Zum anderen dienen Pflanzen als Schattenspende und senken durch das verdunstete Regenwasser die Lufttemperatur. Neben der Verschönerung des Stadtbildes sind Grünflächen, wie Parks, wichtige Bestandteile, um das Stadtklima zu regulieren. In Großstädten mit einem Versiegelungsgrad hingehend zu 100 % ist die Verdunstung um 10 % geringer als im unbebauten Zustand.

Die Folge der sinkenden Versickerung und Verdunstung ist der wachsende Oberflächenabfluss. In Städten sind es 55 % des Regenwassers, die oberflächlich abfließen. Um eine Nutzung der Flächen zu gewährleisten werden die Wassermengen in dem unterirdisch geführten Kanalsystem abgeführt. In Mischkanalisationen kann eine, zu-

sätzlich zum Schmutzwasser, erhöhte abgeführte Regenwassermenge zu einer Überlastung der Kanalisation führen (Sieker, et al., 2009).

Grünflächen hingegen bieten den Vorteil, einen Teil des Niederschlags zu versickern und zu speichern bevor er zum Abfluss kommt. In natürlichen Gebieten, kann das bis zu 50 % der Niederschlagsmenge ausmachen. Das Blattwerk von Bäumen und Sträuchern hält auf seiner Oberfläche Wassertropfen zurück, sodass diese verzögert auf die Erdoberfläche gelangen und abfließen. Somit wird der Niederschlag in regulierten Mengen über eine längere Zeitdauer abgeführt. Vor allem bei Starkregenereignissen werden so wichtige Retentionsräume geschaffen und das Risiko von Hochwassern vermieden.

Eine Minimierung des Versiegelungsgrades, sodass nur mehr 35-50 % der Fläche undurchlässig ausgebildet werden, zeigt bereits eine wesentliche Verbesserung der Wasserbilanz. Die entsiegelten Flächen können einen Großteil der Niederschläge wieder versickern, zusätzlich steigt die Evapotranspiration an. Wird der Versiegelungsgrad halbiert, wird dadurch auch der Anteil des Oberflächenabflusses um fast die Hälfte gesenkt.

Ein Einbinden durchlässiger Flächen und eine Steigerung des Vegetationsvorkommens in urbanen Gebieten bringen einen ökonomischen sowie wasserwirtschaftlichen Nutzen in der Regenwasserbewirtschaftung mit sich.

Laut (Sieker, 2001) wäre es sinnvoll, zulässige Abflussspenden als Funktion der Wiederkehrhäufigkeit für das Einzugsgebiet zu definieren. Außerdem fordert er einen Nachweis für das Einhalten eines „guten Wasserhaushalts“ mittels Simulation. Hierbei soll als anzustrebendes Optimum der unbesiedelte Zustand zum Vergleich dienen.

4 Die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung

Ursprünglich wurde zum Ableiten von Niederschlagswasser der Weg über die Kanalisation gewählt. Durch das wachsende Umweltbewusstsein rücken der Schutz und der nachhaltige Umgang mit den Gewässern sowie eine Annäherung an einen natürlichen Wasserhaushalt wieder stärker in den Fokus. Angelehnt an die Grundsätze des (OEWAV, 2003), (Geiger et al., 2009), (Herzer, 2004) kann für die Bewirtschaftung von Regenwasser folgende Vorgehensweise festgehalten werden:

- Vermeidung von Oberflächenabfluss durch Entsiegelung
- Versickern des Regenabflusses durch eine belebte Bodenschicht
- Rückhalten des Regenabflusses zur Zwischenspeicherung von Abflussspitzen und eine gedrosselte Weiterleitung, wenn eine Versickerung nicht möglich ist
- Ableiten des Regenabflusses in ein Gewässer
- Einleitung in die Kanalisation

In den USA wird Regenwasser nach den Regeln des best management practice (BMP) bewirtschaftet. Außerdem wird die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung mit dem Begriff des low impact development (LID) erweitert. Darunter werden innovative BMP Technologien verstanden, mit denen Regenwasser vor Ort (dezentral) bewirtschaftet wird. LIDs nutzen und imitieren natürliche Prozesse, wie Infiltration und Evapotranspiration, um eine Entwässerung sicher zu stellen und gleichzeitig Gewässer und Biodiversität zu schützen. Mit dem Begriff der LIDs kamen neue Entwässerungstechniken, wie „Bioretentions“ und „Rain Gardens“ hinzu (Sieker, et al., 2009).

In den kommenden Kapiteln wird dargestellt, was unter dem Begriff der „naturnahen Regenwasserbewirtschaftung“ zu verstehen ist und welche Auswirkungen und Ziele vor allem in Bezug auf den Wasserhaushalt erreicht werden können.

4.1 Möglichkeiten der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung

Je nach Regenwasserbewirtschaftungsanlage können unterschiedliche Funktionsweisen kombiniert werden. Die Anlagen können Regenwasser versickern, verdunsten, zurückhalten bzw. speichern, anschließend gedrosselt abführen oder das gesammelte Wasser kann genutzt werden (s. Abbildung 4-1). Regenwasserbewirtschaftungsanlagen können sowohl oberirdische als auch unterirdisch eingebaute Systeme sein.

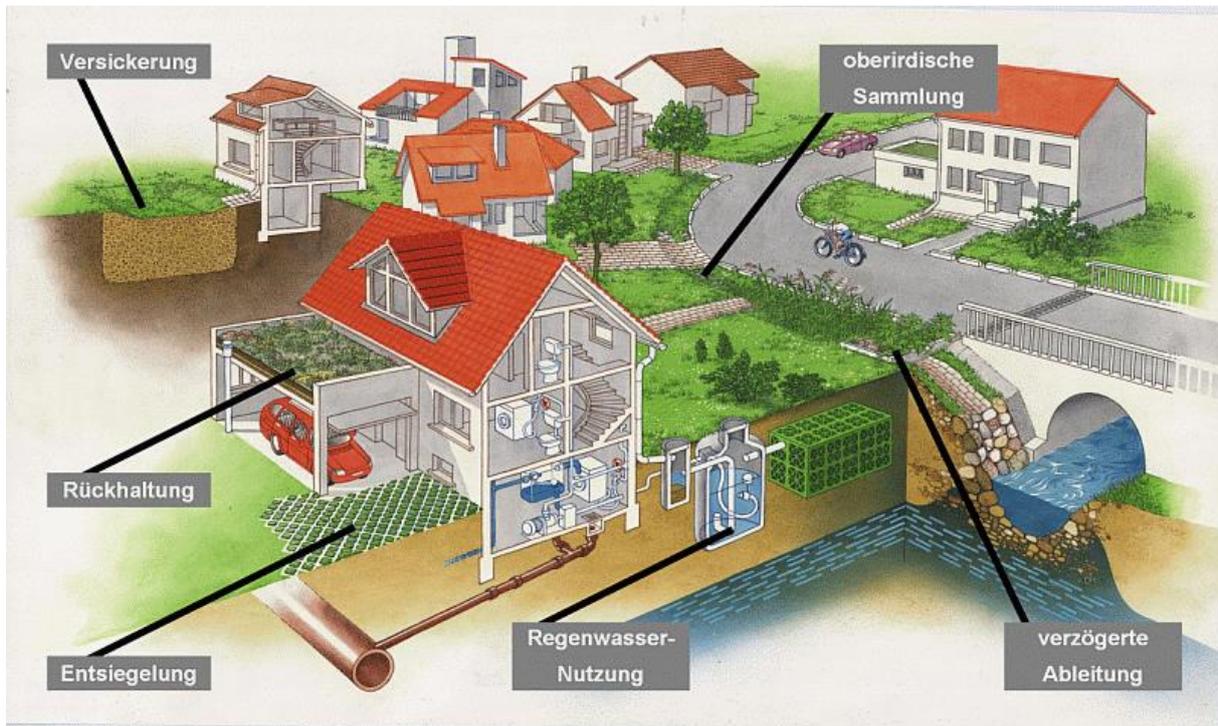


Abbildung 4-1: Die Elemente der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung (LfU, 2016)

Nach (Sieker, et al., 2009) können folgende drei Varianten in ihrer Funktionsweise charakterisiert werden:

- *Variante I:* Oberflächenspeicherung + Reinigung + Versickerung + Verdunstung
- *Variante II:* Oberflächenspeicherung + Reinigung + Untergrundspeicherung + Versickerung + Verdunstung
- *Variante III:* Oberflächenspeicherung + Reinigung + Untergrundspeicherung + Gedrosselte Ableitung + Versickerung + Verdunstung

Die Varianten II und III eignen sich durch die zusätzliche Untergrundspeicherung auch bei Böden mit unzureichender Durchlässigkeit. Die gedrosselte Ableitung in Variante III kann unerwünschte, hohe Grundwasserstände oder zu hohe Einleitungsmengen in Kanal oder Oberflächengewässer vermeiden. Durch den Einbau einer belebten Bodenzone wird das Wasser gereinigt bevor es in den Grundwasserleiter infiltriert oder in Speichervorrichtungen gesammelt wird.

Die Tabelle 4-1 zeigt einen Überblick über die in Deutschland und Österreich gängigen, technischen Ausführungsmöglichkeiten der Regenwasserbewirtschaftung.

Tabelle 4-1: Anlagen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung (Muschalla et al., 2014)

Bewirtschaftungsanlage	Ausführung
Versickerungsanlagen	Flächenversickerung
	Muldenversickerung
	Beckenversickerung
	Schachtversickerung
	Rohr- oder Rigolenversickerung
	Retentionsraumversickerung
Dachbegrünung	extensive Dachbegrünung
	intensive Dachbegrünung
Fassadenbegrünung	Bodengebundene Begrünung
	Fassadengebundene Begrünung (Pitha et al., 2014)
Regenwassernutzung	Regenzisterne
	Regentonne

In Neubaugebieten sind naturnahe Maßnahmen gut umsetzbar, da hier bereits befestigte Fläche nicht zuerst entfernt werden müssen. Liegen befestigte Flächen vor, ist eine Entsiegelung möglich mittels Rasengittersteinen oder Schotterschicht, wenn dies die Nutzung der Fläche nicht beeinträchtigt. Dafür eignen sich besonders Flächen mit geringer mechanischer Beanspruchung und begrenzten Schadstoffbelastungen wie beispielsweise Einfahrten, Wege, Spielplätze, Schul- und Innenhöfe sowie Park- und Stellplätze mit geringem Fahrzeugwechsel unter Beachtung der vorgeschriebenen Grenzwerte (s. (OEWAV, 2015; DWA, 2005)).

4.2 Ziele der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung

Durch die Versiegelung der Flächen in Verbindung mit einer konventionellen Niederschlagsentwässerung (Kanalisation) kommt es zu einer Verschiebung der Komponenten des Wasserkreislaufs. Die Anteile an Verdunstung, Versickerung und der damit zusammenhängenden Grundwasserneubildung fallen auf befestigten Flächen unnatürlich gering aus. Der größte Anteil des Niederschlagswassers fließt an der Oberfläche ab und schlägt sich negativ auf das Abflussverhalten in Kanalisation und Gewässer nieder (LfU, 2016):

- Überlastung der Kanalisation und der Mischwasserüberläufe
- verstärkte Verunreinigung der Vorfluter bei Starkregenereignissen
- Erhöhung der Spitzenabflüsse
- Zerstörung des Ökosystems in den Gewässern durch hydraulischen Stress (Sieker, et al., 2009)
- Änderung des Klimas im Einzugsgebiet (Verminderung der Luftfeuchte, Erhöhung der mittleren Temperatur) (Ostrowski, 1993).

4.2.1 Ökonomische Ziele

Mit der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung kann die Mischwasserkanalisation entlastet, Kosten eingespart und Hochwasserereignisse reduziert werden.

4.2.1.1 Entlastung der Mischwasserkanalisation

Im Sinne einer komfortablen Entwässerung wurden mit dem Städtebau das System der Mischwasserkanalisation und der Trennkanalisation entwickelt. Während bei dem Trennsystem das Regenwasser in einem separaten Kanal in den Vorfluter geleitet wird, führt die Mischwasserkanalisation den Niederschlag gemeinsam mit dem Abwasser zur Kläranlage ab. Da viele Kanalsysteme mittlerweile nicht mehr den Anforderungen an die gewachsene Einwohnerzahl und Siedlungsgröße gerecht werden, können sie oftmals die zusätzliche Wassermenge durch Niederschlag nicht mehr abführen. Durch den nachträglichen Bau eines Speicherkanals wird dem entgegen gewirkt. Das ist allerdings mit hohen Kosten verbunden (Sieker et al., 2007).

Die örtliche Kanalisation ist zum überwiegenden Teil nach dem Anfall des Oberflächenwassers dimensioniert, der sich auf 75 % beläuft wobei das Schmutzwasser nur einen Teil von 25 % ausmacht (Muschalla et al., 2014). Durch das Entwässern mittels naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen kann die Kanalisation in Neubaugebieten zukünftig kleiner dimensioniert werden. Durch das Zwischenspeichern und eine gedrosselte Einleitung in die Kanalisation kann eine Überlastung des Kanalsystems z. B. mittels Mulden-Rigolen-Systemen vermieden werden (Assinger, 2012).

4.2.1.2 Hochwasservermeidung

Bei Starkregenereignissen fließt der Niederschlag aufgrund undurchlässiger Flächen direkt (ohne Versickerung und/oder Rückhalt) in das nächste Gewässer oder in die Kanalisation (Sieker et al., 2007).

Kleine Gewässer, wie Bachläufe, können das zufließende Wasser nicht schnell genug abtransportieren, was zu einem Übertritt des Fließgewässers über das Ufer hinaus führen kann. Das gleiche Szenario ist bei stärkeren Regenfällen auch bei größeren Oberflächengewässern möglich (Ginzky et al., 2005).

Im Stadtgebiet wird der Niederschlag schnellst möglich in die Kanalisation abgeführt. Bei Starkregenereignissen sind einige Abwassersysteme der Städte mit den Wassermassen überfordert. Die großen Wassermengen können durch die Rohrquerschnitte nur langsam abtransportiert werden. Das Wasser staut sich zurück und der Kanal läuft über (Carlson, 2014). Das Wasser wird aus den Schächten gedrückt und überschwemmt Wohn- und Verkehrsflächen. Mit anhaltendem Niederschlag kann dies zu innerstädtischen Überschwemmungen führen.

Der Oberflächenabfluss, der nicht in die Kanalisation abgeführt wird, fließt direkt in das nächste Gewässer und kann einen hydraulischen Stress verursachen. Das Einbringen von großen Wassermassen mit erhöhter Fließgeschwindigkeit zerstört die vorhandene gewässertypische Flora und Fauna. Hinzukommt, dass der direkt eingeleitete Niederschlag keine natürliche oder technische Vorreinigung erfährt, wodurch weitere Schadstoffe in das Gewässer gelangen. Im Falle einer Hochwassersituation werden durch die Hochwasserentlastung eines Regenrückhaltebeckens zusätzlich Schadstoffe in den Vorfluter eingeleitet (Ginzky et al., 2005).

Im Rahmen von Untersuchungen zur Erstellung der WWRL konnte festgestellt werden, dass die Schmutzbelastung aus Niederschlagsabflüssen, die in ein Oberflächengewässer abgeführt werden, heute höher ist, als die Summe der Belastungen aus Industrie, Gewerbe und häuslichem Abwasser (Sieker et al., 2009).

„Jeder Kubikmeter Wasser, der zurückgehalten wird, ist ein Gewinn für die Natur und entschärft die ortsnahe Hochwassersituation.“ (DWA, 2007)

4.2.1.3 Kostenminimierung

Im Mischsystem wird das Regenwasser zusammen mit dem Schmutzwasser über die Kanalisation bis zur Kläranlage transportiert, wo es gereinigt wird. Neben dem eigentlichen Schmutzwasser wird dieses nur gering oder nicht belastete Wasser zusätzlich zur Kläranlage geführt. Die größere zu reinigende Wassermenge führt zu einer Erhöhung der Kosten für die jeweilige Stadt oder Gemeinde (Sieker et al., 2007).

Der Ausbau der Kanalisation aufgrund von Bevölkerungswachstum und steigendem Wasserverbrauch ist teurer und mit höherem baulichem Aufwand verbunden, als das Kanalsystem mit der Herstellung von Versickerungsflächen hydraulisch zu entlasten. Ingenieurstechnisch hat die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung den Vorteil,

dass geringere Mengen an abzuführendem Regenwasser den Aufwand an abwassertechnischen Baumaßnahmen reduziert, da eine kleinere Dimensionierung der Kanalisation und der Sonderbauwerke möglich wird (Assinger, 2012). Vor allem in Neubaugebieten ist der Einsatz von Regenwasserbewirtschaftungsanlagen gut zu realisieren und sollte bei zukünftigen Städteplanungen berücksichtigt werden, um die Kosten für den Bau der Kanalisation gering zu halten (Sieker et al., 2007).

Das nachträgliche Herstellen von Niederschlagbewirtschaftungsanlagen kann, je nach Ausführung und verwendetem Material sowie in den nachfolgenden Jahren anfallendem Wartungs- und Instandhaltungsaufwand, zu unterschiedlich hohen Kosten führen. Unter Wartungs- und Instandhaltungskosten fallen beispielsweise die Mahd, die gärtnerische Pflege, das Spülen von Rigolen, die Inspektion sowie die Entfernung von Laub und Störstoffen (Muschalla et al., 2014). Eine Niederschlagswasserbewirtschaftung ist durch eine Abkopplung vom Kanalsystem mittels Versickerung oder gedrosselter Einleitung in dafür geeignete Oberflächengewässer auch nachträglich noch möglich (Geiger et al., 2009).

Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass sich die Nutzungsdauer von Niederschlagbewirtschaftungsanlagen auf 30 Jahre beläuft, im Gegensatz zur Kanalisation, deren Nutzung auf 60 Jahren angesetzt wird. In einigen Fällen kann die kostengünstigste Ausführung eine Kombination aus dezentraler Regenwasserbewirtschaftung und Sanierung des Kanalbestandes sein (Muschalla et al., 2014).

Außerdem kann gering verschmutztes Regenwasser als Brauchwasser zur Gartenbewässerung und für die Toilettenspülung verwendet werden (LfU, 2016). Bei steigenden Trinkwasserpreisen kann durch die Regenwassernutzung der Verbrauch des Trinkwassers gesenkt werden. Auf diese Art können sowohl die Trinkwassergebühren als auch die aus dem Trinkwasserverbrauch berechneten Abwassergebühren eingespart werden (Kipgen et al., 2010).

4.2.2 Wasserhaushaltsbezogene Ziele

Naturnahe Regenwasserbewirtschaftungssysteme versuchen das Regenwasser dem Wasserkreislauf wieder zuzuführen. Das geschieht indem die Systeme die Verdunstung erhöhen, die Versickerung und damit die Grundwasserneubildung steigern, wodurch der Oberflächenabfluss reduziert wird. Die Speicherung des Wassers sichert die für Pflanzen notwendige Bodenfeuchte und unterstützt das Evapotranspirationpotential durchlässiger Flächen.

4.2.2.1 Verringerung des Oberflächenabflusses

Dem Ideal des naturbelassenen Zustandes kann sich durch die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung am leichtesten mit dem Prinzip der Entsiegelung angenähert werden. Das Dezimieren undurchlässiger Flächen führt zu einer Reduzierung des Oberflächenabflusses und der Abflussgeschwindigkeit (Sieker et al., 1996).

Bei unbefestigten, naturbelassenen Flächen werden in der Regel lediglich 0 bis etwa 20 % des gefallenen Niederschlages an der Oberfläche abfließen. Im Falle von versiegelten Flächen wie z. B. bei Dächern oder betonierten Flächen muss hingegen mit einem Abflussanteil von über 90 % gerechnet werden (Kompatscher, 2008). Dementsprechend gering ist der Anteil an Verdunstung und Infiltration. Vor allem bei kurzen Regenereignissen können naturnahe Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen eine deutliche Reduzierung des Oberflächenabflusses erzielen.

Der bauliche Anspruch entsiegelter Flächen besteht darin, dass die Entwässerung während des Niederschlags gewährleistet sein muss, sodass weiterhin eine ungestörte Flächennutzung möglich ist.

Versickerungsanlagen können durch eine künstlich hergestellte Vertiefung den Niederschlag zunächst sammeln, um ihn anschließend zu versickern. So verringern sie den Oberflächenabfluss, und das Wasser steht längere Zeit zur Versickerung zur Verfügung. Allerdings können zu lange Stauzeiten auch zu einem Verstopfen der Poren führen (Clogging) (Kumar et al., 2015), wodurch die Infiltrationsrate über die Nutzungsdauer abnimmt.

Flächenversickerungen hingegen eignen sich für Flächen, die weiterhin begehbare oder befahrbar bleiben müssen. Diese Flächen werden mit einem teildurchlässigen Oberflächenbelag ausgebildet und erhöhen dadurch die Versickerung und die Evapotranspiration (s. Abbildung 4-2).

Anlagen, die die Regenwasserversickerung steigern, eignen sich vor allem für kurze Starkregenereignisse (Sieker, et al., 2009).

Flächenversickerung

Eine Möglichkeit die Versickerung zu erhöhen und den Oberflächenabfluss zu verringern, ist die Entsiegelung befestigter Flächen. Die Flächenversickerung gehört zu den Versickerungsanlagen, die keine explizite Speicherwirkung besitzen, bis auf den darunterliegenden Bodenkörper (Siegele, 2013).

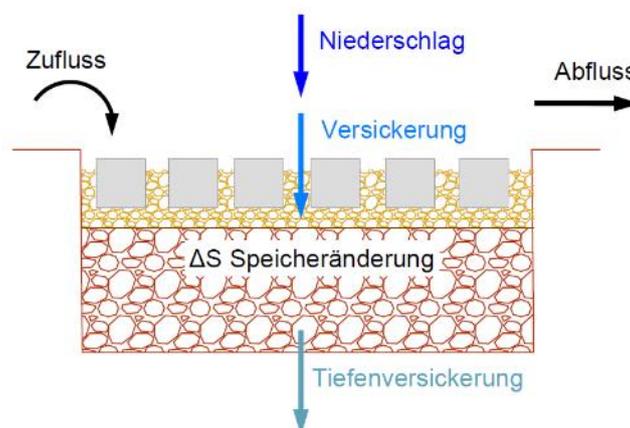


Abbildung 4-2: Abflussverhalten einer Flächenversickerung mit teildurchlässiger Pflasterung (angelehnt an (McCutcheon, 2013))

Folgende Auflistung zeigt einige Ausführungsmöglichkeiten mit dem zugehörigen Anwendungsbereich:

- *Schotterrasen* für wenig frequentierte Verkehrsflächen
- *Kiesbelag* für selten befahrene Gehwege
- *Geotextilschotter* für Zufahrtswege, Stellflächen oder Fußwege
- *Rindenhäcksel* für *Spielflächen*, Gartenwege oder selten befahrene Stellflächen
- *Holzpfaster, Holzroste* für Gartenwege oder Spielflächen
- *Rasengittersteine* für mäßig frequentierte Flächen, Zufahrten, Parkplätze etc.
- *Rasen- oder Splittfugenpfaster* für Höfe oder Plätze
- *Porenpfaster* oder *Steintepiche* für mäßig frequentierte Flächen, Zufahrten, Höfe oder Gartenwege
- *Drainasphalt* oder *Einkornbeton* für stärker frequentierte Verkehrsflächen (Doppler et al., 2013)

Eine mögliche Nutzung im Winter erfordert, dass die entsiegelten Flächen frei von Eis bleiben, was die Verwendung wasserdurchlässiger Flächenbeläge einschränken kann, da diese aus Gründen des Grundwasserschutzes nicht mit Tausalz gestreut werden dürfen (Kipgen et al., 2010).

Versickerungsanlagen

Neben der oben aufgeführten Möglichkeit der Flächenversickerung, geben nachstehende Baumaßnahmen einen Überblick über weitere Versickerungsanlagen und deren Funktionsweise. Versickerungsanlagen kombinieren eine gesteigerte Versickerungsleistung mit der Möglichkeit das Regenwasser oberirdisch, z. B. Versickerungsmulde oder unterirdisch, z. B. Rohr-Rigolen-System, zu speichern (s. Abbildung 4-3).

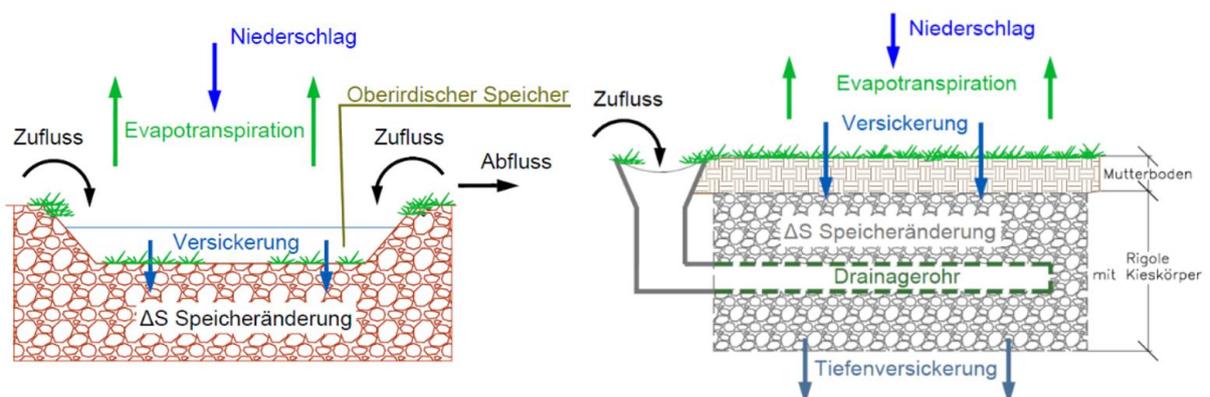


Abbildung 4-3: Abflussverhalten einer Versickerungsanlage, hier: Muldenversickerung und Rohr-Rigolen System (angelehnt an (McCutcheon, 2013))

Es gibt bereits einschlägige Literatur, die sich genauer mit der baulichen Ausführung der Anlagen befasst (s. (Sieker, 2001)):

- *Versickerungsteiche* haben ein großes Retentionspotential und versickern das Wasser über die Uferböschungen, während der Teich an sich undurchlässig ausgeführt ist.
- *Mulden- oder Beckenversickerungen* sammeln das Niederschlagswasser in begrünten Bodenvertiefungen, wo es langsam versickern kann.
- *Rohr-Rigolen-Systeme*: der Niederschlag wird schnell und komplett versickert, allerdings entfällt hier die Möglichkeit der Verdunstung, da der Niederschlag unterirdisch gesammelt wird. Das gesammelte Wasser wird entweder an den darunterliegenden Boden abgegeben oder kann in das örtliche Kanalsystem eingeleitet werden (Doppler et al., 2013).

4.2.2.2 Erhöhung der Verdunstung

Die Verdunstung als ein Bestandteil des natürlichen Wasserhaushalts wird meistens nur untergeordnet berücksichtigt. Dabei trägt sie einen wesentlichen Anteil zur Rückführung des Regenwassers in den natürlichen Wasserkreislauf bei.

Nach (Sieker et al., 1996) wird mittels konventioneller Entwässerungsmaßnahmen nur ein Verdunstungsanteil von 4 % erreicht. Bei oberirdischen Versickerungsmethoden wie der Flächen- und Muldenversickerung, verdoppelt sich der Anteil der Verdunstung und beläuft sich auf 7 bis 14 %.

Wasser kann grundsätzlich auf zwei Arten verdunsten. Einerseits kann es direkt von der Bodenoberfläche evaporieren, andererseits über die Blätter der Pflanzen transpirieren. Naturnahe Regenwasserbewirtschaftungsanlagen bieten hier je nach Ausführung und Vegetation ein unterschiedlich hohes Verdunstungspotential. Selbst entsiegelte Flächen, die mit Rasengittersteinen gepflastert werden, haben, bedingt durch die bewachsenen Zwischenräume, eine Steigerung der Verdunstung zur Folge.

Die Verdunstung beeinflusst außerdem das natürliche Kleinklima. Das Kleinklima bezieht sich auf die klimatischen Bedingungen in Bodennähe bis hin zu einer Höhe von etwa zwei Metern (klima.org, 2016). Durch die Verdunstung des Regenwassers steigt die Luftfeuchtigkeit und die bodennahe Temperatur sinkt. Begrünte Flächen zeigen tagsüber tiefere Temperaturen als die Oberfläche der bebauten Gebiete. Pflanzen nutzen die Sonnenstrahlung für die Photosynthese und um Wasser zu verdunsten, statt sie in sensitive Wärmestrahlungen umzuwandeln (Sieker et al., 2007).

Regenwasserbewirtschaftungsanlagen, die den Anteil der Evapotranspiration erhöhen, sind meist Anlagen mit einem hohen Vegetationsbestandteil. So können beispielsweise Dachbegrünungen (s. Abbildung 4-4) nahezu natürliche Verdunstungswerte erzielen (Sartor, 2002).

Folgende Anlagen können zu einer Steigerung der Evapotranspiration beitragen:

- *entsiegelte Flächen* steigern die Verdunstungsleistung durch die in den Zwischenräumen bewachsenen Flächen wie beispielsweise bei Rasengittersteinen (Sieker, 2016b)
- *Dachbegrünungen* fangen den Niederschlag auf. Dieser wird in der Substrat-, Vlies- oder Drainschicht gespeichert und zeitverzögert in kleineren Mengen abgeleitet. Der Hauptanteil der Niederschlagsmenge wird allerdings von der Vegetation oder direkt vom Substrat aus verdunstet.
- *Gebäudebegrünungen* sind vertikale Begrünungen der Fassade. Sie haben ein gutes Verdunstungspotential und durch die Beschattung des Gebäudes können die Gebäude spezifischen Energiekosten reduziert werden (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2010) (s. Abbildung 4-5)
- *Bioretentionen/ Regenteiche* sind großflächige Mulden mit starker Vegetation. Sie können das Regenwasser infiltrieren, zurückhalten und verdunsten (EPA, 2000) (s. Abbildung 4-5)
- *offene Regenwasserableitungen* sind Gräben oder Rinnen, in denen das Niederschlagswasser bis zur nächsten Rückhalte- oder Versickerungsanlage transportiert wird. Mittels oberirdischer Ableitung in offenen Mulden, bewachsenen Gräben oder Gerinnen wird die Verdunstung gesteigert (LfU, 2016)

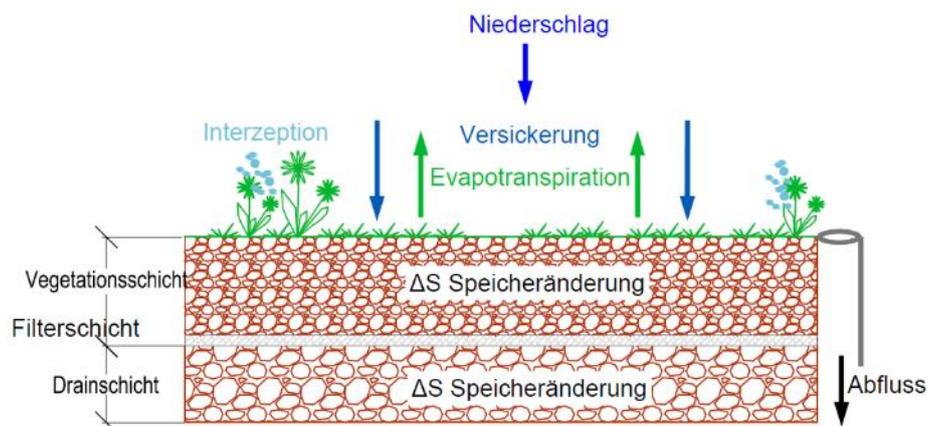


Abbildung 4-4: Abflussverhalten eines Gründaches (angelehnt an (Pendl, 2009))

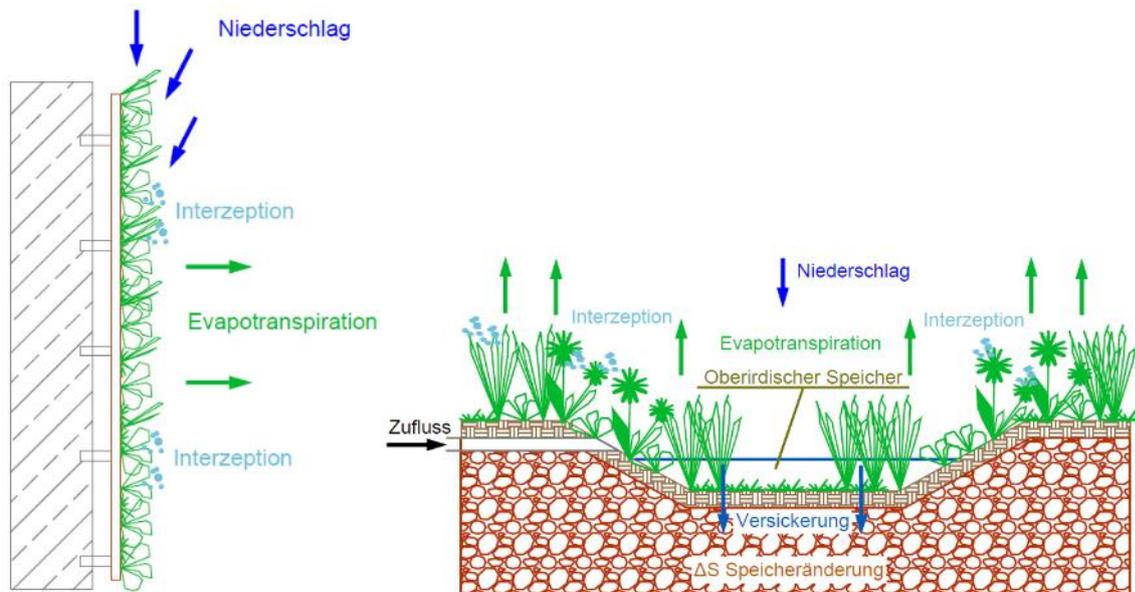


Abbildung 4-5: Abflussverhalten technischer Anlagen der Regenwasserbewirtschaftung (links) Fassadenbegrünung, (rechts) Bioretention (angelehnt an (McCutcheon, 2013))

4.2.2.3 Erhöhung der Grundwasserneubildung

Durch die abnehmende Versickerung in urbanen Gebieten geht auch die Grundwasserneubildung zurück. Ein niedriger Grundwasserstand hat zur Folge, dass die mit dem Grundwasserleiter in Verbindung stehenden Oberflächengewässer einen niedrigeren Wasserstand führen. Durch den Rückhalt mittels naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen kann in Trockenzeiten der Basisabfluss erhöht werden (Sieker et al., 2007). Aufgrund des fehlenden Wassers wird der Bodenwasserhaushalt mit seinen Mikroorganismen nachhaltig gestört (LfU, 2016). Durch die Absenkung des Grundwasserspiegels besitzt der Boden eine geringere Feuchte, wodurch das Kleinklima beeinflusst wird.

Der Grundwasserneubildungsanteil macht bei einer grünen Wiese 60 % der Wasserbilanz aus. Bei einem Versiegelungsgrad von 70-90 % werden nur noch 6 % des Niederschlags der Grundwasserneubildung zugerechnet (Herzer, 2004).

In der Wasserrahmenrichtlinie wird ein „guter mengenmäßiger Zustand“ des Grundwassers gefordert. Durch den steigenden Versiegelungsgrad wird die Grundwasseranreicherung unterbunden und wirkt damit entgegen dem Grundsatz der WRRL. Allerdings werden keine genaueren Angaben gemacht, wie dieser Grundsatz realisiert werden soll, noch werden konkrete Zahlen für eine anzustrebende Grundwasserneubildungsrate sowie einzuhaltender Abflussverhältnisse genannt. Lediglich zur Konstruktion von Versickerungsanlagen legen die Regelwerke, wie das DWA-A 138 (DWA, 2005) und das Regelblatt 45 (OEWA, 2015) eine Mächtigkeit für den Grundwasserflurabstand fest.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass in einigen Fällen der Anstieg des Grundwasserspiegels problematisch sein kann. Die Urbanisierung führt zu einer Grundwasserabsenkung. Oftmals wurden Gebäude zu einem Zeitpunkt erbaut, wo der Grundwasserstand bereits unnatürlich abgesenkt war. Bei geringen Flurabständen kann es hier infolge eines späteren Grundwasseranstiegs zu Kellervernässungen kommen (Assinger, 2012).

4.2.2.4 Retention und gedrosselte Ableitung

Eine kurzzeitige Speicherung von Regenwasser ist dann notwendig, wenn die nötigen Versickerungsraten aufgrund der örtlichen Bodenverhältnisse nicht gewährleistet sind, beispielsweise der vorhandene Boden zum Großteil schluffige und tonige Bestandteile aufweist und somit eine Versickerung vor Ort nur gering oder unzureichend möglich ist (Ginzky et al., 2005). Die Retention ermöglicht die Reduzierung hoher Oberflächenabflüsse und vermindert dadurch große Abflussspitzen. Durch das Zurückhalten des Wassers wird zusätzlich der Verdunstungs- und Versickerungsanteil gesteigert (Sieker et al., 2007).

Speichermaßnahmen sind immer von den vorhandenen Platzverhältnissen abhängig und vorzugsweise oberflächlich zugänglich zu konstruieren, um Wartungsarbeiten möglichst kostengünstig zu halten. Eine übliche Ausführung ist die Kombination aus Retentionsraum mit anschließender Reinigung, zum Beispiel ein Auslass eines Regenrückhaltebeckens mit anschließender Vegetationspassage (Siegele and Zingerle, 2013). Die gedrosselte Ableitung sollte nur additiv zur angewendeten Regenwasserbewirtschaftung eingesetzt werden.

Die anfallenden Wassermengen werden bei der gedrosselten Ableitung über Mulden und Gräben in das nächste Gewässer oder in die Kanalisation zeitverzögert abgeführt. Bei Rohr-Rigolen Systemen und Zisternen wird das gespeicherte Wasser nach dem Regenereignis kontrolliert über die Drainage an die Kanalisation abgegeben. Dabei können unterschiedliche Retentionszeiten durch bauliche Maßnahmen oder stärkerer Bepflanzung der Mulden und Becken erreicht werden (EPA, 2000).

Die Speicher- und Retentionswirkung wird je nach Regenwasserbewirtschaftungsanlage anders gewährleistet. Bei Versickerungsanlagen kann das ein Oberflächenspeicher in Form einer Mulde sein, hinzukommt der Untergrundspeicher im Sinne eines künstlichen, nachträglich eingebauten oder natürlichen Bodenkörpers. Die Speicherkapazität des Bodens ist abhängig von dessen Zusammensetzung (Sand, Ton etc.), Porenraum und der bereits vorhandenen Bodenfeuchte. Dachbegrünungen können je nach Aufbau und Mächtigkeit der Schichten ein unterschiedlich großes Speicherpotential erreichen (s. Abbildung 4-4).

Bei Rohr-Rigolen Systemen (s. Abbildung 4-6) wird das Speichervolumen mit Rohren oder mit Kies gefüllten Körben geschaffen. Diese Variante eignet sich vor allem, wenn der anschließende Boden eine sehr geringe Versickerungsfähigkeit aufweist und der Oberflächenspeicher platzsparend ausgeführt werden kann oder muss (Muschalla et al., 2014).

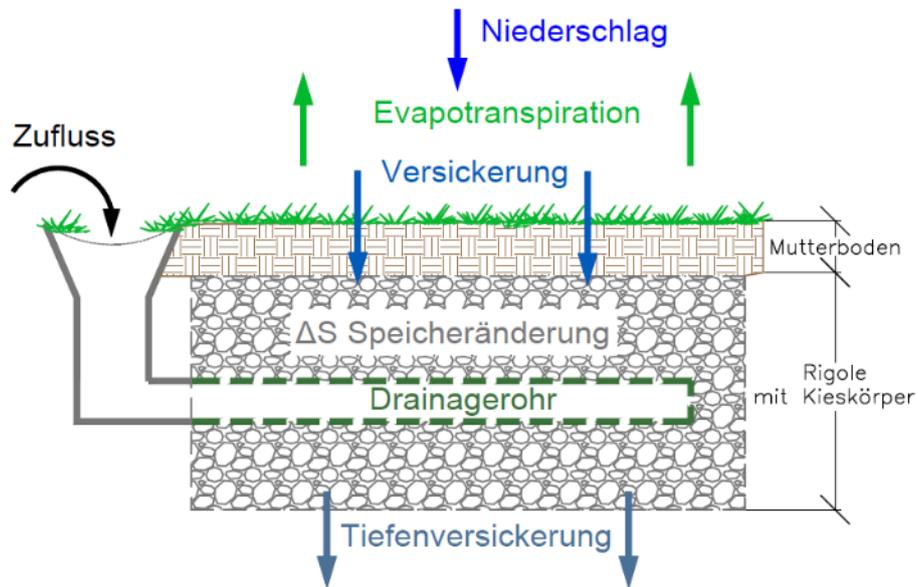


Abbildung 4-6: Versickerung und Retention bei einem Rohr-Rigolen-System (angelehnt an (McCutcheon, 2013))

Weitere Möglichkeiten zur Retention bieten die Anlagen, die zusätzlich zur Regenwassernutzung dienen. Durch das Auffangen in Regentonnen und -zisternen (s. Abbildung 4-7) kann das Wasser beispielsweise zur Bewässerung und als Brauchwasser (Toilettenspülung, Reinigung) verwendet werden. Um das Regenwasser als Brauchwasser zu nutzen, müssen die hygienischen und technischen Grundsätze nach ÖNORM B 2572 (2005) eingehalten werden (Muschalla et al., 2014).

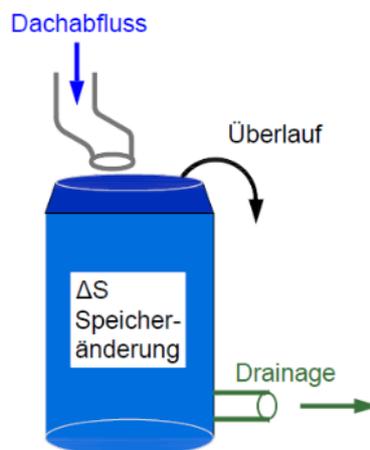


Abbildung 4-7: Retention von Regenwasser mittels Regentonne (angelehnt an (McCutcheon, 2013))

Folgende Liste gibt einen kurzen Überblick über Regenwasserbewirtschaftungsanlagen, die zur Retention eingesetzt werden:

- *Zisternen* sind unterirdische Speicher, in denen das Wasser zwischengespeichert wird und nach dem Regenereignis gedrosselt der Kanalisation zugeführt wird
- *Teiche* können neben der Verdunstung und der Versickerung auch der Speicherung dienen
- *Rohr-Rigolen Systeme* speichern das Wasser in ober- oder unterirdischen Gräben wo es in den Boden versickert (Abbildung 4-6)
- *Schachtversickerungen* dienen zur Zwischenspeicherung und zeitlich verzögerten Abgabe des Regenwassers an den Untergrund, durch die fehlende Oberbodenschicht (fehlende Reinigung) darf nur unbelastetes Wasser eingeleitet werden.
- *Dachbegrünungen* sind auf Grund der geringen Platzverhältnisse in urbanen Gebieten eine gute Alternative. Sie bewirken neben der Speicherung und Verdunstung auch eine Reinigung des Regenwassers
- *Regenrückhaltebecken* sind die größte Form der Retention. Sie vereinen Rückhaltung, Verdunstung und Reinigung. Diese Rückhaltungen werden laut den Arbeitsblättern DWA-A 117 (2006) „Bemessung von Regenrückhalteräumen“ und ATV-A 166 (1999) „Bauwerke der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung“ bemessen und gestaltet (Doppler et al., 2013)

4.2.2.5 Zusammenfassung

Mittels naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen kann der Niederschlag wieder dem hydrologischen Kreislauf zugeführt werden. Das Zurückführen des Wassers ist je nach Anlage auf unterschiedlichen Wegen möglich. Die Tabelle 4-2 zeigt eine Zusammenstellung, welche Steigerung der einzelnen Wasserbilanzkomponenten durch den Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftung möglich ist.

Folgende Werte können für die Anteile der Wasserbilanz unter natürlichen Bedingungen angenommen werden (Sartor, 2002). Nach dem Gelbdruck des DWA-A 102 (DWA, 2016) gelten der natürliche, unbebaute Zustand und dessen Wasserbilanz als Zielgröße, der sich mit der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung angenähert werden soll:

- Niederschlag : 100 %
- Verdunstung : 50- 80 %
- Grundwasserneubildung : 10 -30 %
- Direktabfluss : 10-20 %

Die Abbildung 4-8 zeigt die Auswirkungen der Regenwasserbewirtschaftungsanlagen nach konventioneller und naturnaher Ausführung auf deren Verdunstungs- und Versickerungsleistung sowie den Anteil an Oberflächenabfluss während eines Regenereignisses. Die Veränderung (Steigerung/Abnahme) der Bilanzbestandteile unterscheiden sich je nach Regenwasserbewirtschaftungsanlage in ihren Größenanteilen (Kipgen et al., 2010).

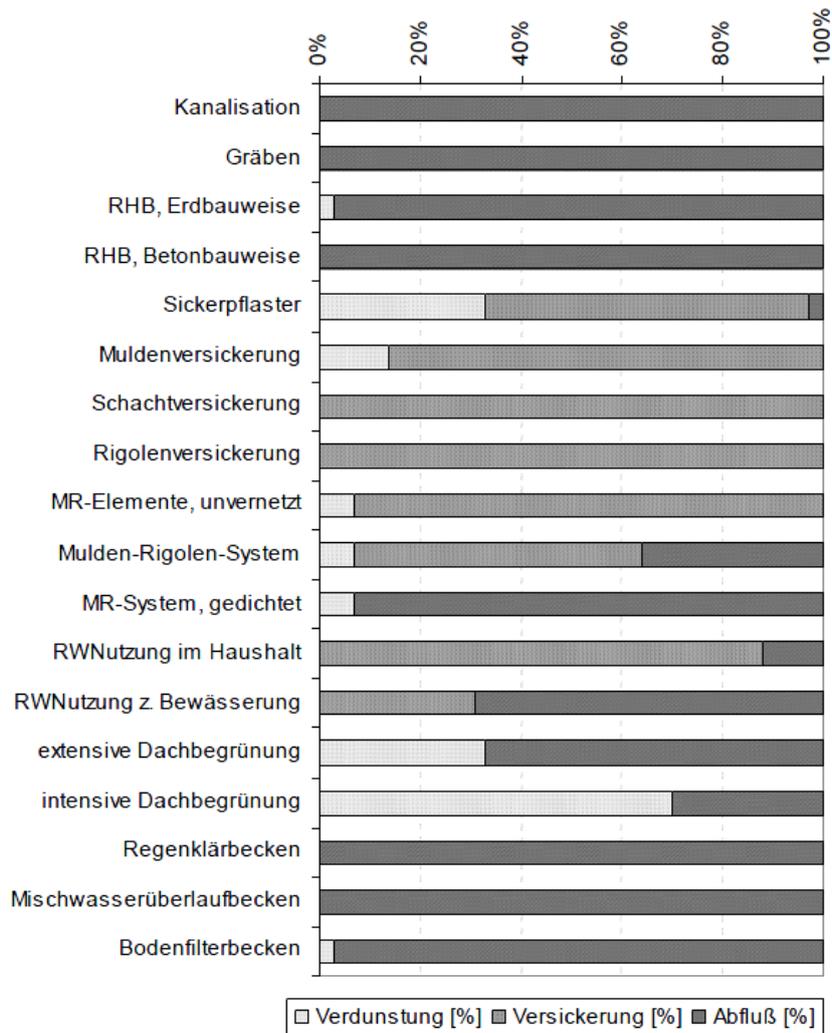


Abbildung 4-8: Wirkung naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen und konventioneller Entwässerung auf den Wasserhaushalt (Sieker, et al., 2009)

Nachfolgende Tabelle 4-2 zeigt eine Zusammenfassung recherchierter Literaturwerte, inwieweit naturnahe Regenwasserbewirtschaftungsanlagen die Komponenten der Wasserbilanz steigern können. Die angegebenen Werte sind Prozentanteile der anfallenden Gesamtniederschlagsmenge.

Tabelle 4-2: Auswirkungen naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen auf die Wasserbilanz (Literaturrecherche). Prozentanteile an Oberflächenabfluss, Verdunstung, Versickerung, GW-Neubildung, und Retention vom Gesamtniederschlag (Niederschlag = 100%)

Regenwasserbewirtschaftungsanlage	Abfluss	Evapotranspiration	Infiltration	Grundwasserneubildung	Retention/Speicherung	Anmerkung
Teildurchlässige Fläche (Allgemein)	15-60 % (Bullermann, 2004)	33,3 % (Sieker, 2016a)	64 % (Sieker, 2016a)			Durchlässigkeitswert k_f zw. 1×10^{-3} & 1×10^{-6} (DWA, 2005) Bodenpassage 20 bis 30 cm für ausreichende Reinigung (Muschalla et al., 2014)
Grasnarbe			80-100 % (Muschalla et al, 2014)			
Schotterrasen			70-80 % (Muschalla et al, 2014)			
Rasengittersteine bzw. -platten			50-90 % (Muschalla et al, 2014)			
Rasenfugenpflaster			30-50 % (Muschalla et al, 2014)			
Muldenversickerung	0 % (Horner and Chapman, 2007)	14-22 % (Professur für Hydrologie, 2013)		78-86 % (Professur für Hydrologie, 2013)		

Die naturnahe Regenwasserbewirtschaftung

Regenwasserbewirtschaftungsanlage	Abfluss	Evapotranspiration	Infiltration	Grundwasser-neubildung	Retention/Speicherung	Anmerkung
Mulden-Rigolen Versickerung		48-78 % (Horner and Chapman, 2007)		48-78 % (Horner and Chapman, 2007)		
Dachbegrünung (Allgemein)	Winter: 80 % (Speak et al., 2013) <hr/> Sommer: 53 % (Speak et al., 2013)	40 bis 90 % (Muschalla et al, 2014)			40-100 % (Kipgen et al., 2010) <hr/> wenig Regen: 90 % (Carter and Rasmussen, 2006)	hydrologische Leistungsfähigkeit ist abhängig von: <ul style="list-style-type: none"> • Dachneigung, • Substrat, • Schichtdicke, -aufbau (Siegele and Zingerle, 2013), • Bepflanzung • lokales Klima (Speak et al., 2013)
Extensive Dachbegrünung		40-60 % (Muschalla et al, 2014)	65-75 % (Senatsverwaltung für Stadtentwicklung, 2010)		45-60 % (Speak et al., 2013)	Substratschichtstärke 2–12 cm, durch geringes Eigengewicht nachträglich einbaubar, Bepflanzung: Moosen, Flechten, Sedum-Arten, wenig Pflege (Muschalla et al. 2014)
Intensive Dachbegrünung		60-90 % (Muschalla et al, 2014)			75 % (Speak et al., 2013)	Substratschichtstärke > 20 cm, begehbar, anspruchsvolle Pflege (Muschalla et al. 2014)
Kombination aus Versickerungsfläche & Zisterne (Scholz and Kazemi Yazdi, 2008)	16,7 %	50 %	33 %			
Fassadenbegrünung		20-40 % (Pitha et al., 2014)				

4.3 Kritische Anmerkungen zur Verwendung naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen

Trotz vieler positiver Erfahrungen und der mittels Studien belegten Annäherung an den natürlichen Wasserkreislauf sowie einer erhöhten Lebensqualität in den stark besiedelten Gebieten durch ein verbessertes und gesünderes Klima und einer Verschönerung des Stadtbildes, dürfen einige Aspekte nicht außer Acht gelassen werden.

In den folgenden Absätzen werden Kritiken und Anmerkungen verschiedener Institutionen angebracht, die bei der Errichtung und Nutzung naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen berücksichtigt werden sollten.

Die Hochschule in Trier hat im Zuge einer Langzeitstudie von 1997 bis 2012 zur naturnahen Regenwasserbewirtschaftung positiv angebracht, dass zwar der Einsatz entsiegelter Flächen und damit eine Abkopplung vom Kanalsystem in den letzten Jahren zugenommen hat, allerdings steht sie dem Einsatz von Versickerungsflächen kritisch gegenüber. Hierzu die Universität Trier (Sartor, 2016):

„es lässt sich mittels einfacher Bilanzrechnungen zeigen, dass aufgrund der weitgehend entfallenden Verdunstungskomponente durch solche reinen Versickerungsmaßnahmen im Jahresmittel dem Untergrund (je nach Flächennutzung vor der Bebauung) zwischen dem 2- und 7-fachen der natürlichen Mengen zugeführt wird. Es gibt Beispiele ausgeführter Versickerungsanlagen die funktionieren und solche, die es aus dem genannten oder anderen Gründen (z. B. Bodenverdichtung während des Baus) nicht tun. Im Versagensfall können die direkt spürbaren Folgen für die An- und Unterlieger von allgemeiner Bodenvernässung bis zu Hangrutschungen reichen.“

Bezogen auf die angeführte Aussage aus Trier ist bei einer nachträglichen Entsiegelung der dadurch ansteigende Grundwasserspiegel zu berücksichtigen, um mögliche Schäden durch Vernässung an den umstehenden Bauwerken zu vermeiden. Außerdem erhöht die Durchnässung des Untergrundes in Hanglage die Gefahr einer Rutschung durch Schichtenwasserbildung (DWA, 2005). Zu Planung, Bau und Betrieb von Anlagen gibt das DWA-A 138 den Stand der Technik vor.

Nach (Sartor, 2002) können große Versickerungsmengen das Hochwasseraufkommen unterstützen. Hierzu wird zunächst kurz auf die Abflusszusammensetzung eingegangen.

Die Aufteilung des versickerten Wasserstroms wird in Abbildung 4-9 gezeigt. Unter Zwischenabfluss (Interflow) versteht man das Durchsickern des Wassers in den Untergrund, allerdings nicht bis in den Grundwasserleiter (Baseflow). Der Zwischenabfluss ist der Abfluss zwischen Oberfläche und Grundwasserstand. In hydrologischen Fachkreisen umfasst der Begriff des Direktabflusses den Oberflächen- sowie den Zwischenabfluss.

Nach Sieker (2009) soll der Begriff „Direktabfluss“ aussagen, „*dass es sich insgesamt um den Abfluss handelt, der in „direktem“ zeitlichen Zusammenhang mit abgrenzbaren Niederschlagsereignissen auftritt. Der Oberflächenabfluss läuft meist mit einer ausgeprägten Abflussspitze vorweg und der Zwischenabfluss etwas langwellig hinterher. Der Zwischenabfluss kann jedoch im Vergleich zum Grundwasserabfluss als „schnelle unterirdische Abflusskomponente“ bezeichnet werden.*“

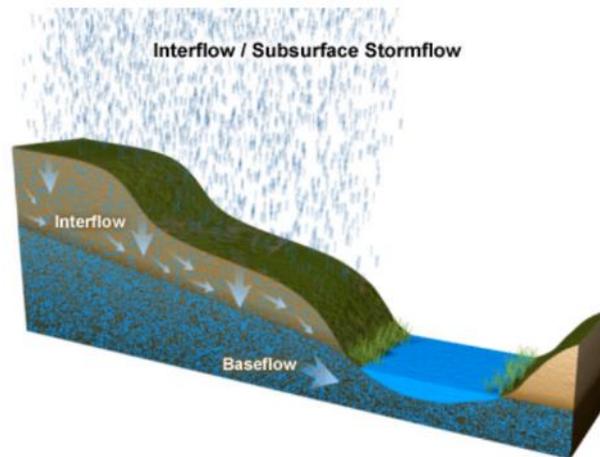


Abbildung 4-9: Zusammensetzung des Direktabflusses (UCAR, 2016)

Im Hinblick auf die bisherige Entwicklung, sind im Rahmen der Regenwasserbewirtschaftung zunehmend Versickerungsanlagen gebaut worden, wie beispielsweise Rigolen- und Schachtversickerung, die den Anteil des Oberflächenabflusses vollständig versickern können (Sartor, 2002). Das in den Rohren gesammelte Wasser wird ebenfalls zum Teil dem Zwischenabfluss zugeführt.

Nach (Herrmann, 1997) kann eine mengenmäßig zu große Versickerung das Hochwasserpotential verstärken. Er erklärt, dass im Falle eines Hochwasserereignisses sich die Hochwasserwelle bis zu 80 % aus dem Zwischenabfluss im Boden (Abfluss in Mikroporen) und Altwasser (Wasser, das bereits im Boden gespeichert war, bzw. mittels Druckimpuls verdrängt wird (Sartor, 2002)), zusammensetzt.

Wird nun zu dem Direktabfluss das steigende Grundwasser hinzugezählt, wird durch reine Versickerungsanlagen dem Boden mehr Wasser zugeführt, als es im natürlichen Zustand der Fall ist (Sartor, 2002). Das ist darauf zurückzuführen, dass reine Versickerungsanlagen wie Schachtversickerungen oder Rohr-Rigolen Systeme höhere Durchlässigkeitswerte als ein natürlich gewachsener Boden aufweisen (Sartor, 2002).

Hinzukommt, dass schon aus Qualitätsgründen (keine Reinigung durch Oberbodenschicht) eine Regenwasserbewirtschaftung rein aus Rigolen- und Schachtversickerung vermieden werden sollte. Der Schutz von Boden und Grundwasser muss jederzeit gewährleistet sein.

5 Methodik

Durch das Aufstellen der Wasserbilanz und dem anschließenden Vergleich des Ursprungszustandes und mit dem durch naturnahe Regenwasserbewirtschaftungssysteme modifizierten Zustand in drei unterschiedlich siedlungsstrukturellen Einzugsgebieten, werden die Wirkungsweise und der zielführende Anwendungsbereich dieser Systeme untersucht.

Zur Modellaufstellung und Simulation diente die Open Source-Modellierungssoftware SWMM 5.1 (CH2water, 2016).

Die Vorgehensweise strukturiert sich demnach, wie folgt:

Die Wirkungsweise wird unter den Gesichtspunkten der Reduzierung des Oberflächenabflusses, der Steigerung der Evapotranspiration und dem Rückhalt bzw. der Speicherung des Niederschlages bewertet. Hierzu wird zunächst die Wasserbilanz des Ausgangszustandes der Einzugsgebiete ermittelt. Anschließend wurde je Simulationdurchlauf eine Form naturnaher Regenwasserbewirtschaftung eingefügt und die daraus resultierende Wasserbilanz errechnet. Der Vergleich des Urzustandes mit dem adaptierten Zustand ergibt eine Änderung der Wasserbilanzkomponenten. Im Weiteren wird anhand der siedlungsstrukturellen Unterschiede der drei Einzugsgebiete der mögliche zielführende Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftungssysteme untersucht. Im Anschluss wurden die verwendeten Maßnahmen mittels Kostenrechnung auf deren Wirtschaftlichkeit geprüft.

Die durchgeführten Schritte können wie folgt zusammengefasst werden:

- Einspielen der Regen- und Klimadaten
- Modellieren eines Grundwasserlayers zur Simulierung einer ungesättigten Bodenschicht
- Aufstellen der Wasserbilanz im ursprünglichen Zustand (ohne Verwendung von LIDs)
- Auswahl und Einfügen eines LIDs je Simulationdurchlauf
- Aufstellen der Wasserbilanz nach dem Einfügen der LIDs
- Vergleich der Wasserbilanzen hinsichtlich Änderungen bei Evapotranspiration, Oberflächenabfluss und Speicheränderung

5.1 Bilanzierung dreier Einzugsgebiete

Als Grundlage zur Modellierung dienen die von Gerald Krebs in seiner Dissertation an der Aalto University in Finnland verwendeten Einzugsgebiete (Krebs, 2016). Im Wesentlichen soll die Wasserbilanz von dem bisherigen Entwässerungssystem berechnet und in Vergleich zu einer mit Regenwasserbewirtschaftungsanlagen optimierten Entwässerung gesetzt werden. Es soll aufgezeigt werden, welche Maßnahme sich aufgrund der gegebenen Randbedingungen der einzelnen Einzugsgebiete am besten eignet bzw. welches der gewählten Regenwasserbewirtschaftungssysteme den größten positiven Einfluss auf die Wasserbilanz nimmt.

5.1.1 Verwendetes Programm SWMM 5.1

Das von der EPA entwickelte Programm SWMM 5.1 (storm water management model) ist ein instationäres Berechnungsmodell und wird zur Simulation von Niederschlagsereignissen in urbanen und landwirtschaftlichen Gebieten verwendet. Die EPA (US Environmental Protection Agency) ist die Umweltschutzbehörde der Vereinigten Staaten von Amerika. Sie ist eine unabhängige Behörde, die sich um die Umsetzung von Gesetzen bezüglich des Umweltschutzes und des Schutzes der menschlichen Gesundheit kümmert. Unter anderem hat die EPA zum Ziel, den Oberflächenabfluss zu reduzieren und die Wasserqualität zu verbessern. Hierbei sieht die EPA den Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen als zielführend (EPA, 2016).

SWMM bedient sich zur N-A-Simulation der sogenannten Differentialmethode nach St. Venant. Die St. Venant'sche Differentialgleichung vereint die Bewegungs- und die Kontinuitätsgleichung. SWMM kann für Kurz- sowie für Langzeitregenereignisse verwendet werden und gibt Informationen über das Abflussverhalten sowie über die Schadstoffkonzentration des Niederschlags (Wasserqualität und -quantität) auf der Geländeoberfläche und in der Kanalisation. Neben der üblichen Entwässerung über die Kanalisation kann es auch die Hydrologie der naturnahen Regenwasserbewirtschaftungssysteme simulieren (Christen et al., 2016).

5.1.2 Beschreibung der Einzugsgebiete

Die zu bearbeitenden Einzugsgebiete befinden sich in Lahti, Süd-Finnland (60.9°N, 25.6°O). Lahti ist die Hauptstadt der Region Päijät-Häme und liegt ungefähr 100 km nördlich von Helsinki. Derzeit leben 118.961 Einwohner in Lahti (Stand: 31.3.2016 (Lahti – Wikipedia, 2016)) Transport- und Handelsgeschäfte prägen das Wirtschafts-bild dieser Region (Discovering Finland Guide Oy, 1999).

5.1.2.1 Geologie

Der Boden in der Region Lahti setzt sich aus Sand, feinkörnigem Sand und sandigem Lehm zusammen. Die anschließende Felsschicht enthält Granit, Granodiorit oder Paragneiss (Geological Survey of Finland, 2015).

5.1.2.2 Klima

Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei 633 mm. Im Jahresdurchschnitt beträgt die Lufttemperatur 4,1°C (Kersalo and Pirinen, 2009).

5.1.2.3 Konventionelles Entwässerungssystem

Lahti wird von der Endmoräne „Salpausselkä“ durchzogen, durch die sich die Stadt in zwei Einzugsgebiete, Nord und Süd, aufteilt. Während eines Regenereignisses wird der Niederschlagsabfluss des nordwestlichen Stadtteils in den See „Vesijärvi“ geführt, wobei für die Kanalisation des nordöstlichen Teils der Fluss „Kymijoki“ als Vorfluter dient. Der im Süden anfallende Niederschlag wird in den Fluss „Porvoonjoki“ entwässert.

Als bisheriges Entwässerungssystem wird eine Trennkanalisation mit einer Gesamtlänge von 394 km genutzt. 70 km des Entwässerungssystems verlaufen in offenen oberirdisch geführten Gräben, weitere 16 km der Kanalisation sind als Mischsystem ausgebildet (Krebs, 2016).

5.1.2.4 Orthographische Lage

Zwei der drei Einzugsgebiete liegen nahe dem Stadtzentrum, wohingegen das dritte Einzugsgebiet etwas außerhalb liegt und sich damit auch in seiner Infrastruktur von den Einzugsgebieten 1 und 2 abhebt (s. Abbildung 5-1).



Abbildung 5-1: Übersicht von Lahti mit den Einzugsgebieten 1-3 (Googlemaps, Zugriff am 24.7.2016)

Das Einzugsgebiet 1 (s. Abbildung 5-2) umfasst eine Fläche von 5,87 ha und liegt im Stadtzentrum. Durch die zentrale Lage sind aktuell 86 % der Fläche versiegelt (5,04 ha). Das Einzugsgebiet 1 ist hauptsächlich geprägt von Wohnhausblocks und Bürogebäuden (Krebs, 2016).

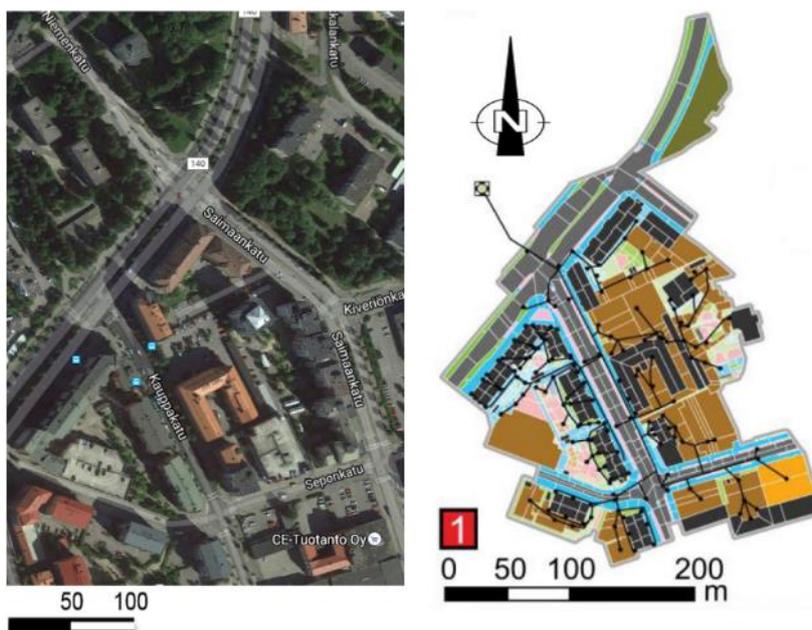


Abbildung 5-2: Darstellung Einzugsgebiet 1: Bebauungs- und Flächeneinteilungsplan (links: Googlemaps, Zugriff am 24.7.2016, rechts: adaptiert (Krebs, 2016))

Das Einzugsgebiet 2 (s. Abbildung 5-3) liegt einen Kilometer südlich von Gebiet 1 und weist einen Versiegelungsgrad von 54 % (3,56 ha) von der insgesamt 6,63 ha großen Gesamtfläche auf. Die Fläche ist hauptsächlich mit Wohnhausblocks bebaut. Richtung Osten findet man vermehrt freistehende Wohnhäuser für ein bis zwei Parteien (Krebs, 2016).

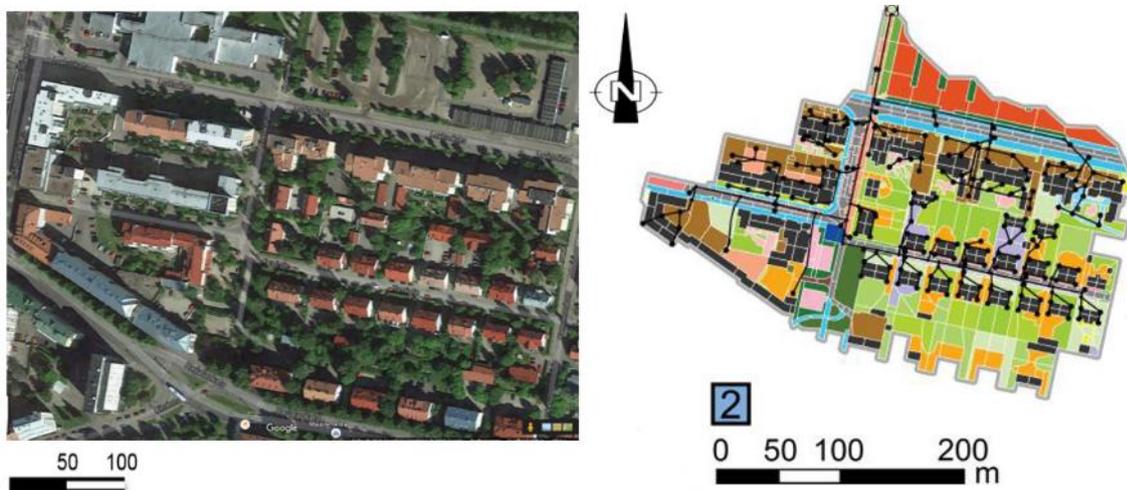


Abbildung 5-3: Darstellung Einzugsgebiet 2: Bebauungs- und Flächeneinteilungsplan (*links*: Googlemaps, Zugriff am 24.7.2016, *rechts*: adaptiert (Krebs, 2016))

Das Einzugsgebiet 3 (s. Abbildung 5-4) befindet sich 4 km nördlich von Gebiet 1 und hat eine Fläche von 12,59 ha von denen 19 % (2,37 ha) undurchlässig gestaltet sind. Das dritte Gebiet hat den Charakter einer Vorstadtsiedlung mit freistehenden Wohnhäusern und einem angrenzenden großen Waldstück, das 50 % der Gesamtfläche von Einzugsgebiet 3 einnimmt (Krebs, 2016).

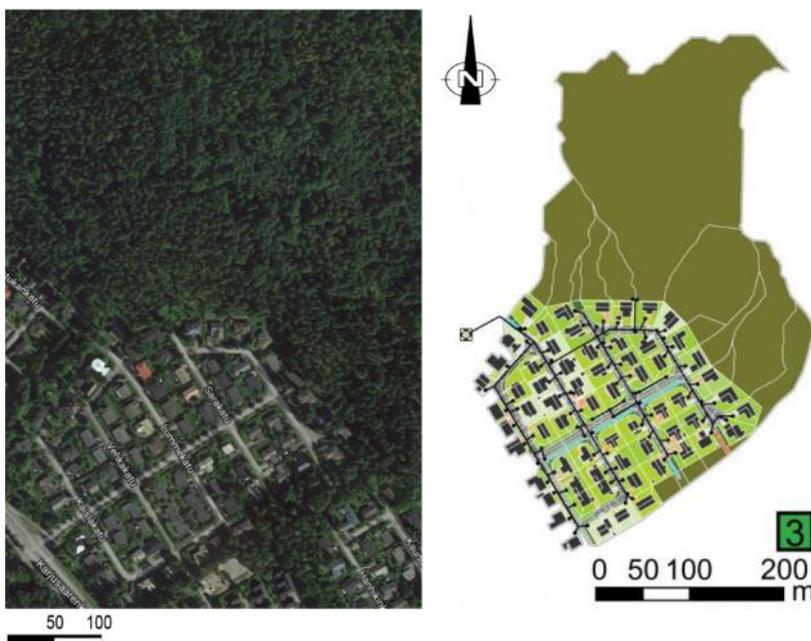


Abbildung 5-4: Darstellung Einzugsgebiet 3: Bebauungs- und Flächeneinteilungsansicht (*links*: Googlemaps, Zugriff am: 24.7.2016, *rechts*: adaptiert (Krebs, 2016))

5.1.3 Simulationsgrundlage

Im Folgenden werden Grundlagen zur Modellierung erklärt. Diese sind wichtig, um die Grundzüge des Modells zu verstehen. Hierbei wird auf die allgemeine Abflussbildung und deren Umsetzung in SWMM eingegangen. Außerdem werden die Berechnungsgrundlage der Infiltrationsprozesse sowie das Modellieren eines Grundwasserleiters beschrieben.

5.1.3.1 (Oberflächen) Abflussbildung

Zur Niederschlags-Abfluss-Modellierung wird zunächst der effektive Niederschlag, also die Menge, die effektiv zum Abfluss kommt, berechnet. Der effektive Niederschlag (mm/h) stellt das Volumen der Abflusswelle dar und ist die Gesamtniederschlagsmenge nach Abzug aller Verluste (s. Abbildung 5-5). Die resultierenden Verluste über die Regendauer können unterschieden werden in:

- Anfangsverluste (Speicheränderung ΔS : Benetzungs- und Muldenverluste)
- Dauerverluste (Versickerung und Verdunstung)

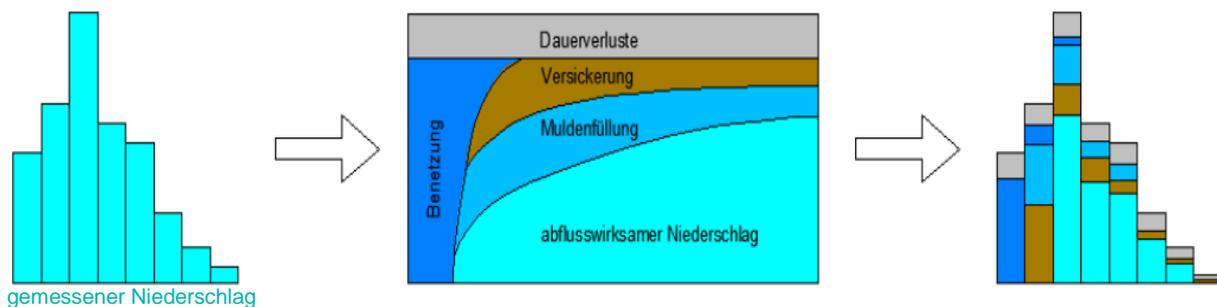


Abbildung 5-5: Ermittlung des abflusswirksamen Niederschlags (Muschalla et al., 2015)

Den Oberflächenabfluss (Surface Runoff) berechnet SWMM aus der Wassermenge, die in das Kanalisationsnetz eingeleitet wird. In SWMM wird ein Teileinzugsgebiet nach dem Prinzip des „nonlinear Reservoir“ behandelt. Das bedeutet, dass der Zufluss divergent, also nicht linear zum Abfluss ist. Der Zufluss setzt sich aus dem Niederschlag und dem Abfluss (Surface Runoff) des höher gelegenen Einzugsgebietes zusammen (KU Leuven, 2006). Volumen und Steigung der Abflussganglinie ist abhängig vom Befestigungsgrad der Flächen und deren Neigung (s. Abbildung 5-6) (Christen et al., 2016).

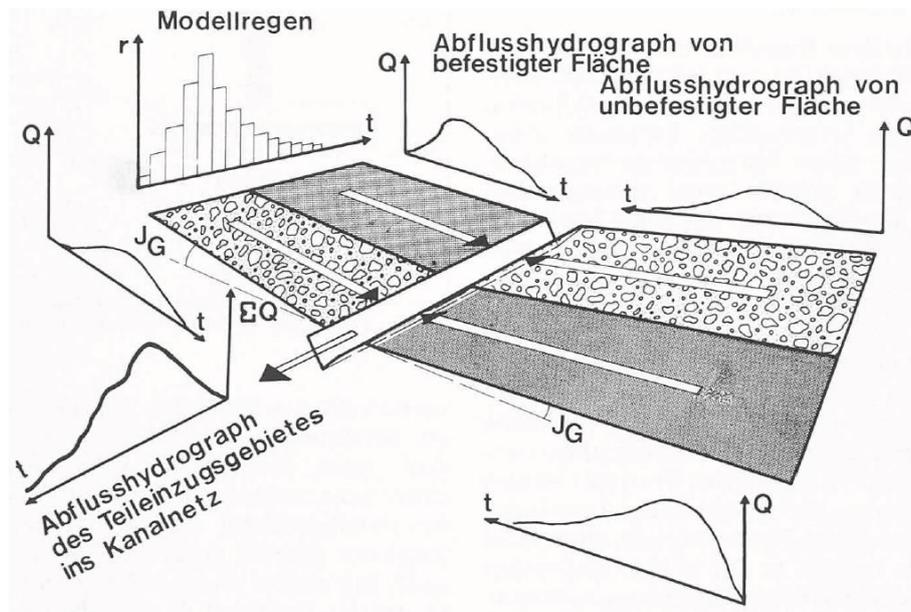


Abbildung 5-6: Schematische Darstellung des Oberflächenabflusses (Christen et al., 2016)

5.1.3.2 Infiltrationsprozess

Der Infiltrationsprozess kann in SWMM nach drei Methoden bestimmt werden:

- Horton Methode,
- Green-Ampt Methode,
- Curve Number Methode

Für das hier simulierte Beispiel wird die Green-Ampt-Methode gewählt, die nach wie vor Grundlage der Berechnung der Infiltrationskomponente in modernen Niederschlags-Abfluss-Modellen ist. Sie berechnet die Infiltration ab dem Zeitpunkt, wenn die oberflächennahe Schicht bereits gesättigt ist. Erst wenn sich eine wassergesättigte Front ausgebildet hat wird Wasser in die ungesättigte darunterliegende Schicht infiltriert (s. Abbildung 5-7) (Koch, 2003).

Die erforderlichen Parameter bei dieser Methode sind:

- das Anfangs-Feuchtigkeits-Defizit in der ungesättigten Zone
- hydraulische Durchlässigkeit bei Sättigung
- kapillare Saugspannung

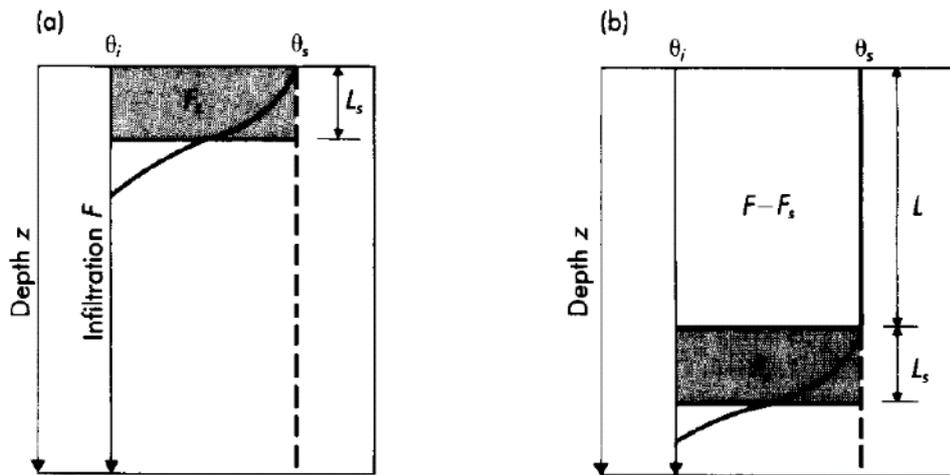


Abbildung 5-7: Schema des Infiltrationsvorganges nach Green-Ampt (a) Profil bei Sättigung der oberflächennahen Schicht; (b) Profil nach der „ponding Zeit“ (oberirdischer Abfluss hat begonnen) (Koch, 2003)

mit:

F : Infiltration, z : Tiefe, θ_s : Sättigungsfeuchte, θ_{ini} : Anfangsfeuchte, L_s : Dicke der gesättigten Schicht, L : Transportzone

Die Green-Ampt Gleichung (s. Gleichung 5-1) leitet sich aus der Darcy-Weißbach-Gleichung ab. Sie geht von einer zu Beginn vorhandenen Saugleistung aus, die über die Zeit schwächer wird (Koch, 2003).

$$F = K + \psi \cdot \Delta\theta \cdot \ln\left(1 + \frac{F}{\psi \cdot \Delta\theta}\right)$$

Gleichung 5-1

mit:

F : Infiltration, K : hydraulische Durchlässigkeit bei Sättigung, θ : Feuchtigkeitsgehalt, ψ : Saughöhe (suction head) (caee.utexas, 2012)

5.1.3.3 Modellieren des Grundwasserslayers

Das Modellieren eines Grundwasserslayers war zur Berechnung der Wasserbilanz zusätzlich notwendig. SWMM bietet hier keine andere Möglichkeit um dem Untergrund eine ungesättigte Zone zuzuweisen. Das Fehlen einer ungesättigten Schicht hätte zur Folge, dass die versickerte Niederschlagsmenge als reiner Verlust (Infiltration Loss) verrechnet wird. Die Prozesse der Evaporation und Transpiration sowie die Grundwasseranreicherung können dadurch nicht simuliert werden. Durch das Einfügen des Grundwasserslayers können die Einflüsse der infiltrierten Wassermengen in den Boden und der daraus resultierenden Bodenfeuchte in der ungesättigten Schicht bezüglich der Evapotranspirationsrate berücksichtigt werden (s. Abbildung 5-8).

In SWMM wird der Grundwasserslayer in zwei Schichten dargestellt, eine obere ungesättigte Schicht und eine untere gesättigte Schicht. Im Fall eines Niederschlagsereignisses versickert Wasser von der Oberfläche in die obere ungesättigte Schicht. Von dort aus kann es entweder verdunsten oder in die darunterliegende gesättigte

Schicht infiltrieren. Aus der unteren Schicht kann das Wasser in tieferliegende Schichten versickern (Deep Percolation) oder wieder in die obere Schicht aufsteigen.

SWMM unterteilt hier den Anteil der Evapotranspiration in zwei Teile:

- Upper zone ET: Evapotranspiration aus der oberen Zone
- Lower zone ET: Evapotranspiration aus der unteren Zone

Die Evapotranspiration aus der unteren Schicht wird unterbunden, wenn der Abstand von Geländeoberkante bis zur gesättigten Schicht (=Dicke der ungesättigten Schicht) die Wurzeltiefe der Vegetation übersteigt (= Lower Evaporation Depth).

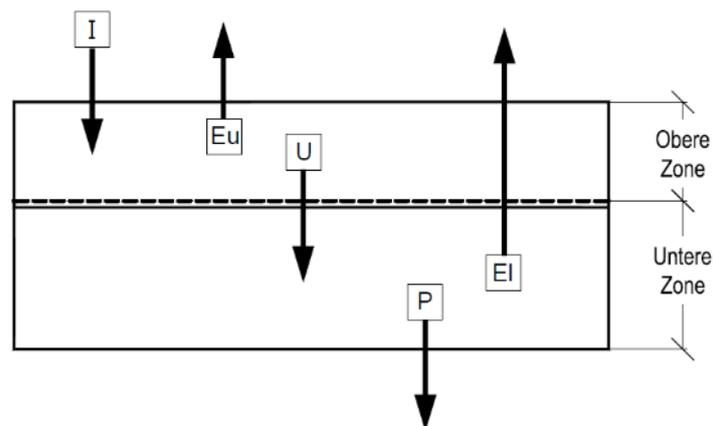


Abbildung 5-8: Grundwasserkörper in PCSWMM; unterteilt in obere (ungesättigt) und untere (gesättigt) Zone (modifiziert nach (Rossmann and Huber, 2016))

mit:

I: Infiltration, Eu: Evaporation der oberen Zone (upper zone), U: Perkolationsverlust von der oberen in die untere Zone, P: Perkolationsverlust aus der unteren Schicht in tiefere Schichten, El: Evaporation von der unteren Schicht

Der Anstieg des GW-Spiegels ist abhängig von der Infiltration aus der oberen Schicht in die gesättigte untere Schicht und dem Abfluss aus dieser Schicht. Der Abfluss der unteren Schicht ist abhängig vom Verlust durch Evapotranspiration aus dieser Schicht, der Tiefenperkolationsverlust und der seitlichen Grundwasserströmung. Wobei die Evapotranspiration aus der unteren gesättigten Schicht sich auf die Transpiration über die Pflanzen beschränkt. Die Evapotranspirationstiefe der unteren Schicht ist abhängig von der Wurzeltiefe der Pflanzen, die je nach Boden- und Pflanzenart variiert. Die tatsächliche Evapotranspirationstiefe der unteren Schicht ist dabei größer als die Wurzeltiefe anzunehmen, aufgrund der tieferwirkenden Kapillarkräfte der Wurzeln (Rossmann and Huber, 2016).

Wenn der Wasserspiegel des Grundwasserleiters bis zur Oberfläche ansteigt, kommt es aufgrund der vollen Sättigung des Bodens zum Oberflächenabfluss (Rossmann and Huber, 2016).

Die Bodenart der Einzugsgebiete war für die drei Modelle bekannt. Es handelte sich in allen Einzugsgebieten um einen schluffig lehmigen Boden (Silt Loam). Anhand der

Bodenart konnten mit Hilfe der Tabelle 5-1 die ersten Parameter für den Grundwasserlayer festgelegt werden.

Tabelle 5-1: Bodenparameter für verschiedene Bodentypen (Rawls et al., 1983)

Soil Type	Porosity (ft ³ /ft ³)	Field Capacity (ft ³ /ft ³)	Wilting Point (ft ³ /ft ³)	Saturated Hydraulic Conductivity (in/hr)
Sand	0.437	0.062	0.024	4.74
Loamy sand	0.437	0.105	0.047	1.18
Sandy loam	0.453	0.190	0.085	0.43
Loam	0.463	0.232	0.116	0.13
Silt loam	0.501	0.284	0.135	0.26
Sandy clay loam	0.398	0.244	0.136	0.06
Clay loam	0.464	0.310	0.187	0.04
Silty clay loam	0.471	0.342	0.210	0.04
Sandy clay	0.430	0.321	0.221	0.02
Silty clay	0.479	0.371	0.251	0.02
Clay	0.475	0.378	0.265	0.01

Die „Lower Evaporation Depth“ wurde auf den Wert „0“ festgelegt. Damit bleibt die Wasseraufnahme über die Wurzeln und die Verdunstung über das Blattwerk unberücksichtigt.

Der Anteil der Evapotranspiration aus der oberen Schicht wurde mit dem Wert 0,35 angenommen (Upper Evap. Fraction = 0,35) (CHI, 2016).

Die „Groundwater Loss Rate“ bezieht sich auf die Tiefenperkolation von der gesättigten Schicht in einen tiefer gelegenen Grundwasserkörper. Die Tiefenperkolation ist abhängig von der hydraulischen Leitfähigkeit der Grundwasserschicht. Diese ist vergleichbar mit der Leitfähigkeit eines dichten tonigen Bodens und damit sehr klein zu wählen. Die Lower GW Loss Rate wurde mit 0,002 mm/h festgelegt (Rossmann and Huber, 2016).

Die Anfangsfeuchte der ungesättigten oberen Schicht wurde mit dem Wert des Welkpunktes gleichgesetzt. Damit vereinfachte sich die spätere Aufstellung der Wasserbilanz, da der Welkpunkt die unterste Grenze der Bodenfeuchte, um das Überleben der Pflanzen zu sichern, darstellt.

In SWMM muss einem Grundwasserleiter immer ein Knoten zugewiesen werden, in dem er zum Abfluss kommt, dem sogenannten „Receiving Node“. Das Abflussverhalten des Grundwasserleiters wird durch den Koeffizienten A1 und den Abflussexponenten B1 definiert. Diese wurden nach (Rossmann and Huber, 2016) gewählt: A1=0,5 ; B1=1,0.

Somit ergaben sich für den Grundwasserlayer folgende Eigenschaften:

Tabelle 5-2: Grundwasser Parameter

Name	
Porosity	0,501
Wilting Point	0,135
Field Capacity	0,284
Conductivity [mm/hr]	6,80
Conduct. Slope	10,0
Tension Slope	15,0
Upper Evap. Fraction	0,35
Lower Evap. Depth [m]	0,0
Lower GW Loss Rate [mm/hr]	0,002
Bottom Elevation [m]	s. Tabelle 5-3
Water Table Elevation [m]	0,0
Unsat. Zone Moisture	0,135
Upper Evap. Pattern	-

Das Einfügen des Grundwasserleiters sollte, wenn möglich, auf realen Grundwasserhöhen basieren. Das war bei den bearbeitenden Einzugsgebieten nur bedingt möglich. Im Einzugsgebiet 2 konnte aufgrund einer mittig liegenden Messstelle die genaue Grundwasserhöhe ermittelt werden.

Die Einzugsgebiete 1 und 3 weisen extreme Unterschiede in ihren Geländehöhen über das Einzugsgebiet auf. Auch die realen Grundwasserstände zeigen große Höhenunterschiede. Die Bildung des Mittelwertes der realen Grundwasserhöhen führte dazu, dass die Grundwasserhöhe in einigen Fällen die Höhe des vorhandenen Geländes überstieg. Auf Grund dessen, musste die Grundwasserhöhe bezogen auf die tiefste GOK gewählt werden. Der Grundwasserleiter wurde abhängig von der Geländehöhe mindestens 2 m unter GOK der niedrigsten Teileinzugsfläche angesetzt. Auf ein Gefälle des Grundwasserleiters wurde ebenfalls verzichtet, da es bei der Simulation der Grundwasserneubildung nicht mit einfließt.

Da es für die weitere Simulation nicht relevant war, wurde eine Grundwasserhöhe über das gesamte Einzugsgebiet angenommen, statt jeder Teileinzugsfläche eine separate Grundwasserhöhe zuzuteilen.

Die Tiefenlage des Grundwasserleiters für die drei Einzugsgebiete wurde mit den Höhen in Tabelle 5-3 angesetzt.

Tabelle 5-3: Grundwasserhöhen

Einzugsgebiet	Grundwasserhöhe (Water Table Elevation)
Einzugsgebiet 1	90,95 m ü. A. (gewählt, nach Geländeoberkante)
Einzugsgebiet 2	95,5 m ü. A. (Messwert)
Einzugsgebiet 3	86,0 m ü. A. (gewählt, nach Geländeoberkante)

5.1.3.4 Flächencharakteristik

Grundsätzlich können in SWMM zwei Flächentypen unterschieden werden, deren Durchlässigkeit in Prozent der Teileinzugsfläche ausgedrückt wird:

- durchlässige (pervious) Flächen: z. B. Wald, Wiese, 100 % der Fläche sind durchlässig (*Imperviousness [%] = 0,0*)
- undurchlässige (impervious) Flächen: z. B. Straßen, Dachflächen, 100 % der Fläche ist undurchlässig (*Imperviousness [%] = 100*)

Folgende weitere Parameter können für Flächen definiert werden:

- Neigung (Slope S)
- Querschnitt (Width W)
- Oberflächenrauigkeit (Roughness) nach Manning
- Speicherkapazität (Depression Storage), je nach Flächentyp

Die Speicher- oder Retentionsleistung einer Fläche ist das zurückgehaltene Wasser auf einer durchlässigen oder undurchlässigen Fläche, bevor es zum Abfluss kommt und beinhaltet:

- Pfützenbildung,
- Oberflächenfeuchtigkeit,
- Interzeption

Abflusswirksame Flächen werden entweder auf eine angrenzende durchlässige Fläche entwässert oder der Abfluss von diesen Flächen in die Kanalisation eingeleitet. Dachabflüsse werden in den meisten Fällen auf eine Grünfläche entwässert oder in Auffangvorrichtungen gesammelt. Wählt man eine der beiden Varianten wird der Oberflächenabfluss um den Anteil des Abflusses vom Dach vermindert. Für undurchlässige Flächen gilt, dass kein Wasser infiltriert wird (Infiltrationsrate=0) (Rossman, 2016).

Seit Huber (2001) ist es möglich, dass Abflüsse von einer Teilfläche auf die angrenzende Fläche geleitet werden können ohne diese sofort in die Kanalisation einzuleiten. Das wird in SWMM als „Re-Routing“ bezeichnet und entspricht einer realen Abflusssituation während eines Niederschlagsereignisses. Außerdem wird hier der Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen (LIDs) einbezogen. SWMM kann den Abfluss von einer durchlässigen Fläche (Wiese) über eine undurchlässige Fläche (Gehweg) bis hin zu einer Regenwasserbewirtschaftungsanlage (Versickerungsmulde) simulieren. Die durch das „Re-Routing“ möglichen Abflusswege sind in Abbildung 5-9 zu sehen (Huber, 2001).

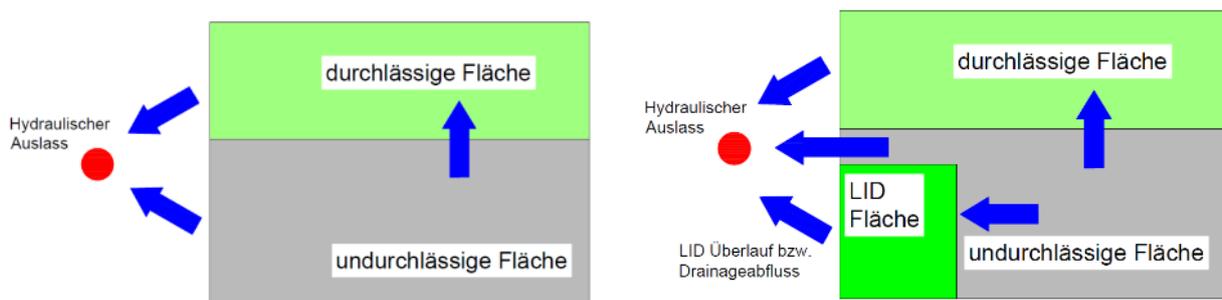


Abbildung 5-9: „Re-Routing“ nach Huber (2001), Abfluss über unterschiedliche Teilflächen bevor er in die Kanalisation geleitet wird ((Rossmann and Huber, 2016), modifiziert)

5.1.4 Datengrundlage

Zur Durchführung der Wasserbilanzanalyse der drei beschriebenen Einzugsgebiete wurden die von Dr. Gerald Krebs (Krebs, 2016) bereits hydraulisch kalibrierten Modelle verwendet.

5.1.4.1 Niederschlagsdaten

Die Niederschlagsdaten lagen von den Jahren 2008 bis 2011 vor und wurden direkt vor Ort von Krebs (2016) in Zusammenarbeit mit der Universität Helsinki aufgezeichnet. Für die Simulation wurden die Regendaten vom Jahr 2009 gewählt. Aus diesem Jahr lagen Messdaten mit den geringsten Messfehlern vor und die zusätzlich von Krebs (2006) verifiziert wurden. Die Messungen wurden in einem Zeitintervall von einer Minute aufgenommen.

Abbildung 5-10 zeigt den Niederschlagsverlauf des Jahres 2009. Die maximale Niederschlagsintensität im Jahr 2009 beläuft sich auf ca. 65 mm/h, bildet damit aber über den Jahresverlauf eine Ausnahme. Die häufigsten Regenereignisse haben eine Niederschlagsintensität von 15-25 mm/h im Sommer und ca. 5 mm/h im Herbst bis zum Frühjahr.

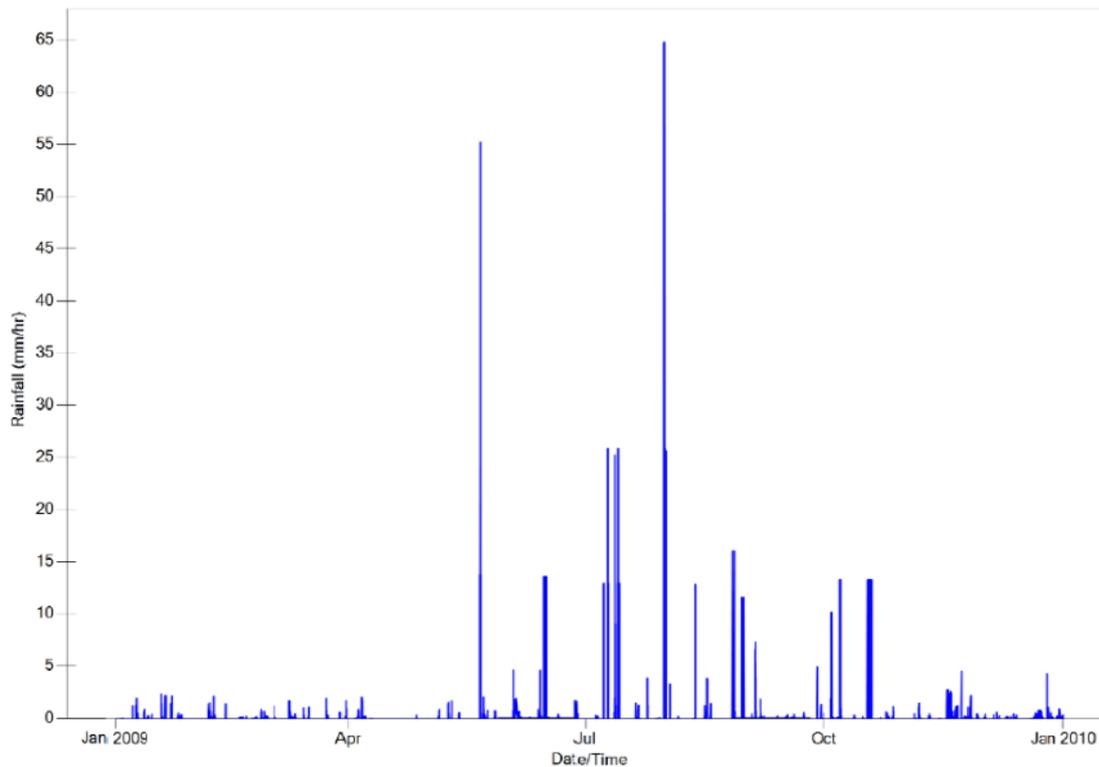


Abbildung 5-10: gemessene Niederschlagsereignisse im Jahr 2009

5.1.4.2 Klimadaten

SWMM benötigt zur Simulation von Schneeschmelze (bleibt hier unberücksichtigt) und Evapotranspiration zusätzlich Klimadaten des Einzugsgebietes.

Für das zu bearbeitende Simulationsmodell lagen die folgenden Klimadaten der Jahre 2008 bis 2011 vor:

- Höchst- und Tiefsttemperatur pro Tag
- Potentielle Evapotranspiration pro Tag
- Windgeschwindigkeit

Die Potentielle Evapotranspiration ist „die maximal mögliche Verdunstung unter den jeweiligen meteorologischen Bedingungen“ (Muschalla et al., 2008).

5.1.4.3 Flächennutzung

Die Modelle (Krebs, 2016) waren bereits in ihre Teileinzugsgebiete und deren Nutzung unterteilt. Die Nutzung ist ausschlaggebend um sich für Art und Lage der LIDs zu entscheiden. Folgende Flächennutzungen sind typisiert:

- Parkplatz (PL)
- Gehweg (P)
- Dachflächen (R)
- Grünflächen 100% durchlässig (G)
- Straße (S)
- Andere (O) (z. B. Spielplätze)
- Grundstückzufahrten (D)

5.1.5 Einfügen der LIDs

Mit der Version SWMM 5.1 können naturnahe Regenwasserbewirtschaftungssysteme modelliert werden. Hierfür stehen dem Benutzer folgende Arten an LIDs zur Wahl:

- Regentonne (Rain Barrel)
- Gründach (Green Roof)
- teildurchlässige Flächen (Permeable Pavement)
- Versickerungsgräben und –mulden (Vegetative Swale)
- Rigolenversickerung (Infiltration Trench)
- Regengarten und Bioretention (Raingarden + Bioretention)

Jedem LID werden in SWMM unterschiedliche Teillayer zugeordnet (s. Abbildung 5-11). SWMM unterscheidet hier die fünf folgenden:

- Oberfläche (Surface)
- Bodenbelag (Pavement)
- Boden (Soil)
- Speicher (Storage)
- Drainage (Underdrain)

LID Type	Surface	Pavement	Soil	Storage	Underdrain
Bio-Retention Cell	x		x	x	o
Porous Pavement	x	x		x	o
Infiltration Trench	x			x	o
Rain Barrel				x	x
Vegetative Swale	x				

Abbildung 5-11: Teillayer der unterschiedlichen LIDs (x notwendig, o optional) (James et al., 2010)

Je nach verwendetem LID sind unterschiedliche Layer und ihre Eigenschaften zu definieren. So ist in dem Layer „Surface“ beispielsweise eine Oberflächenrauigkeit (Mannings roughness n) und der Anteil an vorhandener Vegetation (Vegetation Volume) der gewählten Fläche festzulegen (s. Abbildung 5-12). Quellen für die Parameterwahl der einzelnen LID-Layer können beispielsweise das Handbuch (James et al., 2010), publizierte Erfahrungen von bisherigen SWMM-Benutzern oder Ergebnisse von eigenen Testgebietsrechnungen (Krebs, 2016) sein.

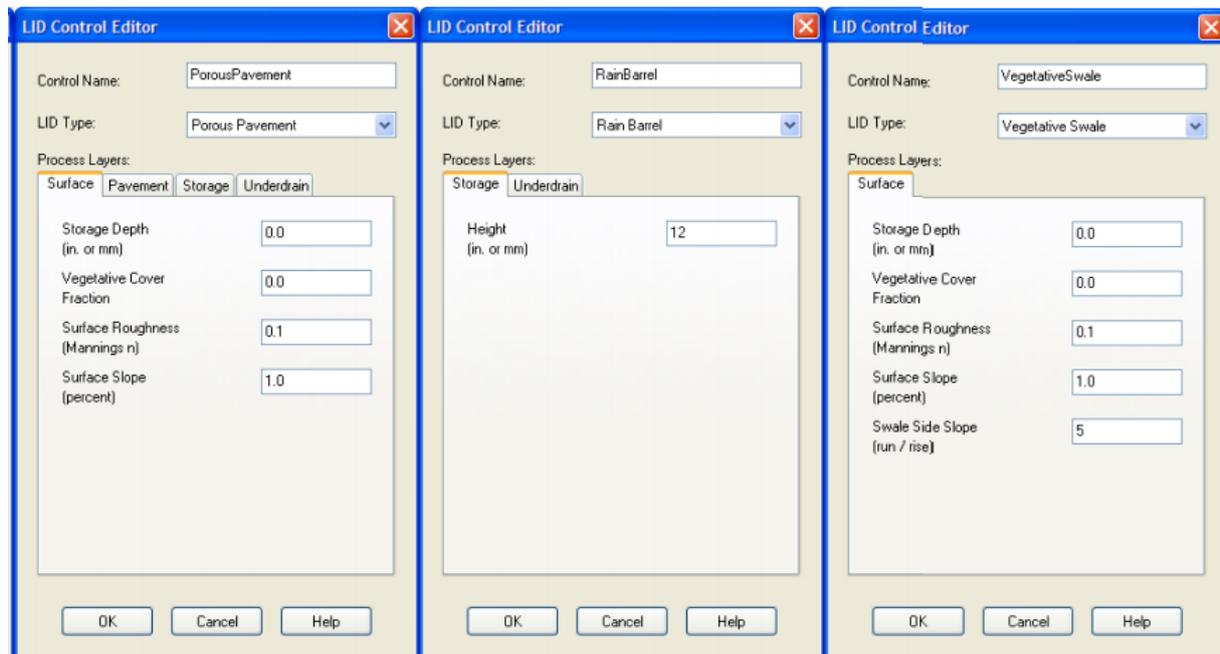


Abbildung 5-12: LID Control Editor zum Definieren der Eigenschaften (McCutcheon, 2013)

5.1.5.1 Wahl der LIDs

Der Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen ist an einige Randbedingungen gekoppelt, beispielsweise an siedlungsstrukturelle Faktoren, wie die vorhandene Bebauung und das lokale Entwässerungssystem (s. Tabelle 5-4). Hinzu kommen wasserwirtschaftliche Faktoren wie Lage und Schutz des Grundwasserleiters. Geogene Faktoren, wie die vorliegende Bodenart und dessen Durchlässigkeit können den Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftungssysteme einschränken.

Tabelle 5-4: Einflussfaktoren der Niederschlagswasserbewirtschaftung (Assinger, 2012)

Einflussfaktoren			
			
Siedlungsstrukturelle Faktoren	Biogene Faktoren	Geogene Faktoren	Wasserwirtschaftliche Faktoren
Grundstück <ul style="list-style-type: none"> - Art der versiegelten Fläche - Versiegelungsgrad - Bebauungsgrad - Grünflächen - überbaubare Flächen - benachbarte Nutzung Gebäude <ul style="list-style-type: none"> - Größe - Dachtyp - Entwässerungssysteme Einzugsgebiet <ul style="list-style-type: none"> - Größe des Einzugsgebiets - Gebietsnutzung - Bebauungsgrad 	Umwelt <ul style="list-style-type: none"> - Auswirkung auf Kleinklima - Gestaltungsmöglichkeiten 	Bodenbeschaffenheit <ul style="list-style-type: none"> - Mächtigkeit der Bodenschichten - Bodentyp - Durchlässigkeit - Altlasten Topographie <ul style="list-style-type: none"> - Hangneigung - Risikobereiche 	Niederschlag <ul style="list-style-type: none"> - Intensität - Dauer - Menge Grundwasser <ul style="list-style-type: none"> - Grundwasserschutzzonen - Grundwasserflurabstand Oberflächengewässer <ul style="list-style-type: none"> - Größe und Entfernung von Oberflächengewässern

Die Einzugsgebiete in Lahti bieten durch ihre Siedlungsstruktur unterschiedliche Möglichkeiten für den Einsatz der LIDs. Innerstädtische Gebiete haben einen höheren Anteil an versiegelten Flächen, die gleichzeitig begeh- und befahrbar bleiben müssen (s. Einzugsgebiet 1+2). In Randgebieten (s. Einzugsgebiet 3) mit einem großen Grünflächenanteil beschränkt sich der Einsatz der LIDs auf zurückhaltende Maßnahmen, da bereits ein großer Teil des Niederschlags verdunsten und versickern kann.

Durch die genaue Unterteilung der Teileinzugsgebiete in Größe, Nutzung und deren Abflussrichtung wurden die LIDs bestmöglich eingesetzt.

Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsweisen bezüglich der Wasserbilanz und der möglichen Einsatzgebiete, wurden folgende Bewirtschaftungssysteme eingesetzt:

- teildurchlässige Flächen (Permeable Pavement)
- Gründach (Green Roof)
- Regentonne (Rain Barrel)
- Versickerungsgraben/ -mulde (Vegetative Swale)

5.1.5.2 Wahl der LID-Parameter

Im weiteren Schritt wurden den LIDs und ihren Teillayern geeignete Parameter zugeordnet. Die Tabelle 5-5 zeigt die gewählten Parameter für die verwendeten LIDs. Bei der Ausführung der teildurchlässigen Flächen wurde ein flächendeckender Oberflächenbelag (z. B. durchlässiger Beton oder Asphalt) gewählt, wodurch es keinen undurchlässigen Flächenanteil der modifizierten Fläche gab (Impervious surface = 0,0). Die weiteren Werte für die teildurchlässigen Flächen wurden aus dem Handbuch für SWMM entnommen (James et al., 2010). Hierbei wurde für die angrenzende Bodenschicht, die als „Storage-Layer“ fungiert, der lokale Boden beibehalten (Silt-Loam), um keine zusätzlichen Aufwendungen für einen Bodenaustausch in der späteren Kalkulation berücksichtigen zu müssen. Außerdem wurden die teildurchlässigen Flächen ohne Drainage ausgebildet. Somit werden die Werte für den Teillayer „Underdrain“ auf null gesetzt.

Die Parameter für das Gründach stammen von einem Versuchsmodell eines Gründaches in Lahti (Krebs, 2016).

Die Regentonnen wurden anhand von zur Verfügung stehenden Herstellergrößen (Baumarkt Hellweg, 2016) sowie Erfahrungswerten von Nutzern und angelehnt an die im Handbuch von SWMM vorgeschlagenen Größenordnungen gewählt (James et al., 2010). Für die Versickerungsmulden konnten Literaturwerte (McCutcheon et. al, 2012) sowie Erfahrungen und Empfehlungen verschiedener Nutzer der Software SWMM (CHI, 2016) angewendet werden.

Tabelle 5-5: Wahl der LID-Parameter

LID	Layer	Literaturwerte			Wertebereich	gewählt
Permeable Pavement						
	Surface					
	Berm height [mm]	20 (CH2water, 2016)				20 mm
	Vegetation volume [fraction]	0 (CH2water, 2016)				0
	Surface roughness [Manning's n]	0,011-0,013 (CH2water, 2016)	0,03 (James 2001)	0,011-0,045 (Yen, 2001)	0,011-0,045	0,028
	Surface slope [percent]	1 (CH2water, 2016)	0-10 (Kuosa et al., 2014)		0-10	2 %
	Pavement					
	Thickness [mm]	100-150 (James et al., 2010)	75-200 (University of Maryland, 2016)		75-200	150 mm
	Void ratio [voids/solids]	0,12-0,21 (James et al., 2010)				0,16
	Impervious surface [fraction]	0 (CH2water, 2016)				0,0
	Permeability [mm/h]	2000 (CH2water, 2016)	2540 (Sochanska, 2014)	300-3960 (Illgen, 2009)	300-3960	2255 mm/h
	Clogging factor	s. Gleichung 5-3				833,75

	<u>Soil (Silt Loam)</u>					
	Thickness [mm]	100-150 (James et al., 2010)	50 (University of Maryland, 2016)		50-150	100 mm
	Porosity [volume fraction]	0,501	Parameter gewählt nach den lokalen Bodenverhältnissen (Rossmann and Huber, 2016)			0,501
	Field capacity [volume fraction]	0,248				0,284
	Wilting point [volume fraction]	0				0
	Conductivity [mm/h]	6,8				6,8 mm/h
	Conductivity slope	10				10
	Suction head [mm]	169,93				166,8 mm
	<u>Storage</u>					
	Thickness [mm]	150-450 (James et al., 2010)	75-100 (University of Maryland, 2016)		75-450	250 mm
	Void ratio [voids/solids]	0,5-0,75 (James et al., 2010)				0,6
	Conductivity [mm/h]	6,8 (James et al., 2010)				6,8 mm/h
	Clogging factor	0	Clogging Faktor des Bodens bleibt unberücksichtigt			0,0
	<u>Underdrain</u>					
	Drain Coefficient [mm/hr]	0, LID ohne Drainage				0
	Drain exponent	0, LID ohne Drainage				0
	Drain offset height [mm]	0, LID ohne Drainage				0

Green Roof						
	<u>Surface</u>					
	Berm height [mm]	30	Alle Werte für das Gründach von (Krebs, 2016)			30 mm
	Vegetation volume [fraction]	0,1				0,1
	Surface roughness [Manning's n]	0,168				0,168
	Surface slope [percent]	8				8,0 %
	<u>Soil</u>					
	Thickness [mm]	100				100 mm
	Porosity [volume fraction]	0,41				0,41
	Field capacity [volume fraction]	0,29				0,29
	Wilting point [volume fraction]	0,02				0,02
	Conductivity [mm/h]	37,9				37,9 mm/h
	Conductivity slope	40				40,0
	Suction head [mm]	61,3				61,3 mm
	<u>Drainage Mat</u>					
	Thickness [mm]	3,8				3,8 mm
	Void fraction	0,41				0,41
	Roughness [Manning's n]	0,01			0,01	
Rain Barrel						
	<u>Storage</u>					
	Berm height [mm]	600-900 (James et al., 2010)	Herstellergröße: 650 l (Baumarkt Hellweg, 2016)		600-900	650 mm

	<u>Underdrain</u>					
	Drain coefficient [mm/h]	s. Gleichung 5-4				0,834 mm/h
	Drain exponent	0,5 (James et al., 2010)				0,5
	Drain offset height [mm]	10 (CHIwater, 2016)				10,0 mm
	Drain delay [h]	48 (CHIwater, 2016)				24,0 h
Vegetative Swale						
	<u>Surface</u>					
	Berm height [mm]	150-600 (Rossman and Huber, 2016)	50-5000 (McCutcheon et al., 2012)		50-5000	200 mm
	Vegetation volume [fraction]	0,05 (CHI, 2016)	0,01-1 (McCutcheon et. al, 2012)		0,05-1	0,1
	Surface roughness [Manning's n]	0,03-0,2 (Rossman and Huber, 2016)	0,03-0,12 (Yen, 2001)	0,01-0,4 (McCutcheon et. al, 2012)	0,01-0,4	0,1
	Surface slope [percent]	0,5-3,0 (Rossman and Huber, 2016)	0,1-10 (McCutcheon et. al, 2012)		0,1-10	1 %
	Swale side slope [run/rise]	5 (CHIwater, 2016)	1-10 % (McCutcheon et. al, 2012)		1-10	5

Clogging Faktor

Der Clogging Faktor für die teildurchlässigen Flächen sagt aus, wie schnell sich die Poren und Fugen der Fläche mit Feinanteilen aus Abschwemmungen der überflossenen Flächen zusetzen. Laut dem DWA-A 138 kann eine Nutzungsdauer von 20-30 Jahren für Regenwasserbewirtschaftungsanlagen angesetzt werden. Je nach Platzierung der teildurchlässigen Fläche und dem Verschmutzungsgrad der umliegenden Flächen kann die Nutzungsdauer von Versickerungsflächen stark variieren. So konnten in Chicago Parkflächen, die entweder mit durchlässigem Asphalt, durchlässigem Beton oder Betonpflastersteinen ausgebildet wurden, nach 5 Jahren nur mehr 20-40 % ihrer ursprünglichen Versickerungsleistung aufweisen. Bei teildurchlässigen Flächen mit hohem Verkehrsaufkommen verloren die Flächen nach 5 Jahren bis zu 90 % ihrer Leistungsfähigkeit (Kumar et al., 2015). Laut (Muschalla et al., 2014) können auch Nutzungsdauern von bis zu 80 Jahren erreicht werden.

Zur Berechnung des Clogging Faktors wurde eine Lebensdauer von 30 Jahren angenommen (James et al., 2010).

$$\text{Clogging Faktor} = Y_{\text{clog}} \cdot P_a \cdot CR \cdot (1 + VR) / (T \cdot VR) \quad \text{Gleichung 5-2}$$

mit:

Y_{clog}: Jahre bis alle Poren verstopft sind, P_a: Gesamtniederschlagsmenge in einem Jahr, CR: ist der vom LID belegte Flächenanteil (hier: immer 100 %), VR: Porosität, ISF: undurchlässiger Flächenanteil, T: Dicke des Belages

gewählt: Y_{clog}=30 Jahre

mit: P_a=575 mm/Jahr, CR=100 %, VR=0,16; ISF: 0, T: 150 mm, so ergibt sich:

$$\text{Clogging Faktor} = 30 \cdot 575 \cdot 1 \cdot (1 + 0,16) \cdot (1 - 0) / (150 \cdot 0,16) = 833,75 \quad \text{Gleichung 5-3}$$

Der Clogging Faktor beläuft sich auf einen einheitslosen Wert von 833,75.

Drainageauslass der Regentonne

Die Regentonnen wurden als Teil der Dachfläche modelliert. Dadurch wurde darauf verzichtet ein eigenes Einzugsgebiet, das die reale Fläche einer Regentonne darstellt, zu erstellen. Deshalb wurde die Regentonne auf eine Fläche von 0,01 m² angesetzt, um die in SWMM undurchlässige Dachfläche minimal zu verkleinern. Demnach hatte die Regentonne eine Höhe von 65.000 mm, um ein Fassungsvermögen von 650 l zu erreichen. Außerdem wurde festgelegt, dass innerhalb von 24 Stunden 50 Liter gesammeltes Regenwasser über die Drainage ausgelassen werden. Die Berechnung der Parameter für den Auslass der Regentonnen (Underdrain) gestaltete sich wie folgt (James et al., 2010) :

$$C = 2 \cdot D^{0,5} \cdot (1 - f^{0,5}) / T \quad \text{Gleichung 5-4}$$

mit:

C: Auslasskoeffizient, D: Tiefe des gespeicherten Wassers, T: Auslasszeit, f: Verhältnis Tonnenvolumen nach Entnahme der 50 l/Volumen der Tonne

$$C = 2 \cdot 65000^{0,5} \cdot (1 - 0,923^{0,5}) / 24 \quad \text{Gleichung 5-5}$$

somit ergibt sich für C= 0,834 mm/h.

5.1.6 Definition des Anwendungsbereiches der LIDs

Das in den Modellen vorhandene Kanalnetz (Haltungen, Schächte) gibt Informationen über die bisherige Entwässerung. Die vorhandene Entwässerung der Flächen zeigt auf, welcher Einsatz der LIDs sinnvoll wäre. Im Moment wird ein Großteil der Dachflächen direkt über einen Schacht in die Kanalisation entwässert (s. Einzugsgebiet 2). Somit wäre das Abkoppeln der Dachflächen oder der Einsatz von Gründächern hier zielführend, um den Abfluss zu minimieren. Im Einzugsgebiet 3 werden die meisten Dachabflüsse bereits auf die angrenzende Gartenfläche geführt und der Einsatz von LIDs war hier nicht zielführend. Bei der Modellerstellung wurde je Simulationsdurchlauf nur eines der genannten Regenwasserbewirtschaftungssysteme je Einzugsgebiet verwendet. Durch diese Vorgehensweise konnten im Anschluss präzisere Aussagen über die Wirkung der LIDs auf die Wasserbilanz getroffen werden. In Verbindung mit der anschließenden Kostenrechnung wurden die Systeme auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht.

Der Anwendungsbereich der einzelnen LIDs wurde nach den folgenden Kriterien definiert:

teildurchlässige Flächen

Die Gestaltung teildurchlässiger Flächen steigert den Versickerungsanteil und erhöht die Verdunstung. In den vorliegenden Einzugsgebieten wurden Parkflächen, Grundstückszufahrten, Spielplätze und Gehwege zur teildurchlässigen Fläche optimiert. Bei den Parkflächen wird davon ausgegangen, dass es sich um Flächen mit „nicht häufigem Fahrzeugwechsel“ (s. Kapitel 1.3) handelt, sodass eine Gefährdung des Grundwassers durch Versickern ausgeschlossen werden kann. Im Einzugsgebiet 3 beschränkt sich der Einsatz der teildurchlässigen Ausführung auf die Grundstückszufahrten. Damit die Schadstoffe aus den Straßenabflüssen nicht ins Grundwasser gelangen, müssen sie zunächst gesondert gesammelt und aufbereitet werden, um sie anschließend versickern zu dürfen. Im Einzugsgebiet 3 kommt hinzu, dass die Verkehrsflächen bereits auf angrenzende Grünflächen entlang der Straßenführung entwässert werden.

Dachbegrünung

Die Umwandlung eines Daches in ein Gründach war an die Anforderung gebunden, dass der Dachabfluss nicht bereits auf eine durchlässige oder teildurchlässige Fläche entwässert wird und dort versickert. Nach (Geiger et al., 2009) eignen sich Dächer mit einer Neigung bis 30 Grad für eine Umgestaltung zum Gründach. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Bau von Gründächern auf Satteldächern aufwendiger und damit mit mehr Kosten verbunden ist, als der Einbau auf einem Flachdach. Für die dennoch vom Dach zum Abfluss kommende Wassermenge wird die bisherige Entwässerung (Kanalnetz, Grünfläche, versiegelte Fläche etc.) beibehalten.

Regentonne

Die Regentonne wurde bei allen Dächern angewendet. Nach (James et al., 2010) empfiehlt es sich für eine Entwässerung eines Einfamilienhauses ein Regentonnen-volumen von 600 bis 900 l Volumen zu verwenden. Die verwendete Regentonne hat ein Fassungsvermögen von 650 l. Einzelne Regentonnenmodelle sind in den meis-ten Fällen mit weiteren Tonnen koppelbar. Dadurch kann bei einer späteren Ausfüh-rung zwischen der Aufstellung einzelner Tonnen an unterschiedlichen Orten und der Bildung eines großen Komplexes an einem Ort gewählt werden (Baumarkt Hellweg, 2016). Bei großen Zusammenschlüssen der Regentonnen ist auch ein unterirdischer Einbau in Betracht zu ziehen.

Je nach Unterteilung des Daches und der jeweiligen Flächengröße variierten die Re-gentonnen in ihrer Anzahl. Ab einer Dachfläche von 400 m² wurde grundsätzlich eine zweite Tonne hinzugefügt. Zu berücksichtigen ist, dass die Wahl von 650 l Fas-sungsvermögen für einige Regenereignisse für die jeweilige Dachfläche zu klein di-mensioniert war und für kleinere Dachflächen (z. B. 20 m²) zu viel Volumen bot (s. Kapitel 8).

Zusätzlich zum Einsatz der Regentonnen wurden die Dachflächen vom ursprüngli-chen Entwässerungsnetz abgekoppelt. Das hatte zur Folge, dass zunächst der Dachabfluss in die Regentonne geleitet und dort gesammelt wird. Jeder weitere Dachabfluss, der das Fassungsvermögen übersteigt, bringt die Tonne zum Überlau-fen. Dieses Wasser wurde anschließend auf eine Grünfläche geleitet. Zusätzlich wurde die Regentonne mit einem Drainageauslass versehen, der eine stetige Entlee-rung und damit eine Wiederbefüllung garantiert.

Versickerungsgraben

In Stadtgebieten werden vermehrt bepflanzte Mulden zur Entwässerung eingesetzt, vor allem zum Auffangen von Regenwasserabflüssen von Parkflächen. Durch ihr gu-tes Reinigungsvermögen können sie auch entlang von Straßen gebaut werden. Die Muldenversickerung wurde in den Einzugsgebieten 1 und 2 angewendet. Die großen Parkflächen im Einzugsgebiet 1 bieten hier am meisten Platz für den Bau schmaler Versickerungsmulden. Hierbei wurden die Mulden so dimensioniert, dass sie ca. 3-10 % der Parkfläche ausmachten. Die Mulden haben eine Breite von einem Meter. Die Länge variiert je nach der Größe der nutzbaren Parkfläche.

Im Einzugsgebiet 3 beschränkt sich die Versiegelung auf kleine Flächen, die den Einsatz von Versickerungsmulden aufgrund der Platzverhältnisse nicht ermöglichten.

5.1.7 Datenmodifizierung zur weiteren Auswertung

Nach Ablauf der N-A-Simulation wurden folgende Daten ausgegeben. Alle Mengen wurden in Millimetern, als auch in Volumen auf die gesamte Einzugsgebietsgröße errechnet (s. Abbildung 5-13):

- Niederschlag (Precipitation)
- Evaporation (Evaporation Loss)
- Infiltration (Infiltration Loss)
- Oberflächenabfluss (Surface Runoff)
- Speicherung (Final Surface Storage)
- Fehler (Continuity Error)

Durch das Einfügen des Grundwasserlayers kann die infiltrierte Wassermenge weiter aufgespalten werden in:

- Speichermenge bzw. Wassermenge im GW-Leiter am Anfang (Initial Storage)
- Evapotranspiration der oberen Schicht (Upper Zone ET)
- Evapotranspiration der unteren Schicht (Lower Zone ET)
- Tiefenversickerung (Deep Percolation)
- Grundwasserabfluss (Groundwater Flow)
- Speichermenge bzw. Wassermenge im GW-Leiter am Ende (Final Storage)

*****	Volume	Depth
Runoff Continuity	hectare-m	mm
*****	-----	-----
Total Precipitation	3.376	575.279
Evaporation Loss	0.412	70.186
Infiltration Loss	0.912	155.368
Surface Runoff	2.043	348.008
Final Storage	0.010	1.728
Continuity Error (%)	-0.002	
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm
*****	-----	-----
Initial Storage	270.687	46120.432
Infiltration	0.912	155.368
Upper Zone ET	0.132	22.440
Lower Zone ET	0.000	0.000
Deep Percolation	0.026	4.419
Groundwater Flow	0.377	64.224
Final Storage	271.064	46184.717
Continuity Error (%)	0.000	

Abbildung 5-13: Auszug einer „Reported-Datei“ nach der Modellsimulation in SWMM 5.0

Durch die von SWMM ausgegebenen Daten konnte im Weiteren die Wasserbilanz berechnet werden. Die Wasserbilanz ist im Allgemeinen durch die Gleichung 5.6 definiert:

$$P = R + ET + \Delta S \quad \text{Gleichung 5-6}$$

mit:

P: Niederschlag (precipitation), *R*: Oberflächenabfluss (Runoff), *ET*: Evapotranspiration,

wobei die Evapotranspiration aufgespalten wird in:

$$ET = E_{\text{loss}} + ET_{\text{upper}} + ET_{\text{lower}} \quad \text{Gleichung 5-7}$$

mit:

E_{loss}: Evaporation aus Oberflächenabfluss (Evaporation loss), *ET_{upper}*: Evapotranspiration der oberen Schicht (Upper Zone ET), *ET_{lower}*: Evapotranspiration der unteren Schicht (Lower Zone ET)

Die Speicheränderung setzt sich zusammen aus der Speichermenge, der Perkolation in tiefere Schichten und dem Grundwasserabfluss.

$$\Delta S = \Delta S_{\text{ini}} - \Delta S_{\text{fin}} + I_{\text{deep}} + GW \quad \text{Gleichung 5-8}$$

mit:

ΔS_{ini}: Speichermenge am Anfang (Initial Storage), *ΔS_{fin}*: Speichermenge am Ende (Final Storage), *I_{deep}*: Tiefenversickerung (Deep Percolation), *GW*: Grundwasserabfluss (Groundwater Flow)

6 Ergebnisse

Ausgehend von dem definierten Einsatzbereich wurden die LID-Typen in den Einzugsgebieten eingesetzt. Anschließend wurden die simulierten Modelle bezüglich der Wasserbilanz ausgewertet. Dazu wurden die von SWMM ausgegebenen Daten für die weitere Bilanzrechnung modifiziert. Danach konnten die LIDs auf ihre Wirkungsweise analysiert werden.

6.1 Ergebnisse der Bestimmung des Anwendungsbereiches der LIDs

Die gewählten Formen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung wurden auf die drei Einzugsgebiete (EZG) angewendet. Unter Beachtung der siedlungsstrukturellen Faktoren der drei Einzugsgebiete konnten die LIDs in einem unterschiedlichen Maße eingesetzt werden.

Die in den Abbildungen farbig hinterlegten Flächen zeigen die für die LIDs verwendeten Flächen, unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.1.6 festgelegten Randbedingungen. Anschließend wurden für die einzelnen Einzugsgebiete die für den LID-Einsatz geeigneten Flächenanteile ermittelt.

Es ergaben sich folgende Verteilungen in den Einzugsgebieten.

Einzugsgebiet 1



Gründach
 teildurchlässige Fläche
 Versickerungsgraben
 Regentonne



50 100

Abbildung 6-1: über LIDs entwässerte Teileinzugsflächen im Einzugsgebiet 1, *links oben*: Gründach, *rechts oben*: teildurchlässige Flächen, *links unten*: Versickerungsgraben, *rechts unten*: Regentonnen

Das Einzugsgebiet 1 (s. Abbildung 6-1) hat eine Gesamtfläche von 5,87 ha. Davon sind 1,144 ha Dachflächen. Im Einzugsgebiet 1 ist es bei 1,030 ha der gesamten Dachflächen möglich diese mittels Gründach zu entwässern. Nur bei vier Dachflächen ist ein Umbau zum Gründach nicht durchführbar. Das entspricht einer möglichen Umsetzung von 90,03 % aller vorhandenen Dächer.

Tabelle 6-1: Flächen und Anzahl der vorhandenen Dächer und der über ein Gründach zu entwässernde Dächer im EZG 1

Gründach (GR)	Flächen	Anzahl	über LIDs entwässerter Flächenanteil
Dächer	1,144 ha	107	
Gründächer	1,030 ha	97	90,03 %

Durchlässige Bodenbelägen wurden auf Parkplätzen (PL) und Gehwegen (P) angewendet. Im Einzugsgebiet 1 sind das 94 Flächen mit einer Größe von 1,171 ha. Damit wurden 41,20 % der möglichen nutzbaren Fläche mit einem wasserdurchlässigen Belag ausgebildet.

Tabelle 6-2: Flächen und Anzahl der Parkflächen und Gehwege und die, die über eine teildurchlässige entwässert wurden im EZG 1

Pavement (PP)	Flächen	Anzahl	über LIDs entwässerter Flächenanteil
Parkplätze und Gehwege	2,481 ha	260	
umgebaute PL und P	1,171 ha	94	41,20 %

Die verwendeten Versickerungsgräben in Einzugsgebiet 1 haben eine Länge von 8 m, 20 m oder 25 m. Je nach Geometrie und Größe des Parkplatzes konnten ein bis vier Versickerungsgräben pro Parkplatz platziert werden. Das entspricht je Fläche einem Flächenanteil zwischen 3-15 % der Parkfläche. Im gesamten Einzugsgebiet 1 wurden Versickerungsgräben mit einer Gesamtlänge von 540 m geplant mit einer Breite von je 1 m. Es wurden mit den Versickerungsgräben 49,97 % aller Parkflächen im Einzugsgebiet 1 entwässert.

Tabelle 6-3: Flächen und Anzahl der Parkplätze und die, die über Versickerungsgräben entwässerte Parkflächen im EZG 1

Vegetative Swales (VS)	Flächen	Anzahl	über LIDs entwässerter Flächenanteil
Parkplätze	1,635 ha	95	
entwässerte Parkplätze	0,817 ha	21	49,97 %
Gesamtfläche der VS	0,054 ha		

Im Einzugsgebiet 1 wurden 115 Regentonnen als Entwässerungsmaßnahme verwendet.

Einzugsgebiet 2



Gründach
 teildurchlässige Fläche
 Versickerungsgraben
 Regentonne



50 100

Abbildung 6-2: über LIDs entwässerte Teileinzugsflächen im Einzugsgebiet 2, *links oben*: Gründach, *rechts oben*: teildurchlässige Flächen, *links unten*: Versickerungsgraben, *rechts unten*: Regentonnen

Das Einzugsgebiet 2 (s. Abbildung 6-2) hat eine Gesamtfläche von 6,63 ha. Das Einzugsgebiet hat 1,275 ha Dachfläche, wovon 0,607 ha mit einer Dachbegrünung ausgestattet werden können. Damit können 38,35 % der Dachflächen als Gründach genutzt werden.

Tabelle 6-4: Flächen und Anzahl der vorhandenen Dächer und der über ein Gründach zu entwässernde Dächer im EZG 2

Gründach (GR)	Flächen	Anzahl	über LIDs entwässerter Flächenanteil
Dächer	1,275 ha	181	
Gründächer	0,489 ha	57	38,35 %

Im Einzugsgebiet 2 werden 2,452 ha als Parkplatz oder Gehweg genutzt. Davon wurden 0,883 ha (33,97 % aller Parkplatz- und Gehwegflächen) durchlässig gestaltet. Somit wurden 85 Flächen umgebaut.

Tabelle 6-5: Flächen und Anzahl der Parkflächen und Gehwege und die, die über eine teildurchlässige entwässert wurden im EZG 2

Pavement (PP)	Flächen	Anzahl	über LIDs entwässerter Flächenanteil
Parkplätze und Gehwege	2,452 ha	261	
umgebaute PL und P	0,883 ha	85	33,97 %

Die Versickerungsgräben im Einzugsgebiet 2 haben eine Länge von 8 oder 15 m. Die gebauten Versickerungsgräben haben eine Gesamtlänge von 280 m und nehmen damit 5,81 % der Parkplatzflächen ein. Aufgrund der großen Anzahl an kleinen Flächen mit einer ungünstigen Geometrie wurden nur 22 Parkplätze (25,28 %) für das Entwässern über Versickerungsgräben als zielführend erachtet.

Tabelle 6-6: Flächen und Anzahl der Parkplätze und die, die über Versickerungsgräben entwässerte Parkflächen im EZG 2

Vegetative Swales (VS)	Flächen	Anzahl	über LIDs entwässerter Flächenanteil
Parkplätze	1,907 ha	176	
entwässerte Parkplätze	0,482 ha	22	25,28 %
Gesamtfläche der VS	0,028 ha		

Im Einzugsgebiet 2 wurden 181 Regentonnen zur Entwässerung der Dachflächen verwendet.

Einzugsgebiet 3

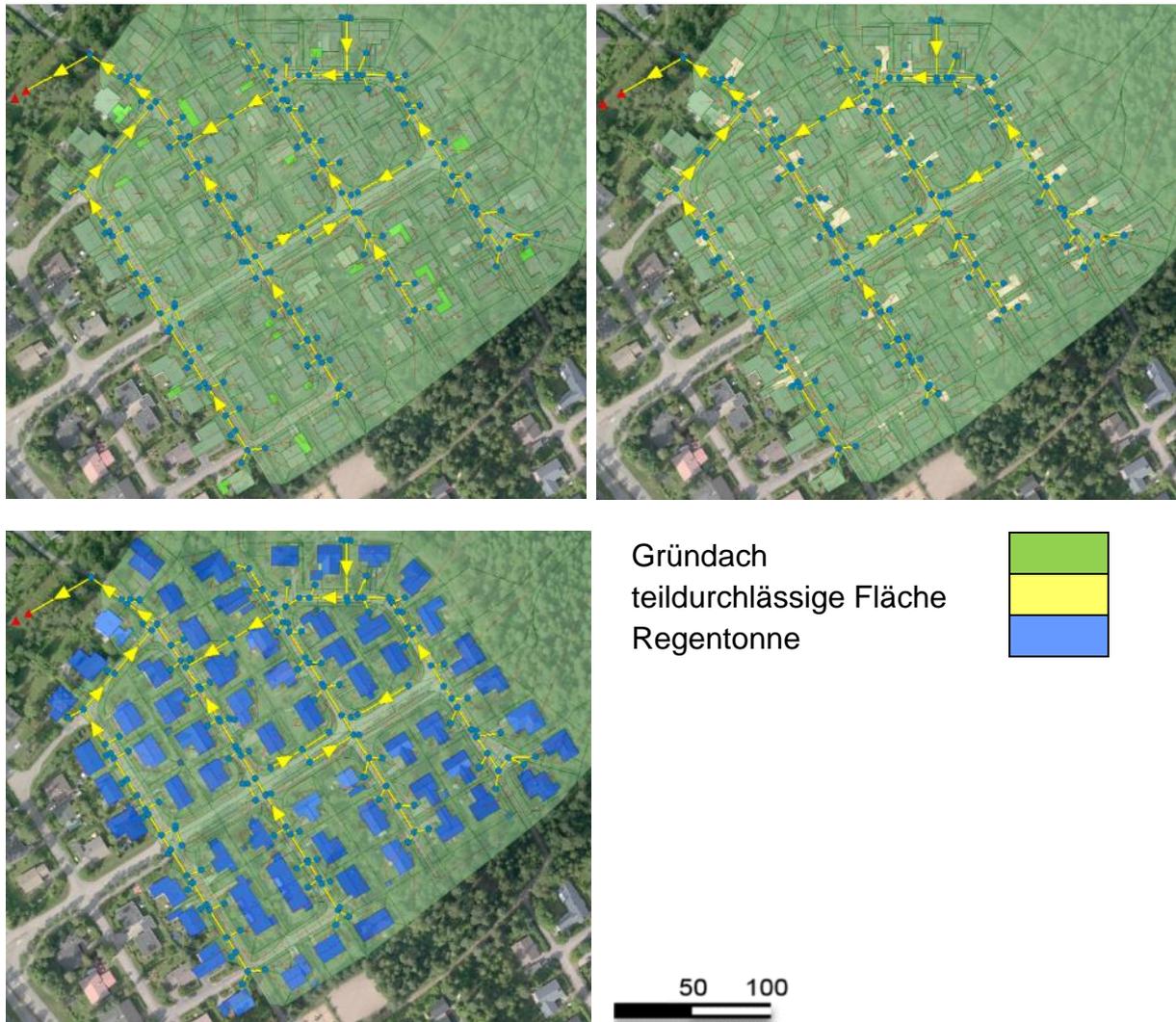


Abbildung 6-3: Anwendung der LIDs auf Teileinzugsflächen im Einzugsgebiet 3

Das Einzugsgebiet 3 (s. Abbildung 6-3) hat eine Fläche von 12,59 ha. Es bietet im Gegensatz zu den beiden innerstädtisch gelegenen Einzugsgebieten einen geringen Anteil an versiegelten Flächen (19 %). Den größten Anteil an undurchlässigen Flächen bilden hier die Dachflächen. Allerdings werden fast alle Dachabflüsse bereits auf eine Grünfläche geleitet. Nur 3,60 % der gesamten Dachflächen standen für einen zielführenden Einsatz der Dachbegrünungen zur Verfügung.

Tabelle 6-7: Flächen und Anzahl der vorhandenen Dächer und der über ein Gründach zu

Gründach (GR)	Flächen	Anzahl	über LIDs entwässerter Flächenanteil
Dächer	1,362 ha	158	
Gründächer	0,049 ha	8	3,60 %

Neben den Straßen, die nicht durchlässig ausgebildet werden können, konnten im Einzugsgebiet nur die Einfahrten (D) der einzelnen Wohnhäuser teildurchlässig gestaltet werden. Die Zufahrten belegen eine Fläche von 0,268 ha. Die Hälfte der Einfahrten wurde nicht mit einem durchlässigen Bodenbelag bebaut, da diese auf eine Grünfläche entwässert werden.

Tabelle 6-8: Flächen und Anzahl der Grundstückzufahrten und die, die über eine teildurchlässige entwässert wurden im EZG 3

Pavement (PP)	Flächen	Anzahl	über LIDs entwässerter Flächenanteil
Grundstückzufahrten	0,268 ha	143	
umgebaute D	0,106 ha	71	39,55 %

Eine naturnahe Niederschlagsentwässerung mittels Versickerungsgräben ist aufgrund der vorhandenen Infrastruktur des Einzugsgebietes 3 keine wirtschaftliche Lösung. Da die Straßen bereits auf die angrenzenden Grünflächen entwässert werden, ist der Bau von Entwässerungsgräben entlang der Straße nicht notwendig.

Im Einzugsgebiet 3 wurden die Dachabflüsse von 158 Regentonnen aufgefangen.

6.2 Ergebnisse der Wasserbilanzen

Um eine klare Veränderung der Wasserbilanz vom Ausgangszustand zu dem mit LIDs optimierten Zustand zu erhalten, wurde zunächst die Wasserbilanz der Einzugsgebiete ohne LIDs ermittelt.

Nach dem Einfügen je einer Form der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung (Gründächer, teildurchlässige Fläche, Regentonne, Versickerungsgraben) wurden die Wasserbilanzen erneut aufgestellt.

Anschließend wurde die Änderung der Wasserbilanz durch die Differenz der Wasserbilanzen zwischen dem Ausgangszustand und dem adaptierten Zustand ermittelt.

Es wurden die Anteile des Oberflächenabflusses, der Speicheränderung und der Evapotranspiration prozentual vom Gesamtniederschlag (= 100 %) berechnet und dargestellt. Die prozentuale Änderung der Bilanzkomponenten kann den Balkendiagrammen entnommen werden (s. Abbildung 6-5, Abbildung 6-7, Abbildung 6-9).

6.2.1 Aufstellung der Wasserbilanzen im Einzugsgebiet 1

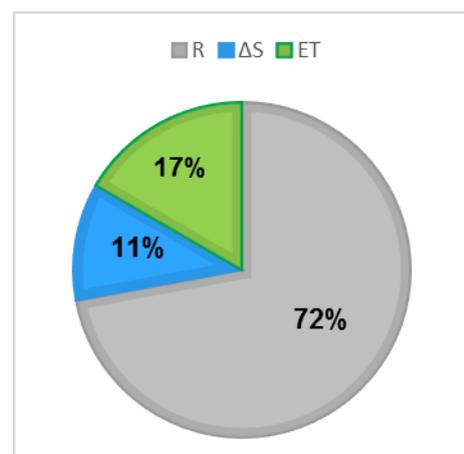
Im Einzugsgebiet 1 ergab sich aufgrund des hohen Versiegelungsgrades des gesamten Einzugsgebietes ein hoher Oberflächenabfluss. Hier sollten die LIDs vor allem eine Reduzierung dieser Wasserbilanzkomponente erzielen.

Durch die ausgedehnten Teileinzugsflächen konnten große Teile teildurchlässig gestaltet und viele Versickerungsgräben eingesetzt werden. Aufgrund der Dachneigung und der bisherigen Entwässerung konnten fast alle Dächer zu einem Gründach umgebaut werden. Für den Ausgangszustand sowie für den adaptierten Zustand ergaben sich die Anteile für den Oberflächenabfluss, die Evapotranspiration und die Speicheränderung wie folgt:

Einzugsgebiet 1

ohne LID

	[mm]
Oberflächenabfluss (R)	414,26
Speicheränderung (ΔS)	65,36
Evapotranspiration (ET)	95,21



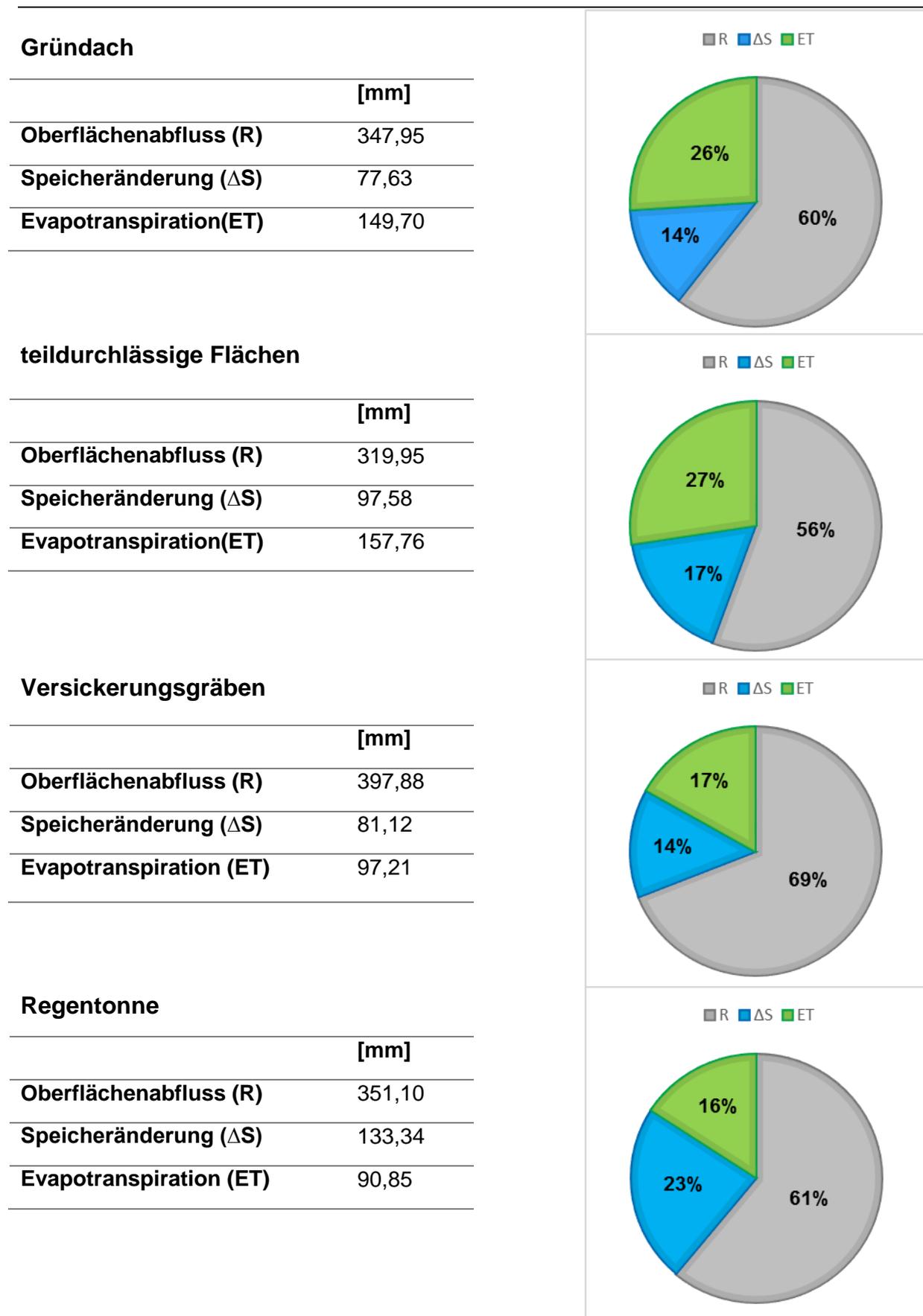


Abbildung 6-4: Wasserbilanzaufstellung in [mm] und in [%] im Ursprungszustand und im adaptierten Zustand im Einzugsgebiet 1

Abbildung 6-5 zeigt die prozentuale Änderung der Bilanzkomponenten im Einzugsgebiet 1. Die Ergebnisse werden getrennt nach Art der LIDs, nach Ablauf der N-A-Simulation über ein Jahr, dargestellt.

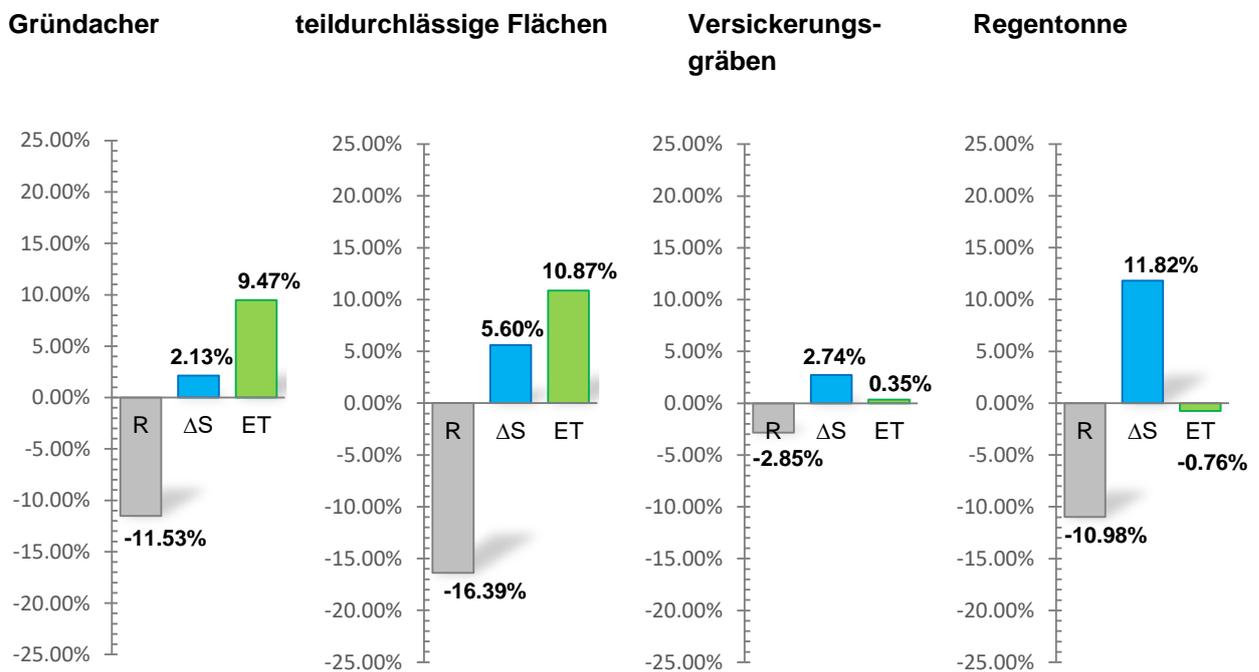


Abbildung 6-5: Änderung der prozentualen Wasserbilanzkomponenten im Einzugsgebiet 1

Im Einzugsgebiet 1 konnte mit Gründächern eine Reduzierung des Oberflächenabflusses von 11,53 % erreicht werden. Die Speicheränderung belief sich auf nur 2,13 %, wobei die Evapotranspiration sich um 9,47 % gesteigert hat.

Der Einsatz teildurchlässiger Flächen im Einzugsgebiet 1 konnte auf 41,20 % Parkflächen und Gehwegen realisiert werden. Nach einer Simulationsdauer über ein Jahr konnte der Oberflächenabfluss in diesem Zeitraum um 16,39 % gesenkt werden. Die Evapotranspiration steigerte sich um 10,87 %. Außerdem konnte eine Verbesserung des gespeicherten und zurückgehaltenen Wassers um 5,60 % zum Ursprungszustand erreicht werden.

Die Versickerungsgräben mit einer Gesamtfläche von 590 m² entwässerten 0,871 ha Parkplatzflächen. Die Gräben konnten 2,74 % des Regenwassers speichern bzw. zurückhalten und verbesserten damit die Oberflächenabflusssituation (Reduzierung des Oberflächenabflusses um 2,85 %). Die Evapotranspiration stieg um 0,35 % zum Ursprungszustand.

Durch das Auffangen der Dachabflüsse in den Regentonnen konnte der Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet 1 um 10,98 % reduziert werden. Die Speicheränderung stieg um 11,82 %. Die Evapotranspiration nahm minimal ab (-0,76 %).

6.2.2 Aufstellung der Wasserbilanzen im Einzugsgebiet 2

Eine Steigerung der Evapotranspiration kann gerade im innerstädtischen Bereich zu einer Reduzierung der Temperatur und einer Steigerung der Luftfeuchtigkeit führen und somit zu einem besseren Wohlbefinden verhelfen.

Im Einzugsgebiet 2 konnten zahlreiche Flächen für den Einsatz von LIDs genutzt werden. Die daraus resultierenden Wasserbilanzen ergaben sich wie folgt:

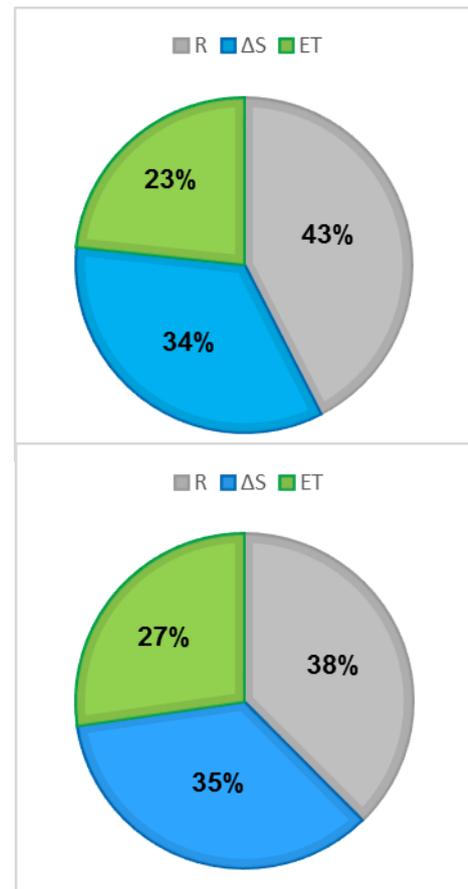
Einzugsgebiet 2

ohne LID

	[mm]
Oberflächenabfluss (R)	244,11
Speicheränderung (ΔS)	196,65
Evapotranspiration (ET)	133,97

Gründach

	[mm]
Oberflächenabfluss (R)	216,22
Speicheränderung (ΔS)	201,73
Evapotranspiration (ET)	156,93



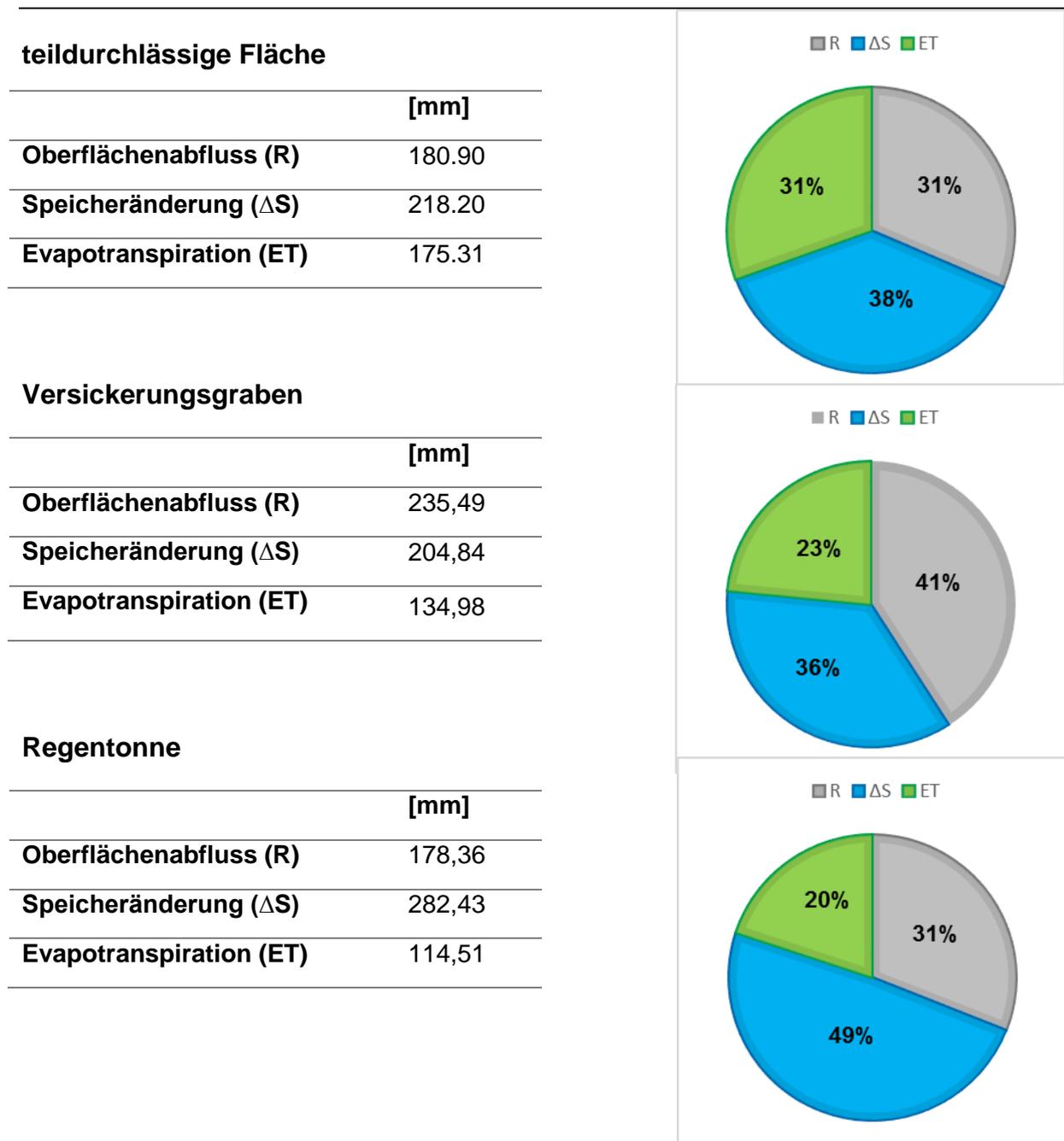


Abbildung 6-6: Wasserbilanzaufstellung in [mm] und in [%] im Ursprungszustand und im adaptierten Zustand im Einzugsgebiet 2

Nach dem Einsatz der vier LID-Typen konnte die Wasserbilanz aus dem Grundzustand mit den Wasserbilanzen nach dem Einfügen der LIDs verglichen werden. Die Änderungen, welche sich für das Einzugsgebiet 2 ergaben, sind nachstehender Abbildung 6-7 zu entnehmen.

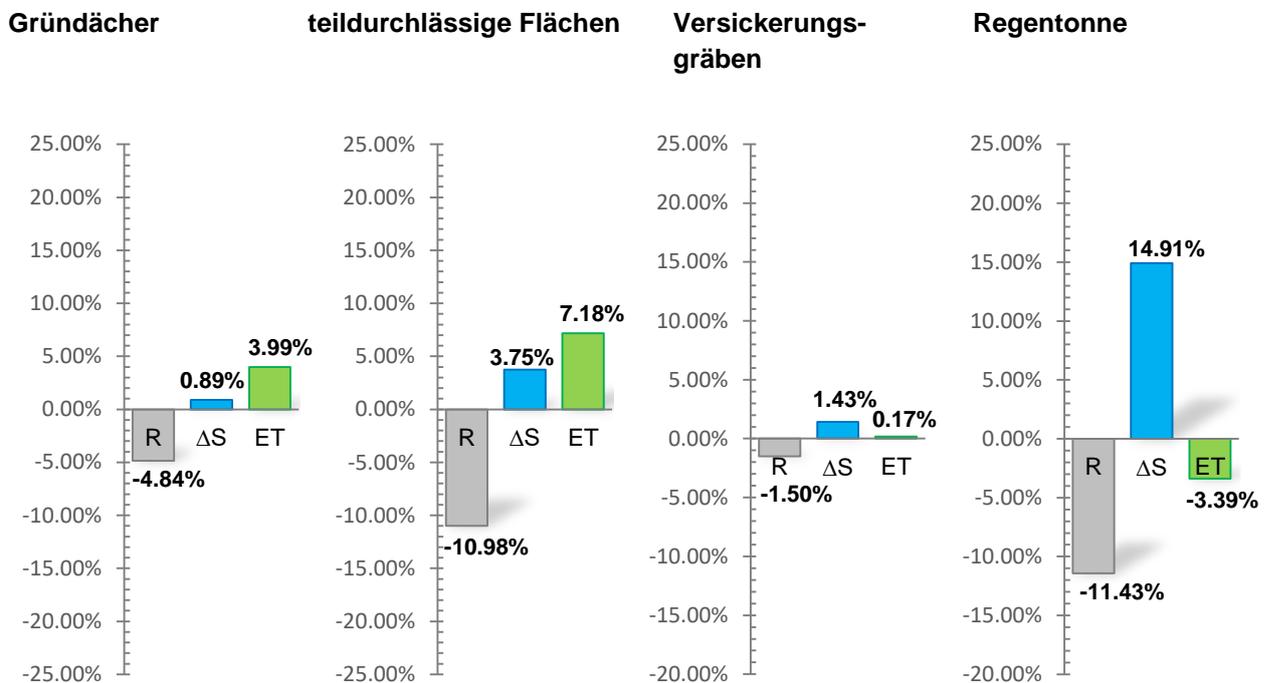


Abbildung 6-7: Änderung der prozentualen Wasserbilanzkomponenten im Einzugsgebiet 2

Im Einzugsgebiet 2 eignete sich 38,35 % der vorhandenen Dachflächen für einen Umbau zum Gründach. Einige Dächer wurden bereits auf eine durchlässige oder teildurchlässige Fläche entwässert oder wiesen eine zu steile Neigung auf, womit das Installieren einer Dachbegrünung mit einem unwirtschaftlichen Aufwand verbunden wäre. Im Einzugsgebiet 2 wurde mittels Dachbegrünungen der Oberflächenabfluss um 4,84 % reduziert. Die Evapotranspiration hat sich um 3,00 % gesteigert. Die Versickerung und Retention blieben im Einzugsgebiet 2 fast unverändert zum Ausgangszustand.

Im Einzugsgebiet 2 konnten 80,76 % der vorhandenen Parkflächen und Gehwege teildurchlässig gestaltet werden. Der Oberflächenabfluss reduzierte sich damit um 10,98 %. Das Entsiegeln erhöhte die Speicheränderung um 3,75 %. Die Evapotranspiration stieg um 7,18 % an.

Die Versickerungsgräben konnten den Oberflächenabfluss um 1,50 % reduzieren. Die Evapotranspiration stieg minimal an, und 1,43 % nahm die Speicheränderung zu.

Regentonnen wurden zur Entwässerung aller Dachflächen eingesetzt und gleichzeitig das Dach vom Kanalnetz abgekoppelt. Dadurch reduzierte sich der Oberflächenabfluss um 11,43 %. Die Speicheränderung stieg gleichzeitig um 14,91 %. Allerdings sank die Evapotranspiration um 3,39 %.

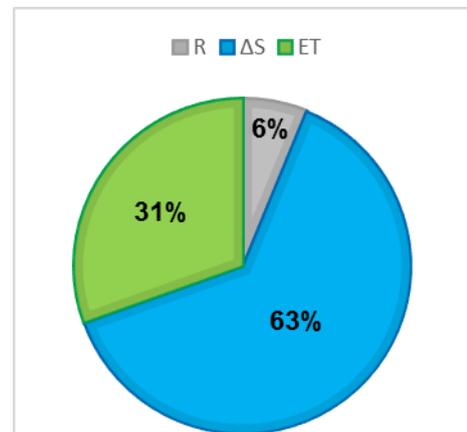
6.2.3 Aufstellung der Wasserbilanzen im Einzugsgebiet 3

Das Einzugsgebiet 3 bietet nur wenige Möglichkeiten naturnahe Regenwasserbewirtschaftungssysteme einzusetzen. Die Anteile der Wasserbilanz gestalteten sich für das Einzugsgebiet 3 wie folgt:

Einzugsgebiet 3

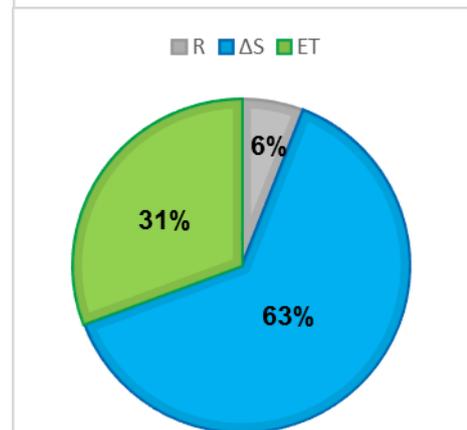
ohne LID

	[mm]
Oberflächenabfluss (R)	35,537
Speicheränderung (ΔS)	364,062
Evapotranspiration(ET)	175,352



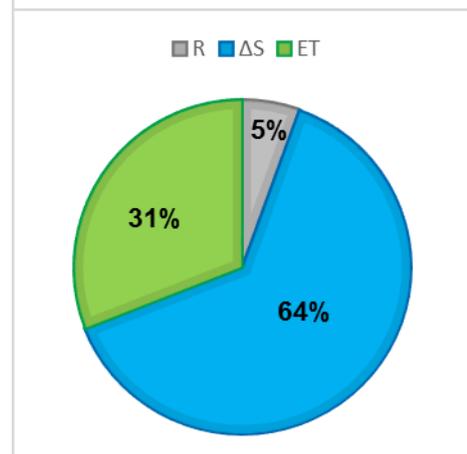
Gründach

	[mm]
Oberflächenabfluss (R)	34,071
Speicheränderung (ΔS)	363,788
Evapotranspiration(ET)	176,557



teildurchlässige Fläche

	[mm]
Oberflächenabfluss (R)	31,562
Speicheränderung (ΔS)	365,426
Evapotranspiration(ET)	177,991



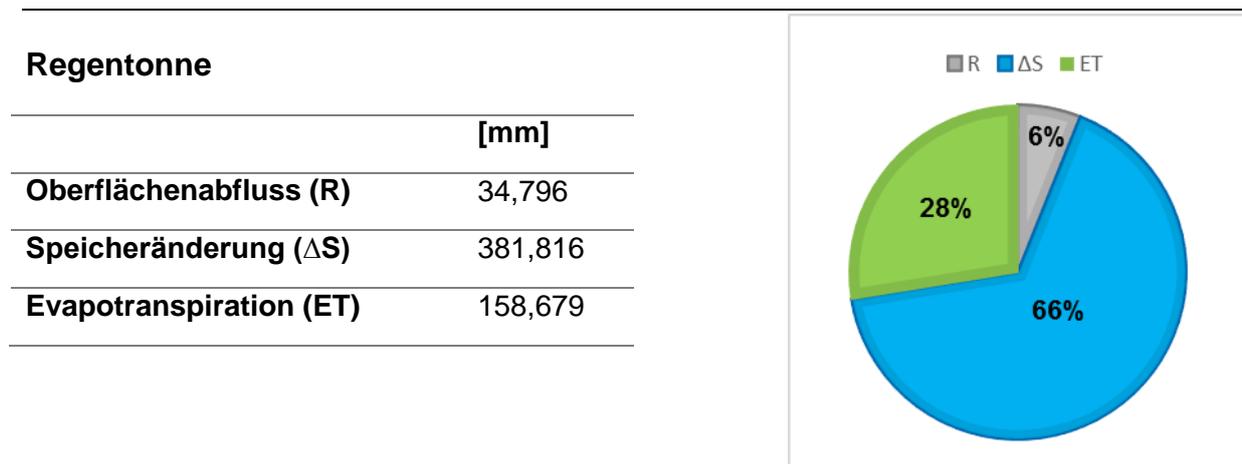


Abbildung 6-8: Wasserbilanzaufstellung in [mm] und in [%] im Ursprungszustand und im adaptierten Zustand im Einzugsgebiet 3

Im Einzugsgebiet 3 ergaben sich sehr geringe Abweichungen der Wasserbilanzkomponenten vom Ausgangszustand zum modifizierten Zustand, wie Abbildung 6-9 zeigt.

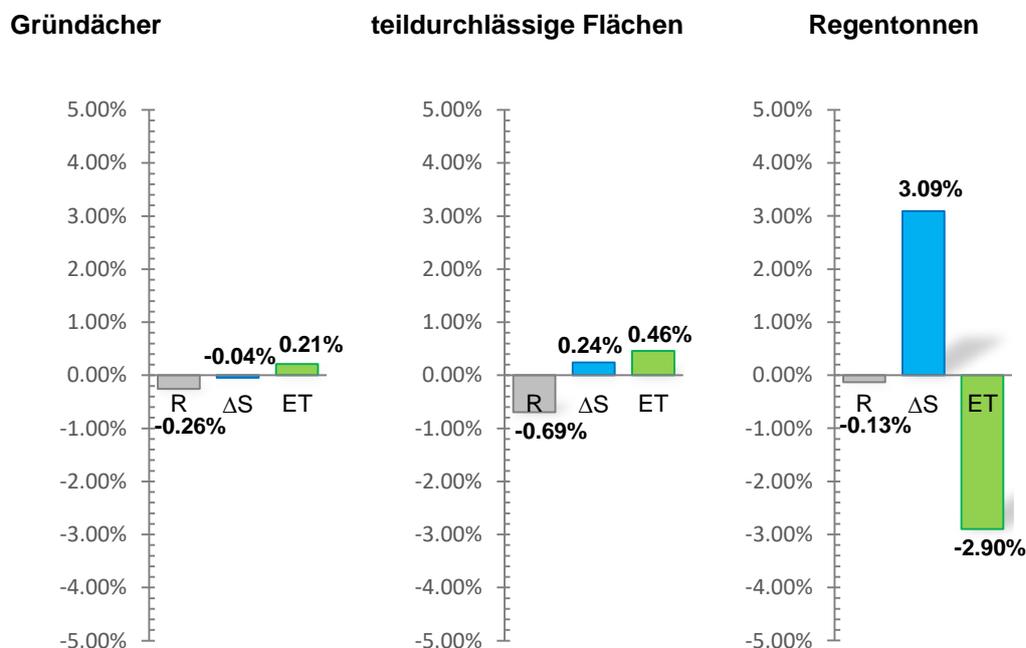


Abbildung 6-9: Änderung der prozentualen Wasserbilanzkomponenten im Einzugsgebiet 3
Der Einsatz von Gründächern im Einzugsgebiet 3 hatten eine geringe Änderung von Oberflächenabfluss, Evapotranspiration und Speicheränderung zur Folge.

Die teildurchlässigen Flächen führten zu einer Reduzierung des Oberflächenabflusses um 0,68 %. Gleichzeitig steigerte sich die Evapotranspiration um 0,46 % und die Speicheränderung nahm um 0,24 % zu.

Die Regentonnen hatten eine Speicheränderung von 3,09 % zur Folge. Die Evapotranspiration nahm dagegen um 2,90 % ab. Der Oberflächenabfluss reduzierte sich minimal (-0,13 %).

6.3 Ergebnisse der Wirkungsweise

Durch die Wahl eines LIDs pro Simulationsdurchlauf können die LIDs auf ihre Wirkungsweise analysiert werden. Die mengenmäßige Änderung (vom Ausgangszustand zum modifizierten Zustand) des Oberflächenabflusses, der Evapotranspiration und der Speicheränderung wurde errechnet. Anschließend wurde das Verhältnis der Einzugsgebietsgröße zur „über ein LID entwässernden“ Fläche gebildet. Nach der Multiplikation mit der jeweiligen Änderung (R, ET, ΔS) in mm, wurden die Ergebnisse auf eine zu entwässernde Fläche von 100 m² normiert. Dadurch konnten die Regenwasserbewirtschaftungssysteme in ihrer Wirkungsweise verglichen werden (s. Abbildung 6-10).

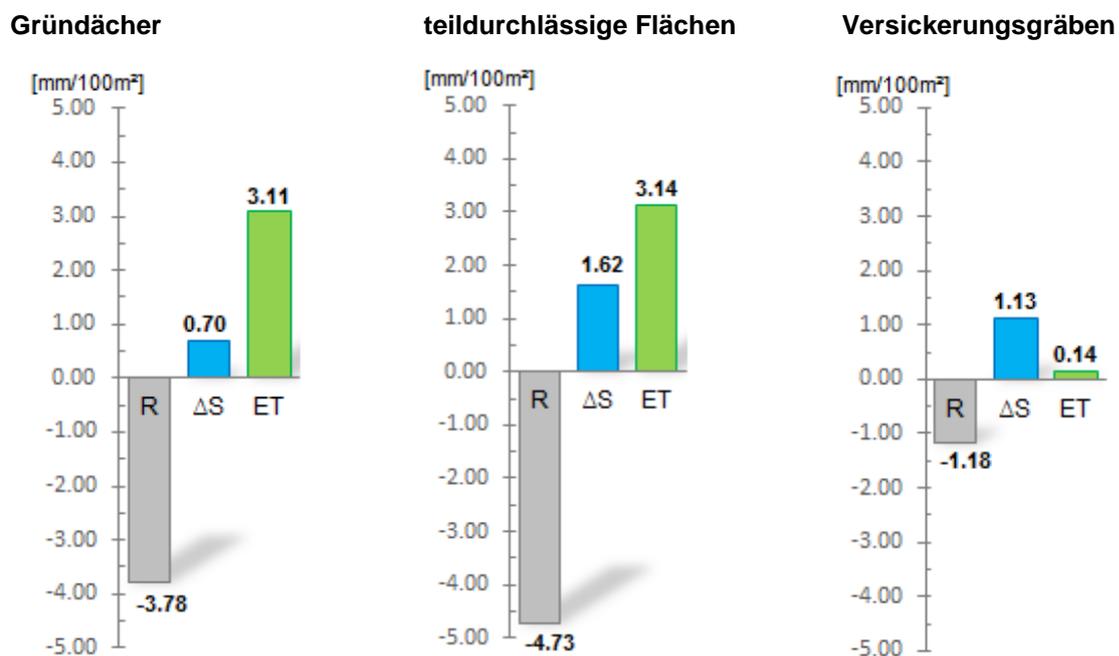


Abbildung 6-10: Änderung der Wasserbilanz in [mm] je 100 m² entwässerter Fläche je LID

Durch den Einsatz von Gründächern konnte eine Reduzierung des Oberflächenabflusses von 3,78 mm/100 m² in allen drei Einzugsgebieten erreicht werden. Die Speicheränderung stieg um 0,70 mm/100 m². Die Evapotranspiration erhöhte sich um 3,11 mm/100 m².

Die Verwendung teildurchlässiger Flächen konnte den Oberflächenabfluss um 4,73 mm/100 m² senken. Die Speicheränderung sank dabei um 1,62 mm/100 m². 3,14 mm/100 m² konnten die Versickerungsflächen evapotranspirieren.

Die Versickerungsflächen erreichten in den Einzugsgebieten 1 und 2 eine Verringerung des Oberflächenabflusses um 1,18 mm/100 m². Das zurückgehaltene Wasser belief sich auf 1,13 mm/100 m². Die Evapotranspiration erhöhte sich nur um 0,14 mm/100 m².

7 Diskussion der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Auswirkungen der LIDs, bezogen auf die infrastrukturellen Ausgangsbedingungen und die ursprüngliche Wasserbilanz der drei Einzugsgebiete, verglichen und diskutiert. Hierzu zeigt die Tabelle 7-1 eine Zusammenfassung der berechneten Ergebnisse. Vergleicht man nun alle drei Einzugsgebiete im Ausgangszustand untereinander, können folgende Äußerungen getroffen werden.

Im Ausgangszustand weist das Einzugsgebiet 1 den höchsten Versiegelungsgrad von 86 % auf und hat damit auch den größten Oberflächenabfluss von 72 %. Im Gegensatz dazu fließen im Einzugsgebiet 3 nur 6 % des Niederschlags oberflächlich ab. Durch den hohen Grünflächenanteil der einzelnen Grundstücke und das Waldstück im Norden des Einzugsgebietes 3 kann der Großteil versickern (63 %) und verdunsten (31 %). Das Einzugsgebiet 2 kann mittels der Gärten in der östlichen Einfamilienhaussiedlung 34 % des Niederschlags versickern und 23 % verdunsten. Fast die Hälfte (43 %) des Niederschlags fließt bisher an der Oberfläche ab.

7.1 Diskussion der Wirkungsweise

Durch die Normierung können im Weiteren folgende Aussagen getroffen werden.

Die gewählten naturnahen Regenwasserbewirtschaftungssysteme zeigen alle eine Verbesserung der Abflusssituation. Alle Systeme konnten den Oberflächenabfluss reduzieren. Gleichzeitig erhöhten sie den Anteil an gespeichertem bzw. zurückgehaltenem Niederschlag und die Evapotranspiration stieg an. Die Reduzierung des Oberflächenabflusses ergibt sich durch die Summe aus der Steigerung der Evapotranspiration und der Speicheränderung.

Gründächer

Die Gründächer erreichten gute Evapotranspirationswerte von 3,11 mm/100 m². In allen drei Einzugsgebieten hatten sie nur eine geringe Auswirkung auf die Speicheränderung (0,70 mm/100 m²). Die Speicheränderung, welche sich unterteilt in versickertes und gespeichertes Wasser im Boden sowie der Speicherung in den Schichten des Gründaches, stieg bei allen drei Einzugsgebieten nur gering an. Die Evapotranspirationswerte stiegen an durch die gute Verdunstungsleistung des Gründaches. Die Speicheränderung hingegen wurde nur leicht erhöht. Das ist zum einen darauf zurückzuführen, dass das verwendete Gründach einen Schichtaufbau von 10 cm aufwies und damit kaum Speicherraum bot. Zum andern zeigen die hohen Evapotranspirationswerte, dass große Anteile des Niederschlags vom Dach verdunsten konnten und somit weniger Wasser gespeichert werden musste bzw. zur Speicherung verfügbar war. Die Speicheränderung lässt sich somit auf das in den Schichten noch gespeicherte Wasser zurückführen.

Teildurchlässige Flächen

Die teildurchlässigen Flächen konnten den Oberflächenabfluss mit 4,73 mm/100 m² am stärksten reduzieren.

Die starke Reduzierung des Oberflächenabflusses lässt sich zum einen auf die niedrigen Niederschlagsmengen zurückführen. Die übers Jahr gemessenen Regenereignisse weisen in den Sommermonaten Intensitäten von 20-25 mm/h auf. Das restliche Jahr über wurden Niederschlagsereignisse gemessen, deren Intensitäten bei maximal 5 mm/h liegen. Niederschlagsintensitäten von 90 mm/h wurden in Lathi bereits aufgezeichnet. Solche großen Regenereignisse sind im Simulationsjahr 2009 nicht gemessen worden.

Zum anderen haben Flächenversickerungen anfangs sehr gute Infiltrationsraten von mehreren 100 mm/h. Aus diesem Grund wurde der Oberflächenabfluss im Einzugsgebiet 1 und 2 um mehr als 10 % reduziert. Das Zusetzen der Zwischenräume und Poren ist nach der Simulationsdauer von einem Jahr gering, sodass die Versickerungsleistung der teildurchlässigen Flächen kaum beeinträchtigt wurde.

Ferner erreichten sie bessere Werte für die Speicheränderung als die Dachbegrünungen. Das liegt daran, dass eine teildurchlässige Fläche mit einem zweischichtigen Aufbau simuliert wird, der sich aus dem teildurchlässigen Belag und der angrenzenden Bodenschicht zusammensetzt. Diese beiden Schichten zusammengefasst beliefen sich in den durchgeführten Simulationen auf 25 cm. Die höhere Mächtigkeit des Aufbaus erreichte eine Speicheränderung von 1,62 mm/100 m².

Die teildurchlässigen Flächen können 3,14 mm Niederschlag pro 100 m² evaporieren, das ungefähr der Evapotranspiration der Gründächer entspricht.

Versickerungsgräben

Die Versickerungsgräben wurden nur in den beiden innerstädtischen Gebieten angewendet. Im Einzugsgebiet 3 wären Versickerungsgräben aus platz- und entwässerungstechnischen Gründen nicht zielführend.

Die Versickerungsgräben können den Oberflächenabfluss um 1,18 mm/100 m² reduzieren, und erbringen damit die geringste Verbesserung der Abflusssituation. Die Evapotranspiration von 0,14 mm/100 m² kann durch den Anteil an Vegetation der Versickerungsgräben noch weiter erhöht werden. Die Steigung der Speicheränderung von 1,13 mm/100 m² liegt daran, dass Versickerungsgräben durch die Ausbildung eines Grabens einen zusätzlichen Speicherraum bieten.

Die dennoch sehr schlechte Wirkungsweise der Versickerungsgräben, ist auf den vorhandenen Bodenparameter des Modells zurückzuführen. Der anstehende Boden wurde im Vorfeld nicht kalibriert und wurde mit einer geringen Durchlässigkeit angenommen.

Regentonnen

Die Auswirkungen der Regentonnen ließen sich nicht anhand der Modelle normieren. Das liegt daran, dass alle Dachflächen verwendet worden sind und eine gleichzeitige Abkopplung vom Kanalnetz stattgefunden hat. Das aufgefangene Wasser wird auf eine Grünfläche drainiert, ebenso fließt das überschüssige Wasser beim Überschreiten des Fassungsvermögens der Tonne auf eine Grünfläche. Dadurch sind die Evapotranspirationswerte und die Speicheränderung abhängig von der zur Verfügung stehenden durchlässigen Fläche.

Bei den erreichten Bilanzverbesserungen, ist zu beachten, dass der Einsatz der LIDs in einem extremen Maße betrieben worden ist. Jede aufgrund der in Kapitel 5.1.6 genannten definierten Einsatzbereiche der verschiedenen LID Typen in Frage kommende Fläche, wurde modifiziert. Bei der Planung und Umsetzung von naturnahen Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen ist jedoch meist eine Kombination mehrerer Systeme zielführend, um eine optimale Unterstützung in entwässerungstechnischer sowie wasserhaushaltsbezogener Hinsicht zu gewährleisten. Trotz der geringen Leistungen der Versickerungsgräben können diese in Kombination mit anderen Systemen einen Beitrag zur Verbesserung der Wasserbilanz liefern. Versickerungsgräben sind durch ihre flexible Größengestaltung in vielen Bereichen leicht umsetzbar. Hinzukommt die gute Reinigungsleistung der Gräben, wodurch sie auch für stark verschmutzte Regenwässer entlang von Straßen oder stark befahrener Parkplätze geeignet sind.

7.2 Diskussion der prozentualen Änderung

Die Zusammenfassung der Änderung der prozentualen Wasserbilanzen (s. Tabelle 7-1) für die drei Einzugsgebiete, zeigt klare Unterschiede hinsichtlich der Einzugsgebiete 1 und 2 im Vergleich zum Einzugsgebiet 3. Das liegt an der unterschiedlichen Gebietsstruktur, hinsichtlich Bebauung, dem damit zusammenhängenden Versiegelungsgrad und der bestehenden Entwässerung. Im Folgenden werden deshalb die Einzugsgebiete 1 und 2 gemeinsam betrachtet und anschließend auf das Einzugsgebiet 3 eingegangen.

Tabelle 7-1: Zusammenfassung der Ergebnisse: Änderung der prozentualen Wasserbilanzkomponenten in den Einzugsgebieten 1-3

	Gründächer	teildurchlässige Flächen	Versickerungsgräben	Regentonnen
Wasserbilanz im EZG 1	<p>R: -11.53% ΔS: 2.13% ET: 9.47%</p>	<p>R: -16.39% ΔS: 5.60% ET: 10.87%</p>	<p>R: -2.85% ΔS: 2.74% ET: 0.35%</p>	<p>R: -10.98% ΔS: 11.82% ET: -0.76%</p>
Wasserbilanz im EZG 2	<p>R: -4.84% ΔS: 0.89% ET: 3.99%</p>	<p>R: -10.98% ΔS: 3.75% ET: 7.18%</p>	<p>R: -1.50% ΔS: 1.43% ET: 0.17%</p>	<p>R: -11.43% ΔS: 14.91% ET: -3.39%</p>
Wasserbilanz im EZG 3	<p>R: -0.26% ΔS: -0.04% ET: 0.21%</p>	<p>R: -0.69% ΔS: 0.24% ET: 0.46%</p>		<p>R: -0.13% ΔS: 3.09% ET: -2.90%</p>

7.2.1 Einzugsgebiet 1 und 2

Die Einzugsgebiete 1 und 2 werden zusammen betrachtet, da sie sich von der Gebietsstruktur gleichen. Beide Gebiete haben einen innerstädtischen Charakter und die mögliche Umsetzung der naturnahen Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen gestaltete sich dementsprechend kongruent.

Der Einsatz der Gründächer in den Einzugsgebieten 1 und 2 konnte durch eine Steigerung der Speicheränderung und der Evapotranspiration den Oberflächenabfluss senken. Diese deutliche Reduzierung des Oberflächenabflusses des Einzugsgebietes 1 durch Gründächer ist auf den hohen Grad/Prozentsatz an Dachflächen, welche sich für den Umbau eines Gründaches eignen (90,03 %), zurückzuführen.

Die teildurchlässigen Flächen erreichten hohe Evapotranspirationswerte und konnten den Oberflächenabfluss stark reduzieren. Im Einzugsgebiet 1 konnte der Oberflächenabfluss durch Umsetzung von 41,20 % aller Parkflächen und Gehwege um 16,39 % dezimiert werden. Die Reduzierung der teildurchlässigen Flächen belief sich auf 10,98 %, da nur 33,97 % der Parkflächen und Gehwege teildurchlässig gestaltet werden konnten.

Die Versickerungsgräben im Einzugsgebiet 1 hatten eine Länge von 540 m und konnten dadurch 2,85 % des Oberflächenabflusses reduzieren. Im Einzugsgebiet 2 lag die geringere Reduzierung an der kürzeren Gesamtlänge der eingesetzten Gräben von 280 m.

Die Regentonnen erreichten in den Einzugsgebieten 1 und 2 eine Steigerung der Speicheränderung und gleichzeitig eine Reduzierung der Evapotranspiration. Das liegt daran, dass alle Dachabflüsse von einer Regentonne aufgefangen werden, auch diejenigen, die im Ausgangszustand bereits auf eine Grünfläche entwässert wurden.

Im Einzugsgebiet 1 war dieser Fall im Ausgangszustand nur minimal gegeben und hatte deshalb nur eine geringe Absenkung der Evapotranspiration um 0,76 % zur Folge.

Im Einzugsgebiet 2 wurden hingegen mehr Dachabflüsse im Ausgangszustand auf eine durchlässige oder zumindest teildurchlässige Fläche entwässert. Durch das Auffangen dieser Dachabflüsse in den Regentonnen wurde die Evapotranspiration um 3,39 % verringert.

7.2.2 Einzugsgebiet 3

Die geringen Auswirkungen der LIDs auf die Wasserbilanz im Einzugsgebiet 3 lassen sich auf eine bereits im Ausgangszustand gut geplante Entwässerung zurückführen. Die meisten Dachflächen werden auf die angrenzende Gartenfläche der Einfamilienhäuser entwässert. Straßenabflüsse können auf die an der Straße entlang geführten Grünstreifen abgeführt werden. Im Ausgangszustand ist damit ein Großteil der abflusswirksamen Flächen bereits vom Kanalsystem abgekoppelt. Hinzu kommt das große Waldstück im Norden des Einzugsgebietes, das eine enorme Versickerungs-

und Verdunstungsleistung mit sich bringt. Außerdem sind im Einzugsgebiet 3, im Gegensatz zum Einzugsgebiet 1 und 2, nur 19 % der Gesamtfläche versiegelt (Einzugsgebiet 1: 86 %, Einzugsgebiet 2: 54 %).

Durch den großen, bereits abgekoppelten Anteil der versiegelten Flächen beschränkte sich der Einsatz der LIDs auf ein Minimum im Gegensatz zu den Einzugsgebieten 1 und 2.

3,60 % aller vorhandenen Dachflächen konnten zur Umgestaltung zum Gründach verwendet werden. Folglich hat der geringe Anteil an Gründächern kaum Auswirkungen auf Oberflächenabfluss, Evapotranspiration und auf die Speicheränderung.

Ähnlich gering zeigten sich die Änderungen nach dem Einfügen teildurchlässiger Flächen. Die entsiegelten Flächen nahmen im Einzugsgebiet 3 nur 0,84 % der Gesamtfläche ein. Die gute Infiltrationsleistung der teildurchlässigen Fläche führt zu einer Reduzierung des Oberflächenabflusses um 0,69 %. Damit hatten die teildurchlässigen Flächen am meisten Einfluss auf die Abflussregulierung im Einzugsgebiet.

Die Versickerungsgräben konnten im Einzugsgebiet 3 aus platztechnischen Gründen und der Geometrie der versiegelten Flächen nicht verwendet werden.

Die Regentonnen wurden, wie in den Einzugsgebieten 1 und 2, als einzige Maßnahme auf alle Dachflächen angewendet. Als Folgen des Einsatzes der Regentonnen sind die Steigerung der Speicheränderung sowie die gleichzeitige Abnahme der Evapotranspiration zu nennen. Das liegt daran, dass alle Dachabflüsse zunächst von den Regentonnen aufgefangen wurden, auch die Dachabflüsse, die mit der bisherigen Entwässerung bereits auf eine Grünfläche entwässert wurden. Durch das Sammeln des Regenwassers in den Regentonnen werden der Grünfläche Wassermengen vorenthalten, die vorher verdunstet wurden.

Die Reduzierung des Oberflächenabflusses war nach dem Einsatz der Regentonnen sehr gering. Die Regentonnen erreichten damit eine Verschiebung der Bilanzkomponenten (Evapotranspiration und Speicheränderung) ohne jedoch die Abflusssituation zu verbessern.

Die geringen Auswirkungen auf die Wasserbilanz von Gründächern und einer Entsigelung waren zu erwarten, da die mit diesen LIDs zu verbessernden Anteile an Oberflächenabfluss und Evapotranspiration im Urzustand schon sehr gute Werte aufwiesen. Hinzu kommt, dass die Umsetzung der von Gründächern und teildurchlässigen Flächen nur auf wenigen Flächen zielführend war.

Hinsichtlich starker Regenereignisse und der daraus resultierenden Hochwassergefahr sind zurückhaltende Maßnahmen in Gebieten mit bereits guter Verdunstungs- und Versickerungsleistung eine mögliche sinnvolle Maßnahme. Aus Sicht des Wassereinsparpotentials mit den in den Regentonnen aufgefangenen Dachabflüssen, gewinnen sie zusätzlich an Wirtschaftlichkeit.

8 Kostenrechnung

8.1 Herstellungskosten

Die folgende Kostenaufstellung zeigt, dass die Umsetzung naturnaher Entwässerungssysteme für viele Bauherren noch eine Kostenfrage darstellt. Gerade die Gestaltung teildurchlässiger Flächen kann zu höheren Kosten führen als diese mit einer Beton- oder Asphaltdeckschicht auszubilden.

Tabelle 8-1 zeigt die Herstellungs- und Materialkosten für naturnahe Regenwasserbewirtschaftungssysteme sowie deren finanziellen Wartungs- und Pflegeaufwand für ein Jahr. Im Vergleich dazu sind zusätzlich die Herstellungs- sowie Wartungs- und Pflegekosten für eine Asphalt- und Betondecke aufgestellt. Die Wartung und Pflege von Beton- und Asphaltflächen bezieht sich z. B. auf die Reparatur von Rissen in der Oberfläche. Im Falle von naturnahen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen sind das z. B. die Mahd, die gärtnerische Pflege, das Spülen von Rigolen, die Inspektion sowie die Entfernung von Laub und Störstoffen (Muschalla et al., 2014b).

Allerdings sind bei den teildurchlässigen Flächen die Kosten je nach Ausführung des Bodenbelages zu berücksichtigen. Die Preise variieren je nach Material und Anbieter und liegen zwischen 2,5 und 100 €/m². Somit ist die Herstellung von Flächenversickerungen nicht immer zwangsläufig teurer als eine Fläche zu betonieren oder zu asphaltieren. Hinzu kommt, dass weniger Geräte für die Herstellung einer teildurchlässigen Fläche notwendig sind. Bei Beton- und Asphaltierarbeiten fallen die Kosten für die Baustelleneinrichtung hingegen höher aus.

Tabelle 8-2 zeigt eine Übersicht der Kosten für die Umsetzung der naturnahen Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen in den drei Einzugsgebieten. Hierbei wurden die laufenden Kosten über die Nutzungsdauer von Jahren (Kosten für Wartung und Pflege) unter Berücksichtigung des Diskontierungsfaktors nach Gleichung 8-1 (DWA, 2012) berechnet. Zur Berechnung des Diskontierungsfaktors wurde ein Zinssatz von 3% angenommen (DWA, 2012).

$$\text{DAKR} = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n}$$

Gleichung 8-1

mit:

i: Zinssatz, *n*: Nutzungsdauer

Tabelle 8-1: Übersicht der Kosten für Material, Herstellung sowie Wartung und Pflege für naturnahe Regenwasserbewirtschaftungssysteme, und für eine Beton- oder Asphaltfläche

LID	Beschreibung	Preis	Quelle
Gründach			
intensiv	25–35 cm Aufbauhöhe je nach Bepflanzung Kosten mit Fertigstellungspflege	55-65 €/m ²	(Pendl, 2009)
Pflege	Die laufende Pflege entspricht ungefähr einer Gartenbetreuung: gießen, Unkraut und Wildaufgeher entfernen, Einsetzen und Rückschnitt von Pflanzen, ev. Mähen, Düngen usw.	2.500-3.000 € für 500 m ² /a	
extensiv	Aufbauhöhe von 8-15 cm Kosten mit Anwuchspflege:	12,50-25 €/m ²	
Pflege	Begehung 1x pro Jahr: Entfernen der wurzelaktiven Wildaufgeher wie Disteln und Gehölze, Düngung, Kontrolle der Regenrinnen und Abflüsse, Entfernen von Unrat.	1.000 € für 500 m ² /a	
Evtl. Aufwand für Statik		10 €/m ²	(Hämmerle, 2010)
teildurchlässige Fläche			
Grasnarbe	Gras + 10-20 cm Mutterboden	2,5-10 €/m ²	(Naturverträgliche Regenwasserbewirtschaftung- Hinweise für Gemeinden, Planer und Grundstücksbesitzer, 2003)
Schotterrasen	5-15 cm Mutterboden mit Steinen, 10 cm Schotter, 15-20 cm Kiessand	2,5-10 €/m ²	
Rasengittersteine bzw. -platten	Rasengittersteine mit Mutterboden verfüllt, 5 cm Splitt, 5 cm Feinkies, 15-20 cm Schotter	50-100 €/m ²	
Rasenfugenpflaster	Pflastersteine sandverfugt, 5 cm Splitt/Sand, 10-20 cm Schotter	50-60 €/m ²	
Betonsteinpflaster	inkl. Bodenaushub, Oberbau, Belag, Kantenstein und Gosse mit Kanalanschluss	22,50-25 €/m ²	(Grüne Liga e.V., 1999)
Klinker	inkl. Bodenaushub, Oberbau, Belag, Kantenstein und Gosse mit Kanalanschluss	35-40 €/m ²	
Natursteinpflaster	inkl. Bodenaushub, Oberbau, Belag, Kantenstein und Gosse mit Kanalanschluss	60 €/m ²	
Pflege	Wartung und Pflege für 1 Jahr für teildurchlässige Flächen	0,25-1,75 €/m ²	(Muschalla et al., 2014a)

Offenporiger Asphalt	Herstellung offenporiger Asphalt	22 €/m ²	(LfU, 2005)
	Deckschicht	11,30 €/m ²	
	Wartung und Pflege für 1 Jahr	5-7 €/m ² Jahr	(top-agrar, 2009)
Versickerungsgraben			
	Aushub	5,50 €/lfm	(Department of Planning and Local Government, 2010)
	Bodeneinbau	19,00 €/lfm	
	Grass ansähen und Fertigstellung	2,50 €/lfm	
	Rinne und Randstein bzw. Einfassung	11,00 €/lfm	(Friends of the Rappahannock, 2000)
	Wartung und Pflege für 1 Jahr	2,25 €/m ²	(saveitlancaster, 2012)
Regentonne			
	Fassungsvermögen 650 l	249,00 €/Stück	(Baumarkt Hellweg, 2016)
Betonfläche			
	Material Schichtstärke 20 cm	80-120 €/m ³	(Preisliste, 2015)
	Lieferkosten	25 €/m ³	
	Pumpe/Einbau	9-12 €/m ³	
	Wartung und Pflege für 1 Jahr	5-7 €/m ²	(top-agrar, 2009)
Asphaltfläche			
	Material Schichtstärke 20 cm	13-15,00 €/m ³	(Energiesparhaus, 2014)
	Lieferkosten	3-4 €/m ³	
	Grobplanie erstellen/ Ergänzungsmaterial	2,50 €/m ²	
	Herstellen der Tragschicht	4,20 €/m ²	
	Schotter Schichtstärke 10 cm	22,0 €/m ³	
	Wartung und Pflege für 1 Jahr	5-7 €/m ²	(top-agrar, 2009)

Tabelle 8-2: Kosten für Herstellung, Wartung und Pflege der naturnahen Regenwasserbewirtschaftungssysteme in den Einzugsgebieten 1-3 über eine Nutzungsdauer von 30 Jahren

LID	Menge	Einheit	Leistung	Preis	Einzelkosten [€]	Gesamtkosten [€]
EZG 1						
Gründächer (extensiv)	1,030	ha	Herstellung	18,75 €/m ²	193.060,69	
			Wartung & Pflege	2 €/m ² Jahr	403.769,09	596.829,78
teildurchlässige Flächen	1,171	ha	Herstellung offenporiger Asphalt	22 €/m ²	257.605,92	
			Deckschicht	11,30 €/m ²	132.315,77	
			Wartung & Pflege	6 €/m ² Jahr	1.377.127,01	1.509.442,78
Versickerungsgräben	540	lfm	Aushub	5,50 €/lfm	2.970,00	
			Bodeneinbau	19,00 €/lfm	10.260,00	
			Grass ansähen und Fertigstellung	2,50 €/lfm	1.350,00	
			Rinne und Randstein bzw. Einfassung	11,00 €/lfm	5.940,00	
			Wartung & Pflege	2,25 €/m ² Jahr	23.814,54	44.334,54
Regentonnen	115	Stk	Material	249,00 €/Stk	28.635,00	28.635,00
EZG 2						
Gründächer (extensiv)	0,607	ha	Herstellung	18,75 €/m ²	113.745,56	
			Pflege	2 €/m ² Jahr	237.949,36	351.694,92
teildurchlässige Flächen	0,883	ha	Herstellung offenporiger Asphalt	22 €/m ²	194.260,00	
			Deckschicht	11,30 €/m ²	99.779,00	
			Wartung & Pflege	6 €/m ² Jahr	1.038.431,38	1.332.470,38
Versickerungsgräben	280	lfm	Aushub	5,50 €/lfm	1.540,00	
			Bodeneinbau	19,00 €/lfm	5.880,00	
			Grass ansähen und Fertigstellung	2,50 €/lfm	700,00	
			Rinne und Randstein bzw. Einfassung	11,00 €/lfm	3.080,00	
			Wartung & Pflege	2,25 €/m ² Jahr	12.348,28	23.548,28
Regentonnen	181	Stk	Material	249,00 €/Stk	45.069,00	45.069,00
EZG 3						
Gründächer (extensiv)	0,091	ha	Herstellung	18,75 €/m ²	17.007,38	
			Pflege	2 €/m ² Jahr	35.672,80	52.680,18
teildurchlässige Flächen	0,195	ha	Herstellung offenporiger Asphalt	22 €/m ²	42.887,46	
			Deckschicht	11,30 €/m ²	22.028,56	
			Wartung & Pflege	6 €/m ² Jahr	229.325,16	294.241,18
Regentonnen	158	Stk	Material	249,00 €/Stk	3.9342,00	39.342,00

8.2 Wirtschaftlichkeit

Anhand der Ergebnisse im Kapitel 6.3 und der aufgestellten Kosten der Tabelle 8-1 können die naturnahen Regenwasserbewirtschaftungssysteme bezogen auf ihre Wirtschaftlichkeit gegenübergestellt werden.

Die Gründächer erreichen eine Reduzierung des Oberflächenabflusses von 3,78 mm/100 m² für einen Herstellungspreis von 18,75 €/m².

Durch den Einsatz teildurchlässiger Flächen können 4,73 mm/100 m² Oberflächenabfluss reduziert werden. Für die Herstellung einer offenporigen Asphaltfläche fallen dafür Kosten in der Höhe von 33,30 €/m² an.

Die Versickerungsgräben können den Oberflächenabfluss um 1,18 mm/100 m² reduzieren und verursachen Herstellungskosten von 38 €/lfm.

Die Regentonnen sind durch die unterschiedlichen angeschlossenen Grünflächen in den drei Einzugsgebieten nicht vergleichbar. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass Regentonnen den Oberflächenabfluss stark reduzieren können indem sie durch das gegebene Fassungsvermögen das Wasser speichern bzw. zurückhalten und geregelt drainieren können.

Somit sind Gründächer als die wirtschaftlichste Entwässerungsmaßnahme der vier simulierten naturnahen Regenwasserbewirtschaftungssysteme zu nennen. Sie können den Niederschlag verdunsten und einen Teil zurückhalten, wodurch sie den Oberflächenabfluss reduzieren. Die Herstellungskosten von 18,75 €/m² berücksichtigen keine Kosten für statische Aufwendungen. Die Wartungs- und Pflegekosten sind mit 2 €/m²Jahr ebenfalls preiswert.

In Bezug auf die teildurchlässigen Flächen ist, wie bereits erwähnt, die Art der Oberflächenausbildung ausschlaggebend für die Herstellungskosten. Teildurchlässige Flächen können den Oberflächenabfluss stärker reduzieren, als dies Gründächer schaffen. Sie können in der Herstellung, je nach Ausführung jedoch teurer als Gründächer sein. Hinzukommt der unterschiedliche Wartungs- und Pflegeaufwand, je nach Ausführung und Einsatzort teildurchlässiger Flächen. Sie sind wegen der guten Bilanzerfolge eine empfehlenswerte Maßnahme zur Regenwasserbewirtschaftung.

8.3 Mögliche Kosteneinsparungen

Weitere Anregungen für einen intensiveren Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen schafft beispielsweise Luxemburg durch eine Subventionierung solcher Anlagen (Kipgen et al., 2010).

Außerdem gibt es in einigen Städten und Gemeinden in Deutschland bereits die Regelung, wonach Abwasser- und Regenwassereinleitungen in das Kanalnetz getrennt berechnet werden (Siegele and Zingerle, 2013).

In Österreich wird zur Ableitung des Abwassers eine Kanalnetzbenutzungsgebühr erhoben. Die Gebühren werden entweder nach dem Frischwasserbezug, also von

der über einen Wasserzähler ermittelten Wassermenge ermittelt, oder die Benützungsg Gebühr wird über die Anzahl der WC Anlagen vorgenommen. Weitere Möglichkeiten der Gebührenberechnung in Österreich sind beispielsweise die Berechnung der Schmutzwasserfracht über die Einwohnerzahl oder über die Anzahl der angeschlossenen Haushalte (Scheucher, 2006).

Durch eine Trennung der Gebühren können so in Zukunft für Grundeigentümer Anreize geschaffen werden, sich für den Bau dezentraler Regenwasserbewirtschaftungssysteme zu entscheiden.

Mit einer gesetzlichen Gebührensplittung, so wie sie in Deutschland eingeführt wurde, würde das Abwasser weiterhin über den Bezug von Frischwasser berechnet werden, wobei sich der Niederschlagswasseranteil auf die überbauten und befestigten Flächen eines Grundstückes, welche an die öffentliche Kanalisation angeschlossen sind bzw. von denen Niederschlagswasser in die Kanalisation eingeleitet wird, bezieht. Im Falle einer Trennung der Gebühren verringert sich die Abwassergebühr um den Anteil der Kosten für die Niederschlagswassergebühr.

Flächen, die das Versickern von Niederschlagswasser vollständig sicherstellen (z. B. Flächen mit Rasengittersteinen), werden bei der Berechnung der Gebühr nicht mit einbezogen. Bei Dachbegrünungen werden 50 % der begrünten Dachfläche zur Berechnung der Gebühr angesetzt. (Siegele and Zingerle, 2013). Die Niederschlagswassergebühr in München liegt derzeit (2016) bei 1,30 € pro Quadratmeter und Jahr (Münchner Stadtentwässerung, 2016).

Bezogen auf die Einzugsgebiete 1-3 entfallen damit die Gebühren für die Flächen, die nun über ein LID entwässert werden. Im Falle der Regentonnen können die Gebühren um den Anteil aller Dachflächen reduziert werden, da mit der Verwendung der Regentonnen, auch die Dachflächen von der Kanalisation abgekoppelt wurden. Somit fließen Dachabflüsse, die nicht von der Regentonne aufgefangen werden auf die angrenzende Grünfläche und nicht in den Kanal.

Durch die Einführung einer Trennung der Abwasser- und Regenwasserbeseitigungsg Gebühr könnten über die Nutzungsdauer weitere Kosten gespart werden, die nicht zu vernachlässigen sind. Die Kostenaufstellung der Tabelle 8-3 zeigt, dass über eine Nutzungsdauer von 30 Jahren, die sowohl für Regenwasserbewirtschaftungssysteme (Muschalla et al., 2014a), als auch für Beton- und Asphaltflächen (Bundesministerium für Finanzen (BMF)) angesetzt wird, fallen die Kosten für naturnahe Systeme geringer aus. Je nach Ausführungsvariante der teildurchlässigen Flächen übersteigen die durch die Gebühr eingesparten Kosten sogar den Herstellungspreis inkl. Wartungskosten über die Nutzungsdauer. Die Kostenaufstellung berücksichtigt allerdings keinen Ausfall der Anlagen und der damit verbundenen Kosten. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass trotz Wartung und Pflege die teildurchlässigen Flächen über die Nutzungsdauer an Leistungsfähigkeit verlieren.

Tabelle 8-3: Kosten für Herstellung und Betrieb über 30 Jahre, abzüglich der Niederschlagswassergebühr von 1,30 €/m²

	Herstellung [€/m ²]	Preis [€/m ²]	Wartung & Pflege [€/m ² Jahr]	Preis [€/m ²]	Wartung & Pflege für 30 Jahre [€/m ²]	Herstellung inkl. Wartung & Betrieb nach 30 Jahren Nutzungsdauer	abzüglich der Nieder- schlagwassergebühr von 1.30 €/m ² nach 30 Jahren [€/m ²]	Gesamtkosten über die Nut- zungsdauer von 30 Jahren [€/m ²]
Grasnarbe	2,5-10	6,25		1,00	30,00	36,25	39,00	<u>-2,75</u>
Schotterrasen	2,5-10	6,25		1,00	30,00	36,25	39,00	<u>-2,75</u>
Rasengitterstei- ne bzw. -platten	50-100	75,00	0,25-1,75	1,00	30,00	105,00	39,00	<u>66,00</u>
Rasenfugen- pflaster	50-60	55,00		1,00	30,00	85,00	39,00	<u>46,00</u>
Betonstein- pflaster	22,50-25	23,75		1,00	30,00	53,75	39,00	<u>14,75</u>
Klinker	35-40	37,50		1,00	30,00	67,50	39,00	<u>28,50</u>
Naturstein- pflaster	60	60,00		1,00	30,00	90,00	39,00	<u>51,00</u>
Offenporiger Asphalt	33,30	33,30	5,00-7,00	6,00	180,00	213,30	39	<u>174,30</u>
Beton	33,0	33,00	5,00-7,00	6,00	180,00	213,00	-	<u>213,00</u>
Asphalt	13,04	13,04		6,00	180,00	193,04	-	<u>193,04</u>

Die Kostenaufstellung zeigt, dass eine Trennung der Abwasser- und Niederschlagswassergebühren den Bau naturnaher Maßnahmen bedeutend attraktiver machen könnte. Eine Gegenüberstellung der Herstellungskosten und der über die Nutzungsdauer anfallenden Kosten ist bei zukünftigen Bauprojekten in jedem Falle zu empfehlen.

Eine weitere Kosteneinsparung ergibt sich durch die Möglichkeit der Regenwassernutzung. Durch die Verwendung des Regenwassers als Brauchwasser im Haushalt und zur Bewässerung kann Trinkwasser eingespart und somit die Trinkwasserkosten reduziert werden. Dort, wo die Abwassergebühr sich nach dem Trinkwasserbezug berechnet, kann es zusätzlich zu einer Reduktion der Abwassergebühr kommen.

Um eine Regenwassernutzung zu ermöglichen, werden Regentonnen und Zisternen verwendet, die den Niederschlag von Dachflächen und bebauten Flächen sammeln. Für einen Vier-Personen-Haushalt liegen die Kosten einer Regenwassernutzungsanlage (inklusive Nutzung für Toilettenspülung und Waschmaschine) bei ca. 3.000-7.000 €.

Der Einbau von Zisternen dient hauptsächlich der Einsparung von Trinkwasser und den damit reduzierten Trinkwasserkosten. Allerdings dauert es mehrere Jahre bis sich die Investitionskosten einer solchen Anlage durch das Einsparen der Trinkwasserkosten rechnen (Sieker, 2001).

Bei dem Einsatz von Regentonnen und Regenwasserzisternen spielt der ökologische Gedanke zudem eine bedeutende Rolle. Das Grundwasservorkommen wird geschont, weil weniger Wasser als Trinkwasser entnommen werden muss. Zudem bieten Zisternen ein Retentionsvolumen und verbessern damit die Abflusssituation (Sieker, 2001).

9 Schlussfolgerungen, Zusammenfassung und Ausblick

Durch den wachsenden Anteil an versiegelten Flächen in urbanen Gebieten wird es notwendig, die Regenwasserbewirtschaftung zeitgemäß weiterzuentwickeln. Die natürliche Verdunstung und Versickerung von Regenwasser wird durch asphaltierte und betonierte Flächen unterbunden. Der Niederschlag muss zu einem großen Teil an der Oberfläche abfließen und anschließend über die Kanalisationssysteme abtransportiert werden. Das unterirdische Abführen des Regenwassers führt zu einer Änderung des Kleinklimas und einer Verschiebung der Wasserbilanz.

Eine Möglichkeit der nachhaltigen Entwässerungstechnik bieten die Systeme der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. Sie orientieren sich an den Fließwegen des Regenwassers in der Natur. Diese Art der Bewirtschaftung verfolgt das Ziel, das Regenwasser am Ort des Anfallens, somit dezentral, zu bewirtschaften. Dabei wird das Regenwasser gesammelt, zurückgehalten, genutzt, versickert oder gedrosselt abgeleitet.

Für den Einsatz und die Ausführung naturnaher Regenwasserbewirtschaftungssysteme werden auf europäischer sowie auf österreichischer und deutscher Landesebene Anforderungen an den Grundwasserschutz gestellt. Aus der lokalen Bebauung und der vorhandenen Bodenzusammensetzung resultieren Grenzwerte hinsichtlich der möglichen Bauausführung. Abstände zu Gebäuden und zu Grundwasserleiter sind gemäß den Regelwerken einzuhalten. Je nach entwässertem Flächentyp und Verschmutzungsgrad wird eine ausreichende Reinigung vor Versickern des Wassers notwendig.

Die Anlagen können dezentral installiert werden und den Niederschlag am Ort des Anfallens behandeln. Durch den Einsatz naturnaher Maßnahmen wird das Regenwasser mittels Versickerung und Verdunstung wieder dem Wasserkreislauf zugeführt. Die Grundwasserneubildung wird gefördert und sichert damit eine wichtige Quelle für Trinkwasser. Durch die Speicherung und Rückhaltung des Wassers in Mulden, im Bodenkörper und in extra geschaffenen Retentionsräumen, z. B. in Rohr-Rigolen Systemen, kann das Wasser zwischengespeichert und zeitverzögert weitergeleitet werden. Dadurch werden Hochwassersituationen entschärft und die Abflussspitzen der Gewässer abgeflacht. Eine Nutzung des aufgefangenen Regenwassers als Brauchwasser oder zur Gartenbewässerung ist zielführend für einen nachhaltigen Umgang mit der Ressource Wasser.

Mit Hilfe hydrologischer Softwareprogramme kann die Verwendung naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen simuliert werden. Im Rahmen von Planungen neuer Entwässerungswege in Gebieten mit bestehender Kanalisation oder im Falle einer Neuplanung in Neubaugebieten können naturnahe Systeme auf ihre siedlungswasserwirtschaftliche Effizienz getestet werden.

In dieser Arbeit wurde hierfür das Programm SWMM 5.0, das mehrere Arten naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen, die unter dem amerikanisch ge-

prägen Begriff des LIDs, zusammengefasst werden, verwendet. Die LIDs entsprechen der deutschen naturnahen Regenwasserbewirtschaftung mit der Erweiterung zusätzlicher Systeme. Aus den errechneten Werten über eine Simulationsdauer von einem Jahr konnten für drei Testgebiete in Finnland unter Verwendung von LIDs die entsprechenden Wasserbilanzen ermittelt werden. Durch die separate Anwendung unterschiedlicher LIDs in den Testgebieten kann die genaue Änderung der Wasserbilanzkomponenten, unterteilt in Oberflächenabfluss, Speicheränderung und Evapotranspiration, dem jeweiligen System zugeordnet werden. Die Simulationsergebnisse zeigen eine Reduzierung des Oberflächenabflusses, eine Steigerung der Evapotranspiration sowie eine positive Speicheränderung bedingt durch eine erhöhte Versickerungsleistung und den Rückhalt bzw. die Speicherung des Niederschlagswassers.

Die gewonnenen Werte können als Anhaltspunkt für die Wirkungsweise naturnaher Regenwasserbewirtschaftungssysteme und deren Auswirkungen auf die Wasserbilanz herangezogen werden. Allerdings ist bei der Betrachtung der Ergebnisse zu berücksichtigen, dass sich diese aus den vorher fest definierten Randbedingungen ergaben. Zunächst ist dabei zu erwähnen, dass die ausgewerteten Ergebnisse für die Bilanzen nur für die hier aufgestellten Modelle mit den in dieser Arbeit recherchierten Parameter gelten. Die gewählten Parameter für die einzelnen LIDs berufen sich auf Literaturwerte. Einzig die Parameter der Gründächer sind für die lokalen klimatischen Verhältnisse kalibriert. Die Parameter der anderen LIDs sind Mittelwerte der recherchierten Literatur und wurden nicht vor Ort empirisch ermittelt.

Auch der Anwendungsbereich orientiert sich an vorher festgelegten Kriterien und die vorgeschlagene Wahl in dieser Arbeit stellt nur eine Möglichkeit dar.

Ferner ist festzuhalten, dass sich die Leistungen naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen aufgrund der gegebenen Infrastruktur stark unterscheiden können. Je nach Einsatzort und den dort vorhandenen Konzentrationen an Schmutz- und Schwebstoffen können Anlagen unterschiedlich schnell versagen. Poren und Zwischenräume verstopfen durch das Auswaschen von Schwebstoffe aus der Atmosphäre und den überströmten Flächen. In bereits realisierten Anlagen ist eine unzureichende Wartung und Pflege der häufigste Grund für ein frühzeitiges Versagen der Anlage. Dabei ist die Simulationsdauer von einem Jahr zusätzlich zu berücksichtigen. Die Ergebnisse längerer Laufzeiten können dann auch eine Verschlechterung oder gar ein Versagen der Anlagen erkennen lassen.

Des Weiteren wurden klimatische Einwirkungen, wie Schneeschmelze oder Windgeschwindigkeiten, die zu einer zusätzlichen Belastung der Anlagen führen können, nicht berücksichtigt.

Auf Basis der genannten Fehlerquellen müssen die Ergebnisse, die im Rahmen dieser Arbeit erworben worden sind, immer in Zusammenhang mit den festgelegten Randbedingungen betrachtet werden. Für genauere Auswirkungen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung auf die Wasserbilanz sind, wenn möglich, vor Ort Pro-

beflächen zu errichten, um genaue Messwerte hinsichtlich Evapotranspiration und Versickerung zu erhalten. Dadurch können die LID-Parameter, wie beispielsweise die Infiltrationsrate einer teildurchlässigen Fläche, kalibriert werden.

Unter Beachtung, dass die erworbenen Ergebnisse projektspezifisch zu betrachten sind, zeigen die angewendeten Systeme die erwünschten Erfolge hinsichtlich der Wasserbilanz. Die Reduzierung des Oberflächenabflusses führt zu einer Mäßigung zukünftiger Hochwassersituationen. Außerdem wird die in den Kanal einzuleitende Wassermenge reduziert, wodurch eine Erweiterung der Kanalisation umgangen werden kann.

Die Steigerung der Evapotranspiration führt zu einer Verbesserung des Kleinklimas. Das verdunstete Regenwasser erhöht die Luftfeuchtigkeit und senkt die innerstädtischen Temperaturen. Zusätzlich kann die Feinstaubbelastung aufgrund der staubbindenden Wirkung des verdunstenden Wassers verringert werden.

Eine Erhöhung der Speicheränderung impliziert, dass mehr Wasser versickert, womit der Grundwasserleiter mit frischem Wasser gespeist wird. Außerdem kann Regenwasser gespeichert und zurückgehalten werden, um es zeitverzögert wieder abzugeben oder zu nutzen. Das zeitweise Zurückhalten von Wasser kann während Starkregenereignissen die Kanalisationssysteme entlasten, wodurch eine Überlastung von Mischwasserüberläufen verhindert werden kann. Eine Nutzung des Regenwassers im Haushalt oder zur Gartenbewässerung führt zu einer Einsparung des Trinkwassers.

Trotz der genannten Verbesserungen durch den Einsatz naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen zeigt die Kostenaufstellung, dass ein Bau solcher Anlagen für den Bauherren noch sehr teuer ist. In den meisten Fällen wird das Asphaltieren und Betonieren die günstigere Alternative zur Flächenbefestigung großer Bereiche sein. Je nach lokaler infrastruktureller sowie bodenkundlicher Randbedingungen können sich die Kosten für die Herstellung und den weiteren Betrieb der Anlagen stark unterscheiden. Anreize werden mittlerweile in Deutschland und der Schweiz geschaffen, wo einige Projekte zum Bau naturnaher Maßnahmen gefördert werden.

Außerdem gibt es in beiden Ländern bereits eine Gebührentrennung bezüglich der Abwasser- und Regenwasserbeseitigung. Hierfür wird das Abwasser weiterhin über den Trinkwasserbezug berechnet. Die Niederschlagswassergebühr bezieht sich auf die überbauten und befestigten Flächen eines Grundstückes, welche an die öffentliche Kanalisation angeschlossen sind bzw. auf die Menge des Niederschlagswassers, das in die Kanalisation eingeleitet wird. Durch das Reduzieren der abflusswirksamen Flächen auf dem eigenen Grundstück kann jeder Eigentümer Gebühren einsparen.

Für eine nachhaltige und zeitgemäße Entwässerung von Niederschlägen sind naturnahe Regenwasserbewirtschaftungssysteme als eine wirkungsvolle Maßnahme zur Verbesserung der Wasserbilanz vermehrt umzusetzen. Als eine optimale Anwendung naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen sollte immer eine Kombina-

tion aus mehreren verschiedenen Anlagen gesehen werden. Je nach zu erreichendem primärem Ziel, sei es hauptsächlich die Reduzierung des Oberflächenabflusses, das Zurückhalten des Wassers und eine anschließende kontrollierte Ableitung des Wassers an geeigneter Stelle oder die Anreicherung des Grundwassers in Regionen, in denen die Fluss- und Bachläufe in den Sommermonaten oft trocken liegen, können unterschiedliche Kombinationen naturnaher Regenwasserbewirtschaftungsanlagen zielführend sein.

Literaturverzeichnis

- AbwAG (1976) *Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz - AbwAG)*, [online] <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/abwag/gesamt.pdf> (Accessed October 27, 2016).
- Assinger, C. (2012) Niederschlagswasserbewirtschaftung - Analyse, Möglichkeiten und Empfehlungen für Graz.
- Baumarkt Hellweg (2016) Garantia Gartentank »Classico«, 650 L grün kaufen bei HELLWEG.at. [www.hellweg.at](http://www.hellweg.at/Gartentank-Classico-650-L-gruen.html). [online] <http://www.hellweg.at/Gartentank-Classico-650-L-gruen.html> (Accessed August 29, 2016).
- Bernard, J. M. and Tuttle, R. W. (1998) Stream corridor restoration: Principles, processes, and practices. *Engineering approaches to ecosystem restoration*, 320–325.
- BGBl.II.98/2010 (2010) *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über den guten chemischen Zustand des Grundwassers (Qualitätszielverordnung Chemie Grundwasser – QZV Chemie GW)*, Vienna, Austria.
- Bullermann (2004) *Regenwasserbewirtschaftung in Neubaugebieten*, Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (Hrsg.), Wiesbaden.
- Bundeskanzleramt der Republik Österreich (1996) *Abwasseremissionsverordnung, Fassung vom 25.07.2016*, [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010977> (Accessed July 25, 2016).
- Bundeskanzleramt der Republik Österreich (2013) *Wasserrechtsgesetz 1959, Fassung vom 23.07.2016*, [online] <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/10010290/WRG%201959%2c%20Fassung%20vom%2023.07.2016.pdf>.
- Bundesministerium für Finanzen (BMF) Tabelle über die Nutzungsdauer von Sachanlagen und immateriellen Anlagenkennzahlen mit den Nutzungsdauerwerten. [online] https://www.bmb.gv.at/ministerium/rs/2010_27_beilage2_20004.pdf?5i835g (Accessed September 21, 2016).
- Bundesverband Boden (1999) Empfehlungen zur guten fachlichen Praxis bei der Planung von Anlagen zur dezentralen Regenwasserversickerung-Anforderungen aus der Sicht der bodenkundlichen Fachtechnik.
- Carlson, C. (2014) *Storm Water Management as a Public Good Provision*, American Society of Civil Engineers.
- Carter, T. L. and Rasmussen, T. C. (2006) Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association*, **42**(5), 1261–1274.

- CHI (2016) SWMM Knowledge Base. www.openswmm.org. [online] <https://www.openswmm.org/Forum> (Accessed August 16, 2016).
- CHIwater (2016) www.chiwater.com, SWMM 5.1,
- Christen, Dietrich, and Schmocker (2016) Das Stormwater Management Model: ein Simulationsmodell für die elektronische Berechnung von Kanalisationen. , **102**(Heft 38). [online] <http://www.e-periodica.ch>.
- Department of Planning and Local Government (2010) Swales and Buffer Strips. [online] https://www.sa.gov.au/__data/assets/pdf_file/0019/20917/WSUD_chapter_11.pdf (Accessed September 16, 2016).
- Discovering Finland Guide Oy (1999) Reiseführer Lahti - Tourismus Lahti - Ferien | DiscoveringFinland.com. www.discoveringfinland.com. [online] <http://www.discoveringfinland.com/de/travel/regionen/sudfinnland/lahti/> (Accessed June 23, 2016).
- Doppler, B., Kubu, S., and Willerstorfer, C. (2013) Regenwassermanagement. Nachhaltiger Umgang mit wertvollem Regenwasser.
- DWA (2005) *Arbeitsblatt DWA-A 138 - Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser*, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Germany.
- DWA (2012) *DWA Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien)*, DWA, Hennef, Germany.
- DWA (2016) *Gelbdruckvorlage DWA-A 102 Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer*, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef, Germany.
- DWA (2007) *Merkblatt DWA-M 153 - Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser August 2007*, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, Germany.
- Dyck, S. and Peschke, G. (1995) *Grundlagen der Hydrologie*, Ernst. [online] <http://tocs.ulb.tu-darmstadt.de/30373859.pdf> (Accessed November 4, 2015).
- Energiesparhaus (2014) Kosten Asphaltierung | Bauforum auf energiesparhaus.at. [online] http://www.energiesparhaus.at/denkwerkstatt/allgemein_a.asp?Thread=34006 (Accessed October 20, 2016).
- EPA (2000) Low Impact Development (LID): a literature review.
- EPA (2016) Storm Water Management Model (SWMM) | Water Research | US EPA. www.epa.gov. [online] <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm> (Accessed August 1, 2016).

- Friends of the Rappahannock (2000) [online]
<http://for.communitypoint.org/pages/LID.htm>.
- Geiger, W. F., Dreiseitl, H., and Stemplewski, J. (2009) *Neue Wege für das Regenwasser - Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebieten*, Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München.
- Geological Survey of Finland (2015) [online]
<http://gtkdata.gtk.fi/Maankamara/index.html>.
- Ginzky, Hagendorf, and Hornemann (2005) *Versickerung und Nutzung von Regenwasser - Vorteile, Risiken, Anforderungen*.
- Grüne Liga e.V. (1999) *Abschlußbericht zum Urban-Projekt: Musterhof mit Beratungsstelle im Prenzlauer Berg*, Berlin.
- Hämmerle, F. (2010) Die Wirtschaftlichkeit von Gründächern aus der Sicht des Bauherrn. [online] <http://www.efb-greenroof.eu/verband/fachbei/fa01.html> (Accessed September 16, 2016).
- Herrmann, A. (1997) *Global review of isotope hydrological investigations*, Cemagref Editions, Frankreich.
- Herzer, P. (2004) *Einflüsse einer naturnahen Regenwasserbewirtschaftung auf den Städtebau - Räumliche, ökonomische und ökologische Aspekte.*, Fraunhofer IRB Verlag, Fakultät Architektur und Stadtplanung Universität Stuttgart.
- Horner, R. R. and Chapman, C. (2007) *NW 110th Street Natural Drainage System Performance Monitoring*, University of Washington, Seattle, USA.
- Huber, W. C. (2001) New options for overland flow routing in SWMM. *Urban drainage modeling*, 22–29.
- James, W., Rossmann, L. A., and James, W. R. C. (2010) *Users's Guide to SWMM5 - 13th Edition*, CHI - Computational Hydraulics International, Guelph, Ontario, Canada. [online]
<http://www.chiwater.com/Files/UsersGuideToSWMM5Edn13.pdf>.
- Kersalo, J. and Pirinen, P. (2009) *Suomen maakuntien ilmasto*, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland.
- Kipgen, Lambert, and Lanners (2010) *Leitfaden zum Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten Luxemburgs*.
- klima.org (2016) Definition Kleinklima Archives. www.klima.org. [online]
<http://www.klima.org/schlagwort/definition-kleinklima/>.
- Koch, M. (2003) *Ingenieurhydrologie*. [online] http://www.uni-kassel.de/fb14/geohydraulik/Lehre/Hydrologie_/skript/IngHydro7.pdf (Accessed August 9, 2016).
- Kompatscher, P. (2008) *Leitfaden zum naturnahen Umgang mit Regenwasser*.

- Krebs, G. (2016) Spatial Resolution and Parameterization of an Urban Hydrological Model: Requirements for the Evaluation of Low Impact Development Strategies at the City Scale. [online] <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/20293> (Accessed July 7, 2016).
- KU Leuven (2006) The influence of rainfall and model simplification on combined sewer system design. [online] <http://www.kuleuven.be/hydr/downloads/H3.pdf> (Accessed October 28, 2016).
- Kumar, K., Kozak, J., Hundal, L., Cox, A., and Zhang, H. (2015) In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot-A four year study.
- Kuosa, H., Niemeläinen, E., and Korkealaakso, J. (2014) Pervious pavement testing methods. State-of-the-Art and laboratory and field guideline for performance assessment. [online] http://www.vtt.fi/files/sites/class/CLASS_WP2_Lab_and_Field_Testing_Guideline.pdf (Accessed October 8, 2016).
- Lahti – Wikipedia (2016) [de.wikipedia.org](https://de.wikipedia.org/wiki/Lahti). [online] <https://de.wikipedia.org/wiki/Lahti> (Accessed October 18, 2016).
- Larcher (2009) Planungshilfen für die Bemessung und Hinweise zur Sanierung von dezentralen Versickerungsanlagen für Niederschlagswasser.
- LfU (2016) Naturnaher Umgang mit Regenwasser-Verdunstung und Versickerung statt Ableitung.
- LfU (2005) Westliche Ringstraße- Pilotprojekt zwischichtiger offenporiger Asphalt. [online] <http://www.lfu.bayern.de/laerm/opa/projektbeschreibung/doc/2opa.pdf> (Accessed October 20, 2016).
- McCutcheon, M. (2013) SWMM5 LID Control for Green Infrastructure Modeling. [online] http://www.ohiowea.org/docs/1115_SWMM5_LID_Control_Green_Infrastructure_Modeling.pdf (Accessed September 23, 2016).
- McCutcheon, M., Wride, D., and Reinicke, J. (2012) An Evaluation of Modeling Green Infrastructure Using LID Controls. *Journal of Water Management Modeling*. [online] <https://www.chijournal.org/Content/Files/R245-12.pdf> (Accessed October 8, 2016).
- Münchner Stadtentwässerung (2016) Niederschlagswassergebühr. [online] <https://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/baureferat/mse/Kundenservice/Gebuehreninformation/Niederschlagswassergebuehr.html> (Accessed September 15, 2016).
- Muschalla, D., Gruber, G., and Scheucher, R. (2014a) *Ecostorma- ökologische und ökonomische Maßnahmen der Niederschlagswasserbewirtschaftung*, Ministerium für ein lebenswertes Österreich bmlfuw.gv.at, Wien, Österreich. [online] bmlfuw.gv.at.

- Muschalla, D., Gruber, G., and Scheucher, R. (2014b) *Ökologische und ökonomische Maßnahmen der Niederschlagswasserbewirtschaftung*, BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT, Wien.
- Muschalla, D., Klawitter, A., and Ostrowski, M. W. (2008) *Vorlesungsunterlagen Ingenieurhydrologie 3*, ihwb - Institut fuer Wasserbau und Wasserwirtschaft, Fachgebiet Ingenieurhydrologie und Wasserbewirtschaftung, TU Darmstadt, Darmstadt, Germany.
- Muschalla, D., Sulzbacher, R. M., Leimgruber, J., Maier, R., Ertl, T., Neunteufel, R., Kretschmer, F., Kleidorfer, M., and Tscheikner-Gratl, F. (2015) *Auf effizientem Wege von den Daten zum Modell (DATMOD) - Sanierungs- und Anpassungsplanung von kleinen und mittleren Kanalnetzen*, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich. [online] https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user_upload/media/umweltfoerderung/Dokumente_Betriebe/Wasser_Betriebe/Studien_Wasserwirtschaft/DATMOD_Leitfaden_160217.pdf.
- Muschalla, D., Vallet, B., Ancil, F., Lessard, P., Pelletier, G., and Vanrolleghem, P. A. (2014c) Ecohydraulic-driven real-time control of stormwater basins. *Journal of Hydrology*, **511**, 82–91.
- Naturverträgliche Regenwasserbewirtschaftung- Hinweise für Gemeinden, Planer und Grundstücksbesitzer; (2003) [online] http://www.neckar-odenwald-kreis.de/nok_media/landratsamt/verwaltung/Umwelt_und_Bauen_FB2/Wasserwirtschaft/Regenwasserbewirtschaftung.pdf (Accessed September 16, 2016).
- OEWAV (2003) *ÖWAV - Regelblatt 35 - Behandlung von Niederschlagswässern*, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Vienna, Austria.
- OEWAV (2015) *ÖWAV - Regelblatt 45 - Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund*, Wien, Österreich.
- Ostrowski, M. W. (1993) *Surface Runoff Components in Urbain Drainage Systems*, Proc. der 6. International Conference on urban storm drainage, Niagara Falls, USA.
- Pendl, M. (2009) LEITFADEN – DACHBEGRÜNUNG IN WIEN. [online] http://images.umweltberatung.at/htm/leitfaden_dachbegruenung.pdf (Accessed September 16, 2016).
- Pitha, U., Scharf, B., and Enzi, V. (2014) *Grüne Bauweisen für Städte der Zukunft- Optimierung des Wasser- und Lufthaushalts urbaner Räume mittels Gründächern, Grünfassaden und versickerungsfähigen Oberflächenbefestigungen*, Verband für Bauwerksbegrünung, BOKU Wien. [online] http://www.gruenstadtklima.at/download/leitfaden_GSK.pdf (Accessed August 31, 2016).
- Professur für Hydrologie (2013) *Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung - Was können Sie tun.* [online] <http://www.naturnahe->

- regenwasserbewirtschaftung.info/index.php?page=was_koennen_sie_tun (Accessed August 24, 2016).
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., and Miller, N. (1983) Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydraulic Engineering* - ASCE, **109**(1), 62–70.
- Rossmann, L. A. and Huber, W. C. (2016a) *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I - Hydrology*, US EPA National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, USA.
- Rossmann, L. A. and Huber, W. C. (2016b) *Storm Water Management Model Reference Manual Volume III - Water Quality*, US EPA National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, USA.
- Rossmann, L. A. and Huber, W. C. (2016) *Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology (Revised)*, EPA - United States Environmental Protection Agency. [online] http://innovyze.com/products/swmm/download/STORM_WATER_MANAGEMENT_MODEL_REFERENCE_MANUAL_VOLUME_I_HYDROLOGY_REVISI D.PDF (Accessed August 9, 2016).
- Sartor (2016) Hochschule Trier - Technik BLV: Langzeituntersuchung zur naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. www.hochschule-trier.de. [online] <https://www.hochschule-trier.de/index.php?id=18294> (Accessed May 20, 2016).
- Sartor, J. (2002) Ist die Regenwasserversickerung von bebauten Flächen wirklich naturnah? *WASSER UND ABFALL*, **7**, 5.
- saveitlancaster (2012) FACT SHEET: Vegetated Swale. [online] http://www.saveitlancaster.com/wp-content/uploads/2011/10/09_VegSwale_V3.pdf (Accessed September 12, 2016).
- Scheucher, R. (2006) ABWASSERGEBÜHRENSPLITTING Erfahrungen bei der Einführung und Umsetzung in Deutschland und Umsetzung auf steirische Verhältnisse anhand von Fallbeispielen. [online] https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Institute/SWW/3_Unterseite_Lehre/4_Masterarbeiten/DA_Scheucher.pdf (Accessed October 19, 2016).
- Scholz, M. and Kazemi Yazdi, S. (2008) Treatment of Road Runoff by a combined Storm Water Treatment, Detention and Infiltration System.
- Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (2010) *Konzepte der Regenwasserbewirtschaftung Gebäudebegrünung, Gebäudekühlung Leitfaden für Planung, Bau, Betrieb und Wartung*, Berlin Bauen, Berlin, Deutschland.
- Siegele, V. and Zingerle (2013) RegenwasserÄsthetik, Abkoppelungspotenzial und Gestaltungspotenzial dezentraler Regenwasserbewirtschaftung im Wiener Siedlungsbestand.

- Sieker (2016a) Flächenversickerung | Sieker. [online] <http://www.sieker.de/de/fachinformationen/regenwasserbewirtschaftung/versicherung/article/flaechenversickerung-155.html> (Accessed October 18, 2016).
- Sieker, F. (2016b) Durchlässige Pflasterbeläge | Sieker. [online] <http://www.sieker.de/de/fachinformationen/regenwasserbewirtschaftung/article/durchlaessige-pflasterbelaege-151.html> (Accessed July 15, 2016).
- Sieker, F., Adams, R., Huhn, V., and Stecker, A. (1996) *Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten - Grundlagen, Leitfaden und Anwendungsbeispiele*, expert verlag, Renningen-Malmsheim.
- Sieker, F., Schlottmann, P., and Zweynert, U. (2007) *Ökologische und ökonomische Vergleichsbetrachtung zwischen dem Konzept der konventionellen Regenwasserentsorgung und dem Konzept der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung*, Umweltbundesamtes, Hannover, Germany.
- Sieker, F., Sieker, H., and Zweynert (2009) *Konzept für bundeseinheitliche Anforderungen an die Regenwasserbewirtschaftung*, Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau.
- Sieker, H. (2001) Generelle Planung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten.
- Sochanska, M. D. (2014) PERFORMANCE AND COST EFFECTIVENESS OF CENTRALIZED INFILTRATION BASINS AND DECENTRALIZED LOW IMPACT DEVELOPMENT PRACTICES IN A SEMI-ARID URBAN WATERSHED. [online] <http://content.lib.utah.edu/utis/getfile/collection/etd3/id/3164/filename/3173.pdf> (Accessed August 14, 2016).
- Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., and Smith, C. L. (2013) *Rainwater Runoff retention on an aged intensive green roof*, School of Environment and Development, Manchester, England.
- top-agrar (2009) Ist Asphalt das bessere Pflaster für den Hof? [online] http://oevermann.com/tl_files/inhalte/aktuelles/pressespiegel/top_agrar_08-2009.pdf (Accessed September 16, 2016).
- UCAR (2016) The COMET Program. [online] <http://www.comet.ucar.edu/>.
- Wasserrahmenrichtlinie (2000) www.umweltbundesamt.at. [online] <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/wasser/eu-wrrl/> (Accessed May 6, 2016).
- Yen, B. C. (2001) *Hydraulics of Sewer Systems*, New York, NY, USA.

Anhang A

A.1. Ergebnisdaten nach Simulationsdurchlauf

Die Ergebnisse der Simulationsdurchläufe der drei Einzugsgebiete in Lahti werden in der Tabelle A.1-1 dargestellt. Die Daten waren Grundlage für die Berechnung der Wasserbilanzen.

Tabelle A.1-1: Datenausgabe nach Simulationsdurchlauf für das Einzugsgebiet 1
(Quelle: rpt.-Datei aus SWMM)

Einzugsgebiet 1		
ohne (without) LID		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Total Precipitation	3.379	575.279
Evaporation Loss	0.411	69.886
Infiltration Loss	0.533	90.684
Surface Runoff	2.433	414.258
Final Storage	0.003	0.463
Continuity Error (%)	.....	-0.002
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	270.921	46120.364
Infiltration	0.533	90.684
Upper Zone ET	0.149	25.321
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.021	3.524
Groundwater Flow	0.023	3.95
Final Storage	271.261	46178.252
Continuity Error (%)	.....	0

Gründächer (Green Roof)		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Initial LID Storage	0.002	0.351
Total Precipitation	3.379	575.279
Evaporation Loss	0.731	124.381
Infiltration Loss	0.533	90.684
Surface Runoff	2.044	347.954
Final Storage	0.074	12.617
Continuity Error (%)	.....	-0.001
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	270.921	46120.364
Infiltration	0.533	90.684
Upper Zone ET	0.149	25.321
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.021	3.524
Groundwater Flow	0.023	3.952
Final Storage	271.261	46178.25
Continuity Error (%)	.....	0

teildurchlässige Fläche (Permeable Pavement)		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Total Precipitation	3.379	575.279
Evaporation Loss	0.679	115.507
Infiltration Loss	0.787	134.047
Surface Runoff	1.879	319.95
Final Storage	0.034	5.783
Continuity Error (%)	.....	-0.002
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	270.921	46120.364
Infiltration	0.787	134.047
Upper Zone ET	0.248	42.252
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.04	6.871
Groundwater Flow	0.023	3.965
Final Storage	271.397	46201.323
Continuity Error (%)	.....	0

Regentonnen (Rain Barrel)		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Total Precipitation	3.376	575.279
Evaporation Loss	0.412	70.184
Infiltration Loss	0.894	152.274
Surface Runoff	2.061	351.104
Final Storage	0.01	1.729
Continuity Error (%)	.....	-0.002
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	270.687	46120.432
Infiltration	0.894	152.274
Upper Zone ET	0.121	20.661
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.026	4.419
Groundwater Flow	0.368	62.644
Final Storage	271.065	46184.982
Continuity Error (%)	.....	0

Versickerungsgräben (Vegetative Swale)		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Total Precipitation	3.379	575.279
Evaporation Loss	0.402	68.42
Infiltration Loss	0.641	109.151
Surface Runoff	2.334	397.882
Final Storage	0.003	0.458
Continuity Error (%)	.....	-0.005
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	270.921	46120.364
Infiltration	0.641	109.151
Upper Zone ET	0.167	28.787
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.034	5.868
Groundwater Flow	0.023	3.952
Final Storage	271.338	46191.208
Continuity Error (%)	.....	0

Tabelle A.1-2: Datenausgabe nach Simulationsdurchlauf für das Einzugsgebiet 2
(Quelle: rpt.Datei aus SWMM)

Einzugsgebiet 2		
ohne (without) LID		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Total Precipitation	3.815	575.279
Evaporation Loss	0.411	61.972
Infiltration Loss	1.782	268.650
Surface Runoff	1.619	244.113
Final Storage	0.004	0.562
Continuity Error (%)	.....	-0.003
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	321.874	48531.493
Infiltration	1.782	268.650
Upper Zone ET	0.478	71.997
Lower Zone ET	0.000	0.000
Deep Percolation	0.061	9.163
Groundwater Flow	0.103	15.558
Final Storage	323.015	48703.426
Continuity Error (%)	.....	0.000

Gründächer (Green Roof)		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Initial LID Storage	0.001	0.148
Total Precipitation	3.815	575.279
Evaporation Loss	0.553	83.928
Infiltration Loss	1.781	268.504
Surface Runoff	1.445	216.224
Final Storage	0.038	5.355
Continuity Error (%)	.....	-0.003
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	321.874	48531.493
Infiltration	1.781	268.504
Upper Zone ET	0.477	72.998
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.061	9.144
Groundwater Flow	0.103	15.563
Final Storage	323.014	48703.312
Continuity Error (%)	.....	0

teildurchlässige Fläche (Permeable Pavement)		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Total Precipitation	3.815	575.279
Evaporation Loss	0.856	129.116
Infiltration Loss	2.086	314.473
Surface Runoff	0.820	123.624
Final Storage	0.054	8.076
Continuity Error (%)	.....	-0.002
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	321.874	48531.493
Infiltration	2.086	314.473
Upper Zone ET	0.604	91.020
Lower Zone ET	0.000	0.000
Deep Percolation	0.080	12.057
Groundwater Flow	0.095	14.265
Final Storage	323.182	48728.625
Continuity Error (%)	.....	0.000

Regentonnen (Rain Barrel)		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Total Precipitation	3.815	575.279
Evaporation Loss	0.415	62.518
Infiltration Loss	2.202	332.084
Surface Runoff	1.183	178.361
Final Storage	0.015	2.334
Continuity Error (%)	.....	-0.003
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	321.874	48531.493
Infiltration	2.202	332.084
Upper Zone ET	0.345	51.991
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.061	9.163
Groundwater Flow	0.386	58.193
Final Storage	323.285	48744.23
Continuity Error (%)	.....	0

Versickerungsgräben (Vegetative Swale)		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Total Precipitation	3.815	575.279
Evaporation Loss	0.403	60.69
Infiltration Loss	1.848	278.58
Surface Runoff	1.562	235.49
Final Storage	0.004	0.551
Continuity Error (%)	.....	-0.006
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	321.874	48531.493
Infiltration	1.848	278.58
Upper Zone ET	0.493	74.288
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.069	10.383
Groundwater Flow	0.103	15.533
Final Storage	323.057	48709.868
Continuity Error (%)	.....	0

Tabelle A.1-3: Datenausgabe nach Simulationsdurchlauf für das Einzugsgebiet 3
(Quelle: rpt.Datei aus SWMM)

Einzugsgebiet 3		
ohne (without) LID		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Total Precipitation	7.242	575.279
Evaporation Loss	0.321	25.466
Infiltration Loss	6.47	513.948
Surface Runoff	0.447	35.537
Final Storage	0.004	0.34
Continuity Error (%)	.....	-0.002
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	571.348	45386.742
Infiltration	6.47	513.948
Upper Zone ET	1.887	149.886
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.148	11.722
Groundwater Flow	0.147	11.657
Final Storage	575.637	45727.425
Continuity Error (%)	.....	0

Gründächer (Green Roof)		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Initial LID Storage	0	0.008
Total Precipitation	7.242	575.279
Evaporation Loss	0.331	26.671
Infiltration Loss	6.47	513.948
Surface Runoff	0.434	34.071
Final Storage	0.008	0.599
Continuity Error (%)	.....	-0.002
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	571.348	45386.742
Infiltration	6.47	513.948
Upper Zone ET	1.887	149.886
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.148	12.021
Groundwater Flow	0.147	12.493
Final Storage	575.637	45725.425
Continuity Error (%)	.....	0

teildurchlässige Fläche (Permeable Pavement)		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Total Precipitation	7.242	575.279
Evaporation Loss	0.344	27.312
Infiltration Loss	6.493	515.765
Surface Runoff	0.398	31.562
Final Storage	0.007	0.571
Continuity Error (%)	.....	-0.002
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	571.348	45386.742
Infiltration	6.493	515.765
Upper Zone ET	1.896	150.679
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.149	11.859
Groundwater Flow	0.146	11.431
Final Storage	575.649	45728.307
Continuity Error (%)	.....	0

Regentonnen (Rain Barrel)		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm

Total Precipitation	7.242	575.279
Evaporation Loss	0.325	25.828
Infiltration Loss	6.465	513.528
Surface Runoff	0.438	34.796
Final Storage	0.014	1.14
Continuity Error (%)	.....	-0.002
*****	Volume	Depth
Groundwater Continuity	hectare-m	mm

Initial Storage	571.348	45386.742
Infiltration	6.465	513.528
Upper Zone ET	1.672	132.851
Lower Zone ET	0	0
Deep Percolation	0.148	11.722
Groundwater Flow	0.176	13.942
Final Storage	575.817	45741.754
Continuity Error (%)	.....	0