



Masterarbeit

im Studiengang

Wasser-, Umwelt- und Küsteningenieurwesen

am

Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft

und am

Institut für Strömungsmechanik und Umweltphysik im Bauwesen

Modellbasierte Ermittlung der Wirksamkeit von Schwammstadtansätzen auf die Reduzierung der Überflutung durch extreme Starkregen

Model-based assessment of the effectiveness of sponge city
approaches to cope with urban flash floods

Arbeitsbeginn: 06.07.2020

Abgabe: 06.01.2021

Erstprüfer: Jun. – Prof. Dr.-Ing Kristian Förster

Zweitprüferin: Prof. Dr. sc. nat. ETH Insa Neuweiler

Betreuerinnen: Anneke Schönfeld, M. Sc.

Annabelle Iwanek, M. Sc.

Eingereicht von:

Katharina Fuchs

Matr.-Nr. 3098740

Masterarbeit

Katharina Fuchs, Matrikelnummer 3098740

“Modellbasierte Ermittlung der Wirksamkeit von Schwammstadtansätzen auf die Reduzierung der Überflutung durch extreme Starkregen”

“Model-based assessment of the effectiveness of sponge city approaches to cope with urban flash floods”

Bis 2050 werden voraussichtlich mehr als 70% der Menschen in Städten leben, wobei viele dieser städtischen Gebiete Megastädte mit mehreren Millionen Einwohnern sind. Zu den Herausforderungen, denen sich nicht nur diese großen Städte stellen müssen, gehören u.a. wasserbezogene Problemstellungen (Fletcher et al., 2013): Die zunehmende Versiegelung der Städte führt zu einer Vergrößerung des Niederschlagsabflusses und damit zu einer Beeinträchtigung des Wasserhaushalts. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel, durch den intensivere Starkregen prognostiziert werden (Stocker et al., 2013), steigt auch die Gefahr von urbanen Sturzfluten. Bereits seit Jahren wird versucht, die negativen Folgen der zunehmenden Versiegelung auf den Wasserhaushalt und die Niederschlagsabflüsse durch Abkoppelung der versiegelten Flächen zu reduzieren. Diese sind international auch unter den Begriffen Best Management Practices (BMP), Low Impact Development (LID, Rossman, 2010), Sustainable Urban Drainage (SUDs), Water Sensitive Urban Design (WSUD), wassersensible Städte (van Hattum et al., 2016), Schwammstädte (Swamp / sponge city, Xu et al., 2018) und blaue bzw. Grüne Infrastruktur („Blue Green Technology“) bekannt (Fletcher et al., 2015). Durch die verstärkte Versickerung, Verdunstung und Rückhaltung bei diesen Ansätzen werden die negativen Folgen auf den Wasserhaushalt reduziert. Dabei ist noch nicht vollständig geklärt, wie sich derartige Maßnahmen auf die Reduzierung der Niederschlagsabflüsse bei seltenen Ereignissen auswirken, die urbane Sturzfluten hervorrufen können.

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll daher untersucht werden, inwieweit die o.g. Schwammstadtansätze auch bei extremen Starkregenereignissen wirksam sind, um die negativen Folgen urbaner Sturzfluten zu minimieren. Es soll basierend auf Simulationen in vorhandenen Testgebieten (Quartieren) ein Konzept entwickelt werden, das eine Übertragbarkeit der Ansätze und Methoden auf andere Gebiete zulässt.

Aufgaben:

- Literaturrecherche zum Thema Modellierung von Schwammstadtansätzen bzw. grüner Infrastruktur bei urbanen Sturzfluten mit Fokus auf die Übertragbarkeit der Ansätze
- Aufbau von 2d hydrologisch-hydrodynamischen Modellen für ausgewählte Quartiere und Integration von Schwammstadtelementen bzw. Elemente naturnaher Regenwasserbewirtschaftung in verschiedenen Stufen; Vergleich der verschiedenen Quartiere

unter Berücksichtigung lokaler Begebenheiten und der Niederschläge (historische Ereignisse und Extremwertstatistik).

- Analyse des erforderlichen Komplexitätsgrades der Modelle (z.B. hydrologisch vereinfacht vs. hydrodynamisch; Notwendigkeit der Kanalnetzmodellierung).
- Unsicherheitsanalyse mit vereinfachten, approximativen Verfahren, z.B. First-Order-Second-Moment (FOSM, Kunstmann et al., 2002; Gelleszun et al, 2017) zur Ermittlung der Parameterunsicherheit (für Parameter der Abflussbildung, Rauigkeiten bei der hydrodynamischen Simulation).
- Entwicklung eines modellbasierten Konzepts zur Bewertung von Schwammstädten unter Extremniederschlägen mit Hinblick auf die Reduktion der Ausbreitung der Überflutung sowie von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten und unter Berücksichtigung der möglichen Übertragbarkeit und der Unsicherheitsbetrachtung.

Alle zur Bearbeitung der Aufgaben notwendigen Daten werden von den Betreuenden für die Bearbeitung bereitgestellt. Die durchgeführten Arbeiten sind ausführlich zu dokumentieren und durch entsprechende Abbildungen und Tabellen zu erläutern. Die Masterarbeit ist in zweifacher Ausführung schriftlich und in digitaler Form mit einer unterzeichneten eidesstattlichen Erklärung der selbständigen Bearbeitung bei der Leibniz Universität Hannover abzugeben. Wenn bei der Bearbeitung nicht vorhersehbare Probleme - z.B. bei der Datenaufbereitung - auftreten, kann der Arbeitsumfang in Absprache mit den Betreuenden angepasst werden. Wesentlichen Ergebnisse müssen in einem 20-minütigen deutsch- oder englischsprachigen Vortrag präsentiert werden.

Betreuer*innen: Anneke Schönfeld, M.Sc., Annabelle Iwanek, M.Sc.

Prüfer 1: Juniorprof. Dr.-Ing.
Kristian Förster

Prüferin 2: Prof. Dr. rer. nat.
Insa Neuweiler

Beginn: 06.07.2020,

Abgabe: 06.01.2021

Literatur:

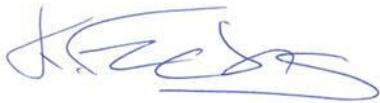
- Fletcher, T.D., Andrieu, H., Hamel, P., 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources* 51, 261–279. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>
- Fletcher, T.D., Shuster, W., Hunt, W.F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P.S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., Viklander, M., 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal* 12, 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Gelleszun, M., Kreye, P., Meon, G., 2017. Representative parameter estimation for hydrological models using a lexicographic calibration strategy. *Journal of Hydrology* 553, 722–734. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.015>

- Kunstmann, H., Kinzelbach, W., Siegfried, T., 2002. Conditional first-order second-moment method and its application to the quantification of uncertainty in groundwater modeling. *Water Resources Research* 38, 6-1-6–14. <https://doi.org/10.1029/2000WR000022>
- Rossman, L.A., 2010. Modeling Low Impact Development Alternatives with SWMM. *Journal of Water Management Modeling*. <https://doi.org/10.14796/JWMM.R236-11>
- Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Alexander, L.V., Allen, S.K., Bindoff, N.L., Bréon, F.-M., Church, J.A., Cubasch, U., Emori, S., others, 2013. Technical summary, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 33–115.
- van Hattum, T., Blauw, M., Jensen, M.B., de Bruin, K., 2016. *Towards Water Smart Cities: climate adaptation is a huge opportunity to improve the quality of life in cities*. Wageningen University & Research.
- Xu, G., Shen, W., Huo, X., Yang, Z., Wang, J., Zhang, W., Ji, X., 2018. Investigation on the properties of porous concrete as road base material. *Construction and Building Materials* 158, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.151>

Selbständigkeitserklärung

"Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbständig verfasst wurde und ich alle verwendeten Hilfsmittel und Quellen, auch Internetquellen, ordnungsgemäß angegeben habe."

Hannover, 06.01.2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'K. Fuchs', written in a cursive style.

(K. Fuchs)

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit untersucht Schwammstadtansätze, auch Grüne Infrastruktur (GI) genannt, im Hinblick auf ihre Wirksamkeit auf die Reduzierung von Überflutungen durch extreme Starkregen. Dazu wurden in zwei topografisch verschiedenen Einzugsgebieten insgesamt fünf Implementierungsstufen der GI sowie ein Ausgangszustand ohne GI anhand von sieben verschiedenen Modellregnen unterschiedlicher Wiederkehrzeiten untersucht und ausgewertet. Die modelltechnische Umsetzung fand sowohl in einem gekoppelten 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflussmodell als auch in einem ungekoppelten 2D Oberflächenabflussmodell statt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte anhand der maximalen Wasserstände, deren Ausdehnung, der maximalen Fließgeschwindigkeiten und zusätzlich bei der gekoppelten 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflusssimulation anhand des Gesamtabflusses im Kanalnetz. Im Anschluss wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt und ein modellbasiertes Konzept zur Ermittlung der Wirksamkeit entwickelt.

Zentrale Erkenntnisse dieser Arbeit sind, dass die Wirksamkeit der GI abhängig von dem Implementierungsgrad, der Intensität des Modellregens und der Topografie des Einzugsgebiets ist. Die Ergebnisse zeigen weiter, dass sich mit steigendem Implementierungsgrad an GI die Auswirkungen von Überflutungen reduzieren. Dabei ist der Einfluss von kleinskaligen Maßnahmen auf die Reduzierung von Überflutungen vernachlässigbar gering. Deutlich wird auch, dass die Wirksamkeit der GI mit steigender Wiederkehrzeit sinkt. Die maximalen Wasserstände werden an ausgewählten Punkten reduziert, jedoch ist der Einfluss der GI auf die maximalen Fließgeschwindigkeiten vernachlässigbar gering. Der Einfluss der Topografie hingegen ist auf die Wirksamkeit der GI signifikant. Die Ergebnisse der Simulationen mit dem ungekoppelten 2D Oberflächenabflussmodell zeigen im Vergleich zur gekoppelten 1D/2D Simulation deutliche Unterschiede.

Abstract

This master thesis examines sponge city approaches, also called green infrastructure (GI), with regard to their effectiveness to cope with urban flash floods. For this purpose, a total of five implementation levels of GI as well as an initial state without GI were analyzed and evaluated in two topographically different catchments using seven different design storms of different return periods. The model implementation was done using a coupled 1D drainage network model and 2D surface flow model as well as in an uncoupled 2D surface flow model. The evaluation of the results was based on the maximum water levels, the flooded area, the maximum flow velocities on the surface and additionally for the coupled 1D/2D model on the total runoff in the drainage network. A sensitivity analysis was performed and a model-based approach was developed to determine effectiveness.

Key findings of this work are that the effectiveness of GI depends on the degree of implementation, the intensity of the design storm, and the topography of the catchment. The results further show that as the degree of GI implementation increases, the impact of flooding is reduced. At the same time, the impact of small-scale measures on reducing flooding is negligible. It is obvious that the effectiveness of GI decreases with increasing return period. Maximum water levels are reduced at selected points, but the influence of GI on maximum flow velocities is negligible. Whereas the influence of topography is significant on the effectiveness of GI. The results of the simulations with the uncoupled 2D surface runoff model show significant differences compared to the coupled 1D/2D simulation.

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV	
TABELLENVERZEICHNIS	VII	
1	EINLEITUNG	1
2	URBANE STARKREGEN UND ÜBERFLUTUNG	4
2.1	Urbane Starkregen	4
2.2	Überflutung	5
2.2.1	Stabilität des Menschen im Wasser	7
3	HYDROLOGISCHE UND HYDRODYNAMISCHE GRUNDLAGEN	10
3.1	N-A-Modelle.....	10
3.1.1	Oberflächenabfluss.....	10
3.1.1.1	Abflussbildung	10
3.1.1.2	Abflusskonzentration	11
3.1.1.3	Grenzwertmethode	12
3.1.1.4	Infiltrationsmodell nach Horton/ Paulsen.....	13
3.1.2	Abflusstransport.....	14
3.1.2.1	Dynamische Wellenapproximation	14
3.2	2D Berechnung des Oberflächenabflusses	15
4	MODELLE ZUR ÜBERFLUTUNGSBERECHNUNG	16
4.1	1D Modell – Kanalnetzmodelle	16
4.2	2D Oberflächenmodelle.....	17
4.3	1D/2D gekoppelte Kanalnetz- und Oberflächenmodelle	18
4.4	Verwendetes Berechnungsmodell	19
4.4.1	HYSTEM-EXTRAN (HE)	19
4.4.2	HYSTEM – EXTRAN 2D (HE 2D)	19
4.4.2.1	FOG/ FOG 2D.....	20
5	DER SCHWAMMSTADTANSATZ/ GRÜNE INFRASTRUKTUR	21
5.1	Allgemeines	21
5.2	Der Schwammstadtansatz	21
5.3	Elemente der Grünen Infrastruktur	22
5.3.1	Gründächer	23
5.3.2	Rasengittersteine.....	23
5.3.3	Versickerungsmulden	24
5.3.4	Rigolen	24
5.3.5	Mulden-Rigolen-Elemente/ -Systeme	24
5.4	Maßstäbe Grüner Infrastruktur.....	25
6	UNTERSUCHUNGSGEBIETE	27
6.1	Hannover Oberricklingen.....	27

6.2	Göttingen Nikolausberg.....	28
7	UMSETZUNG UND METHODIK	31
7.1	Datengrundlage.....	31
7.2	Niederschlag.....	31
7.3	Modellaufbau	32
7.3.1	Korrektur der Eingangsdaten	32
7.3.2	Oberflächenrauheit	33
7.3.3	Wahl der Abflussparameter und Anfangsbedingungen	33
7.3.4	Generierung des Rechengitters	35
7.3.4.1	Gekoppelte 1D/2D Simulation	35
7.3.4.2	Rechengitter einer 2D Oberflächenabflusssimulation.....	38
7.4	Varianten	38
7.4.1	Ausgangszustand: Variante 0	39
7.4.2	Variante 1.....	39
7.4.3	Variante 2.....	40
7.4.4	Variante 3.....	41
7.4.5	Variante 4.....	42
7.4.6	Variante 5.....	43
7.4.7	Flächenanteile der Varianten	43
7.5	Methoden der Auswertung	45
7.5.1	Ergebnisauswertung.....	45
7.5.2	Methodisches Vorgehen.....	45
8	ERGEBNISSE	47
8.1	Auswertung der gekoppelten 1D/2D Simulation	47
8.1.1	Auswertung der maximalen Wasserstände	47
8.1.2	Überflutungsfläche.....	51
8.1.3	Fließgeschwindigkeit	55
8.1.4	Kanalnetz	58
8.1.5	Vergleich Oberricklingen und Nikolausberg.....	61
8.2	Auswertung der reinen 2D Simulation	62
8.2.1	Hannover Oberricklingen.....	62
8.2.2	Göttingen Nikolausberg	64
8.3	Vergleich: 1D/2D Simulation - Reine 2D Simulation.....	66
8.3.1	Untersuchungsgebiete ohne Grüne Infrastruktur.....	66
8.3.2	Untersuchungsgebiete mit Grüner Infrastruktur.....	68
9	SENSITIVITÄTSANALYSE	72
9.1	2D Bodenklassen	72
9.2	Verluste der Abflussparameter.....	74
9.3	Mindestwasserstand der Oberflächenabflusssimulation	75
10	KONZEPT ZUR BEURTEILUNG	77
11	DISKUSSION	80

12	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT.....	84
13	AUSBLICK	85
	LITERATURVERZEICHNIS.....	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Bewertungskategorien des ortsbezogenen Starkregenindex (nach Schmitt et. al., 2018).	4
Abbildung 2.2:	Auswirkungen der kanalindizierten Überflutung kategorisiert anhand statistischer Wiederkehrzeiten (DIN, 2017).	6
Abbildung 2.3:	Überflutungsgefahr in Abhängigkeit des Wasserstands (DWA, 2016b).	7
Abbildung 2.4:	Auswirkungen von Überflutung bei verschiedener Geländetopografie (nach DWA, 2016b).	7
Abbildung 2.5:	Stabilität des Menschen im Wasser in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe (Chanson & Brown, 2018).	8
Abbildung 2.6:	Sturz des Menschen infolge der Momenteninstabilität (Chanson & Brown, 2018).	9
Abbildung 2.7:	Instabilität des Menschen im Wasser infolge Gleitens (Chanson & Brown, 2018).	9
Abbildung 3.1:	Verlauf des Abflussbeiwerts (nach itwh, 2020a).	13
Abbildung 4.1:	Schematische Darstellung eines 1D Kanalnetzmodells (von Horn et. al., 2018).	16
Abbildung 4.2:	Vereinfachte Darstellung eines 2D Oberflächenmodells (von Horn et. al., 2018).	17
Abbildung 4.3:	Vereinfachte Darstellung eines gekoppelten 1D/2D Modells (von Horn et. al., 2018).	18
Abbildung 4.4:	Kopplung zwischen Kanalnetzmodell und Oberflächenmodell über Austausch-speicher (itwh, 2020a).	20
Abbildung 5.1:	Schematische Darstellung des Schwammstadtansatzes (Chan et. al., 2018).	22
Abbildung 5.2:	Aufbau eines extensiven Gründachs (Landeshauptstadt Hannover, 2015).	23
Abbildung 5.3:	Typischer Aufbau von Rasengittersteinen (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2005).	23
Abbildung 5.4:	Aufbau einer Versickerungsmulde (DWA, 2005).	24
Abbildung 5.5:	Aufbau eines Mulden-Rigolen-Elements (DWA, 2005).	25
Abbildung 6.1:	Untersuchungsgebiet Hannover Oberricklingen.	27
Abbildung 6.2:	Topografie Hannover Oberricklingens.	28
Abbildung 6.3:	Untersuchungsgebiet Göttingen Nikolausberg.	29
Abbildung 6.4:	Topografie Göttingen Nikolausbergs.	30
Abbildung 7.1:	Wahl der 2D Objekte bei der Modellerstellung.	35
Abbildung 7.2:	Geometrische Parameter der Vorbearbeitung.	36

Abbildung 7.3:	Gewünschte Zellgröße der Triangulierung.	37
Abbildung 7.4:	Parameter des Höhenmodells.	37
Abbildung 7.5:	Schematische Darstellung eines Glättungskreis (itwh, 2020c).	37
Abbildung 7.6:	Auswahl der 2D Objekte für 2D Oberflächenabflussmodell.	38
Abbildung 8.1:	Profilschnitte Hannover Oberricklingen.	47
Abbildung 8.2:	Lage der Profilschnitte in Göttingen Nikolausberg.	49
Abbildung 8.3:	Überflutungsfläche in Hannover Oberricklingen, gekoppelte 1D/2D Simulation.	51
Abbildung 8.4:	Prozentuale Abweichung der Überflutungsfläche zu Variante 0, Hannover Oberricklingen 1D/2D Simulation.	52
Abbildung 8.5:	Differenz der maximalen Wasserstände, Variante 2 zu Variante 0 bei T = 100 a, Hannover Oberricklingen.	53
Abbildung 8.6:	Überflutungsfläche in Göttingen Nikolausberg, 1D/2D Simulation. ...	54
Abbildung 8.7:	Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Grüner Infrastruktur, Hannover Oberricklingen Schnitt 3, gekoppelte 1D/2D Simulation.	55
Abbildung 8.8:	Maximale Fließgeschwindigkeiten, Göttingen Nikolausberg Schnitt 1, 1D/2D Simulation.	57
Abbildung 8.9:	Reduzierung des Gesamtabflusses bezogen auf Variante 0, Hannover Oberricklingen gekoppelte 1D/2D Simulation.	58
Abbildung 8.10:	Gesamtabfluss in Göttingen Nikolausberg.	59
Abbildung 8.11:	Reduzierung der Überflutungsflächen, Vergleich Hannover Oberricklingen und Göttingen Nikolausberg.	61
Abbildung 8.12:	Überflutungsfläche Hannover Oberricklingen, reine 2D Simulation. .	62
Abbildung 8.13:	Maximale Wasserstände in Schnitt 2, Hannover Oberricklingen reine 2D Simulation.	63
Abbildung 8.14:	Überflutungsfläche Göttingen Nikolausberg, reine 2D Simulation.	65
Abbildung 8.15:	Abweichung der Überflutungsfläche von der 2D Simulation zu der 1D/2D Simulation, Ausgangszustand.	66
Abbildung 8.16:	Differenz der maximalen Wasserstände in Göttingen Nikolausberg, T = 50 a.	67
Abbildung 8.17:	Abweichung der Überflutungsfläche einer reinen 2D Simulation zu einer 1D/2D Simulation, Hannover Oberricklingen.	68
Abbildung 8.18:	Abweichung der Überflutungsfläche einer reinen 2D Simulation zu einer 1D/2D Simulation, Göttingen Nikolausberg.	70
Abbildung 9.1:	Sensitivitätsanalyse der 2D Bodenklasse, Variante 5.	72
Abbildung 9.2:	Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und 2D Bodenklassen, Variante 5.	73

Abbildung 9.3: Sensitivitätsanalyse der Benetzungs- und Muldenverluste, Variante 5.....	74
Abbildung 9.4: Sensitivitätsanalyse des Mindestwasserstands, Variante 5.	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 7.1: Auflösung der DGM und Luftbilder der Untersuchungsgebiete.	31
Tabelle 7.2: Gesamtniederschlagshöhen der Untersuchungsgebiete (DWD, 2017).....	32
Tabelle 7.3: Oberflächenrauheiten in Form der 2D Bodenklassen.	33
Tabelle 7.4: Abflussparameter der Ausgangsuntersuchung (Verworn, 1999).....	34
Tabelle 7.5: Gewählte Bodenklassen der Untersuchungsgebiete.	35
Tabelle 7.6: Matrix der verschiedenen Varianten.	39
Tabelle 7.7: Flächenanteile Variante 1.	40
Tabelle 7.8: Tiefenabhängige k_{St} -Werte der 2D Bodenklasse „Gründach“.....	40
Tabelle 7.9: Flächenanteile Variante 2.	41
Tabelle 7.10: Flächenanteile der Variante 3.	41
Tabelle 7.11: Tiefenabhängige k_{St} - Werte für Rasengittersteine.	42
Tabelle 7.12: Flächenanteile der Variante 4.	43
Tabelle 7.13: Übersicht über die beanspruchten Flächenanteile der Varianten in Oberricklingen.....	44
Tabelle 7.14: Übersicht über die beanspruchten Flächenanteile der Varianten im Detailgebiet in Nikolausberg.....	44

1 Einleitung

Von Jahr zu Jahr nehmen Anzahl und Größe sogenannter Megacities zu (Fletscher et. al., 2013). Schätzungen gehen davon aus, dass bis 2050 wahrscheinlich 70 % der Bevölkerung im urbanen Raum leben. Die zunehmende Urbanisierung und das verstärkte Auftreten von extremen Starkregen hat unter anderem zur Folge, dass große Schäden durch extreme Niederschlagsereignisse gerade im urbanen Raum vermehrt auftreten (Fletscher et. al., 2013). Der Großteil der heute bestehenden Entwässerungssysteme wurde vor Jahrzehnten oder noch früher gebaut. Wegen des gestiegenen Anteils versiegelter Fläche können die vorhandenen Entwässerungssysteme die anfallenden niederschlagsbedingten Abflüsse bei Starkregen oftmals nicht mehr ordnungsgemäß ableiten (Li et. al., 2020). Mögliche Folgen sind Überflutungen mit Gefahr für Leib und Leben. Deshalb haben sich die Anforderungen an Entwässerungssysteme zwischenzeitlich erhöht: Während 1977 das Arbeitsblatt A 118 (ATV, 1977) als Bemessungskriterium für allgemeine Baugebiete die Ableitung eines ein- bis zweijährigen Niederschlags als Freispiegelabfluss fordert, wird mit Neuerscheinungen dieses Arbeitsblatts (DWA, 2011) für allgemeine Baugebiete der Überstau nachweis – Wasserstand auf der Geländehöhe – für eine Wiederkehrzeit von drei Jahren notwendig. Hier wird denn auch auf die Überflutung als eigentliches Kriterium hingewiesen, mit Wiederkehrzeiten von 20 Jahren für allgemeine Baugebiete. Gleichzeitig weist das Arbeitsblatt DWA-A 118 (2011) darauf hin, dass die modelltechnische Überprüfung nach damaligem Stand nicht möglich ist. Auch DIN EN 752 (2017) gibt Bemessungshäufigkeiten für Überflutungen mit vergleichbaren Wiederkehrzeiten vor (DIN, 2017). Es ist mittlerweile allgemeiner Konsens, dass die Entwässerungssysteme diese Niederschlagsabflüsse nicht ableiten können und Maßnahmen auf der Oberfläche erforderlich sind.

Bereits seit den 1970er Jahren wird versucht, den negativen Folgen der Urbanisierung z. B. durch Verringerung oder Abkopplung der versiegelten Fläche entgegenzuwirken. Diese verschiedenen Maßnahmen und Konzepte sind international unter den Begriffen „Schwammstadt“, „Grüne Infrastruktur“ (GI), „Low Impact Development Controls“ (LID), „Water Sensitive Urban Drainage Systems“ (WSUDS), „Sustainable Urban Drainage Systems“ (SUDS) oder „Best Management Practices“ (BMP) bekannt (Fletscher et. al., 2015). Die Maßnahmen haben gemein, dass sie die Versickerung, die Verdunstung und den Rückhalt in dem jeweiligen Gebiet verstärken. Ziel ist es, den urbanen Wasserkreislauf an die natürlichen Prozesse anzupassen und diese nachzubilden (Fletscher et. al., 2015; Wang, 2020). Die positiven Auswirkungen dieser Ansätze auf den Wasserkreislauf sind bereits bekannt. Ihr Einfluss auf den Niederschlagsabfluss bei extremen Niederschlagsereignissen wurde jedoch noch nicht untersucht (Zhang et. al., 2019).

Viele Studien haben bereits die Wirksamkeit von GI bezogen auf das Kanalnetz betrachtet (Guo et. al., 2019; Schubert et. al., 2017; Ahiablame & Shakaya, 2016). So haben Tao et. al. (2020) gezeigt, dass das Abflussvolumen und der Spitzenabfluss effektiv durch GI reduziert werden können. Außerdem erfolgte in einigen Studien die Simulation von GI in einem 2D Oberflächenabflussmodell.

Yin et. al. (2020) haben ein Framework zur schnellen Beurteilung von GI auf Basis von Cellular Automata Data ohne bidirektionale Kopplung zwischen einem Kanalnetzmodell und einem Oberflächenmodell erstellt. Bei Überschreiten der Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes und der GI wurde der überschüssige Abfluss als Zufluss für das 2D Oberflächenmodell verwendet. Als Elemente der GI wurden sogenannte „Raingarden“ und durchlässige Pflasterung implementiert. Aussagen zur Wirksamkeit der GI bei unterschiedlichem Gefälle wurden von Yin et. al. (2020) nicht

getroffen, sondern es wurde lediglich ein flaches Gefälle von 0,2 % betrachtet. Außerdem definieren Yin et. al. (2020) einen Flood Response Index als Verhältnis zwischen Überflutungsfläche und gesamter Fläche des Einzugsgebiets zur Beurteilung der Wirksamkeit von GI. Die Überflutungsfläche wird dabei anhand der benetzten Rasterelemente ohne Berücksichtigung eines Schwellwerts des Wasserstands auf der Oberfläche bestimmt. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass sich der Flood Response Index bei Berücksichtigung von GI lediglich um weniger als 0,1 % ändert. Der Einfluss von GI auf die Überflutungsfläche ist bei Modellregen größerer Wiederkehrzeit geringer. Es ist jedoch nicht ersichtlich, in welchem Umfang GI in dem Einzugsgebiet implementiert wurde. Identische Ergebnisse zeigen auch die Untersuchungen von Tao et. al. (2020), Guo et. al. (2019), Schubert et. al. (2017) und Rosa et. al. (2020).

Li et. al. (2020) verwenden ein vereinfachtes GIS-basiertes Verfahren, bei dem die Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes durch Reduzierung des Oberflächenabflusses vereinfacht berücksichtigt wird. Sie weisen nach, dass bei sehr großflächiger Implementierung von GI eine signifikante Reduzierung der Überflutungsfläche bei einem Modellregen mit einer Wiederkehrzeit von 50 Jahren möglich ist. Bezogen auf die Wassertiefe zeigen die Ergebnisse von Yin et. al. (2020) lediglich eine Reduzierung von einem Zentimeter.

Webber et. al. (2019) haben eine reine 2D Oberflächenabflussberechnung mit Cellular Automata durchgeführt, weisen aber darauf hin, dass die Berücksichtigung des Kanalnetzes unbedingt erforderlich ist. Sie zeigen eine Reduzierung der Wassertiefe durch Implementierung von GI von 25%, bei einem hohen Anteil GI punktuell bis zu 50 %. Die Einflüsse sind bei Ereignissen mit einer Wiederkehrzeit von 100 Jahren jedoch deutlich geringer.

Schubert et. al. (2017) untersuchen für ein Einzugsgebiet den Anschluss von 50 % und 100 % der versiegelten Flächen an Elemente der GI. Die Abflussbildung berechnen sie ähnlich wie Yin et. al. (2020) und übergeben die Ganglinien an ein 2D Oberflächenabflussmodell basierend auf den Flachwassergleichungen. Die Ergebnisse zeigen bei vollständiger Implementierung von GI eine Reduzierung der Überflutungsfläche um 91 %. Die Reduzierung ist bei Ereignissen mit kleinerer Wiederkehrzeit geringer.

Hu et. al. (2017) haben GI in einem Bestandsgebiet implementiert. Sie verwenden ein 2D Modell, bei dem der Abfluss im Kanalnetz vereinfacht mitberücksichtigt wird. Die Überflutungsfläche kann im Mittel zwischen 2 % und 17 % reduziert werden, lokal bis zu 80 %. Sie sehen ein großes Potential für GI, vor allem in der Entsiegelung von verkehrsberuhigten Zonen, Parkstreifen, Parkplätzen, etc.

Die vorangegangenen Studien haben bereits bis zu einem gewissen Grad die Wirksamkeit der GI bei verschiedenen Niederschlagsereignissen überprüft. Allerdings erfolgte bisher keine Untersuchung der Wirksamkeit der GI bei der Reduzierung von Überflutung durch extreme Starkregen mit Blick auf den maximalen Wasserstand, dessen Ausdehnung und der maximalen Fließgeschwindigkeit.

Im Rahmen dieser Masterarbeit im Studiengang Wasser-, Umwelt- und Küsteningenieurwesen wird die Wirksamkeit von GI bei extremen Starkregen mittels eines bidirektional gekoppelten 1D/2D Kanalnetz- Oberflächenabflussmodells untersucht. Dabei wird ein Ausgangszustand ohne GI definiert, in welchen in fünf Stufen Elemente der GI implementiert werden. Die Untersuchung der GI erfolgt in zwei verschiedenen Untersuchungsgebieten, die sich hinsichtlich der Topografie und der Bebauungsstruktur unterscheiden. Anhand von Modellregen verschiedener Häufigkeiten und einer Dauerstufe von 60 Minuten werden die Veränderungen der maximalen Wasserstände,

deren Ausdehnung, der maximalen Fließgeschwindigkeiten und des Gesamtabflusses im Kanalnetz überprüft. Zudem wird überprüft, inwieweit die Simulation mit einem 1D/2D Kanalnetz- Oberflächenabflussmodell erforderlich ist, oder ob eine vereinfachte Berechnung durch eine reine 2D Oberflächenabflusssimulation ausreicht. Im Anschluss erfolgt eine Sensitivitätsanalyse verschiedener Parameter für den höchsten Ausbaugrad an GI und für den Ausgangszustand. Die Sensitivitätsanalyse wird zur Überprüfung der gewählten Parameter für den Vergleich der betrachteten Varianten und zur Überprüfung des Modells im Anschluss durchgeführt.

2 Urbane Starkregen und Überflutung

2.1 Urbane Starkregen

Die Häufigkeit und Intensität extremer Niederschlagsereignisse sind in den letzten Jahren angestiegen (Ziese et. al., 2016). Als einer der Hauptgründe kann der Klimawandel genannt werden. Der damit einhergehende Temperaturanstieg führt zu einer steigenden Verdunstung und somit auch zu einem steigenden Sättigungsdampfdruck des Wasserdampfes. Folglich ist mehr Wasserdampf für die Niederschlagsbildung verfügbar (Ziese et. al., 2016). Ferner begünstigen höhere Temperaturen die Bildung lokaler Gewitterzellen bzw. spezifischer Wetterlagen, die besonders in urbanen Gebieten vermehrt auftreten. Dort ist die Temperatur im Schnitt höher als in ländlichen Gebieten, sodass sich sogenannte Hitzeinseln entwickeln. Zudem begünstigen Hitzeinseln in Kombination mit spezifischen Wetterlagen in Form von hoher Sonneneinstrahlung und labil geschichteter Luftmassen die Bildung lokaler Gewitterzellen bzw. starker Niederschlagsereignisse (Dilly et. al., 2019; Illgen et. al., 2013). Aufgrund der begrenzten räumlichen Ausdehnung und auch der kleinen zeitlichen Skala ist eine Vorhersage dieser Starkregenereignisse (pluviale Ereignisse) bzw. Wetterlagen kaum bis nicht möglich (DWA, 2016b). Die kurze und somit nicht ausreichende Vorwarnzeit bzw. Vorhersagezeit extremer Niederschlagsereignissen geht mit beträchtlichen Schäden einher. Zum einen sind Leib und Leben gefährdet, zum anderen entstehen meist auch große materielle Schäden (DWA, 2016b).

Ein viel zitiertes und sehr einprägsames Beispiel für ein Starkregenereignis ist Münster im Juli 2014 (Grüning & Grimm, 2015). So fielen in Münster im Juli 2014 innerhalb von sieben Stunden etwa 300 mm Niederschlag, was in etwa 40 % des mittleren Jahresniederschlags von 764 mm beträgt. Die Regenspenden dieses Ereignisses variierten zwischen 134 l/(s·ha) und bis zu 611 l/(s·ha). Damit wurden sowohl für einzelne Dauerstufen als auch für das Gesamt ereignis Wiederkehrzeiten von $T = 100$ a deutlich überschritten. Schwere Überflutungen im gesamten Stadtgebiet waren die Folge (Grüning & Grimm, 2015).

Durch die begrenzte räumliche Ausdehnung dieser extremen Ereignisse ist oftmals eine Beurteilung schwer möglich. Zu ihrer besseren Einordnung und Kategorisierung kann der Starkregenindex [-] (kurz: SRI) hinzugezogen werden. Voraussetzung für die Anwendung des SRI ist die Einordnung eines Ereignisses mittels einer ortsbezogenen statistischen Auswertung (z. B. KOSTRA – DWD) (Schmitt et. al., 2018).

Wiederkehrzeit T [a]	1	2	3,3	5	10	20	25	33,3	50	100	> 100				
Kategorie	Starkregen				Intensiver Starkregen				Außergewöhnlicher Starkregen		Extremer Starkregen				
Starkregenindex SRI [-]	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Erhöhungsfaktor [-]										1,00	1,20–1,39	1,40–1,59	1,60–2,19	2,20–2,79	≥2,80

Abbildung 2.1: Bewertungskategorien des ortsbezogenen Starkregenindex (nach Schmitt et. al., 2018).

Die farblich gekennzeichneten Bewertungskategorien des ortsbezogenen Starkregenindex sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Auf Grundlage dieser Bewertungskategorien kann ein Niederschlagsereignis in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit T [a] und unter Berücksichtigung spezifischer Erhöhungsfaktoren [-] klassifiziert werden. Der Wertebereich des SRI ist unterteilt in SRI-Werte von 1 bis 12, die vier übergeordneten Kategorien zugewiesen sind. Die Starkregenindizes 1 bis

7 beziehen sich auf örtliche Starkregenstatistiken oder extremwertstatistische Analysen nach DWA-A 531 und somit direkt auf ortsbezogene Regenhöhen, abgestuft nach der Wiederkehrzeit zwischen $T = 1$ a bis $T = 100$ a. Die Starkregenindizes 8 bis 12 werden in Abhängigkeit der Dauerstufe und Niederschlagshöhe über einen spezifischen Erhöhungsfaktor ermittelt (Schmitt et. al., 2018).

Im Rahmen dieser Arbeit werden Niederschlagsereignisse der Wiederkehrzeiten von $T = 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150$ Jahren betrachtet (vgl. Kapitel 7.2). Die Niederschlagsintensität der Ereignisse leitet sich aus der örtlichen Starkregenstatistik aus KOSTRA-DWD ab. Aus diesem Grund ist kein Erhöhungsfaktor für das Ereignis der Wiederkehrzeit $T = 150$ a notwendig.

2.2 Überflutung

Die Dimensionierung von Kanalnetzen erfolgte nach ATV Arbeitsblatt A 118 (1977) durch vereinfachte Verfahren und unter Ansatz des Vollfüllungsabflusses der jeweiligen Kanäle. Dafür wurden Wiederkehrzeiten für z. B. allgemeine Bebauungsgebiete von einem bis zwei Jahren oder für Stadtzentren und Industrie- und Gewerbegebieten von einem bis fünf Jahren angesetzt (ATV, 1977). Aktuelle Regelwerke wie die DIN EN 752 sehen für die Neuplanung von Entwässerungssystemen unter Anwendung von vereinfachten Verfahren wie dem Freispiegelabfluss, Bemessungsregen mit statistischen Wiederkehrzeiten zwischen ein und zehn Jahren abhängig von Örtlichkeit und Nutzung vor (DIN, 2017). Mit zunehmender Anwendung von Simulationsmodellen kommt als maßgebliches Kriterium der Überstau hinzu. Als Überstau wird ein Belastungszustand im Entwässerungssystem bezeichnet, bei dem der Wasserstand über ein vorgegebenes Niveau steigt (DWA, 2011). In den meisten Fällen entspricht dieses Niveau der Geländeoberkante, möglich ist aber auch eine definierte Höhe zwischen Rohrscheitel und Geländeoberkante. Je nach örtlichen Gegebenheiten liegen die dafür maßgebenden Wiederkehrzeiten entsprechend DWA-A 118 zwischen einem und zehn Jahren (DWA, 2011).

Im Gegensatz dazu empfiehlt die europäische Norm DIN EN 752-2 statistische Wiederkehrzeiten für kanalindizierte Überflutungen festzulegen, um das Risiko und die daraus resultierenden Folgen reduzieren bzw. umgehen zu können (DIN, 2017). Dabei wird die Überflutung als ein Zustand beschrieben, bei dem Schmutz- und/ oder Regenwasser dem Entwässerungssystem weder entweichen noch in dieses eintreten kann, sodass es an der Oberfläche verbleibt und/ oder in Gebäude eindringt (DWA, 2011). In Abbildung 2.2 sind Beispiele für Bemessungskriterien kanalindizierter Überflutung in Abhängigkeit örtlicher Gegebenheiten und der statistischen Wiederkehrzeit dargestellt.

Auswirkung	Beispielhafte Orte	Beispiele für Bemessungshäufigkeiten von kanalindizierten Überflutungen	
		Jährlichkeit Jahre	Überschreitungswahrscheinlichkeit je Jahr
Sehr gering	Straßen oder offene Flächen abseits von Gebäuden	1	100 %
Gering	Agrarland (in Abhängigkeit von der Landnutzung, z. B. Weidegrund, Ackerbau)	2	50 %
Gering bis mittel	Für öffentliche Einrichtungen genutzte offene Flächen	3	30 %
Mittel	An Gebäude angrenzende Straßen oder offene Flächen	5	20 %
Mittel bis stark	Überflutungen in genutzten Gebäuden mit Ausnahme von Kellerräumen	10	10 %
Stark	Hohe Überflutungen in genutzten Kellerräumen oder Straßenunterführungen	30	3 %
Sehr stark	Kritische Infrastruktur	50	2 %

Die Jährlichkeit sollte erhöht werden (Wahrscheinlichkeiten reduziert), wo das Wasser aus Überflutungen schnell fließt.
Bei der Sanierung von bestehenden Systemen und wo das Erreichen derselben Bemessungskriterien für ein neues System übermäßige Kosten zur Folge hätte, darf ein niedrigerer Wert in Betracht gezogen werden.

Abbildung 2.2: Auswirkungen der kanalindizierten Überflutung kategorisiert anhand statistischer Wiederkehrzeiten (DIN, 2017).

Als Grundlage der Bemessungskriterien sind die Folgen einer kanalindizierten Überflutung zu betrachten. Die Folgen sind abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit oder von der Gebäudeart, auf welche die Überflutung einwirkt. Diese Folgen können Sachbeschädigung und negative Auswirkungen auf die Sicherheit und/ oder Gesundheit des Menschen sein. Zudem sollten die Bemessungskriterien berücksichtigen, dass

- hohe Wasserstände auf der Oberfläche oder hohe Fließgeschwindigkeiten eine erhöhte Gefahr für den Menschen darstellen;
- Überschwemmungen in Gebäuden zu hohen wirtschaftlichen Schäden führen und eine Gefahr für Menschen darstellen können;
- bei geringer Ausdehnung der Überflutung oftmals nur geringe Schäden in Außengebieten oder auf Straßenflächen zu erwarten sind.

Darüber hinaus gilt für kritische Infrastruktur, also Orte mit hohem Schadens- oder Gefährdungspotenzial, dass zusätzliche Untersuchungen unter Berücksichtigung der Fließwege und gewisser Oberflächeneigenschaften (z. B. Bordsteine) durchgeführt werden sollten (DIN, 2017).

Zusätzlich zu der Betrachtung von Überstau und Überflutung in Abhängigkeit statistischer Wiederkehrzeiten gilt es ermittelte Wasserstände an der Oberfläche als weiteres Kriterium hinzuzuziehen (DWA, 2016b). Der Wasserstand an der Oberfläche ist ausschlaggebend für die Gefahr, die aus einer Überflutung resultieren kann (DWA, 2016b). In dem Merkblatt DWA-M 119 sind diese Überflutungsgefahren ausgehend vom Wasserstand in vier Gefahrenklassen kategorisiert (vgl. Abbildung 2.3). Allerdings gelten die angegebenen Wasserstände vorrangig für den Wasserübertritt auf Privatgrundstücke (DWA, 2016b).

Gefahrenklasse	Überflutungsgefahr	Wasserstand
1	gering	< 10 cm
2	mäßig	10 cm – 30 cm
3	hoch	30 cm – 50 cm
4	sehr hoch	> 50 cm

Abbildung 2.3: Überflutungsgefahr in Abhängigkeit des Wasserstands (DWA, 2016b).

Die Überflutungsgefahr ist unter anderem bei kritischer Infrastruktur, Tiefgaragen, Unterführungen, Verkehrssicherheit oder kritischen Engstellen im Netz gesondert zu betrachten. In diesen Bereichen können auch geringere Wassertiefen (< 10 cm) zur Gefahr werden (DWA, 2016b).

Ferner kann die Kombination aus gewissen Fließgeschwindigkeiten und Wasserständen eine Erhöhung der Überflutungsgefahr darstellen (DIN, 2017; DWA, 2016b). Dabei ist insbesondere der Sturz des Menschen im Wasser als kritisch zu bewerten (vgl. Kapitel 2.2.1). Aspekte wie z. B. Geländetopografie und Bebauungsstruktur sind dabei zusätzlich zu betrachten.

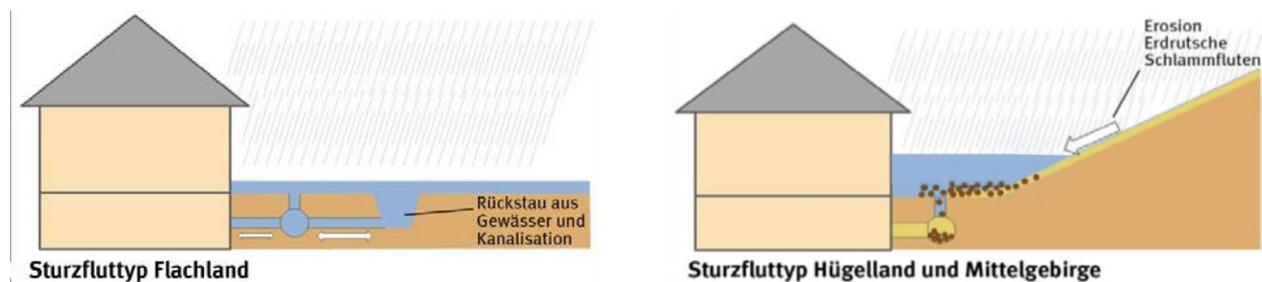


Abbildung 2.4: Auswirkungen von Überflutung bei verschiedener Geländetopografie (nach DWA, 2016b).

Abbildung 2.4 zeigt die verschiedenen Auswirkungen von Überflutung infolge extremer Niederschläge bei unterschiedlichen topografischen Gegebenheiten. In eher flachen Gebieten (Sturzfluttyp Flachland, vgl. linke Seite der Abbildung 2.4) haben extreme Niederschläge zur Folge, dass das Entwässerungssystem überlastet wird, folglich das Wasser auf der Oberfläche verbleibt und somit Schaden anrichten kann. Bei Überflutungen in Gebieten in Hanglage (Sturzfluttyp Hüggelland und Mittelgebirge, vgl. rechte Seite Abbildung 2.4) können neben den Überflutungen an der Oberfläche zusätzlich Erosionen und Erdrutsche auftreten, welche ein erhöhtes Schadenspotenzial darstellen. Außerdem können in diesen Gebieten sowohl große Wasserstände in Geländesenken als auch hohe Fließgeschwindigkeiten in Hangbereichen auftreten (DWA, 2016b).

Die Fließgeschwindigkeit wird in technischen Regelwerken erwähnt, aber nicht als Bewertungskriterium der Überflutungsgefährdung berücksichtigt. Trotzdem ist dieser Aspekt, vor allem in Kombination mit dem Wasserstand, relevant zur Beschreibung der Überflutungsgefährdung (DWA, 2016b; DIN, 2017).

2.2.1 Stabilität des Menschen im Wasser

Wird bei der Überflutungsgefährdung der Zusammenhang zwischen Wasserstand und Fließgeschwindigkeit betrachtet, so ist insbesondere die Stabilität des Menschen im Wasser zu beachten (Xia et. al., 2016). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.5 aufgeführt.

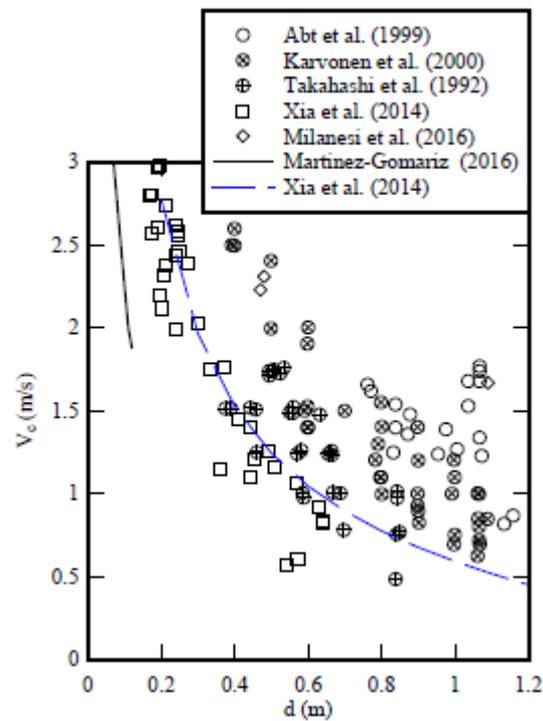


Abbildung 2.5: Stabilität des Menschen im Wasser in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und Wassertiefe (Chanson & Brown, 2018).

Abbildung 2.5 zeigt die Ergebnisse mehrerer Studien, die die Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeit V_c [m/s] über die Wassertiefe d [m] für die Stabilität des Menschen (Erwachsenen) im Wasser untersucht haben. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass bei hohen Fließgeschwindigkeiten bereits geringe Wassertiefen ausreichen, um die Stabilität des Menschen im Wasser kritisch zu beeinträchtigen. Bei großen Wassertiefen hingegen können schon geringe Fließgeschwindigkeiten den Sturz des Menschen im Wasser herbeiführen. Dabei sind die Ergebnisse von Xia et. al. (2014) (vgl. Abbildung 2.5; blaue, gestrichelte Linie) als Übergang zwischen stabil (unterhalb) und instabil (oberhalb) zu verstehen (Chanson & Brown, 2018).

Im Allgemeinen wird die Stabilität eines menschlichen Körpers im Wasser durch zwei Hauptmechanismen beeinflusst. Zum einen durch das Stürzen (engl. toppling) ausgelöst von einem Moment/ einer Instabilität des Moments (engl. moment instability), und zum anderen durch das Gleiten (engl. sliding) verursacht durch Reibung (engl. friction) (Xia et. al., 2016).

Das Stürzen/ die Momenteninstabilität tritt bei hohen Wasserständen und geringen Fließgeschwindigkeiten auf. Dabei ist das durch die ankommende Strömung ausgelöste Moment größer als das resultierende Moment des Körpergewichts. Die Konsequenz ist meist ein leichtes Drehen um die eigene Ferse und ein Sturz rückwärts (Shu et. al., 2016).

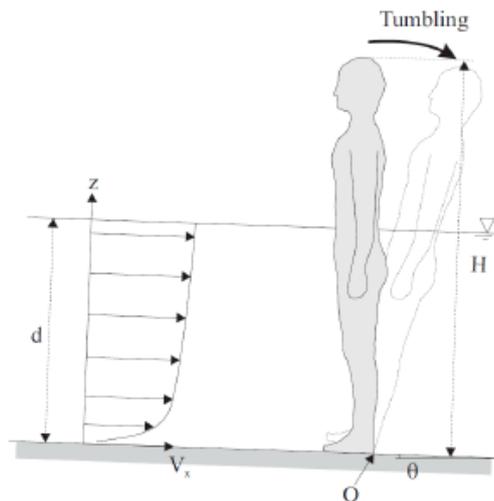


Abbildung 2.6: Sturz des Menschen infolge der Momenteninstabilität (Chanson & Brown, 2018).

Abbildung 2.6 zeigt schematisch diesen Mechanismus, worin d die Höhe des Wasserstands, V_x die horizontale Fließgeschwindigkeit, H die Höhe des Körpers und der Punkt O die Ferse bzw. der Drehpunkt des Körpers ist (Chanson & Brown, 2016).

Das Gleiten wiederum tritt bei geringen Wasserständen mit hohen Fließgeschwindigkeiten auf. Verursacht wird das Gleiten durch die Trägheitskraft der ankommenden Strömung. Diese Trägheitskraft ist größer als der Reibungswiderstand zwischen Fuß und Untergrund. Die Folge ist, dass der Halt zwischen Fuß und Untergrund nicht mehr gegeben ist und der Körper zu gleiten beginnt (Jonkman & Penning-Rowse, 2008). Schematisch wird diese Form der Instabilität in Abbildung 2.7 dargestellt.

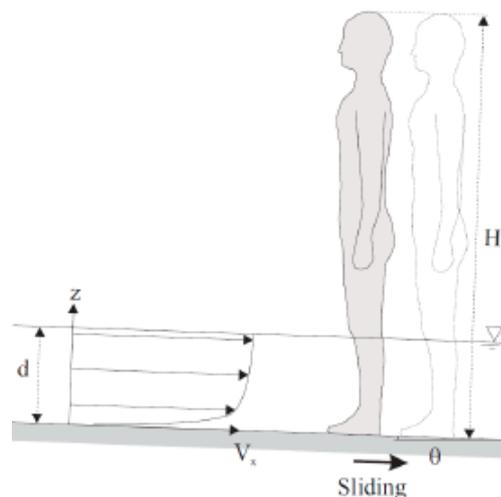


Abbildung 2.7: Instabilität des Menschen im Wasser infolge Gleitens (Chanson & Brown, 2018).

Zudem werden die Mechanismen des Gleitens und des Stürzens durch eine Geländeneigung verstärkt. Ist das Gelände geneigt, so wird meist versucht die Neigung auszugleichen. Der Mensch verlagert dazu seinen Körperschwerpunkt je nach Gefälle weiter nach vorn bzw. hinten. Diese Verlagerung verändert den Angriffspunkt der einwirkenden Kräfte und Momente, sodass meist geringere Wassertiefen (Gleiten) bzw. kleinere Fließgeschwindigkeiten (Stürzen) erforderlich sind, um die Stabilität negativ zu beeinflussen (Xia et. al., 2016).

3 Hydrologische und hydrodynamische Grundlagen

In diesem Kapitel werden zunächst allgemein die Niederschlags-Abfluss-Prozesse auf eindimensionaler Ebene erläutert (Kapitel 3.1), anschließend die maßgeblichen Gleichungen zur zweidimensionalen Berechnung dieser Prozesse (Kapitel 3.2) vorgestellt.

3.1 N-A-Modelle

Der Zusammenhang zwischen Niederschlag (N) und dem daraus resultierendem Abfluss (A) kann in einem Niederschlags-Abfluss-Modell numerisch nachgebildet werden. Dafür wird das Modell in zwei Komponenten unterteilt (Verworn & Kenter, 1993):

- Berechnung des Oberflächenabflusses
- Berechnung des Abflusstransports

Der Oberflächenabfluss beschreibt den Abflussprozess an der Oberfläche vom Eintreffen des Niederschlags bis zum Eintreffen des Wassers an einem bestimmten Punkt. In urbanen Einzugsgebieten sind dies Hausanschlüsse und Straßeneinläufe, die in das Entwässerungssystem einleiten (Verworn, 1999). Der Abflusstransport beschreibt die Verformung der Welle im Kanalnetz (Verworn, 1999) und wird in Kapitel 3.1.2 beschrieben.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Modellierung und Simulation des Niederschlags-Abfluss-Prozesses die Software HYSTEM-EXTRAN der „Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH“ (itwh GmbH) verwendet. Eine kurze Beschreibung der Software ist in Kapitel 4.4 gegeben.

3.1.1 Oberflächenabfluss

Der Oberflächenabfluss wird unterteilt in den Prozess der Abflussbildung (vgl. Kapitel 3.1.1.1) und den der Abflusskonzentration (vgl. Kapitel 3.1.1.2). Diese beiden Teilprozesse sind eng miteinander verbunden und lassen sich modelltechnisch nur schwer getrennt behandeln. Im Folgenden werden die Prozesse und ihre Umsetzung im Programm beschrieben.

3.1.1.1 Abflussbildung

Der Prozess der Abflussbildung beschreibt die Umwandlung des gefallenen Niederschlags in den abflusswirksamen Niederschlag (DWA, 2020). Der Gesamtniederschlag kann in den Effektivniederschlag, also den abflusswirksamen Niederschlag, und in Verluste unterteilt werden. Der effektive Niederschlag P_{eff} [mm] ist der Anteil vom Niederschlag, der nach Abzug aller Verluste und unter Berücksichtigung bodenphysikalischer Eigenschaften auf der Oberfläche verbleibt und abfließt. Dieser Prozess wird als Quotient aus dem effektiven Niederschlag P_{eff} [L] und dem totalen, dem tatsächlich gefallenen Niederschlag P_{tot} [L] gebildet und als Abflussbeiwert Ψ [-] bezeichnet (Zilch et. al., 2012):

$$\Psi = \frac{P_{eff}}{P_{tot}} [-] \quad (\text{Gl. 3.1})$$

Im Allgemeinen wird in der urbanen Hydrologie zwischen folgenden Verlusten unterschieden (Verworn, 1999):

- Benetzungsverluste
- Muldenverluste
- Dauerverluste
- Verdunstungsverluste
- Versickerungsverluste

Nicht alle Verluste treten zeitgleich auf und zusätzlich muss zwischen (undurchlässig) befestigten und durchlässig befestigten bzw. unbefestigten Flächen unterschieden werden. Bei den befestigten Flächen sind die Benetzungs-, Mulden-, Dauer- und Verdunstungsverluste zu beachten. Bei unbefestigten Flächen sind zusätzlich die Versickerungsverluste zu berücksichtigen. Die Interzeption wird über die Benetzungsverluste berücksichtigt. Oftmals werden die Benetzungs- und Muldenverluste zusammen als Anfangsverluste betrachtet. Unabhängig von Regen- oder Trockenphasen treten die Verdunstungsverluste auf (Verworn, 1999).

Undurchlässig befestigte Flächen

Bei undurchlässig befestigten Flächen kann erst nach Abdecken der Benetzungsverluste Abfluss auftreten. Zusätzlich sind einige Flächenanteile noch nicht abflusswirksam, da ein gewisser Anteil des Niederschlags in Mulden zurückgehalten wird (Verworn, 1999). Mit steigender Muldenfüllung nimmt der abflusswirksame Flächenanteil zu, da die Muldenspeicher gefüllt sind. Dauerverluste können über die gesamte Dauer des Niederschlags auftreten. Sie sind zeitlich unveränderlich und konstant. Beispiel für Dauerverluste sind Flächenanteile, die nicht oder nicht vollständig abflusswirksam bezogen auf das Entwässerungssystem sind (Verworn & Kenter, 1993). Die Berechnung der Mulden- und Dauerverluste erfolgt dabei in HYSTEM-EXTRAN über die Grenzwertmethode (vgl. Kapitel 3.1.1.3) (itwh, 2020a).

Durchlässig befestigte/ unbefestigte Flächen

Die modeltechnische Umsetzung der Abflussbildung durchlässig befestigter bzw. unbefestigter Flächen ist komplexer als die der befestigten Flächen. Die Abflussbildung setzt sich aus den gleichen Verlusten zusammen, allerdings müssen zusätzlich die Versickerungsverluste (auch Infiltrationsverluste genannt) berücksichtigt werden. Diese Verluste sind abhängig von der Durchlässigkeit und von dem Wassergehalt des Bodens. Die Wassermenge, die in den Boden versickern kann, wird durch die Infiltrationskapazität beschrieben. Die Infiltrationskapazität ist zeitlich variabel (Zilch et. al., 2012). Bei durchlässig befestigten und nicht befestigten Flächen tritt erst Oberflächenabfluss auf, wenn die Benetzungs- und Muldenverluste abgedeckt sind und die Niederschlagsintensität größer ist als die Infiltrationskapazität. Ist die Niederschlagsintensität kleiner als die Infiltrationskapazität, versickert das Niederschlagswasser in den anstehenden Untergrund und es findet kein Oberflächenabfluss von diesen Flächen statt (Verworn & Kenter, 1993). Bei einem Starkregenereignis hingegen ist der Anteil des Oberflächenabflusses signifikant und darf nicht unterschätzt werden (Zilch et. al., 2012).

Zur Beschreibung und Berechnung des Infiltrationsprozesses sind mehrere Ansätze vorhanden. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich auf das Infiltrationsmodell nach Horton mit der Erweiterung nach Paulsen eingegangen (vgl. Kapitel 3.1.1.4).

3.1.1.2 Abflusskonzentration

Die Abflusskonzentration beschreibt die Verformung der Ganglinie des abflusswirksamen Niederschlags an einem Kontrollquerschnitt. In einem Kanalnetzmodell ist dieser Kontrollquerschnitt der Übergabepunkt des Oberflächenabflusses in das Kanalnetz. Dabei stellen sich eine Dämpfung

der Ganglinie (Retention) und eine zeitliche Verschiebung (Translation) bedingt durch Speichereffekt und Rauheiten ein (Zilch et. al., 2012). Das Ergebnis der Berechnungen der Abflusskonzentration wird dem Transportmodell, dem sogenannten Abflusstransport, übergeben (Verworn, 1999). Bei eindimensionalen Modellen wird die Abflusskonzentration wegen der Komplexität der Abflussbildung auf der Oberfläche vereinfacht umgesetzt (Zilch et. al., 2012).

Die Berechnung der Abflusskonzentration erfolgt bei einfachen Modellen meist mittels hydrologischer Ansätze. Diese Verfahren beruhen auf zwei grundlegenden Annahmen: Ein bestimmter Verlauf des Effektivniederschlags erzeugt immer die gleiche Abflussganglinie und der Verlauf des Effektivniederschlags verhält sich proportional zur Abflussganglinie (Verworn, 1999). Die Abflussganglinie wird dabei als das Ergebnis von Überlagerungen mehrerer Teilabflusswellen verstanden. Die Modellansätze des linearen Einzelspeichers, der Linearen Speicherkaskade und das Standardeinheitsganglinien-Verfahren basieren auf diesen Annahmen. Bei anderen Modellansätzen wird angenommen, dass sich ein Einzugsgebiet wie ein Speicher verhält, oder es wird eine vereinfachte Berechnung des Abflusses auf einer schiefen Ebene unter Ansatz der Manning-Strickler Gleichung durchgeführt (Verworn, 1999).

In HYSTEM-EXTRAN wird die Abflusskonzentration nach dem Modellansatz der Linearen Speicherkaskade berücksichtigt (itwh, 2020a).

Eine Berechnung der Fließgeschwindigkeit und des Wasserstands auf der Oberfläche erfolgt in komplexen zweidimensionalen (2D) Modellen, meist im Rahmen einer Überflutungsberechnung. Eine Beschreibung der zugrunde liegenden Gleichungen der 2D Oberflächenabflussberechnung ist in Kapitel 3.2 gegeben.

3.1.1.3 Grenzwertmethode

Bei der Grenzwertmethode werden die verschiedenen Verlustarten getrennt betrachtet. Die Benetzungsverluste werden als Schwellenwert berücksichtigt und zu Beginn eines Ereignisses vom Niederschlag abgezogen. Zudem wird angenommen, dass bereits am Anfang der Muldenauffüllphase ein gewisser Flächenanteil abflusswirksam ist. Diese Annahme beschreibt den Anfangsabflussbeiwert (Verworn, 1999). Mit steigender Muldenfüllung nimmt der Anteil an abflusswirksamer Fläche zu, bis nach vollständiger Abdeckung der Muldenverluste der Endabflussbeiwert erreicht wird. Der Endabflussbeiwert stellt das Verhältnis von abflusswirksamer zu undurchlässig befestigter Fläche dar. Dauerverluste werden ebenfalls durch den Endabflussbeiwert (1- Endabflussbeiwert) beschrieben (itwh, 2020a).

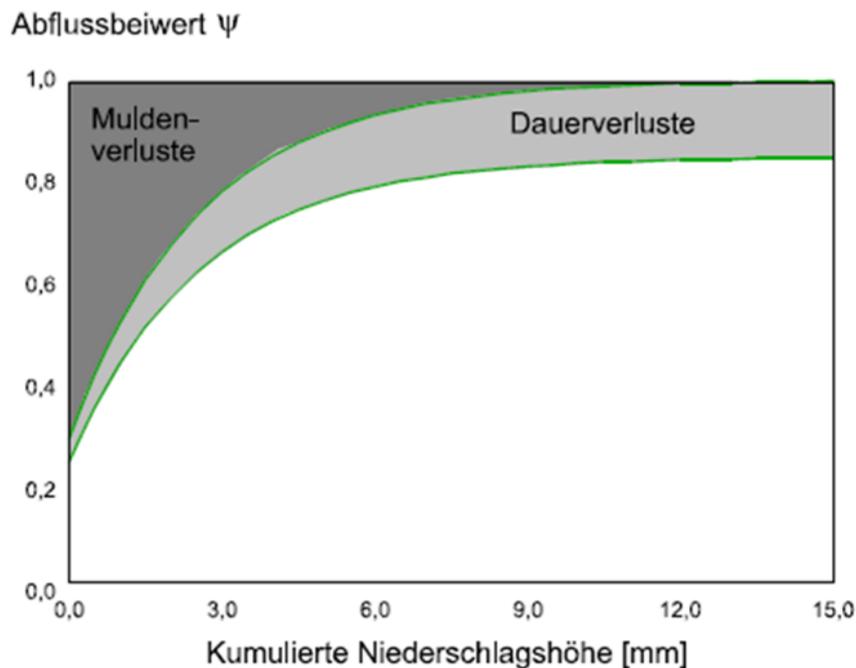


Abbildung 3.1: Verlauf des Abflussbeiwerts (nach itwh, 2020a).

In Abbildung 3.1 ist der Verlauf des Abflussbeiwerts Ψ [-] über die kumulierte Niederschlagshöhe [mm] mit (Hellgrau) und ohne (Dunkelgrau) Berücksichtigung der Dauerverluste bei einem konstanten Niederschlagsverlauf dargestellt.

3.1.1.4 Infiltrationsmodell nach Horton/ Paulsen

Das Infiltrationsmodell nach Horton beschreibt den zeitlichen Verlauf der Infiltrationsrate $f(t)$ [LT^{-1}] ausgehend von einer Anfangsinfiltrationsrate f_0 [LT^{-1}] bis zum Erreichen einer Endinfiltrationsrate f_e [LT^{-1}]. Die allgemeine Berechnungsvorschrift lautet:

$$f(t) = f_e + (f_0 - f_e) \cdot e^{-k \cdot t} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Die Anfangsinfiltrationsrate ist die maximal mögliche Infiltrationsrate und nimmt exponentiell über die Dauer eines Niederschlagsereignisses bis zum Erreichen der Endinfiltrationsrate ab. Diese ist für $t \rightarrow \infty$ konstant (Maniak, 2016). Der Parameter k [T^{-1}] beschreibt die Rückgangskonstante [T^{-1}].

Die kumulative Infiltrationsmenge $F(t)$ [L] berechnet sich als Integral über die Zeit der Infiltrationsrate $f(t)$ (Maniak, 2016).

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = f_e \cdot t + \frac{(f_0 - f_e)}{k} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (\text{Gl. 3.3})$$

Gleichung 3.3 ist nur unter der Annahme anwendbar, dass die Niederschlagsintensität mindestens der Infiltrationskapazität entspricht (Verworn, 1999). Jedoch findet in den Trockenphasen eine Regeneration der Infiltrationskapazität statt, welche durch Ansatz nach Horton mit der Erweiterung nach Paulsen berücksichtigt wird. Die modelltechnische Umsetzung dieses Ansatzes erfordert eine rekursive Berechnung mit der Zeitschrittlänge Δt . Die Infiltrationskapazität f_i des i-

ten Zeitschritts wird aus dem vorherigen Zeitschritt $i-1$ errechnet. Der Parameter k_D [T^{-1}] beschreibt eine Regenerationskonstante während der Trockenphasen (Maniak, 2016).

$$f_i = f_0 - (f_0 - f_{i-1}) \cdot e^{k_D \cdot \Delta t} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

3.1.2 Abflusstransport

Die Abflussganglinien aus dem Oberflächenabflussmodell sind die Zuflussganglinien zum Kanalnetz bzw. zum Kanalnetzmodell. Unter Berücksichtigung physikalischer Eigenschaften werden die Retention und Translation durch das von de Saint-Venant für eindimensionale Strömungen abgeleitete partielle, nichtlineare Gleichungssystem berechnet (DWA, 2020). In dieser Arbeit wird das in dem Berechnungsmodell implementierte Verfahren der „Dynamischen Wellenapproximation“ verwendet, welches das de Saint-Venant'sche Gleichungssystem vollständig löst (itwh, 2020a).

3.1.2.1 Dynamische Wellenapproximation

Das Verfahren der Dynamischen Wellenapproximation berechnet auf Grundlage der Gleichungen zur Massen- und Impulserhaltung (de Saint-Venant'sche Gleichungssystem) den Durchfluss und den Wasserstand einer sich verändernden instationären Strömung mit freier Oberfläche (Veit, 2009; Verworn, 1999). Die wesentlichen Gleichungen sind die Impulserhaltungsgleichung

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} - I_{S_0} + I_E = 0 \quad (\text{Gl. 3.5})$$

und die Kontinuitätsgleichung zur Massenerhaltung

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{Gl. 3.6})$$

g [LT^{-2}] ist die Gravitationskonstante, v [LT^{-1}] die Fließgeschwindigkeit, t [T] die Zeit, x [L] beschreibt die Länge des Berechnungsabschnitts und h [L] ist der Wasserstand in einem Berechnungsabschnitt bzw. einer Haltung. Außerdem ist I_{S_0} [-] das Sohlgefälle und I_E [-] das Energieliniengefälle. A [L^2] beschreibt die durchströmte Querschnittsfläche und Q [L^3T^{-1}] den Durchfluss (Veit, 2009).

Die zeitliche Veränderung des Durchflusses $Q_{t+\Delta t}$ und des Wasserstandes $h_{t+\Delta t}$ in jedem Berechnungsabschnitt, einer Haltung, wird über eine explizite Iteration berechnet. Die Berechnung der aktuellen Zeitschrittlänge erfolgt über eine modifizierte Courant-Friedrich-Lewy-Bedingung (kurz CFL-Bedingung) (Gl. 3.7). Die Bedingung basiert auf der Länge eines Berechnungsabschnitts (Haltungslänge) L [L], der aktuellen Fließgeschwindigkeit v [LT^{-1}], der Gravitationskonstanten g [LT^{-2}] und dem aktuellen Wasserstand h [L] (itwh, 2020a).

$$\Delta t = \frac{L}{v + \sqrt{g \cdot h}} \quad (\text{Gl. 3.7})$$

3.2 2D Berechnung des Oberflächenabflusses

Bei der zweidimensionalen Berechnung des Oberflächenabflusses erfolgt die Berechnung der Abflussbildung in den einzelnen Zellen des Berechnungsgitters. Diese Methode berechnet den Abfluss nicht bezogen auf den Gebietsauslass (wie bei einer Kanalnetzberechnung), sondern flächenhaft auf physikalischer Grundlage. Dabei wird der Abfluss auf der Oberfläche durch die Lösung der Flachwassergleichungen berechnet. Die Flachwassergleichungen beschreiben die zweidimensionale Strömung eines inkompressiblen Fluids mit freier Oberfläche. Die Flachwassergleichungen sind aus den 3D Navier-Stokes Gleichungen durch eine Integration über die Tiefe abgeleitet. Der Ansatz der Tiefenintegration setzt voraus, dass die Tiefe gegenüber der horizontalen Ausdehnung gering ist und im betrachteten Einzugsgebiet ein moderates Geländegefälle herrscht. Unter den gegebenen Voraussetzungen ist die vertikale Komponente der Geschwindigkeit vernachlässigbar und entfällt (Zilch et. al., 2012). Die Flachwassergleichungen werden durch zwei gekoppelte partielle Differentialgleichungen beschrieben. Diese Gleichungen beschreiben die Massenbilanz (vgl. Gl. 3.8) und die Impulserhaltung (vgl. Gl. 3.9) (Zilch et. al., 2012; itwh, 2020a).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (v \cdot h) = f_s \quad (\text{Gl. 3.8})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v + g \cdot \nabla h = g \cdot (I_{So} - I_E) \quad (\text{Gl. 3.9})$$

Darin ist h [L] der Wasserstand über dem Untergrund, t [T] eine Zeitvariable und v [LT^{-1}] beschreibt einen zweidimensionalen Geschwindigkeitsvektor mit den Komponenten in x- und y-Richtung. f_s [m/s] stellt einen Quellterm dar, der den Zu- und Abfluss von Wasser (Niederschlag, Austausch mit dem Kanalnetz) abbildet. g [LT^{-2}] ist die Gravitationskonstante, I_{So} [-] definiert das Sohlgefälle und I_E [-] das Energiegefälle. Die Unbekannten und damit das Ergebnis der Berechnungen sind der Wasserstand h [L] und die Fließgeschwindigkeiten v [LT^{-1}] (Zilch et. al., 2012; itwh, 2020a).

Zur Berechnung des Energiegefälles stehen mehrere Ansätze zur Verfügung. In dieser Arbeit wird der Ansatz nach Manning-Strickler (vgl. Gl. 3.10) verwendet (Zilch et. al., 2012; itwh, 2020a).

$$I_E = \frac{n^2 \cdot v \cdot |v|}{h^{4/3}} = \frac{v \cdot |v|}{k_{st}^2 \cdot h^{4/3}} \quad (\text{Gl. 3.10})$$

n [$\text{LT}^{-1/3}$] ist der Manning Koeffizient, k_{st} [$\text{L}^{1/3}\text{T}^{-1}$] der Strickler-Beiwert.

Die Stabilität dieses Berechnungsverfahrens wird durch die Einhaltung des CFL-Kriteriums gewährleistet. Die Zeitschrittweite wird in jedem Zeitschritt aus dem CFL-Kriterium bestimmt (itwh, 2020a).

4 Modelle zur Überflutungsberechnung

Die Simulation von Überflutungen ist zur Nachbildung von Starkregenereignissen und deren Auswirkungen erforderlich. Je nach vorhandenen Daten, erforderlicher Genauigkeit und Zweck stehen dafür verschiedene Ansätze und Kombinationen dieser zur Verfügung (von Horn et. al., 2018). Diese werden in den Kapiteln 4.1 bis Kapitel 4.3 kurz erläutert. Anschließend wird das verwendete Berechnungsmodell beschrieben (Kapitel 4.4).

4.1 1D Modell – Kanalnetzmodelle

Das Kanalnetzmodell berechnet den Abflusstransport im Kanalnetz. Das Abflussverhalten wird durch das Lösen des eindimensionalen de Saint-Venant'schen Gleichungssystems nachgebildet. Dazu werden lediglich hydrologische und geometrische Eigenschaften des Einzugsgebiets und des Kanalnetzes benötigt (DWA, 2020).

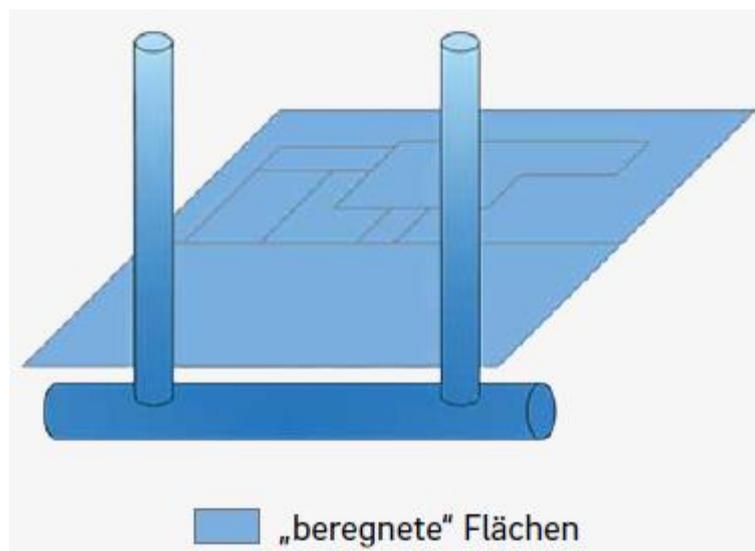


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung eines 1D Kanalnetzmodells (von Horn et. al., 2018).

Abbildung 4.1 zeigt schematisch den Aufbau eines eindimensionalen Kanalnetzmodells mit den abflusswirksamen Flächen (blau gekennzeichnet). Das Modell setzt sich aus Schächten, Haltungen, Teileinzugsgebieten und Sonderbauwerken zusammen. Um die Fließvorgänge zu simulieren, wird das Kanalnetz als Knoten-Kanten-Datenmodell dargestellt. Dabei werden Transportstrecken (z. B. Haltungen) als Kanten und die Verbindungen zwischen den Transportstrecken (z. B. Schächte) als Knoten abgebildet (DWA, 2020). Bei der Simulation wird für jedes Teileinzugsgebiet ein Direktabfluss über hydrologische Ansätze bestimmt, der an den zugeordneten Haltungen übergeben wird (von Horn et. al., 2018; Henonin et. al., 2013).

Eindimensionale Modelle berücksichtigen nur unterirdische und kanalisierte Entwässerungsnetze und sind daher nicht für eine Überflutungsberechnung geeignet. Lediglich eine Abschätzung von Überstauereignissen ist möglich. Allerdings führt eine Abschätzung aus einem 1D Kanalnetzmodell oft zu einer Überschätzung der Überflutungstiefe (Henonin et. al., 2013).

Gängige 1D Kanalnetzmodelle sind unter anderem SWMM, Mike Urban, HYSTEM-EXTRAN, ++SYSTEMS und SEWERPAC (Rossman, 2015; DHI, 2020a; itwh, 2020a; Tandler, 2020a; Rehm, 2019).

4.2 2D Oberflächenmodelle

2D Oberflächenmodelle bilden die Prozesse der Abflussbildung, Abflusskonzentration, -translation und des Abflusstransports ab und berechnen den 2D Oberflächenabfluss. Die hydrodynamische Simulation erfolgt durch das Lösen von Strömungsgleichungen, z. B. durch die tiefengemittelte Flachwassergleichung, unter Annahme zweier Hauptströmungsrichtungen (vgl. Kapitel 3.2). Die Grundlage der Oberflächenmodelle bilden digitale Geländemodelle (kurz: DGM), welche die topografischen Eigenschaften des jeweiligen Einzugsgebiets reproduzieren. Auf Basis des DGM werden Rechennetze bzw. Gitter erzeugt, die dreiecks- oder rasterbasiert sein können. Je nach Auflösung des DGMs und der Gitter- bzw. Rasterbreite variiert die Genauigkeit des Oberflächenmodells und damit auch die Genauigkeit der Simulationsergebnisse (von Horn et. al., 2018; Henonin et. al., 2013). Eine Aufbereitung des DGM ist zwingend erforderlich. Die Aufbereitung umfasst unter anderem das Einpflegen wasserwirtschaftlich relevanter Anlagen, das Sicherstellen von Fließwegen auf der Oberfläche durch Freischneiden von Brückenquerungen/ Unterführungen und die Identifizierung vorhandener Gewässer. Außerdem müssen Gebäudeflächen entweder als nicht überströmbare Abflusshindernisse oder als Lücke im Rechennetz definiert werden. Wenn die Gebäude als Lücke im Rechennetz definiert sind, wird der Abfluss der jeweiligen Dachflächen beim Überschreiten der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Fallrohre auf die umliegenden Oberflächelemente verteilt (vgl. Kapitel 7.3.3). Grundsätzlich sollten alle abflussrelevanten Strukturen in das Modell integriert werden. Zur Optimierung der Simulationsdauer können unwichtige oder komplizierte geometrische Details vereinfacht und zusammengefasst werden (vgl. Kapitel 6.2) (DWA, 2020). Eine vereinfachte Darstellung eines 2D Oberflächenmodells ist in Abbildung 4.2 geben. Darin sind die abflusswirksamen Flächen („berechnete Flächen“) in Blau abgebildet.

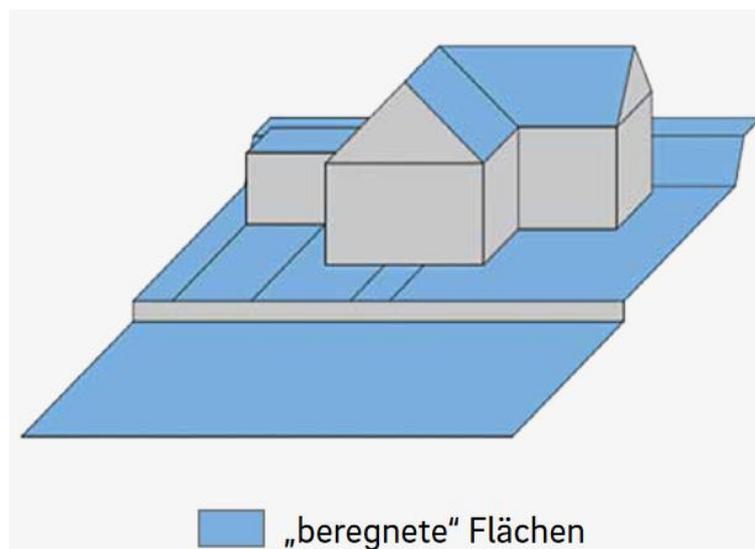


Abbildung 4.2: Vereinfachte Darstellung eines 2D Oberflächenmodells (von Horn et. al., 2018).

Parallel zu den hydrodynamischen Prozessen erfolgt die Berechnung der Abflussbildung. Dafür wird jeder Gitterzelle bzw. jedem Rasterelement zeitdifferenziert eine Regenspende zugewiesen und unter Berücksichtigung aller Verlustansätze wird so direkt in den Gittern/ Rastern des 2D Modells der Effektivniederschlag bzw. der Abfluss berechnet (Fuchs, L. & Schmidt, 2015; DWA, 2020). Die Simulationsergebnisse eines 2D Oberflächenmodells sind die Ausdehnung der Überflutung, Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit auf der Oberfläche für jedes Element des Berechnungsgitters (Henonin et. al., 2013).

Gebräuchliche 2D Oberflächenmodelle sind unter anderem HE 2D, Mike Flood, HYDRO AS-2D, GeoCPM, HYKAS-2D, InfoWorks ICM und HEC-RAS 2D (itwh, 2020a; DHI, 2020b; Hydrotec, 2020; Innovyze, 2020; US ACE, 2020).

4.3 1D/2D gekoppelte Kanalnetz- und Oberflächenmodelle

Bei gekoppelten 1D/2D Kanalnetz- und Oberflächenmodellen wird das Kanalnetz durch das 1D Kanalnetzmodell abgebildet, während der Oberflächenabfluss durch das 2D Oberflächenmodell berechnet wird. Folglich sind diese Modelle eine Kombination aus einem 1D Kanalnetz- und einem 2D Oberflächenmodell (von Horn et. al., 2018). Die Verbindung der beiden Modelle erfolgt über eine bidirektionale Kopplung. Im Falle einer Überlastung des Kanalnetzes überstauen die Schächte und/ oder Straßenabläufe und Wasser tritt aus dem System aus, bzw. es kann kein Zufluss zum Kanalnetz stattfinden. Durch die bidirektionale Kopplung des Kanalnetz- und des Oberflächenmodells kann das Abflussverhalten sowohl im Kanalnetz als auch auf der Oberfläche nachgebildet werden. Das an einer Stelle ausgetretene Wasser kann an einer anderen Stelle zurückgeführt werden. Die bidirektionale Koppelung erfolgt durch Straßenabläufe und Schächte, die innerhalb des 2D Oberflächenmodells liegen. Diese Straßeneinläufe und Schächte gelten als Schnittstelle bzw. Kopplungsknoten zwischen dem Kanalnetz- und dem Oberflächenabflussmodell (itwh, 2020a; Henonin et. al., 2013).

In Abbildung 4.3 ist eine schematische Darstellung eines gekoppelten 1D/2D Modells gegeben. Darin ist auf der linken Seite das Oberflächenabflussmodell und auf der rechten Seite das Kanalnetzmodell ersichtlich. Die abflusswirksame Fläche ist in Blau gekennzeichnet, zudem sind die Kopplungsknoten (Straßeneinläufe) ebenfalls in Blau abgebildet.

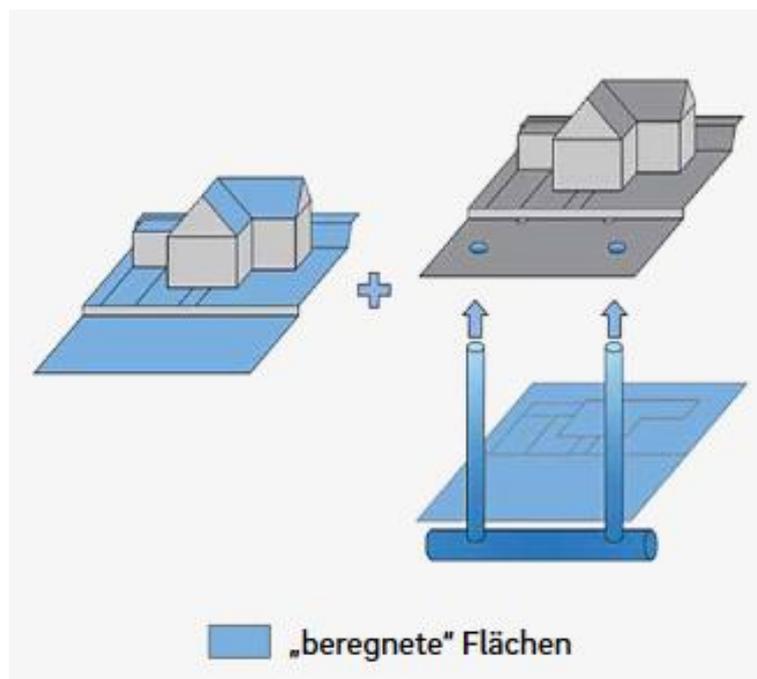


Abbildung 4.3: Vereinfachte Darstellung eines gekoppelten 1D/2D Modells (von Horn et. al., 2018).

Die Simulationsergebnisse einer gekoppelten 1D/2D Simulation sind zum einen das hydraulische Verhalten des Kanalnetzes und zum anderen, wie bei einem reinen 2D Oberflächenmodell auch, die Fließgeschwindigkeit, die Ausdehnung der Überflutung und die Wassertiefe an der Oberfläche (Henonin et. al., 2013).

Gebräuchliche 2D Oberflächenmodelle sind unter anderem HE 2D, Mike Flood, HYDRO AS-2D, GeoCPM, HYKAS-2D, InfoWorks ICM und HEC-RAS (itwh, 2020a; DHI, 2020b; Hydrotec, 2020; Innovyze, 2020; US ACE, 2020).

4.4 Verwendetes Berechnungsmodell

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Kanalnetz- und Überflutungsberechnung das Softwarepaket „Urbane Sturzfluten“ des itwh GmbH verwendet. Das Softwarepaket setzt sich aus einem 1D Kanalnetzmodell, HYSTEM-EXTRAN (vgl. Kapitel 4.4.1), einem 2D Oberflächenabflussmodell, HYSTEM-EXTRAN 2D (vgl. Kapitel 4.4.2) und einem Modul zur Erstellung eines Geländemodells und zur Visualisierung, FOG bzw. FOG 2D (vgl. Kapitel 4.4.2.1) zusammen. Im Folgenden werden die einzelnen Softwarekomponenten beschrieben.

4.4.1 HYSTEM-EXTRAN (HE)

Das Softwarepaket HYSTEM-EXTRAN (HE) dient der eindimensionalen hydrodynamischen Berechnung von Abfluss- und Transportereignissen sowie Schmutzfrachtberechnungen in Kanalnetzen. Das Softwarepaket setzt sich aus zwei Elementen HYSTEM und EXTRAN zusammen, die implizit miteinander gekoppelt sind. In dem Hydrologischen StadtEntwässerungsModell (HYSTEM) erfolgt die hydrologische Berechnung des Oberflächenabflusses (vgl. Kapitel 3.1.1) und simuliert die Abflussbildung und die Abflusskonzentration. Das EXplizite TRANsportmodell (EXTRAN) dient zur eindimensionalen hydrodynamischen Berechnung des Abflusstransports im Kanalnetz und der Schmutzfracht (vgl. Kapitel 3.1.2) (itwh, 2020a).

4.4.2 HYSTEM – EXTRAN 2D (HE 2D)

HYSTEM – EXTRAN 2D (HE 2D) ist die Erweiterung der Software HYSTEM – EXTRAN zur hydraulischen zweidimensionalen Modellierung des Abflusses an der Geländeoberfläche. Die Abflussvorgänge werden flächenhaft auf physikalischer Grundlage der Flachwassergleichungen (vgl. Kapitel 3.2) berechnet. Zur Lösung der gesamten Flachwassergleichungen verwendet HE 2D den Ansatz der dynamischen Wellenapproximation (vgl. Kapitel 3.1.2.1). Zur räumlichen Diskretisierung werden zellzentrierte Finite Volumen verwendet und die zeitliche Diskretisierung erfolgt über den Euler-Ansatz. Die Berücksichtigung der Rauheiten erfolgt über den Ansatz nach Manning – Strickler. Die Unbekannten und damit das Ergebnis der Berechnungen sind die Wasserstände h [m] und die Fließgeschwindigkeiten v [m/s] jedes Dreiecks des Berechnungsgitters (vgl. Kapitel 4.2) (itwh, 2020a).

HE 2D eignet sich gemeinsam mit der Software FOG und FOG 2D (vgl. Kapitel 4.4.2.1), zur gekoppelten 1D/2D Überflutungsberechnung. Während einer gekoppelten Simulation erfolgt an den Kopplungsknoten ein Volumenaustausch, der modelltechnisch durch virtuelle Austauschspeicher umgesetzt wird. In Abbildung 4.4 wird die modelltechnische Umsetzung dieser virtuellen Austauschspeicher und dem Kopplungsknoten zwischen Kanalnetz- und Oberflächenabflussmodell (Straßenablauf, Schacht) dargestellt. Die Austauschspeicher können temporär ein Wasservolumen vorhalten, welches von einem Modell in das andere Modell übergeht, je nach Belastungssituation des Kanalnetzes (itwh, 2020a).

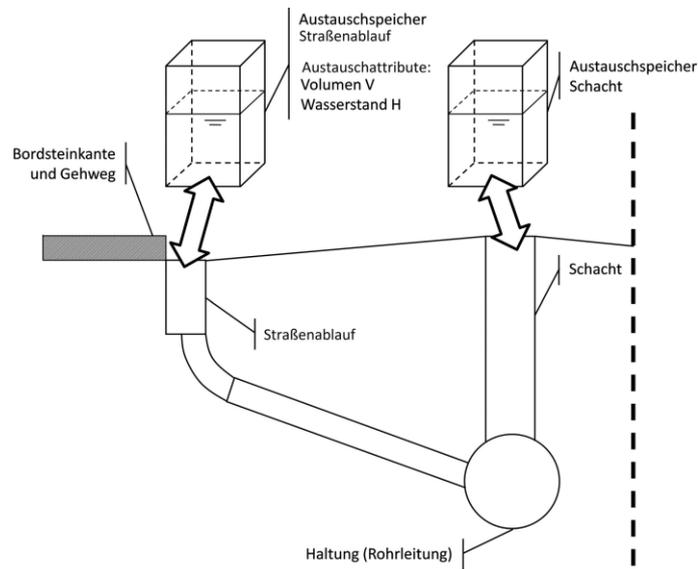


Abbildung 4.4: Kopplung zwischen Kanalnetzmodell und Oberflächenmodell über Austauschspeicher (itwh, 2020a).

4.4.2.1 FOG/ FOG 2D

Flächen und Objekte im GIS (FOG) ist eine Erweiterung der ESRI Software ArcMap und dient zur Planung, Analyse und Auswertung von Kanalnetzdaten, Flächeninformationen und Simulationsergebnissen (itwh, 2020b).

Mit dem zusätzlichen Software-Modul FOG 2D können Überflutungsszenarien modelliert und visualisiert werden. In Kombination mit HE und HE 2D können sowohl Abflussereignisse im Kanalnetz als auch Überflutungsereignisse auf der Oberfläche direkt aus FOG heraus gestartet werden. Die Simulationsergebnisse werden von HE in einer Ergebnisdatenbank gespeichert, welche in FOG importiert und ausgewertet werden kann (itwh, 2020b).

5 Der Schwammstadtansatz/ Grüne Infrastruktur

In diesem Kapitel wird zunächst allgemein auf den Schwammstadtansatz (Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2), auch Grüne Infrastruktur (GI) genannt, eingegangen. Danach werden ausgewählte Elemente (Kapitel 5.3) und die Maßstäbe, auf welcher GI implementiert werden kann (Kapitel 5.4), kurz beschrieben.

5.1 Allgemeines

Die zunehmende Urbanisierung und der damit steigende Anteil versiegelter Oberfläche wirkt sich negativ auf den Wasserkreislauf aus. Je mehr Fläche versiegelt bzw. befestigt ist, desto mehr Wasser fließt an der Oberfläche ab und wird in das Kanalnetz eingeleitet und desto weniger Wasser kann in den Untergrund versickern (Guo et. al., 2019; Maniak, 2016).

Eine Verbesserung des urbanen Wasserkreislaufs wird durch den Ansatz der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung, auch GI genannt, gefördert. Die GI hat zum Ziel, den Zustand des urbanen Wasserkreislaufs in den ursprünglichen vor der Bebauung wiederherzustellen. Damit gehen Bemühungen um eine Verbesserung des Klimas einher. Bei der GI wird das Niederschlagswasser zwischengespeichert und durch Infiltration oder Evaporation dem natürlichen Wasserkreislauf zugeführt (Wang, 2020).

Bereits seit den 1970ern werden verschiedene Konzepte der GI umgesetzt. Mit den „Low Impact Development Controls“ (LID) in den USA oder „Low Impact Urban Design and Development“ (LIUDD) in Neuseeland begann in den 1970ern die Umsetzung der Konzepte. Diese beiden Ansätze beschreiben kleinskalige Maßnahmen, die im Gegensatz zu den damals üblichen „End-of-pipe“ Lösungen stehen. Im Laufe der Zeit entwickelten sich weitere Maßnahmen, Konzepte und Begriffe, die die GI implizierten. So wurde in den 1990ern der Begriff „Best Management Practices“ (BMP) in den USA und Kanada geprägt, der eine Sammlung von Maßnahmen zur Vermeidung von Umweltverschmutzungen und zum Erhalt der Wasserqualität umfasst. Ebenfalls in den 1990ern wurden in Australien die naturnahen Maßnahmen des Regenwassermanagements unter dem Begriff „Water Sensitive Urban Drainage Systems“ (WSUDS) zusammengefasst. Diese Maßnahmen sind naturnahe Lösungen des Regenwassermanagements wie Schutz und Verbesserung der Wasserqualität, Einsparung des Wasserverbrauchs und Erhalt der Wasserbilanz. Das Konzept der „Sustainable Urban Drainage Systems“ (SUDS) aus Großbritannien beschreibt sowohl bauliche als auch nicht-bauliche Maßnahmen im Vergleich zum konventionellen Entwässerungssystem zum nachhaltigeren Umgang mit Niederschlagswasser (Fletscher et. al., 2015).

Die oben beschriebenen Maßnahmen sind lediglich eine Auswahl der vorhandenen Begriffe und Konzepte, die alle das Ziel verfolgen, den urbanen Wasserkreislauf bestmöglich der Natur anzunähern. Die Implementierung dieser Konzepte erfolgt auf verschiedenen Skalen der urbanen Infrastruktur (vgl. Kapitel 5.4).

5.2 Der Schwammstadtansatz

Der Terminus ist selbsterklärend: Das Niederschlagswasser soll wie von einem Schwamm am Ort der Abflussbildung aufgenommen und gespeichert werden. Dabei wird die (Schwamm-) Stadt so konzipiert, dass durch Elemente der GI Spitzenabflüsse reduziert werden und Niederschlagswasser gespeichert, gereinigt und wiederverwendet werden kann. Zudem wird das Entwässerungssystem einer Schwammstadt derart dimensioniert bzw. saniert, dass ein angemessener Schutz vor Überflutungen geboten wird (Chan et. al., 2018). Darüber hinaus werden durch

Elemente der GI Spitzenabflüsse bei gleichzeitiger Reduzierung des überschüssigen Niederschlagswassers ausgeglichen. Außerdem verfolgt der Schwammstadtansatz das Ziel, natürliche Wasserkörper (wie z. B. Feuchtgebiete) zu integrieren und multifunktionale Ziele innerhalb des Entwässerungskonzepts (z. B. Verbesserung des Ökosystems) zu fördern. Darüber hinaus werden Wasser- und Grünflächen neu angelegt, um eine zusätzliche Steigerung der Lebensqualität zu erzielen (Chan et. al., 2018; Zevenbergen et. al., 2018). Abbildung 5.1 zeigt schematisch das Prinzip des Schwammstadtansatzes.

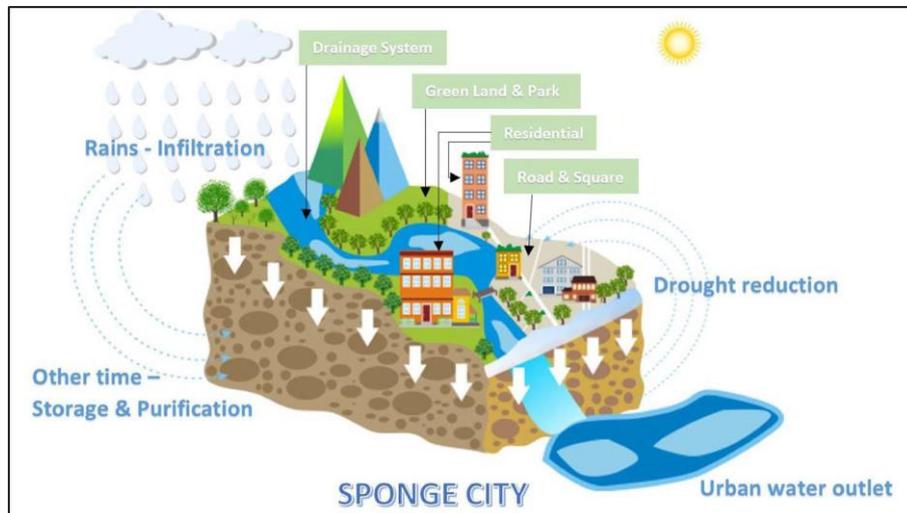


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Schwammstadtansatzes (Chan et. al., 2018).

5.3 Elemente der Grünen Infrastruktur

Die Umsetzung des Schwammstadtansatzes erfolgt durch eine Kombination verschiedener Maßnahmen und Elemente der GI und zielt darauf ab Folgendes zu erreichen: Rückhalt, Speicherung, Verdunstung, Infiltration, Entsiegelung sowie Abkopplung und Nutzung des Niederschlagswassers. Diese Elemente kennzeichnen unter anderem die Schwammstadt:

- Gründächer
- Durchlässige Pflasterbeläge
- Regenwassernutzung
- Mulden-Rigolen-Systeme/-Elemente
- Versickerungsmulden
- Flächenversickerung
- Rigolen
- Wasserwege/ Erschließen von Wasserflächen
- Fassadenbegrünung

Die Kombination und Anordnung der Elemente einer Schwammstadt sind meist landschaftlich gestaltete (Park-) Anlagen mit integrierten Retentionsräumen, die an Wasserwege oder Entwässerungssysteme angeschlossen sind (Li et. al., 2020).

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die modelltechnische Umsetzung des Schwammstadtansatzes im Bestand. Die Implementierung des Schwammstadtansatzes geschieht deshalb in dem Maße, wie es in einer Bestandsbebauung möglich ist. Im Folgenden werden ausgewählte und die in den Untersuchungen implementierten Elemente kurz beschrieben.

5.3.1 Gründächer

Gründächer sind eine verdunstungsfähige naturnahe Alternative zu normalen Dächern. Bei Gründächern wird in zwei Arten der Begrünung unterschieden, dem intensiv und dem extensiv begrünten Dach. Intensiv begrünte Dächer sind begehbare Grünanlagen auf den Dächern (Dachgärten), die aufgrund ihrer hohen Flächenlast von Beginn der Bauplanung an berücksichtigt werden müssen. Die Umsetzung von intensiv begrünten Dächern ist daher nur nach entsprechender Bauplanung bei Neubauten möglich. Extensiv begrünte Dächer sind aufgrund ihrer einfachen und robusten Vegetation (meist Sedum-Pflanzen) sehr pflegeleicht und weisen geringe Flächenlasten auf. Die Umsetzung von extensiven Gründächern kann nachträglich auf bereits bestehenden Dächern erfolgen (Rüngeler, 1998; Landeshauptstadt Hannover, 2015). Abbildung 5.2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau eines extensiv begrünten Dachs.

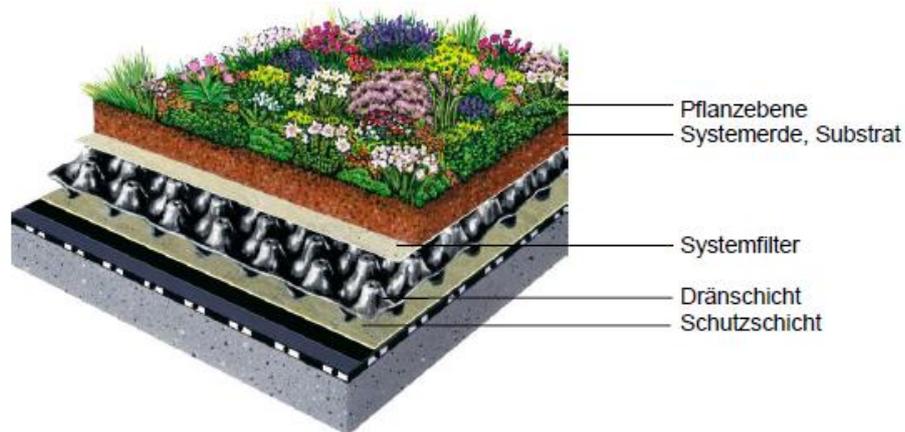


Abbildung 5.2: Aufbau eines extensiven Gründachs (Landeshauptstadt Hannover, 2015).

Gründächer werden im Rahmen dieser Arbeit auf Garagendächern und vorhandenen Flachdächern modelliert. Dabei wird die Höhe des extensiven Gründachs zwischen 10 cm bis 30 cm abgeschätzt. Diese Werte gehen aus der Wahl der Abflussparameter und damit aus dem DWA Arbeitsblatt A 138 (DWA, 2005) hervor. Das Vorgehen bei der modelltechnischen Umsetzung von Gründächern ist in Kapitel 7.4.2 beschrieben.

5.3.2 Rasengittersteine

Rasengittersteine sind eine versickerungsfähige Alternative zu normalen Pflastersteinen. Der Aufbau von Rasengittersteine besteht aus mehreren Schichten, der in Abbildung 5.3 dargestellt ist.

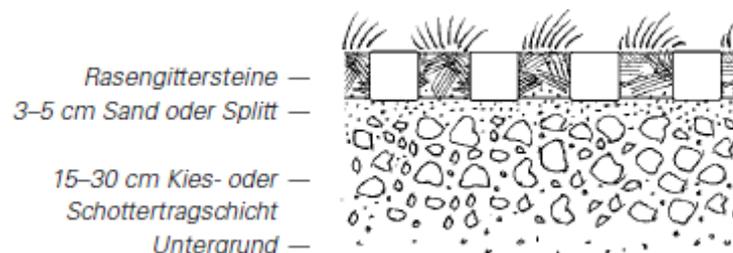


Abbildung 5.3: Typischer Aufbau von Rasengittersteinen (Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2005).

Rasengittersteine können je nach Aufbau geringe Verkehrslasten tragen und eignen sich für Parkplätze und gering befahrene Straßen und Wege (Creabeton, 2014). Die Modellierung der Rasengittersteine erfolgt in diesen Untersuchungen auf Auffahrten, Parkplätzen/-streifen, Wegen und gering befahrenen Straßen. Die modelltechnische Umsetzung der Rasengittersteine ist in Kapitel 7.4.4 beschrieben.

5.3.3 Versickerungsmulden

Versickerungsmulden sind beliebig geformte, dauerhaft begrünte Geländevertiefungen (Mulden). Abbildung 5.4 zeigt eine schematische Darstellung einer Versickerungsmulde.

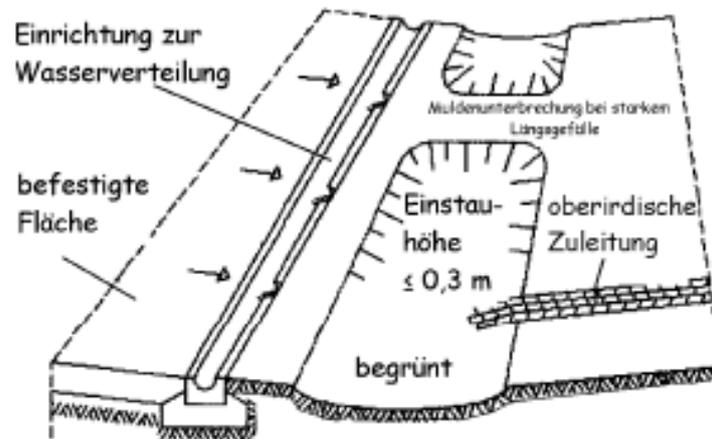


Abbildung 5.4: Aufbau einer Versickerungsmulde (DWA, 2005).

Mulden sind eine dezentrale Versickerungsmaßnahme, in der das Niederschlagswasser kurzzeitig gespeichert wird. Der Niederschlag bzw. der Oberflächenabfluss wird den Mulden oberirdisch und gleichmäßig über den Muldenrand zugeführt. Bei großem Geländegefälle sind insbesondere große bzw. lange Versickerungsmulden durch Bodenschwellen zu unterbrechen (DWA, 2005).

5.3.4 Rigolen

Rigolen sind unterirdische Gräben, die entweder mit natürlichem witterungsbeständigem Material (Grobkies oder Lava) oder mit Füllmaterial aus Kunststoff gefüllt sind. Durch die Füllung der Rigole wird ein zusätzliches Speichervolumen bereitgestellt und das Niederschlagswasser kann in der Rigole zwischengespeichert und verzögert in den anstehenden Untergrund abgegeben werden. Je nach Füllmaterial variiert das nutzbare Porenvolumen zwischen 25 – 35 % für Grobkies und bis zu 90 % für Kunststoff (DWA, 2005; Sieker & Bandermann, 2020). Der Zulauf zu einer Rigole kann entweder über die Oberfläche (vgl. Kapitel 5.3.5) oder unterirdisch durch ein durchlässiges Rohr erfolgen (Rohr-Rigolen-Versickerung) (DWA, 2005).

5.3.5 Mulden-Rigolen-Elemente/ -Systeme

Mulden-Rigolen-Elemente (MRE) sind eine Kombination aus Versickerungsmulden mit darunter liegenden Rigolen. Der typische Aufbau eines Mulden-Rigolen-Elements ist in Abbildung 5.5 dargestellt.

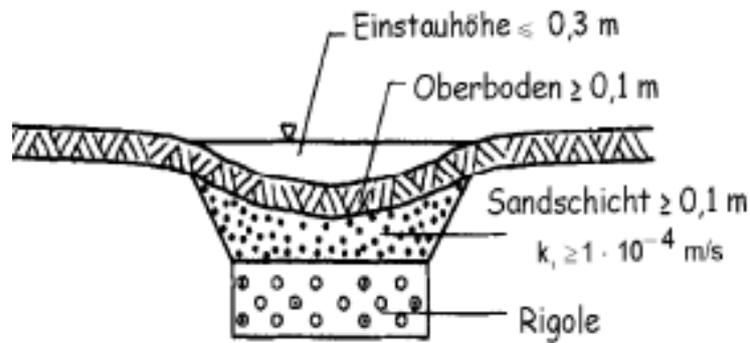


Abbildung 5.5: Aufbau eines Mulden-Rigolen-Elements (DWA, 2005).

Die Beschickung der MRE erfolgt in den meisten Fällen über die Mulde, welche dann das Wasser in den zusätzlichen Speicher, die Rigole, abgibt. Um lange Einstauzeiten der Mulde zu verhindern, ist das Muldenbett, der Boden zwischen Mulde und Rigole, meist als eine durchlässige Sandschicht ausgebildet (DWA, 2005). Die Versickerung des Niederschlagswassers erfolgt durch die Rigole.

Ist der Untergrund sehr gering durchlässig, kann eine zusätzliche Ableitung der Rigole in ein Rohrsystem notwendig sein. Die Rigole ist dann an einen Schacht angeschlossen, in dem eine Abflussdrosselung stattfindet. Sind die verschiedenen Drosselabflüsse der einzelnen Rigolen miteinander verbunden, spricht man von einem Mulden-Rigolen-System (DWA, 2005).

Aufgrund der Komplexität innerhalb eines 1D/2D Kanalnetz- Oberflächenabflussmodells ist eine Implementierung der Mulden-Rigolen-Elemente im Rahmen dieser Arbeit wegen eines numerischen Fehlers nicht möglich gewesen.

5.4 Maßstäbe Grüner Infrastruktur

Die Umsetzung des Schwammstadtkonzepts kann in verschiedenen Maßstäben erfolgen. Beginnend bei einzelnen Gebäuden, auf Stadtteilebene oder, wie der Name es verdeutlicht, in einer ganzen Stadt (van Hattum et. al., 2016). Dabei wird das Schwammstadt-Konzept oftmals als Blau-Grüne-Infrastruktur bezeichnet, weil sie die Elemente GI mit der Schaffung von Wasserwegen und Wasserflächen kombiniert. Im Folgenden sind Möglichkeiten zur Umsetzung des Schwammstadt-Konzepts aufgeführt. Diese sind nur Beispiele und können nach lokalen Gegebenheiten variieren (Sieker, 2020). Die Beispiele sollen lediglich eine Übersicht der Möglichkeiten geben.

Der kleinste Maßstab, auf welchem das Konzept der Schwammstadt umgesetzt werden kann, ist ein Gebäude. Die Umsetzung auf dieser Ebene kann durch verschiedene Maßnahmen erfolgen: die Speicherung des Niederschlagswassers durch Retentionsbecken mit anschließender Regenwassernutzung, Verringerung von versiegelten Flächen und somit einer Steigerung der Infiltrationskapazität, die Begrünung von Dächern und Fassaden zur Erhöhung der Verdunstung, die Nutzung des Niederschlagswassers oder durch Wasserrecycling innerhalb des Gebäudes (van Hattum et. al., 2016; Zhang et. al., 2020). Allerdings ist ein Gebäude nicht ausreichend, um die positiven Effekte der GI auszuschöpfen. Weitet man das Konzept auf einen Stadtteil aus, so addieren sich die Elemente der Gebäude-Ebene und weitere semizentrale Maßnahmen können implementiert werden (van Hattum et. al., 2016). Diese Maßnahmen umfassen die Steigerung des Retentions- und Infiltrationsvermögens und ebenso die Reinigung des Niederschlagswassers. Dabei ist das Schaffen von Grünflächen und sogenannten „blauen Korridoren“ ein elementarer Aspekt. Die „blauen Korridore“ beschreiben Wasserwege auf der Oberfläche, die zum einen das Entwässerungssystem durch Speicherung des Niederschlagswassers entlasten und zum

anderen das Stadtklima positiv durch ihre Verdunstungseigenschaften beeinflussen (Chan et. al., 2018; van Hattum et. al., 2016). Ein weiterer zentraler Aspekt im Rahmen des Schwammstadt-konzepts ist das Reduzieren der versiegelten Flächen auf ein Minimum und damit das Maximieren der Infiltration, unter anderem durch die Verwendung von versickerungsfähigem Asphalt, durchlässigen Pflastersteinen, Verwendung von Mulden-Rigolen-Systemen oder Sickerschächten (Li et. al., 2020). Werden diese Maßnahmen nun auf eine Stadt übertragen bzw. ausgeweitet, ergibt sich daraus eine Schwammstadt (van Hattum et. al., 2016). Die einzelnen Maßnahmen werden dann miteinander kombiniert und gegebenenfalls an die lokalen Gegebenheiten angepasst (Chan et. al., 2018).

6 Untersuchungsgebiete

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei verschiedene Gebiete für die Untersuchungen betrachtet. Diese Gebiete unterscheiden sich unter anderem hinsichtlich ihrer Topografie, Bebauung und des Anteils an befestigter Fläche. Im Folgenden werden die Gebiete Hannover Oberricklingen (vgl. Kapitel 6.1) und Göttingen Nikolausberg (vgl. Kapitel 6.2) vorgestellt.

6.1 Hannover Oberricklingen

Das Gebiet Oberricklingen ist ein Stadtteil der niedersächsischen Landeshauptstadt Hannover in Deutschland. Insgesamt umfasst das Gebiet 4,8 km². Der Jahresniederschlag beträgt 661 mm (DWD, 2011). Abbildung 6.1 zeigt das Untersuchungsgebiet. In Rot dargestellt ist die Modellgrenze. Deutlich zu erkennen ist, dass das Gebiet durch eine lockere Wohnbebauung geprägt ist, lediglich im Norden liegt ein kleines Industriegebiet. Der Anteil an befestigter Fläche beträgt ca. 51 % und dementsprechend an unbefestigter Fläche 49 % der Gesamtfläche.



Abbildung 6.1: Untersuchungsgebiet Hannover Oberricklingen.

Die Topografie des Untersuchungsgebiets ist in Abbildung 6.2 gegeben.

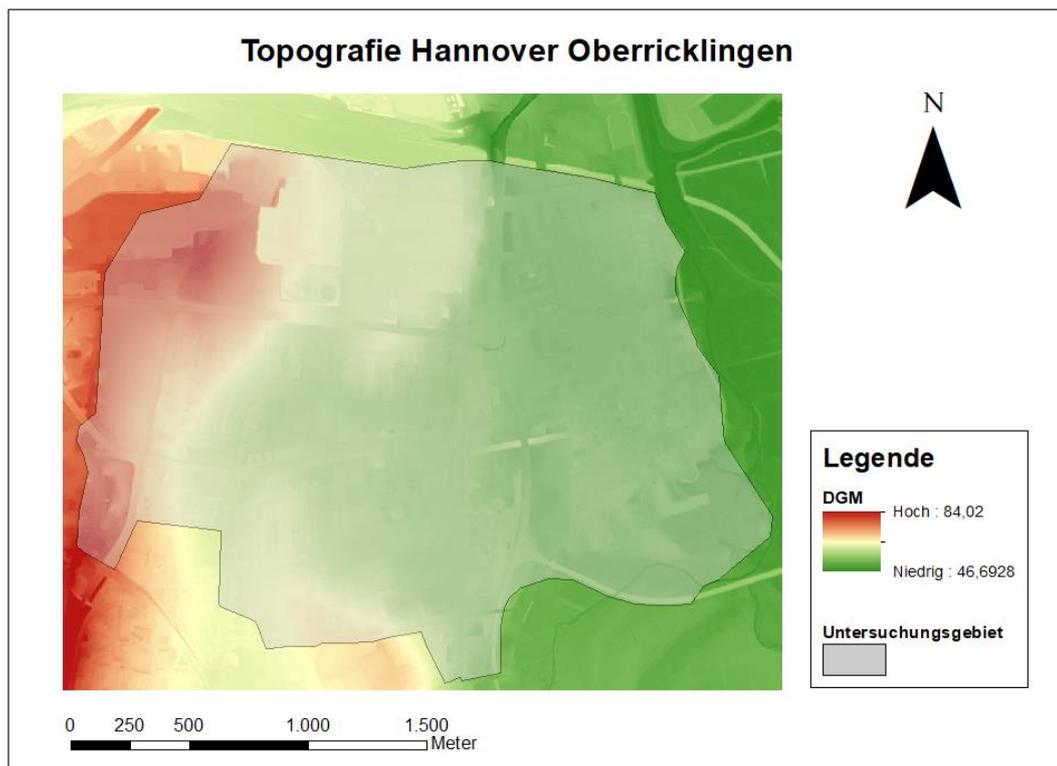


Abbildung 6.2: Topografie Hannover Oberricklingens.

Die Geländehöhen in Hannover Oberricklingen variieren zwischen 84,02 m. ü. NHN (Rot) und 46,6928 m. ü. NHN (Grün). Die durchschnittliche Höhe beträgt 59,34 m. ü. NHN. Das Untersuchungsgebiet ist hell hinterlegt. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine Betrachtung des Regenwassernetzes, das Schmutzwassernetz wird dabei vernachlässigt. Das Kanalnetz ist ca. 54 km lang und umfasst 1136 Schächte, 1124 Haltungen, 2273 Straßenabläufe und 13 Auslassschächte.

6.2 Göttingen Nikolausberg

Das Gebiet Nikolausberg ist ein Außengebiet der Stadt Göttingen in Deutschland. Nikolausberg liegt ca. 7 km entfernt im Nordosten des Stadtzentrums von Göttingen. Insgesamt umfasst das Einzugsgebiet eine Fläche von 6,9 km². Der mittlere Jahresniederschlag beträgt 651 mm (DWD, 2011). Abbildung 6.3 zeigt das Untersuchungsgebiet Nikolausberg.



Abbildung 6.3: Untersuchungsgebiet Göttingen Nikolausberg.

In Rot dargestellt ist die Modellgrenze, welche eine Fläche von ca. 5,5 km² einschließt. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird verstärkt der bebaute Ortskern Nikolausbergs als Detailgebiet betrachtet. Die Grenze des Detailgebiets ist in Violett dargestellt und begrenzt eine Fläche von ca. 1,2 km². Im Gebiet Nikolausberg dominiert deutlich der Grünflächenanteil mit ca. 85,6 %. Dementsprechend beläuft sich der Anteil an befestigter Fläche auf 14,4 %. Diese setzt sich aus Straßenflächen mit 11,3 % und aus Gebäudeflächen mit 3,1 % der Gesamtfläche zusammen. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch nur als Detailgebiet der bebaute Ortskern Nikolausbergs betrachtet.

Die Topografie des Untersuchungsgebiets ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

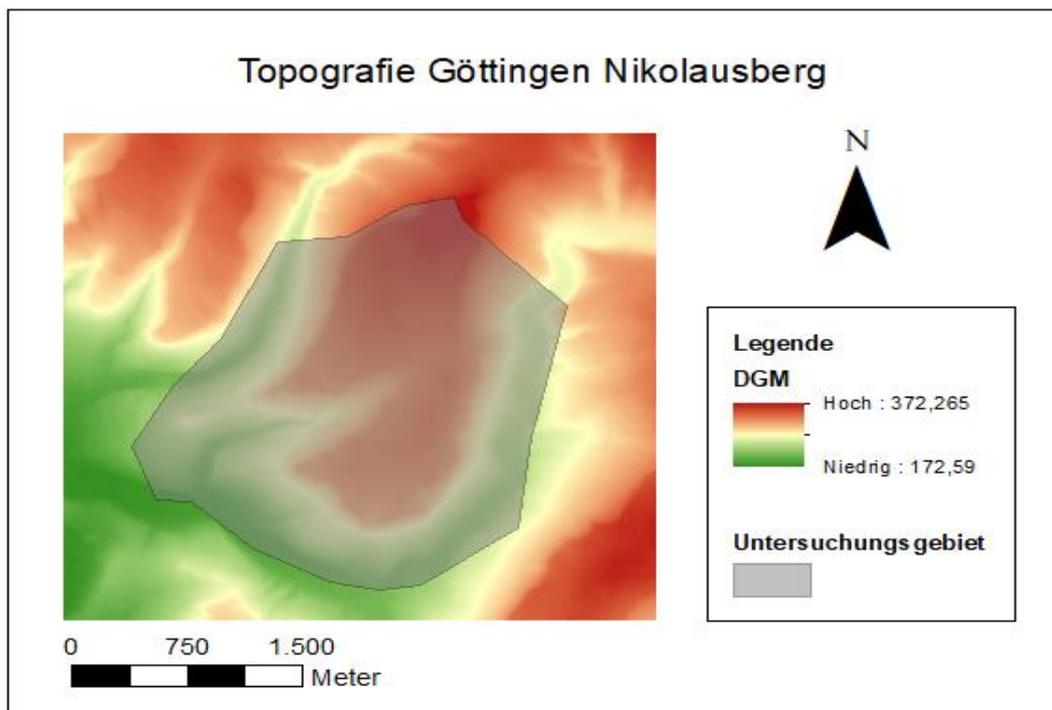


Abbildung 6.4: Topografie Göttingen Nikolausbergs.

Die Höhe des Gebiets variiert zwischen 182 m ü. NHN im Süden (Grün) bis zu 374 m ü. NHN im Norden (Rot), wobei die durchschnittliche Höhe 287,7 m ü. NHN beträgt. Das Gebiet ist zur Verdeutlichung in Grau hinterlegt. Im Rahmen dieser Arbeit findet lediglich eine Betrachtung des Regenwassernetzes und der Überflutung auf der Oberfläche statt, das Schmutzwassernetz wird vernachlässigt. Das Kanalnetz ist ca. 17 km lang und umfasst 552 Schächte, 542 Haltungen und 18 Auslassschächte. Für das Gebiet liegen keine Informationen über Straßenabläufe vor.

7 Umsetzung und Methodik

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen für die Implementierung der Schwammstadtelemente erläutert. Im ersten Schritt werden die vorhandenen Daten (vgl. Kapitel 7.1) und die gewählten Niederschlagsbelastungen (vgl. Kapitel 7.2) dargestellt. Auf der Grundlage der Daten erfolgt dann der Modellaufbau (vgl. Kapitel 7.3) und die Implementierung der verschiedenen Varianten der Schwammstadtelemente (vgl. Kapitel 7.4). Zuletzt werden die Methoden der Ergebnisauswertung (vgl. Kapitel 7.5) beschrieben.

7.1 Datengrundlage

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei unterschiedliche Untersuchungsgebiete betrachtet (vgl. Kapitel 6).

Die zum Aufbau eines gekoppelten 1D/2D Kanalnetz- und Oberflächenabflussmodell notwendigen Daten liegen für beide Gebiete vor. Dies sind

- Höhendaten
- Orthofotos/ Luftbilder
- Kanalnetz(daten)
- ALKIS Daten: Gebäudeflächen und befestigte Fläche im Shape-File-Format
- Flächennutzungsdaten
- Digitales Geländemodell (DGM)

Die Höhendaten liegen im ASCII-Format vor und können somit direkt in das Programm importiert werden.

Die Auflösung der DGM und der Luftbilder variieren zwischen den Untersuchungsgebieten. In Tabelle 7.1 sind die Auflösungen der DGM in Metern und der Luftbilder in Zentimetern gegeben.

Tabelle 7.1: Auflösung der DGM und Luftbilder der Untersuchungsgebiete.

Untersuchungsgebiet	Auflösung	
	DGM [m]	Luftbilder [cm]
Oberricklingen	0,5, 1	20
Nikolausberg	2	10

7.2 Niederschlag

Im Rahmen dieser Arbeit werden Modellregen (Euler Typ 2) der Wiederkehrzeiten $T = 5, 10, 20, 30, 50, 100, 150$ Jahren verwendet. Althaus (1986) und DWA (2020) empfehlen für hydraulische Berechnungen von Kanalnetzen Niederschlagsdauern, die der doppelten Fließzeit des Kanalnetzes, aber mindestens jedoch 60 Minuten, entsprechen. Die Fließzeiten in Hannover Oberricklingen und Göttingen Nikolausberg liegen jeweils unter 30 Minuten, sodass für diese Arbeit eine Dauerstufe von 60 Minuten gewählt wurde.

Die Niederschlagshöhen für die genannten Wiederkehrzeiten und mit einer Dauer von 60 Minuten wurden der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes (KOSTRA - DWD) für Hannover (Spalte 33, Zeile 38) und Göttingen (Spalte 35, Zeile 48) entnommen (DWD, 2017). Die Niederschlagshöhen sind in Tabelle 7.2 aufgeführt.

Tabelle 7.2: Gesamtniederschlagshöhen der Untersuchungsgebiete (DWD, 2017).

Wiederkehrzeit T [a]	Gesamtniederschlagshöhe [mm]	
	Hannover Oberricklingen	Göttingen Nikolausberg
5	24,8	29,8
10	29,5	35,3
20	34,1	40,7
30	36,8	44,0
50	40,3	48,0
100	44,9	53,5
150	47,64	56,7

Die gewählten Niederschlagsbelastungen orientieren sich an den Definitionen des Starkregenindex (vgl. Kapitel 2.1) und lassen sich wie folgt in diesen einordnen:

- T = 5 Jahre: Starkregen (SRI = 2)
- T = 10 Jahre: intensiver Starkregen (SRI = 3)
- T = 20 Jahre: intensiver Starkregen (SRI = 4)
- T = 30 Jahre: intensiver Starkregen (SRI = 5)
- T = 50 Jahre: außergewöhnlicher Starkregen (SRI = 6)
- T = 100 Jahre: außergewöhnlicher Starkregen (SRI = 7)
- T = 150 Jahre: extremer Starkregen (SRI = 9)

7.3 Modellaufbau

Im Folgenden werden die einzelnen für den Modellaufbau notwendigen Arbeitsschritte erläutert.

7.3.1 Korrektur der Eingangsdaten

Um ein gekoppeltes 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflussmodell oder lediglich ein 2D Oberflächenabflussmodell erzeugen zu können, müssen zunächst die Eingangsdaten überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden (vgl. Kapitel 4.2).

Für die Korrektur werden die Luftbilder mit den eingepflegten Flächen verglichen. Flächen werden in HE als Einzelflächen dargestellt, die unter anderem Verweise auf den jeweiligen Abflussparametersatz und Regenschreiber beinhalten. Für spätere Betrachtungen werden in den Einzugsgebieten Garagen und freistehende Gebäude (z. B. Gartenhäuser) als separate Einzelflächen bzw. Gebäudepolygone ausgeschnitten. Ebenfalls werden Auffahrten und einzelne Wege auf Grundstücken ausgeschnitten und als Einzelflächen bzw. Straßenpolygone definiert. Damit das Modell lückenlos ist, werden Grünflächen über das FOG-Werkzeug „Einzugsflächen auffüllen“ ermittelt und hinzugefügt. Das bedeutet, dass Einzelflächen, die nicht als Gebäude- oder Straßenpolygon kategorisiert sind und innerhalb der Modellgrenze liegen, als Grünfläche definiert werden.

Außerdem wird in dem Untersuchungsgebiet Göttingen Nikolausberg eine Korrektur des Kanalnetzes vorgenommen. Im Untersuchungsgebiet Nikolausberg liegen keine Informationen über Straßenabläufe vor. Aus diesem Grund wird Schächten ein Schluckvermögen von 40 l/s

zugewiesen. Dieses Schluckvermögen ist ein Mittelwert aus Herstellerangaben (itwh, 2012) und geht aus der Annahme hervor, dass der Oberflächenabfluss gleichmäßig in den oberen und unteren Schacht eingeleitet wird. Die vorgenommenen Änderungen in Göttingen Nikolausberg sind für eine gekoppelte 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflusssimulation notwendig.

7.3.2 Oberflächenrauheit

Die verschiedenen Oberflächen werden durch ihre jeweilige Rauheit charakterisiert. Diese Rauheiten werden in FOG als 2D Bodenklassen in Form des Manning-Strickler-Beiwerts k_{St} [$m^{1/3}/s$] berücksichtigt. Je nach Untersuchungsgebiet variieren die 2D Bodenklassen. Insgesamt werden sechs verschiedene 2D Bodenklassen auf Grundlage der Flächennutzungsdaten für den Ausgangszustand erstellt. Diese sind in Tabelle 7.3 aufgeführt.

Tabelle 7.3: Oberflächenrauheiten in Form der 2D Bodenklassen.

2D Bodenklasse	Beschreibung	Manning – Strickler Beiwert [$m^{1/3}/s$]
0	Straße	60,0*
1	Gebäude	55
2	Grünfläche/ Unbefestigt	30*
3	Acker	25*
4	Wald	15*
5	Gewässer	30*

Die mit * markierten Werte sind tiefenabhängige k_{St} -Werte, die erst ab einem definierten Wasserstand den in Tabelle 7.3 aufgeführten Maximalwert erreichen. Eine Übersicht über alle Parameter ist in Anlage A.1 gegeben. Für das Untersuchungsgebiet Hannover Oberricklingen werden aufgrund der einheitlichen Oberflächenverhältnisse die 2D Bodenklassen null bis zwei verwendet, im Untersuchungsgebiet Göttingen Nikolausberg wegen der inhomogenen Oberflächenstruktur alle 2D Bodenklassen.

7.3.3 Wahl der Abflussparameter und Anfangsbedingungen

Abflussparameter

Zur Berechnung des niederschlagsbedingten Abflusses müssen jeder Fläche Abflussparameter zugewiesen werden.

Tabelle 7.4: Abflussparameter der Ausgangsuntersuchung (Verworn, 1999).

Abflussparameter		Gebäude	Straße	Unbefestigt
Verluste [mm]	Benetzung	0,3	0,5	5,0
	Mulden	0,0	0,5	4,0
Abflusswirk- same Fläche [%]	Anfangsabflussbeiwert	100,0	25,0	0,0
	Endabflussbeiwert	100,0	100,0	100,0
	Dauerverlust	0,0	0,0	0,0

In Tabelle 7.4 sind die Abflussparameter der Untersuchungsgebiete aufgeführt. Dabei wird unterschieden zwischen Gebäuden, Straßenflächen und unbefestigten Flächen (z. B. Grünflächen). Die Wahl der Parameter erfolgt anhand gängiger Literatur (Verworn, 1999). Im Rahmen einer 2D Simulation wird der Endabflussbeiwert auf 100 % gesetzt, da sämtliche Flächen zum Abfluss beitragen können. Der Benetzungsspeicher wird auf 0mm und der Muldenauffüllgrad auf 0 % festgelegt. Dies entspricht der Annahme, dass keine vorherigen Ereignisse stattfinden, sodass das Untersuchungsgebiet einen trockenen Untergrund aufweist. Ebenfalls wird bei einer 2D Berechnung von HE 2D innerhalb der Abflussparameter unterschieden, ob eine Gebäudefläche an das Kanalnetz angeschlossen ist oder nicht. Bei letzterem sind die Abflussparameter gemäß Tabelle 7.4 anwendbar. Ist ein Gebäude jedoch an das Kanalnetz angeschlossen, benötigt HE zusätzlich die Bemessungsregenspende r [$l/(s \cdot ha)$] für Dachflächen gemäß DIN 1986-100 (2016) mit einer maßgebenden Regendauer von fünf Minuten. Die Bemessungsregenspende beschreibt die Kapazität eines an die Dachfläche angeschlossenen Fallrohres, das heißt den Anteil des Niederschlags, der direkt in das Kanalnetz eingeleitet wird. Wird diese Kapazität überschritten, verbleibt der restliche Niederschlag auf der Oberfläche und wird auf die umliegenden Dreieckszellen des 2D Modells verteilt (itwh, 2020b).

Die Bemessungsregenspenden lassen sich aus der Software KOSTRA-DWD 2010R 3.2 entnehmen und lauten:

- Hannover Oberricklingen: $r = 286,7 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$
- Göttingen Nikolausberg: $r = 333,3 \text{ l/(s} \cdot \text{ha)}$

Zu Beginn der Untersuchung erhalten alle Gebäude, die einer Haltung zugeordnet sind, die Abflussparameter „Gebäude“, die zusätzlich den Wert der Bemessungsregenspende r umfassen. Gebäude, die nicht an das Kanalnetz angeschlossen sind, erhalten den Abflussparameter „Gebäude_na“. Bei diesem Parametersatz wird die Bemessungsregenspende nicht benötigt, die Werte der Verluste und der abflusswirksamen Fläche sind jedoch identisch.

Bodenklassen

Zur Charakterisierung des Untergrundes und zur näheren Definition von Abflussparametersätzen werden in HE Bodenklassen benötigt. Der Bodentyp in Hannover Oberricklingen entspricht der Bodenklasse „Lehm/Löss“, derjenige in Göttingen Nikolausberg wird der Bodenklasse „Sandiger Lehm“ zugeordnet (NIBIS, 2020). Die einzelnen Parameter der Bodenklassen sind in Tabelle 7.5 aufgeführt.

Tabelle 7.5: Gewählte Bodenklassen der Untersuchungsgebiete.

Bodenklasse	LehmLöss	SandigerLehm
Anfangsinfiltrationsrate [mm/min]	1,601	1,798
Endinfiltrationsrate [mm/min]	0,081	0,101
Infiltrationsrate Start [mm/min]	0,841	1,060
Regenerationskonstante [1/d]	0,432	0,720
Rückgangskonstante [1/d]	100,2	143,9

7.3.4 Generierung des Rechengitters

Nach der Korrektur und Bearbeitung der Eingangsdaten erfolgt eine Topologieprüfung. Mittels dieser Funktion wird das Flächenmodell hinsichtlich Lücken und Überlappungen geprüft. Identifizierte Fehler werden im Anschluss bereinigt. Im nächsten Schritt erfolgt die Erzeugung der Rechengitter / 2D Modelle. Im Folgenden werden die Schritte zur Erzeugung eines Rechengitters sowohl für eine gekoppelte 1D/2D Simulation (vgl. Kapitel 7.3.4.1) als auch für eine reine 2D Oberflächenabflusssimulation (vgl. Kapitel 7.3.4.2) erklärt.

7.3.4.1 Gekoppelte 1D/2D Simulation

Zur Erstellung des Rechengitters bzw. 2D Modells ist die Wahl der 2D-Objekte und die Eingabe verschiedener geometrischer Größen notwendig. Für das Untersuchungsgebiet Hannover Oberrieklingen werden die gewählten Objekte und Parameter exemplarisch abgebildet und kurz erläutert.

Zunächst ist für die Erstellung eines 2D Modells die Angabe der Objekte notwendig, die in das Modell implementiert werden sollen. Die Auswahl dieser Objekte ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

The screenshot shows a software interface with the following elements:

- A checked checkbox: 2D-Abflussbildung berücksichtigen
- A tabbed interface with the '2D-Objekte' tab selected. Other tabs include 'Vorbereitung', 'Triangulierung', and 'Höhenmodell'.
- A list of 2D objects with checkboxes:
 - Gebäude
 - Bruchkanten
 - 2D-Bodenklasse-Bereiche
 - Straßenabläufe
 - Maßnahmen
 - Detailgebiete
 - Kontrollquerschnitte
 - Gebäude als Geländeerhöhung

Abbildung 7.1: Wahl der 2D Objekte bei der Modellerstellung.

Außerdem wird für diese Untersuchungen bei allen Flächen und Objekten die 2D Abflussbildung, das heißt die Berechnung der Abflussbildung in den Rechengittern des 2D Modells, berücksichtigt. Zudem werden für diese Arbeit die Gebäude innerhalb des Rechengitters nicht als Geländeerhöhung dargestellt und berechnet, sondern als nicht überströmbare Lücke/ Hindernis modelliert. Durch diese modelltechnische Umsetzung kann der Prozess der Abflussbildung bei Gebäuden bei einer gekoppelten 1D/2D Simulation genauer abgebildet werden (itwh, 2020a). Werden die Gebäude als Lücke im Modell definiert, so werden sie nicht über die 2D Abflussbildung, sondern durch die klassische Abflussbildung berücksichtigt. Das beinhaltet die Haltungszuordnung und den Ansatz der Bemessungsregenspende r für Dachflächen (vgl. Kapitel 7.3.3), welcher modelltechnisch für Gebäude- bzw. Dachflächen genauer ist, da die Leistungsfähigkeit der Fallrohre berücksichtigt wird (itwh, 2020a).

Die Parameter der Vorbearbeitung beschreiben geometrische Größen, welche allgemein zur Erzeugung der Rechengitter (Dreiecke) benötigt werden. Die Vorbearbeitung findet vor der Vermaschung des Dreiecksgitters statt (itwh, 2020a).

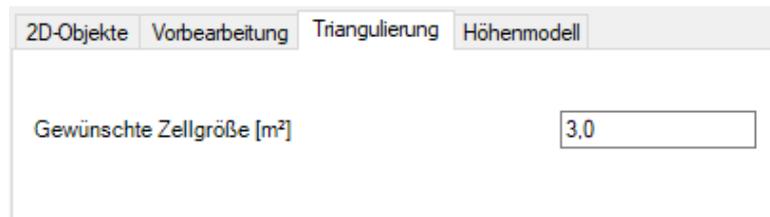
2D-Objekte	Vorbearbeitung	Triangulierung	Höhenmodell
Generalisierungslänge [m]	<input type="text" value="1.0"/>		
Generalisierungslänge für Bruchkanten [m]	<input type="text" value="0.1"/>		
Fangdistanz Knoten-Knoten [m]	<input type="text" value="1.0"/>		
Fangdistanz Knoten-Kante [m]	<input type="text" value="0.5"/>		
Abstand für interpolierte Stützpunkte [m]	<input type="text" value="2.6"/>		
Auflösung Hilfsgitter für die Geländeneigung [m]	<input type="text" value="20.0"/>		

Abbildung 7.2: Geometrische Parameter der Vorbearbeitung.

Abbildung 7.2 zeigt die Übersicht dieser Größen. Um ein Rechengitter zu erzeugen, werden Geometrien entlang der Strukturen „Modellgrenze“, „Gebäude“ und „Bruchkanten“ durch Entfernen einzelner Stützpunkte (Polygonzüge, Polylinien) vereinfacht. Die Generalisierungslänge ist der maximale Abstand zwischen einem vereinfachten Eckpunkt und der ursprünglichen Linienführung. Die abgebildeten Generalisierungslängen (vgl. Abbildung 7.2) entsprechen den Default-Einstellungen und werden für diese Arbeit verwendet. Der Parameter „Fangdistanz Knoten-Knoten“ legt die Distanz fest, unterhalb dessen benachbarte Eckpunkte (Knoten) zu einem Knoten des Gitters zusammengefasst werden. Die „Fangdistanz Knoten-Kante“ beschreibt einen Grenzwert unterhalb derer die Knoten der Eingabegeometrien (z. B. Bruchkanten) auf Kanten verschoben werden. Ebenfalls wurden für die beiden Fangdistanzen die Default-Werte übernommen. Der Abstand für interpolierte Stützpunkte wirkt sich unmittelbar auf die Zellgröße des aus gleichseitigen Dreiecken gebildeten Rechengitters aus und wird aus der Zellgröße abgeleitet (hier zu 2,6 m). Sind Segmente länger als der angegebene Abstand, werden zusätzliche Stützpunkte erzeugt, um bei der Triangulierung Stützpunkte mit möglichst gleichmäßigen Abständen entlang der vereinfachten Strukturen zu generieren. In steilen Bereichen wird zur Verfeinerung des Dreiecksgitters ein Hilfsgitter verwendet und damit die Geländeneigung berechnet. Die Auflösung dieses Gitters wird auf 20 m festgelegt (itwh, 2020b).

Das Dreiecksgitter mit gewünschter Zellgröße [m²] wird durch die Triangulierung erzeugt. Je kleiner die Zellgröße gewählt ist, desto feiner ist das 2D Modell und desto genauer wird das

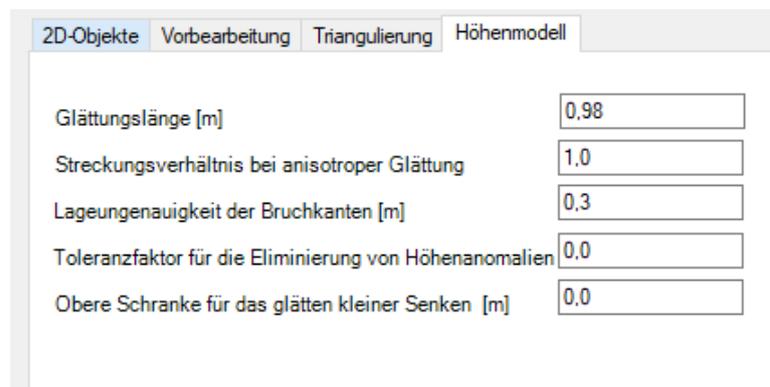
Simulationsergebnis. Allerdings steigt dadurch die Simulationsdauer (itwh, 2020a; von Horn et al., 2018). Im Rahmen dieser Arbeit liegt die gewünschte Zellgröße bei 3 m^2 (vgl. Abbildung 7.3). Dies ist ein Kompromiss, um kleine Teilflächen ausreichend zu berücksichtigen und dennoch vertretbare Simulationsdauern zu erhalten.



2D-Objekte	Vorbereitung	Triangulierung	Höhenmodell
Gewünschte Zellgröße [m²]			
3,0			

Abbildung 7.3: Gewünschte Zellgröße der Triangulierung.

Für die Simulation müssen den jeweiligen Dreieckszellen Höhendaten zugewiesen werden. Die Zuweisung der Höhendaten erfolgt über das Höhenmodell (itwh, 2020a). Die gewählten Parameter sind in Abbildung 7.4 aufgeführt.



2D-Objekte	Vorbereitung	Triangulierung	Höhenmodell
Glättungslänge [m]			
0,98			
Streckungsverhältnis bei anisotroper Glättung			
1,0			
Lageungenaugigkeit der Bruchkanten [m]			
0,3			
Toleranzfaktor für die Eliminierung von Höhenanomalien			
0,0			
Obere Schranke für das glätten kleiner Senken [m]			
0,0			

Abbildung 7.4: Parameter des Höhenmodells.

Die Höhendaten der Dreieckszellen werden durch sogenannte Glättungskreise ermittelt. Abbildung 7.5 stellt schematisch einen Glättungskreis mit den verschiedenen Höhenpunkten (dargestellt in Rot und Grau) dar.

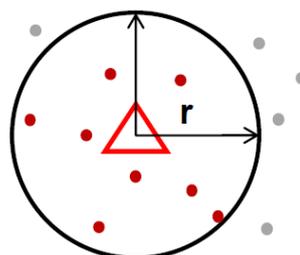


Abbildung 7.5: Schematische Darstellung eines Glättungskreis (itwh, 2020c).

Innerhalb eines Glättungskreises wird eine für das Dreieck gewichtete Höhe errechnet. Der Radius (r) eines Glättungskreises entspricht der Glättungslänge und lässt sich über die gewünschte Zellgröße ableiten (itwh, 2020a). Bei einer Zellgröße von 3 m^2 ergibt sich eine Glättungslänge von $0,98 \text{ m}$.

Das Streckungsverhältnis anisotroper Glättung beschreibt das Verhältnis der Verformung des Glättungskreises zu einer Glättungsellipse. Ist dieser Wert = 1, so erhält man eine isotrope Glättung (Glättungskreis). Eine Lageungenaugigkeit von Bruchkanten kann dazu führen, dass Höhendaten auf der falschen Seite der Bruchkante berücksichtigt werden und somit exakt gegenüber

des eigentlichen Verlaufs liegen. Im Fall einer Lageungenauigkeit werden Höhepunkte, die nah an Bruchkanten liegen, nicht berücksichtigt. Ist dieser Wert = 0, werden alle Höhepunkte ausgewertet (itwh, 2020b). Die zwei weiteren Parameter sind optional und nicht relevant für diese Betrachtung.

Nach der Eingabe dieser Parameter wird das 2D Modell erzeugt.

7.3.4.2 Rechengitter einer 2D Oberflächenabflusssimulation

Zur Erstellung eines Rechengitters für eine reine 2D Oberflächenabflusssimulation sind die in Kapitel 7.3.4.1 beschriebenen Arbeitsschritte notwendig. Allerdings unterscheiden sich die 2D Modelle für die reine 2D Oberflächenabflusssimulation in der Auswahl der 2D Objekte zu den 2D Modellen für eine gekoppelte 1D/2D Simulation. Für die reine 2D Oberflächenabflusssimulation werden alle 2D Objekte ausgewählt und Gebäude werden als Geländeerhöhung implementiert. In Abbildung 7.6 ist die Auswahl der 2D Objekte zur Erzeugung eines Rechnetzes für eine reine 2D Oberflächenabflusssimulation dargestellt.

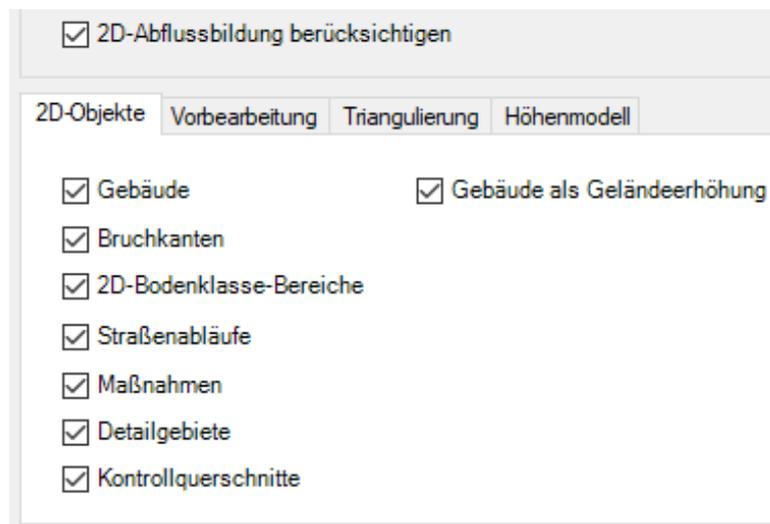


Abbildung 7.6: Auswahl der 2D Objekte für 2D Oberflächenabflussmodell.

Die Parameter der Vorbereitung, die gewünschte Zellgröße und die Parameter des Höhenmodells sind mit einer gekoppelten 1D/2D Simulation identisch.

Bei dem 2D Modell für eine gekoppelte 1D/2D Simulation können wie beschrieben Gebäude aus dem Rechnetnetz ausgespart werden. Sie werden bei einer gekoppelten 1D/2D Simulation durch das Kanalnetzmodell bilanziert. Bei einer reinen 2D Oberflächenabflusssimulation ist es im Rahmen dieser Arbeit sinnvoll, die Gebäude in das Rechnetnetz als Geländeerhöhung zu implementieren. So wird der Abfluss der Gebäude- bzw. Dachflächen nicht auf die umliegenden Dreiecke verteilt, sondern die Berechnung erfolgt auf den Gebäuden selbst.

7.4 Varianten

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Varianten bzw. Implementierungsgrade der GI (vgl. Tabelle 7.6) beschrieben. Die verschiedenen Varianten bauen auf der jeweiligen vorherigen Variante auf. Das bedeutet zum Beispiel, dass in der letzten Variante der höchste Implementierungsgrad der GI vorherrscht. Für jede Variante wird ein 2D Modell mit den in Kapitel 7.3 beschriebenen Arbeitsschritten erstellt.

Tabelle 7.6: Matrix der verschiedenen Varianten.

			Variante					
			V0	V1	V2	V3	V4	V5
Elemente Grüner Infrastruktur	GD	Gar		x	x	x	x	x
		Gar & Flach			x	x	x	x
	RG	Auf				x	x	x
		Auf & vb					x	x
	MRE	Grün						x

GD: Gründach

RG: Rasengittersteine

MRE: Mulden-Rigolen-Element

Gar: Garage

Flach: Flachdach

Auf: Auffahrt

vb: verkehrsberuhigter Bereich

Grün: Grünstreifen

Im Rahmen dieser Arbeit werden alle Varianten sowohl für ein gekoppeltes 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflussmodell als auch für ein reines 2D Oberflächenabflussmodell umgesetzt. Im Folgenden werden für die verschiedenen Modelle die Varianten und deren modelltechnische Umsetzung erläutert. Die Implementierung der Varianten für die Modelle der reinen 2D Oberflächenabflusssimulation bauen in dieser Arbeit auf den Modellen der gekoppelten 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflusssimulation auf. Bei allen Varianten der reinen 2D Oberflächenabflusssimulation werden das Kanalnetz „Außer Betrieb“ gesetzt sowie das Schluckvermögen der Straßenabläufe und Schächte auf 0 l/s festgelegt.

Die Anzahl der verschiedenen Dreieckselemente beträgt bei einer 1D/2D Simulation in Hannover Oberricklingen bis zu 1345598 Elementen und in Göttingen Nikolausberg bis zu 1130261. Bei einer reinen 2D Simulation beläuft sich die Anzahl in Hannover Oberricklingen auf bis zu 1745481 Elementen und in Göttingen Nikolausberg auf bis zu 1218650.

7.4.1 Ausgangszustand: Variante 0

Der Ausgangszustand, die Variante 0 (kurz: V 0) beschreibt das Untersuchungsgebiet ohne Veränderung unter Verwendung der in Kapitel 7.3.2 und Kapitel 7.3.3 beschriebenen Parameter. Diese Variante dient als Grundlage und als Vergleichsvariante für alle weiteren Betrachtungen. Da bei dieser Variante keine Veränderung der Parameter vorgenommen wird, müssen für die reine 2D Oberflächenabflusssimulation lediglich das Kanalnetz, die Straßenabläufe und die Schächte (vgl. Kapitel 7.4) „Außer Betrieb“ gesetzt werden.

7.4.2 Variante 1

Gekoppeltes 1D/2D Kanalnetz- Oberflächenabflussmodell

In der Variante 1 werden modelltechnisch extensive Gründächer (vgl. Kapitel 5.3.1) auf den vorhandenen Garagen implementiert. Diese Implementierung erfolgt über den Abflussparameter „A102 Gründach 10..30 cm Aufbau“. Dieser Abflussparameter beschreibt den Aufbau eines extensiven Gründachs (itwh, 2020a; DWA, 2016a). Die verwendeten Abflussparameter sind in Anlage A.2 gegeben.

Bei dieser Variante werden je nach Untersuchungsgebiet 2,29 ha (Nikolausberg) bzw. 8,87 ha (Oberricklingen) mit Gründächern bedeckt. Eine Übersicht über die jeweiligen Flächenanteile ist in Tabelle 7.7 gegeben. Für die Implementierung dieser Variante werden lediglich die Gründächer implementiert, weitere Änderungen des Modells werden nicht vorgenommen.

Tabelle 7.7: Flächenanteile Variante 1.

Gebiet	Element	Fläche [ha]	Anteil Gesamtfläche [%]	Anteil befestigte Fläche [%]
Oberricklingen	Gründach	8,87	1,84	3,58
Nikolausberg	Gründach	2,29	1,94	3,78

Ungekoppeltes 2D Oberflächenabflussmodell

Die modelltechnische Umsetzung der extensiven Gründächer auf den Garagen (Variante 1) erfolgt für ein reines 2D Oberflächenmodell zusätzlich zu dem Abflussparameter über die Oberflächenrauheit, folglich den 2D Bodenklassen (vgl. Kapitel 7.3.2). Um ein extensives Gründach in das Rechnetz zu implementieren, wird eine neue 2D Bodenklasse definiert. In Tabelle 7.8 sind die tiefenabhängigen k_{St} -Werte der 2D Bodenklasse „Gründach“ aufgeführt. Die Manning-Strickler-Beiwerte ergeben aus dem Minimal- bzw. Maximalwert der Rauheit für Gründächer (Fuchs, K., 2018).

Tabelle 7.8: Tiefenabhängige k_{St} -Werte der 2D Bodenklasse „Gründach“.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert [$m^{1/3}/s$]
0,00	1,59
0,05	1,59
0,25	2,56
100	2,56

Diese 2D Bodenklasse wird allen Garagen zugewiesen. Dadurch wird die Oberflächenrauheit eines extensiven Gründachs abgebildet. Da bei dem Berechnungsnetz einer reinen 2D Oberflächenabflusssimulation Gebäude als Geländeerhöhung implementiert werden (vgl. Kapitel 7.3.4.2), werden die Gründächer zusätzlich zu den Benetzungs- und Muldenverlusten durch die Oberflächenrauheit der 2D Bodenklasse berücksichtigt.

7.4.3 Variante 2

Gekoppeltes 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflussmodell

Diese Variante ist zu der Variante 1 ähnlich (vgl. Kapitel 7.4.2). Neben den implementierten Gründächern auf den Garagendächern werden in der Variante 2 extensive Gründächer auf allen vorhandenen Flachdächern implementiert. Dies geschieht ebenfalls über die Änderung der Abflussparameter dieser Gebäudeflächen. Allen Garagen- und Flachdächern wird über die Funktion „Mehrfachzuweisung“ der Abflussparameter „A102 Gründach 10..30cm Aufbau“ zugewiesen. Die Implementierung der Gründächer hat außerdem zur Folge, dass diese Dachflächen nicht mehr an das Kanalnetz angeschlossen sind und modelltechnisch den Niederschlag über die

Gründächer auf die Geländeoberfläche ableiten. Insgesamt sind bei dieser Variante 40,44 ha (Oberricklingen) bzw. 7,80 ha (Nikolausberg) mit Gründächern bedeckt (vgl. Tabelle 7.9).

Tabelle 7.9: Flächenanteile Variante 2.

Gebiet	Element	Fläche [ha]	Anteil Gesamtfläche [%]	Anteil befestigte Fläche [%]
Oberricklingen	Gründach	40,44	8,37	16,35
Nikolausberg	Gründach	7,80	6,59	12,86

Die Flachdächer wurden zuvor bereits gekennzeichnet, sodass keine weitere Änderung des ursprünglichen Modells vorgenommen wird.

Ungekoppeltes 2D Oberflächenabflussmodell

Die Implementierung der Variante 2 als reines 2D Oberflächenabflussmodell erfolgt mit den gleichen Arbeitsschritten wie in Variante 1. In der Variante 2 wird zusätzlich zu den Garagendächern auch den Flachdächern die 2D Bodenklasse „Gründach“ zugewiesen. Somit werden die Gründächer auf Garagen und Flachdächern in dem Rechnetz eines 2D Oberflächenabflussmodells berücksichtigt.

7.4.4 Variante 3

Gekoppeltes 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflussmodell

Aufbauend auf Variante 2 (Gründächer auf allen Garagen und Flachdächern) werden in dieser Betrachtung zusätzlich alle Auffahrten als Rasengittersteine (vgl. Kapitel 5.3.2) modelliert. Insgesamt sind in der Variante 3 54,91 ha (Oberricklingen) bzw. 14,03 ha (Nikolausberg) durch Elemente der GI bedeckt. Die jeweiligen Flächenanteile sind in Tabelle 7.10 aufgeführt.

Tabelle 7.10: Flächenanteile der Variante 3.

Gebiet	Element	Fläche [ha]	Anteil Gesamtfläche [%]	Anteil befestigte Fläche [%]
Oberricklingen	Gründach	40,44	8,37	16,35
	Rasengittersteine	14,47	3,0	5,85
Nikolausberg	Gründach	7,80	6,59	12,86
	Rasengittersteine	6,23	5,26	10,27

Den Auffahrten wird zur Implementierung der Rasengittersteine der Abflussparameter „A102 Rasengittersteine“ zugewiesen. Die verwendeten Parameterwerte sind in Anlage A.3 gegeben. Für den Boden, modelltechnisch als Bodenklasse definiert, wird unterhalb der Rasengittersteine Sand gewählt, welcher die Speicherschicht zwischen den Rasengittersteinen und dem anstehenden Untergrund abbildet (vgl. Kapitel 5.3.2). Zudem muss die 2D Bodenklasse jeder Auffahrt geändert werden, um die Oberflächenrauheit der Rasengittersteine nachzubilden. Dafür wird eine zusätzliche 2D Bodenklasse erzeugt (2D Bodenklasse 6), sodass die erhöhte Rauheit in der 2D

Abflussbildung berücksichtigt wird. Rasengittersteine sind durch ihren Grünanteil rauer als Asphalt, dementsprechend wird der k_{St} – Wert kleiner gewählt. Die Wahl des Parameters erfolgt anhand Literatur (Fuchs, K., 2018; itwh, 2020a). Der k_{St} – Wert wird wie zuvor als tiefenabhängiger Wert definiert (vgl. Tabelle 7.11).

Tabelle 7.11: Tiefenabhängige k_{St} - Werte für Rasengittersteine.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert [$m^{1/3}/s$]
0,00	5
0,05	5
0,25	15
100	15

Durch die Änderung der 2D Bodenklasse ist die Erzeugung eines neuen 2D Modells zwingend erforderlich. Bei der Erzeugung eines neuen Berechnungsnetzes wird keine weitere Änderung der Parameter des 2D Modells vorgenommen.

Ungekoppeltes 2D Oberflächenabflussmodell

Das 2D Oberflächenabflussmodell der Variante 3, baut wie zuvor auf dem Modell der 1D/2D gekoppelten Kanalnetz- Oberflächenabflusssimulation auf. Für die Implementierung der Rasengittersteine ist keine weitere Änderung der Parameter notwendig. Die Oberflächenrauheit wird bereits durch die 2D Bodenklasse repräsentiert. Allerdings müssen wie bereits in Variante 2 die Gründächer durch die 2D Bodenklassen implementiert werden. Zusätzlich muss das Kanalnetz „deaktiviert“ und Gebäude als Geländeerhöhung im Berechnungsnetz berücksichtigt werden.

7.4.5 Variante 4

Gekoppeltes 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflussmodell

Variante 4 baut ebenfalls auf der vorhergehenden Variante 3 auf. Bei dieser Betrachtung werden zusätzlich sämtliche Wege, verkehrsberuhigte Straßen, Parkplätze und Parkstreifen als Rasengittersteine modelliert. Die Modellierung erfolgt ähnlich zu den Auffahrten. Dementsprechend wird der Abflussparameter jeweils als „A102 Rasengittersteine“ festgelegt und eine Änderung der 2D Bodenklasse wird vorgenommen. Die Fläche, die nun von Elementen der GI beansprucht wird, beträgt 54,91 ha (Oberricklingen) bzw. 36,40 ha (Nikolausberg). Die Aufteilung der Flächen mit dem jeweiligen Element der GI ist in Tabelle 7.12 dargestellt.

Tabelle 7.12: Flächenanteile der Variante 4.

Gebiet	Element	Fläche [ha]	Anteil Gesamtfläche [%]	Anteil befestigte Fläche [%]
Oberricklingen	Gründach	40,44	8,37	16,35
	Rasengittersteine	51,1	10,58	20,65
Nikolausberg	Gründach	7,80	6,59	12,86
	Rasengittersteine	28,60	24,15	47,14

Eine Implementierung verschiedener durchlässig befestigter Straßenbeläge, wie es in der Realität umgesetzt wird, ist im Rahmen dieser Arbeit nicht zweckmäßig. Aus diesem Grund wird hier eine modelltechnische Vereinfachung angenommen und lediglich eine Implementierung von Rasengittersteinen vorgenommen.

Infolge der Änderung der 2D Bodenklasse ist die Erzeugung eines neuen Berechnungsnetzes zwingend erforderlich. Weitere Änderungen von Parametern wurden in dieser Variante nicht vorgenommen.

Ungekoppeltes 2D Oberflächenabflussmodell

Die Implementierung der Variante 4 für das Rechnetz einer reinen 2D Oberflächenabflusssimulation erfordert keine weiteren Änderungen der Parameter. Lediglich ist die Implementierung der Gründächer aus vorangegangenen Varianten notwendig (vgl. Kapitel 7.4.2 und Kapitel 7.4.4). Das Rechnetz kann wie in Kapitel 7.3.4.2 beschrieben erzeugt werden.

7.4.6 Variante 5

Die Variante 5 baut ebenfalls auf den vorherigen Varianten auf und enthält den höchsten Implementierungsgrad an GI in dieser Untersuchung. Zu den bereits bestehenden Rasengittersteinen und Gründächern werden bei dieser Variante Versickerungsmulden seitlich neben den Straßenflächen implementiert. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Mulden nachträglich in das Untersuchungsgebiet eingebaut werden und somit keine Veränderung der Straßenflächen vorgenommen wird. Die Mulden werden als separate Grünfläche und als separate 2D Bodenklasse modelliert. Hierzu werden die Mulden aus den vorhandenen Grünflächen ausgeschnitten und als Fläche „Mulde“ definiert. Ferner erfolgten die Definition eines neuen Abflussparameters und einer dazugehörigen Bodenklasse. Damit die Oberflächenrauheit der Mulde im 2D Modell nachgebildet werden kann, wird ebenfalls eine neue 2D Bodenklasse definiert.

Die Implementierung der Mulden in ein 2D Modell ist sehr umfangreich, da bis jetzt kein Werkzeug dafür zur Verfügung steht. Eine genaue Beschreibung der Implementierung ist in Anlage A.4 gegeben.

7.4.7 Flächenanteile der Varianten

Bei der Implementierung der in Kapitel 7.4.1 bis Kapitel 7.4.6 beschriebenen Varianten wird ein steigender Anteil an GI umgesetzt. Je mehr Elemente implementiert werden, desto mehr Fläche wird von den Elementen beansprucht und desto mehr befestigte Fläche wird durch Elemente der

GI ersetzt. Eine Übersicht über die jeweiligen Flächenanteile der verschiedenen Varianten ist in Tabelle 7.13 für Hannover Oberricklingen und in Tabelle 7.14 für das Detailgebiet Göttingen Nikolausberg gegeben. Eine Übersicht über die jeweiligen Flächenanteile für das Gesamtgebiet Nikolausberg ist in Anlage A.5 gegeben.

Hannover Oberricklingen

Tabelle 7.13: Übersicht über die beanspruchten Flächenanteile der Varianten in Oberricklingen.

	Fläche [ha]	Anteil an Gesamtfläche [%]	Anteil an befestigter Fläche [%]
Variante 1	8,87	1,84	3,58
Variante 2	40,44	8,37	16,35
Variante 3	54,91	11,37	22,19
Variante 4	91,53	18,95	37,00
Variante 5	99,16	20,53	37,00

Göttingen Nikolausberg

Tabelle 7.14: Übersicht über die beanspruchten Flächenanteile der Varianten im Detailgebiet in Nikolausberg.

	Fläche [ha]	Anteil an Gesamtfläche [%]	Anteil an befestigter Fläche [%]
Variante 1	2,29	1,94	3,78
Variante 2	8,44	6,59	12,86
Variante 3	14,03	11,85	23,13
Variante 4	36,40	30,74	60,00
Variante 5	38,24	32,29	60,00

7.5 Methoden der Auswertung

7.5.1 Ergebnisauswertung

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Varianten erzeugt und die erzielten Ergebnisse miteinander verglichen. Insgesamt werden je sieben Modellregen für jede der sechs Varianten berechnet. Für die Ergebnisauswertung werden insgesamt 168 Simulationsergebnisse betrachtet. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt anhand folgender Beurteilungskriterien:

- Maximaler Wasserstand w_{\max} [m]
- Überflutungsfläche $A_{\text{Ü}}$ [m²]
- Fließgeschwindigkeit auf der Oberfläche
- Gesamtabfluss im Kanalnetz (Gekoppelte 1D/2D Simulation)

Der maximale Wasserstand w_{\max} [m] und die maximale Fließgeschwindigkeit v_{\max} [m/s] auf der Oberfläche werden an ausgewählten Punkten verglichen und beziehen sich jeweils auf das Maximum des Ausgangszustands (Variante 0).

Die Überflutungsfläche $A_{\text{Ü}}$ [m²] wird anhand des maximalen Wasserstands in einem Dreieckselement des Berechnungsnetzes/ 2D Modells ermittelt. Wasserstände unterhalb eines Grenzwertes w_{Grenz} [m] werden nicht berücksichtigt. Dieser Grenzwert wird zur Vergleichbarkeit beider Untersuchungsgebiete festgelegt zu:

- $w_{\text{Grenz}} = 0,05$ m

Die Berechnung der Überflutungsfläche $A_{\text{Ü}}$ erfolgt durch Aufsummieren der Dreieckselemente A_{Δ} [m²], welche den Grenzwasserstand w_{Grenz} überschreiten (vgl. Gl. 7.1).

$$A_{\text{Ü}} = \sum A_{\Delta}, \quad \text{für } w \geq w_{\text{Grenz}} \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Die Überflutungsflächen der verschiedenen Varianten werden miteinander verglichen. Zu dem Zweck wird der prozentuale Anteil von der betreffenden Vergleichsvariante (eine der Varianten 1 bis 5) mit der jeweiligen Variante 0 gebildet. Mit diesem Wert wird die prozentuale Reduzierung der Überflutungsfläche gebildet.

Die Auswertung des Gesamtabflusses im Kanalnetz bezieht sich nur auf die gekoppelte 1D/2D Simulation und erfolgt anhand der Bilanzierung des Softwaremoduls EXTRAN (vgl. Kapitel 4.4).

Die Berechnung von Gütekriterien ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Durch die verschiedenen Varianten ist das Erzeugen verschiedener 2D Modelle zwingend erforderlich (vgl. Kapitel 7.4), sodass die Anzahl an Dreieckselementen variiert und kein Abgleich anhand von Elementen möglich ist.

Die Auswertung der Sensitivitätsanalyse erfolgt ebenfalls anhand der oben beschriebenen Kriterien.

7.5.2 Methodisches Vorgehen

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Simulationsergebnisse aus zwei Untersuchungsgebieten (vgl. Kapitel 6) für sechs Varianten und jeweils sieben Ereignissen sowohl für eine gekoppelte 1D/2D Simulation als auch für eine ungekoppelte 2D Simulation miteinander verglichen. Die Auswertung der Überflutungsfläche erfolgt in ArcMap.

Zur Vermeidung einer zusätzlichen Überflutungsfläche werden in Variante 5 die maximalen Wasserstände in Bereich der Mulden und Schwellen auf Null gesetzt. Modelltechnisch bedeutet das, dass die Elemente, welche innerhalb einer Mulde/ Schwelle liegen, aus den Ergebnissen ausgeschnitten und entfernt werden. Somit wird eine zusätzliche Überflutungsfläche bedingt durch die Mulden vermieden.

Die Auswertung der maximalen Wasserstände und der maximalen Fließgeschwindigkeiten erfolgt wegen einer schnelleren Verarbeitung in der Software „Geographisches Informationssystem zur Modellerstellung“ (kurz GISMO) der Firma smile Consult GmbH. Dafür werden die in ArcGIS gespeicherten Ergebnisdateien der maximalen Wasserstände und der maximalen Fließgeschwindigkeiten in Punktdateien umgewandelt. Leider ist in diesem Bereich keine Automatisierung aufgrund der verschiedenen Ergebnisdateien möglich, sodass die Umwandlung der Daten der insgesamt 280 Ergebnisse einschließlich der Sensitivitätsanalyse manuell über die Benutzeroberfläche erfolgen muss.

Die Punktdateien können in GISMO eingelesen und als ein Binärformat abgespeichert werden. Zur weiteren Verarbeitung werden die Punktdateien in GISMO über eine lineare Interpolation trianguliert. Das Erzeugen der Dreieckselemente ermöglicht unter anderem die Profilschnittanalyse oder das Erstellen von Differenzkarten einzelner Varianten. Im nächsten Schritt erfolgt die Profilschnittanalyse. Dazu werden je nach Wiederkehrzeit des Modellregens die Varianten in Gismo eingelesen und die Ansicht des Profilschnitts auf der Straßenoberfläche wird erzeugt. Die Profilschnittanalysen werden sowohl für die maximalen Wasserstände als auch für die maximalen Fließgeschwindigkeiten durchgeführt.

8 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt und erläutert. Das Kapitel unterteilt sich in die Auswertung der gekoppelten 1D/2D Simulation (vgl. Kapitel 8.1), die Auswertung der reinen 2D Simulation (vgl. Kapitel 8.2) und den Vergleich der reinen 2D Simulation mit der 1D/2D Simulation (vgl. Kapitel 8.3).

8.1 Auswertung der gekoppelten 1D/2D Simulation

Die Auswertung der gekoppelten 1D/2D Simulation für beide Untersuchungsgebiete erfolgt anhand der Auswertung der maximalen Wasserstände (Kapitel 8.1.1), der Überflutungsfläche (Kapitel 8.1.2), der maximalen Fließgeschwindigkeit (Kapitel 8.1.3) und anhand des Gesamtabflusses im Kanalnetz (Kapitel 8.1.4). Außerdem erfolgt ein Vergleich der Untersuchungsgebiete bei einer 1D/2D Simulation (Kapitel 8.1.5).

8.1.1 Auswertung der maximalen Wasserstände

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden jeweils fünf verschiedene Varianten (ausgenommen dem Ausgangszustand) modelliert und mit sieben verschiedenen Modellregen simuliert. Zur Bewertung der Wirksamkeit der GI, insbesondere bei extremen Starkregenereignissen ist der maximale Wasserstand eine maßgebliche Größe. Die Gefahren, die von einer Überflutung infolge eines Starkregens ausgehen, werden meist anhand des maximalen Wasserstands (vgl. Kapitel 2.2) klassifiziert. Um beurteilen zu können, wie effektiv sich GI auf die Wasserstände auswirkt, werden zunächst an ausgewählten Orten innerhalb der Untersuchungsgebiete Profilschnitte auf der Oberfläche erzeugt. Deren Lage ist in Abbildung 8.1 für Hannover Oberricklingen und in Abbildung 8.2 für Göttingen Nikolausberg dargestellt. In Anlage A.6 ist für beide Untersuchungsgebiete exemplarisch jeweils ein Profilschnitt über ausgewählte Wiederkehrzeiten abgebildet.



Abbildung 8.1: Profilschnitte Hannover Oberricklingen.

Der erste Profilschnitt (Schnitt 1) liegt im Norden in einem Innenhof. Gewählt wurde dieser Bereich aufgrund der hohen Wasserstände, die bereits bei Modellregen mit geringer Wiederkehrzeit auftraten und wegen des unmittelbaren Einflusses der GI. In der vierten Variante werden Rasengittersteine in diesem Bereich implementiert. Der zweite Profilschnitt (Schnitt 2) liegt auf einer Straße in einem stark versiegelten Abschnitt im Nordosten Oberricklingens. Die Implementierung der verschiedenen Varianten hat allerdings keinen unmittelbaren Einfluss auf diesen Profilschnitt, da keine GI in direkter Nähe implementiert wurde. Im Gegensatz dazu steht der dritte und letzte Profilschnitt (Schnitt 3). Dieser ist in einer Wohnstraße gelegen und ebenfalls bei Variante 4 und Variante 5 in direktem Kontakt zu Elementen der GI. Alle Schnitte zeichnen sich durch hohe Wasserstände bei Modellregen geringer Wiederkehrzeit aus.

Im Vergleich zwischen den einzelnen Varianten wird deutlich, dass die Implementierung von Gründächern auf Garagen (Variante 1) nur eine geringe Absenkung von ca. 10 % (T = 5 a) und bis 2,3 % (T = 30 a) erreicht. Diese Angaben entsprechen je nach Modellregen in etwa einer Senkung des Wasserstands um ein bis zwei Zentimeter. Betrachtet man nun Variante 2 und 3, wird deutlich, dass beide Varianten ähnliche Wasserstände und somit eine ähnliche Absenkung des maximalen Wasserstands erreichen. Je nach Wiederkehrzeit und Profilschnitt unterscheiden sich die Varianten nicht oder nur wenig.

Der Einfluss der GI variiert je nach Lage der Profilschnitte im Untersuchungsgebiet. Diese Unterschiede werden ab Variante 4 sehr deutlich. Bei dieser Variante sind Gründächer auf Garagen und vorhandenen Flachdächern sowie Rasengittersteine auf allen wenig befahrenen Straßen, Parkplätzen und Auffahrten implementiert. Je stärker der direkte Einfluss der GI ist, desto stärker kann der maximale Wasserstand abgesenkt werden. Bei Betrachtung der Profilschnitte im Einzelnen kann allgemein die Aussage getroffen werden, dass der maximale Wasserstand am ersten Profilschnitt durch Variante 4 und Variante 5 im Mittel um 54 % reduziert wird und damit 15 % niedriger liegt als Variante 3. Am zweiten Profilschnitt, dort herrscht der geringste Einfluss der GI, unterscheidet sich Variante 4 lediglich um 2 % von Variante 3 und erreicht eine maximale Absenkung des Wasserstands von 21 % bei einer Wiederkehrzeit von T = 5 a und bei einem hundertjährigen Modellregen wird der maximale Wasserstand um 4 % (entspricht einem Zentimeter) reduziert. Bei Berücksichtigung von Variante 5 (zusätzliche Implementierung von Mulden) zeigt sich, dass nur in direkter Nähe einer Mulde (Schnitt 3) der maximale Wasserstand am stärksten reduziert wird. In diesem Bereich ist eine Reduktion des Wasserstands von 20,5 % (T = 50 a) bis hin zu 87,3 % (T = 5 a) zu beobachten. In Bereichen, die nicht im direkten Einflussbereich einer Mulde liegen, sind die maximalen Wasserstände von Variante 4 und Variante 5 ähnlich bis identisch. Die maximale Abweichung zwischen den Wasserständen beträgt 1,5 cm (6,9 %).

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich auch in Göttingen Nikolausberg. Die Lage der Profilschnitte ist in Abbildung 8.2 dargestellt.



Abbildung 8.2: Lage der Profilschnitte in Göttingen Nikolausberg.

In Abbildung 8.2 sind die Profilschnitte in Gelb, die Modellgrenze in Rot und die Grenze des Detailgebiets in Violett gekennzeichnet. Der erste Profilschnitt (Schnitt 1) liegt südwestlich im Detailgebiet auf der Zufahrtsstraße von Nikolausberg. Dieser Bereich weist bereits bei geringen Niederschlagsintensitäten hohe Wasserstände auf und wurde weiterhin wegen des direkten Einflusses einer in Variante 5 implementierten Mulde gewählt. Zudem liegt dieser Profilschnitt unterhalb des Ortskerns von Nikolausberg, sodass die Einflüsse der Topografie berücksichtigt werden. Der zweite Profilschnitt (Schnitt 2) liegt mittig innerhalb des Wohngebiets Nikolausberg auf einer Hauptverkehrsstraße und erfährt auch einen direkten Einfluss der GI. Im Rahmen der vierten Variante werden die Fußgängerwege entlang der Straße als Rasengittersteine modelliert. Zusätzlich werden in der fünften Variante Mulden entlang der Straße implementiert. Ähnlich dazu verhält es sich mit dem dritten Profilschnitt (Schnitt 3) im Nordosten Nikolausbergs, der sich auf einer Wohnstraße befindet. Ab Variante 3 liegt Schnitt 3 in direktem Kontakt mit Elementen der GI, da nun Rasengittersteine auf den Auffahrten implementiert wurden.

Die einzelnen Varianten in Göttingen Nikolausberg weisen ähnliche Ergebnisse wie in Hannover Oberricklingen auf. Im Vergleich zum Ausgangszustand (Variante 0) werden die maximalen Wasserstände durch die Implementierung der Gründächer in Variante 1 und Variante 2 nur vernachlässigbar gering beeinflusst. Bei Modellregen geringer Wiederkehrzeit tritt der maximale Wasserstand lediglich verzögert, aber kaum bis nicht abgemindert auf. Die maximalen Wasserstände werden lediglich um wenige Millimeter verringert bzw. sie treten ebenfalls bei einzelnen Modellregen verzögert auf. Diese vernachlässigbaren Änderungen der ersten beiden Varianten lassen sich zum einen auf den geringen Anteil an GI im Verhältnis zur befestigten Fläche und zum anderen auf das vorhandene Geländegefälle zurückführen. So werden in der ersten Variante lediglich 2,79 % der befestigten Fläche (vgl. Tabelle 7.7) und innerhalb der zweiten Variante 8,44 % der befestigten Fläche (vgl. Tabelle 7.9) durch Gründächer ersetzt. Diese Dachflächen sind durch

die Gründächer modelltechnisch nicht mehr an das Kanalnetz angeschlossen, sodass nach Erreichen des Retentionsvermögens der Gründächer der generierte Abfluss direkt auf die Geländeoberfläche geleitet wird und bei flachem Gelände wie in Hannover Oberricklingen dort verbleibt. In Nikolausberg hingegen ist ein Geländegefälle vorhanden. Der von den Dachflächen erzeugte Abfluss verbleibt hier nicht auf den Flächen im Bereich der Gebäude, sondern fließt dem Geländegefälle folgend auf der Oberfläche. Wie auch in Hannover wird durch Variante 3 der maximale Wasserstand nicht ($T = 50, 100$ a) oder vernachlässigbar gering reduziert, und zwar unabhängig von der Lage des Profilschnitts.

Erst mit einer zusätzlichen großflächigen Implementierung der Rasengittersteine (Variante 4, vgl. Kapitel 7.4.5) ist eine nennenswerte Reduzierung der maximalen Wasserstände zu beobachten. Allerdings lässt sich diese Aussage nur für die Profilschnitte mit direktem Einfluss der Rasengittersteine (Schnitt 2 und Schnitt 3) treffen. So wird zum Beispiel der maximale Wasserstand bei einem Modellregen der Wiederkehrzeit $T = 30$ a im dritten Schnitt um 8,9 % (entspricht ca. 2 cm) und im Schnitt 2 um 21,8 % (4 cm) reduziert. Im Gegensatz dazu wird der maximale Wasserstand bei Schnitt 1 lediglich um 0,9 % bzw. 2 mm verringert. Selbst bei einem außergewöhnlichen Starkregen ($T = 100$ a) wird innerhalb dieser Untersuchung der maximale Wasserstand um 10,4 % (Schnitt 2) und 4,5 % (Schnitt 3) reduziert. Im Rahmen der Variante 5 werden die maximalen Wasserstände bei jedem Profilschnitt und selbst bei großen Wiederkehrzeiten reduziert. Allerdings gilt es zu beachten, dass der Wasserstand auf der Oberfläche zur Vergleichbarkeit im Bereich der Mulden auf null Meter gesetzt wurde. Aus diesem Grund ist im direkten Einflussbereich einer Mulde kein Wasser auf der Oberfläche festzustellen. Dennoch wird z. B. bei dem Modellregen der Wiederkehrzeit $T = 30$ a der maximale Wasserstand im Mittel bei den Schnitten 2 und 3 um 37 %, das entspricht einer Höhe von 7 cm, gesenkt werden. Im ersten Schnitt allerdings wird der Wasserstand lediglich um 11,5 % (2,5 cm) gesenkt. Selbst bei einem Modellregen der Wiederkehrzeit $T = 100$ a kann der Wasserstand im Mittel um 4 cm (Schnitt 2, 3) bzw. um 2,5 cm (Schnitt 1) reduziert werden. So wird deutlich, dass durch die Implementierung der Mulden, die maximalen Wasserstände lokal reduziert und zudem die maximalen Wasserstände verschoben werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit kann festgehalten werden, dass die Implementierung der GI in allen gewählten Profilschnitten die maximalen Wasserstände reduziert. Dabei ist zu erkennen, je höher der Implementierungsgrad der GI ist, desto niedriger ist der maximale Wasserstand. Dennoch wird deutlich, dass sich die Wirksamkeit der GI bezogen auf die maximalen Wasserstände mit steigender Niederschlagsintensität reduziert. Außerdem ist zu beobachten, dass die Wirksamkeit der Elemente der GI auf den maximalen Wasserstand zunimmt, je näher diese an dem jeweiligen Betrachtungspunkt liegen. Aufgrund der veränderten Oberflächenrauheit und Infiltrationseigenschaften der GI können lokal die maximalen Wasserstände auf der Geländeoberfläche gesenkt werden. Allerdings ist insbesondere unter Berücksichtigung des Geländegefälles anzumerken, dass erst eine großflächige Implementierung der GI nennenswerte Veränderungen erzielt. Diese umfassen eine Reduzierung des maximalen Wasserstands oder zumindest eine Verlagerung des maximalen Wasserstands. Insbesondere diese Verlagerung wird durch das vorhandene Geländegefälle hervorgerufen und muss bei zukünftigen Baumaßnahmen berücksichtigt werden. Eine signifikante Reduzierung der Gefahr, die von maximalen Wasserständen ausgehen, erfolgt lediglich lokal mit Implementierung der Mulden. Bezogen auf das jeweilig gesamte Untersuchungsgebiet ist allerdings die Reduzierung der Überflutungsgefährdung durch GI als gering zu bewerten.

Eine modelltechnische Umsetzung von Gründächern und der damit verbundenen Abkopplung der Dachflächen vom Kanalnetz erweist sich als nicht zweckmäßig. Ferner gilt es zu hinterfragen,

inwieweit die Implementierung von Mulden lediglich eine lokale Veränderung des maximalen Wasserstands hervorruft. Außerdem ist bei starken Niederschlagsintensitäten zu beobachten, dass die zusätzliche Implementierung von Mulden ebenfalls zu hohen Wasserständen führen kann, obwohl diese zusätzliches Retentionsvermögen bieten.

8.1.2 Überflutungsfläche

Zur Bewertung der Wirksamkeit von Elementen der GI, insbesondere bei extremen Starkregenereignissen, ist die Ausdehnung der Überflutung bzw. des Wasserstands auf der Oberfläche ein wichtiges Kriterium. Um die Überflutungsfläche bei verschiedenen Ereignissen vergleichen zu können, erfolgt die Auswertung der Ergebnisse ab dem in Kapitel 7.5.1 definierten Grenzwasserstand von 0,05 m.

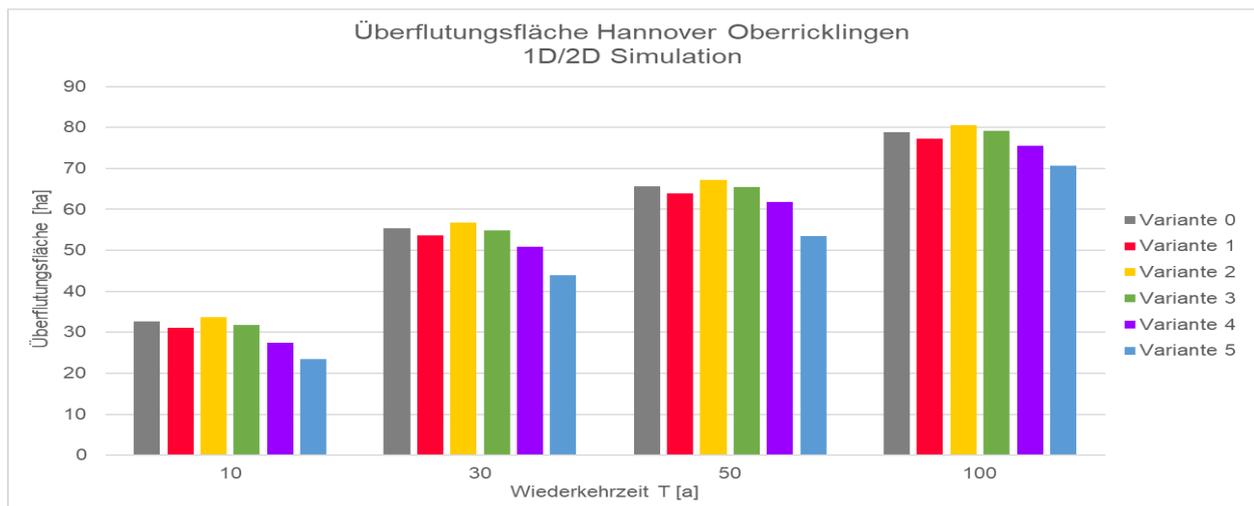


Abbildung 8.3: Überflutungsfläche in Hannover Oberricklingen, gekoppelte 1D/2D Simulation.

Abbildung 8.3 zeigt die Überflutungsfläche [ha] für ausgewählte Modellregen der Wiederkehrzeiten $T = 10, 30, 50, 100$ a für alle modellierten Varianten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Überflutungsfläche erwartungsgemäß mit steigender Wiederkehrzeit des Modellregens zunimmt. Für einen Vergleich der Varianten miteinander bzw. der modellierten Varianten mit dem Ausgangszustand (Variante 0, abgebildet in Grau) ist neben der absoluten Überflutungsfläche [ha] die prozentuale Abweichung der Überflutungsfläche zu Variante 0 zweckmäßig. Diese Abweichungen sind in Abbildung 8.4 für die Modellregen der Wiederkehrzeit $T = 10, 30, 50, 100$ a gegeben.

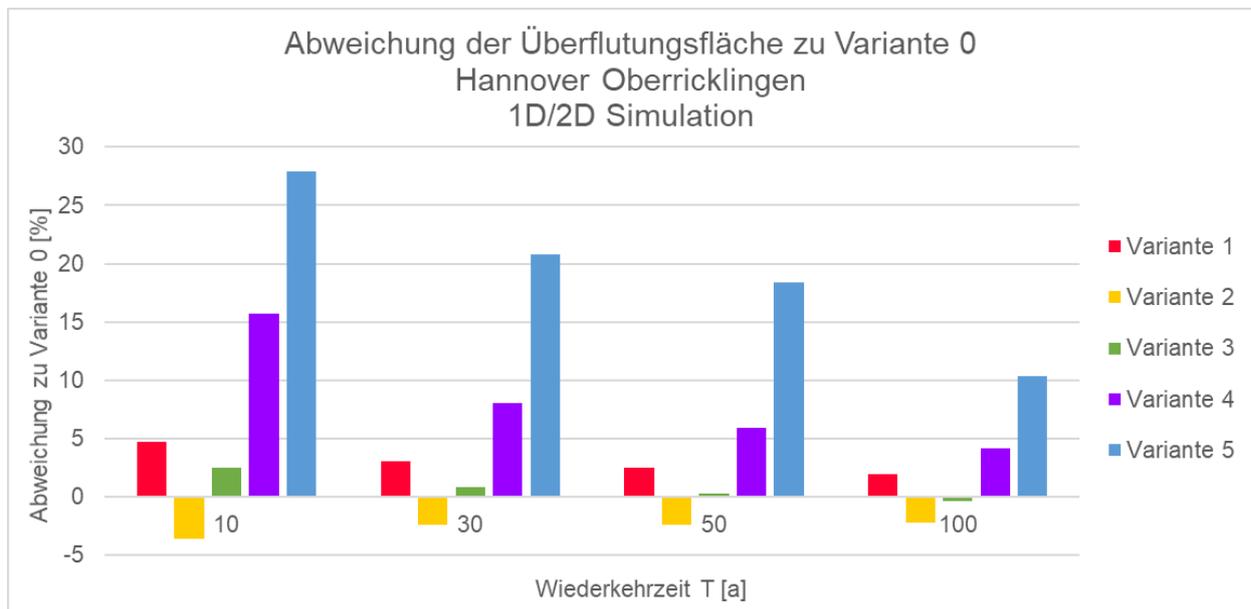


Abbildung 8.4: Prozentuale Abweichung der Überflutungsfläche zu Variante 0, Hannover Oberricklingen 1D/2D Simulation.

Ein positiver Wert der Abweichung beschreibt, dass der Ausgangszustand (Variante 0) eine größere Überflutungsfläche als die jeweilige Vergleichsvariante aufweist. Dementsprechend kennzeichnet ein negativer Wert der Abweichung eine größere Überflutungsfläche der Vergleichsvariante bezogen auf den Ausgangszustand.

Wird zunächst die absolute Überflutungsfläche (Abbildung 8.3) der Variante 0 (Grau) mit Variante 1 (Rot) verglichen, ist zu erkennen, dass die Implementierung der Gründächer die Überflutungsfläche vernachlässigbar gering reduziert (vgl. Abbildung 8.4). Bis zu einem Modellregen der Wiederkehrzeit $T = 50$ a wird die Überflutungsfläche im Mittel um 3,5 % reduziert. Dieser Wert entspricht in etwa dem Anteil befestigter Fläche, der in Variante 1 durch GI ersetzt wurde. Steigt jedoch die Niederschlagsintensität, wird die Überflutungsfläche kaum reduziert. Daraus geht hervor, dass die auf den Garagen implementierten Gründächer bei Modellregen geringer Intensität den Niederschlag effektiver zurückhalten können als bei Modellregen großer Wiederkehrzeiten. Werden jedoch Gründächer zusätzlich auf vorhandenen Flachdächern (Variante 2) implementiert, so ist ein Anstieg der Überflutungsfläche (vgl. Abbildung 8.3, Variante 2 in Gelb dargestellt) bzw. eine negative prozentuale Abweichung (vgl. Abbildung 8.4) zu beobachten. Sowohl die jeweilige Überflutungsfläche als auch die negativen prozentualen Abweichungen zu Variante 0 weisen deutliche Unterschiede zu den verschiedenen Vergleichsvarianten auf. Die modelltechnische Umsetzung der Gründächer auf vorhandene Flachdächer hat zur Folge, dass diese Dachflächen nicht mehr an das Kanalnetz angeschlossen sind und der Niederschlag direkt über die Gründächer abgeleitet wird. Allerdings ist das Retentionsvermögen der Gründächer geringer als die Niederschlagsmenge, sodass ein Großteil des Abflusses dieser Dachflächen auf die Geländeoberfläche geleitet wird und dort verbleibt (vgl. Abbildung 8.5). Abbildung 8.5 zeigt die Differenzkarte zwischen Variante 2 und Variante 0 bei einem Modellregen $T = 50$ a in Hannover Oberricklingen.

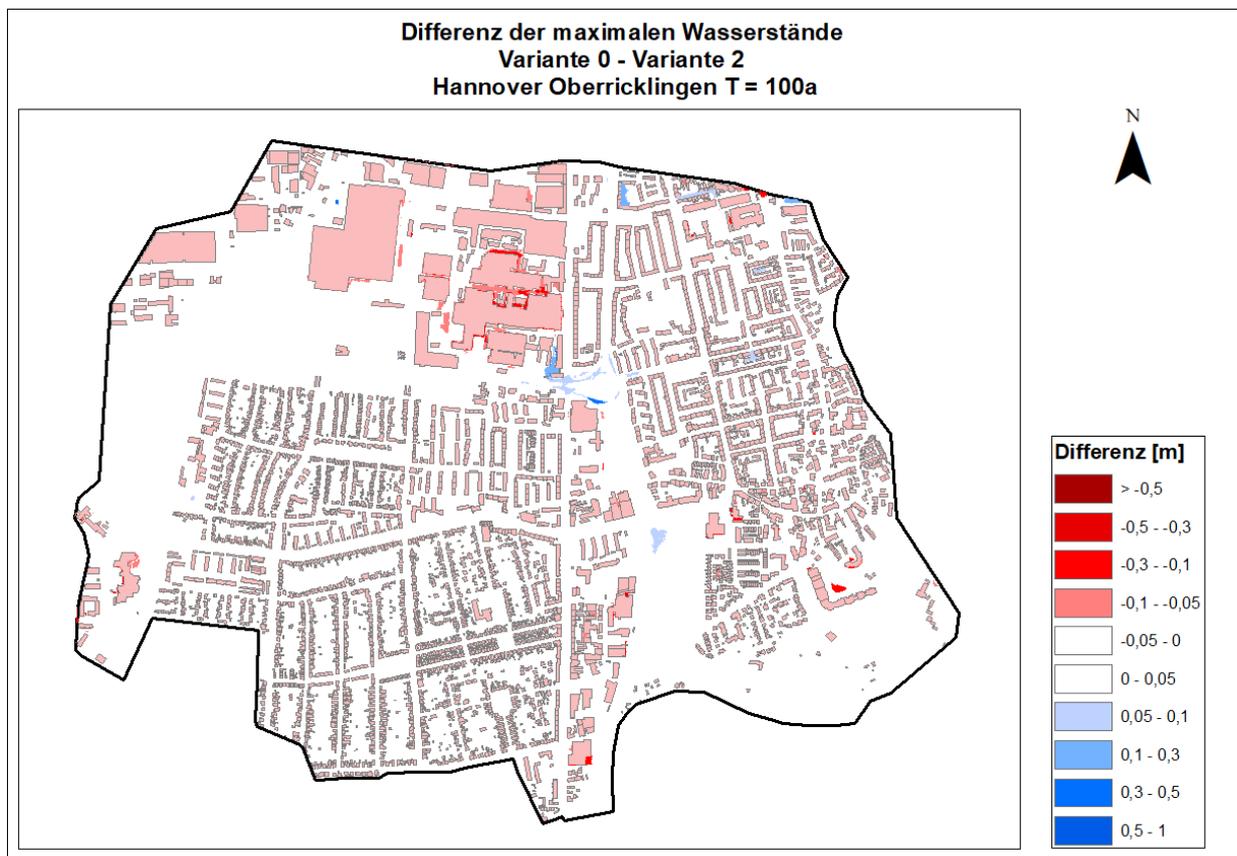


Abbildung 8.5: Differenz der maximalen Wasserstände, Variante 2 zu Variante 0 bei T = 100 a, Hannover Oberricklingen.

Durch die zusätzliche Implementierung von Rasengittersteinen auf allen Auffahrten (Variante 3, dargestellt in Grün) wird ein Anteil des aus Variante 2 generierten Dachabflusses zurückgehalten, sodass die Überflutungsfläche nur geringfügig im Vergleich zu Variante 0 reduziert wird. Ebenfalls ist auch bei dieser Variante der Trend erkennbar, dass mit steigender Wiederkehrzeit eines Modellregens die Wirksamkeit der GI sinkt. Dieser Trend ist ebenfalls übertragbar auf Variante 4 und Variante 5 (vgl. Abbildung 8.3 und Abbildung 8.4).

Im Rahmen der Variante 4 (dargestellt in Violett) wird die Überflutungsfläche bei allen Modellregnen reduziert. Die großflächige Implementierung der Rasengittersteine erhöht das Retentionsvermögen innerhalb des Untersuchungsgebiet, sodass insbesondere bei Modellregnen geringer bis mittlerer Intensität die Überflutungsfläche reduziert wird. Die fünfte Variante und der höchste Implementierungsgrad an GI hat den größten Einfluss auf die Ausdehnung des Wasserstands. Der zusätzliche Retentionsraum der Mulden reduziert die Überflutungsfläche (vgl. Abbildung 8.4, Variante 5 dargestellt in Blau) zwischen 27,93 % (T = 10 a) bis zu 10,39 % (T = 100 a).

Ähnliche Ergebnisse sind auch in dem Untersuchungsgebiet Göttingen Nikolausberg zu beobachten. Die Auswertung der Überflutungsfläche erfolgt in Göttingen Nikolausberg in dem bebauten Ortskern von Nikolausberg (Detailgebiet, vgl. Kapitel 6.2). Nur hier wird GI implementiert.

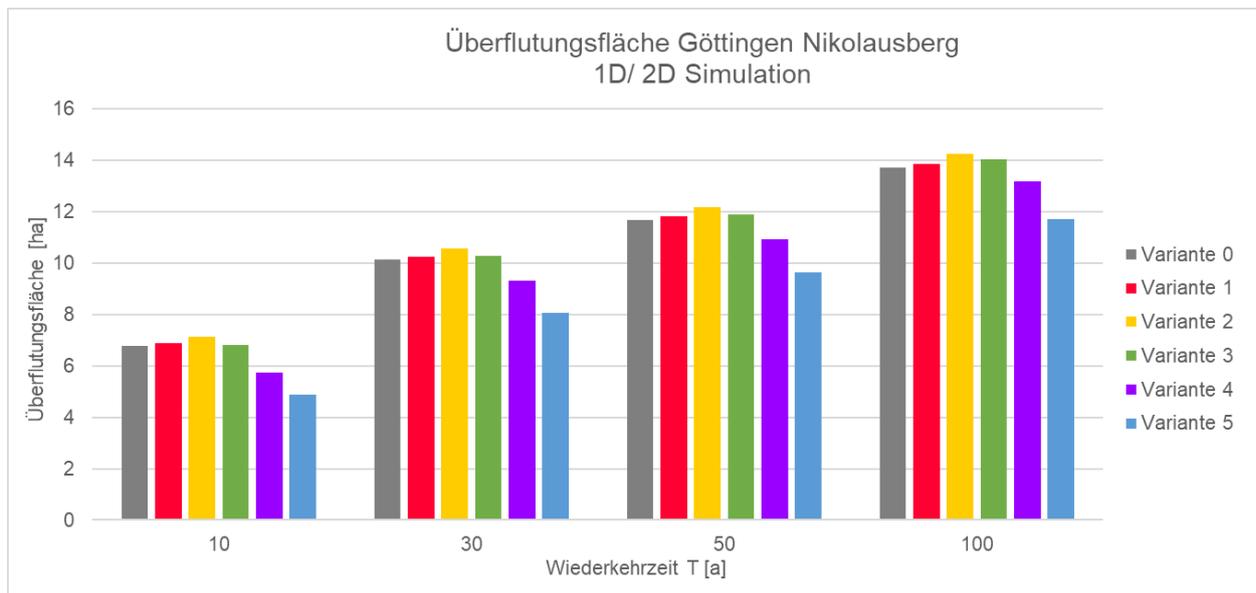


Abbildung 8.6: Überflutungsfläche in Göttingen Nikolausberg, 1D/2D Simulation.

Abbildung 8.6 zeigt die Überflutungsfläche [ha] über die Wiederkehrzeit T [a] aller Varianten für den bebauten Ortskern von Göttingen Nikolausberg, (Detailgebiet, vgl. Kapitel 6.2). Aus den Ergebnissen geht hervor, dass erwartungsgemäß mit steigender Wiederkehrzeit die Überflutungsfläche bei allen Varianten zunimmt.

Im Vergleich der verschiedenen Varianten miteinander bzw. zu Variante 0 (Grau) wird deutlich, dass bis einschließlich Variante 3 (Grün) die Überflutungsfläche vernachlässigbar gering durch GI beeinflusst wird. Wie bereits die Ergebnisse aus Hannover Oberricklingen zeigten, wird auch in Göttingen Nikolausberg deutlich, dass die Implementierung der Gründächer und damit die Abkopplung dieser Dachflächen vom Kanalnetz eine geringfügige Zunahme der Überflutungsfläche verursachen. Dieser generierte Dachabfluss wird in Variante 3 durch die zusätzlichen Rasengittersteine zurückgehalten. Wie auch in Oberricklingen wird erst ab Variante 4 (Violett, vgl. Abbildung 8.6) die Überflutungsfläche reduziert. Ebenfalls ist hier zu erkennen, dass mit steigender Niederschlagsintensität, die Wirksamkeit der GI sinkt. So kann in Variante 4 die Überflutungsfläche bei dem Modellregen T = 10 a um 15,28 % und bei dem Modellregen T = 100 a nur um 4,02 % reduziert werden.

Durch die zusätzliche Implementierung der Mulden in Variante 5 (Blau) wird im Untersuchungsgebiet ein zusätzlicher Retentionsraum geschaffen, welcher bei allen Modellregen die Überflutungsfläche reduziert. Je nach Modellregen erfolgt eine Verringerung der Überflutungsfläche um 28,34 % (T = 10 a) und 14,66 % (T = 100 a). Die zusätzliche Implementierung der Mulden hält dementsprechend einen großen Anteil des Oberflächenabflusses zurück und kann die Überflutungsfläche reduzieren.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Elemente der GI die Überflutungsfläche reduzieren können. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei steigendem Implementierungsgrad die Überflutungsfläche effektiver reduziert wird. Allerdings wird ebenfalls deutlich, dass die Wirksamkeit der GI mit zunehmender Intensität und Wiederkehrzeit der Modellregen abnimmt. Übersteigt die Niederschlagsintensität das Infiltrationsvermögen der GI, so wird lediglich ein geringer Teil des Oberflächenabflusses teilweise durch die erhöhten Muldenverluste und Oberflächenrauheiten zurückgehalten. Zudem geht aus den Ergebnissen hervor, dass die modelltechnische Umsetzung der Gründächer, wie sie im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde, die

Überflutungsfläche negativ beeinflusst. Eine detaillierte Modellierung ist an dieser Stelle notwendig, um genau abbilden zu können, in welchem Umfang Gründächer die Überflutungsfläche reduzieren können. Zudem ergibt die Implementierung der Rasengittersteine auf den Auffahrten keine Reduzierung der Überflutungsfläche. Erst die großflächige Implementierung der GI in Variante 4 führt bei Modellregen geringer bis mittlerer Intensität zu einer signifikanten Reduzierung der Überflutungsfläche. Bei Modellregen geringerer Intensität können versickerungsfähige Straßenbeläge den gefallen Niederschlag durch Versickerung in den Untergrund ableiten. Hier wird das Infiltrationsvermögen dieser Straßenbeläge noch nicht überschritten. Steigt jedoch die Niederschlagsintensität, so ist keine Versickerung in den Untergrund mehr möglich und diese Flächen werden überströmt. Dabei ist insbesondere das Geländegefälle in Nikolausberg zu berücksichtigen. Bei Bereichen, die niedriger als die Umgebung oder in Senken liegen und bedingt durch die Topografie einen erhöhten Oberflächenabfluss durch Gebiete oberhalb erfahren, ist die Leistungsfähigkeit der Rasengittersteine stark eingeschränkt. Der zusätzliche Oberflächenabfluss von topografisch höher gelegenen Bereichen führt unterhalb zu einer verstärkten Überflutung.

In Anlage A.11 ist zusätzlich das Ereignis vom Juli 2014 in Münster mit 285 mm Niederschlag für Hannover Oberricklingen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass GI für ein Ereignis dieser Intensität nicht mehr wirksam ist.

8.1.3 Fließgeschwindigkeit

Die Auswertung der maximalen Fließgeschwindigkeiten erfolgt ebenfalls an den in Hannover Oberricklingen (vgl. Abbildung 8.1) und Göttingen Nikolausberg (vgl. Abbildung 8.2) ausgewählten Profilschnitten. Die Betrachtung der maximalen Fließgeschwindigkeiten ist daher lediglich zur Vollständigkeit aufgeführt.

Zur Analyse der Ergebnisse werden jeweils die maximalen Fließgeschwindigkeiten der Varianten mit GI mit dem Ausgangszustand verglichen. Exemplarisch ist in Abbildung 8.7 für Profilschnitt 3 in Hannover Oberricklingen die Fließgeschwindigkeit über die Wiederkehrzeit T [a] für jede Variante dargestellt.

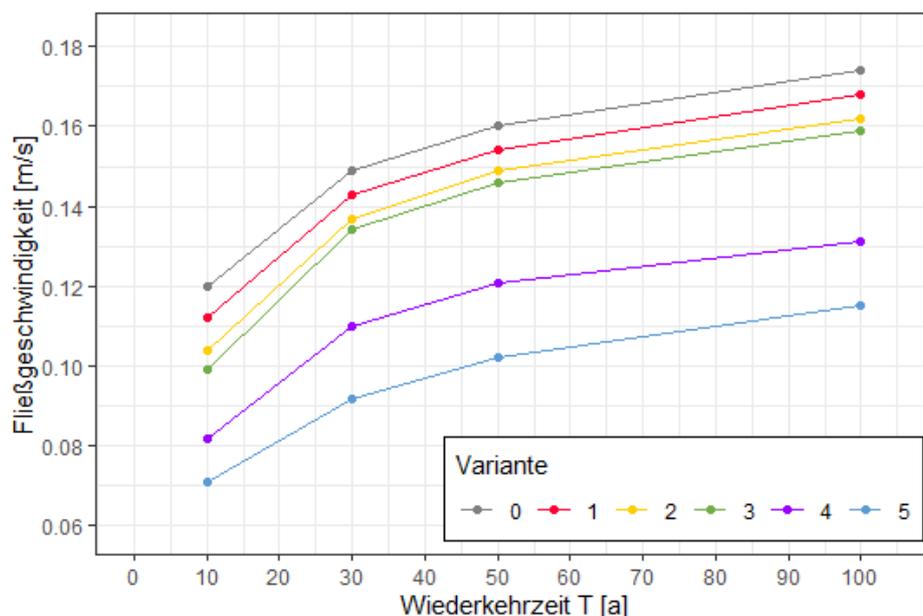


Abbildung 8.7: Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Grüner Infrastruktur, Hannover Oberricklingen Schnitt 3, gekoppelte 1D/2D Simulation.

Aus Abbildung 8.7 geht hervor, dass die Varianten 1 (Rot), 2 (Gelb) und 3 (Grün) die maximale Fließgeschwindigkeit auf der Geländeoberfläche im Vergleich zu Variante 0 (Grau) nur geringfügig reduzieren.

Wie bereits die Ergebnisse der maximalen Wasserstände zeigen (vgl. Kapitel 8.1.1), ist der Einfluss der Gründächer (Varianten 1 und 2) und der Rasengittersteine auf den Auffahrten (Variante 3) an den gewählten Profilschnitten gering. Diese Beobachtung ist übertragbar auf die Fließgeschwindigkeiten. Die gewählten Profilschnitte liegen auf Straßenflächen, sodass kein direkter Einfluss der implementierten GI vorhanden ist. Die erhöhte Oberflächenrauheit der GI führt lokal zu einer Absenkung der Fließgeschwindigkeit. Allerdings ist der Flächenanteil der GI im gesamten Gebiet innerhalb der ersten drei Varianten gering, sodass nur ein geringer Anteil der Oberfläche verändert wird und dementsprechend nur eine geringe Reduzierung der Fließgeschwindigkeit an der Oberfläche zu beobachten ist. Erst die großflächigere Implementierung der zusätzlichen Rasengittersteine der Variante 4 (Violett) reduziert exemplarisch an Schnitt 3 die Fließgeschwindigkeit im Mittel um 25 %. Schnitt 3 liegt in einer Straße innerhalb einer Wohnbebauung, sodass dort lokal ein großer Flächenanteil durch Rasengittersteine umgesetzt werden konnte. Infolge der erhöhten Oberflächenrauheit erfolgt eine Reduzierung der Fließgeschwindigkeit im Vergleich zu Variante 0. Selbst bei Modellregen größerer Wiederkehrzeiten kann die Fließgeschwindigkeit um 25 % reduziert werden. Die zusätzliche Implementierung der Mulden in Variante 5 (Blau) weist im Vergleich die geringsten Fließgeschwindigkeiten auf. Im Vergleich zu Variante 0 können die Fließgeschwindigkeiten im Mittel in Schnitt 3 um 35 % reduziert werden (vgl. Abbildung 8.7). Aufgrund des hohen Retentionsvermögens der Mulden kann ein großer Anteil des Oberflächenabflusses zurückgehalten werden (vgl. Kapitel 8.1.2), sodass im Allgemeinen ein geringerer Anteil des Abflusses über die Oberfläche strömt. Zudem erfolgt durch die Implementierung der Mulden ebenfalls eine Erhöhung der Oberflächenrauheit und Verluste, sodass insbesondere bei Modellregen kleinerer Wiederkehrzeiten die Fließgeschwindigkeiten geringer sind.

Im Allgemeinen sind diese Ergebnisse auf die weiteren Profilschnitte in Hannover Oberricklingen übertragbar. Allerdings ist zu beobachten, dass die Reduzierung der Fließgeschwindigkeit insbesondere durch Variante 4 und Variante 5 in Schnitt 1 und Schnitt 2 geringer ist. Aufgrund der Lage der Profilschnitte besteht kein direkter Kontakt zu den implementierten Elementen. Infolgedessen ist der direkte Einfluss der GI geringer, sodass auch die Fließgeschwindigkeiten in diesen Bereichen im Mittel um 10 % höher sind als in Schnitt 3.

Der Einfluss der GI in Göttingen Nikolausberg auf die maximalen Fließgeschwindigkeiten ist an den ausgewählten Punkten ebenfalls gering. Exemplarisch ist in Abbildung 8.8 für Schnitt 1 im Südwesten Nikolausbergs die maximale Fließgeschwindigkeit [m/s] über die Wiederkehrzeit T [a] ausgewählter Modellregen für jede Variante dargestellt.

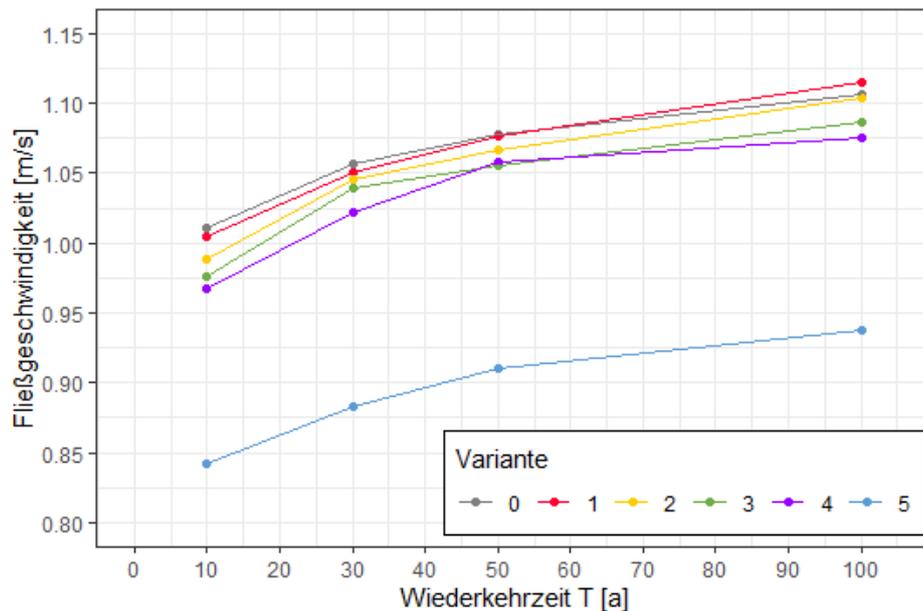


Abbildung 8.8: Maximale Fließgeschwindigkeiten, Göttingen Nikolausberg Schnitt 1, 1D/2D Simulation.

Der abgebildete Profilschnitt 1 in Nikolausberg weist insgesamt sehr hohe Fließgeschwindigkeiten auf. Diese begründen sich in der Lage des Profilschnitts. Schnitt 1 liegt auf der Zufahrtsstraße im Südwesten Nikolausbergs, welche unterhalb des eigentlichen Ortskerns liegt. Aufgrund der Topografie, sind insbesondere in diesem Bereich die Fließgeschwindigkeiten höher. Allerdings geht aus den Ergebnissen hervor, dass bis einschließlich Variante 4 (Violett) die maximalen Fließgeschwindigkeiten im Vergleich zu Variante 0 (Grau) vernachlässigbar gering reduziert werden. Im Mittel wird die maximale Fließgeschwindigkeit durch Variante 1 (Rot) um 0,2 %, durch Variante 2 (Gelb) um 1,2 %, durch Variante 3 (Grün) um 2,5 % und durch Variante 4 (Violett) um 3,1 % reduziert. Die Zunahme der maximalen Fließgeschwindigkeit um 0,8 % durch Variante 1 bei dem Modellregen $T = 100$ a ist ebenfalls vernachlässigbar gering und begründet sich vermutlich in einer numerischen Abweichung. Erst die Implementierung der Mulden in Variante 5 (Blau) reduziert die maximale Fließgeschwindigkeit im Mittel um 16 % durch die zusätzlichen Retentionsvolumina der Mulden.

Im Rahmen dieser Arbeit kann festgehalten werden, dass bei steigender Niederschlagsintensität die Wirksamkeit der GI sinkt. Gerade bei Mulden zeigt sich, dass sie in ihrem näheren Umfeld die maximale Fließgeschwindigkeit effektiver reduzieren kann. Je höher der Implementierungsgrad an GI ist, desto stärker kann die maximale Fließgeschwindigkeit reduziert werden. Allerdings wird, insbesondere bei den maximalen Fließgeschwindigkeiten, der Einfluss der Topografie deutlich. Aufgrund des Geländegefälles in Göttingen Nikolausberg wird nur ein geringer Anteil des Abflusses im Untersuchungsgebiet durch die GI zurückgehalten. Aus diesem Grund kann die Aussage getroffen werden, dass die Implementierung der GI bei Gebieten mit Geländegefälle erst ab einer großflächigen Implementierung wirksam ist und die maximalen Fließgeschwindigkeiten reduzieren kann.

8.1.4 Kanalnetz

Neben dem Überflutungsgeschehen auf der Oberfläche ist auch der Gesamtabfluss bei einer gekoppelten 1D/2D Simulation zu betrachten. Für Hannover Oberricklingen ist dafür die Reduzierung des Gesamtabflusses im Vergleich zum Ausgangszustand in Abbildung 8.9 gegeben. In Abbildung 8.10 ist der Gesamtabfluss für Göttingen Nikolausberg dargestellt.

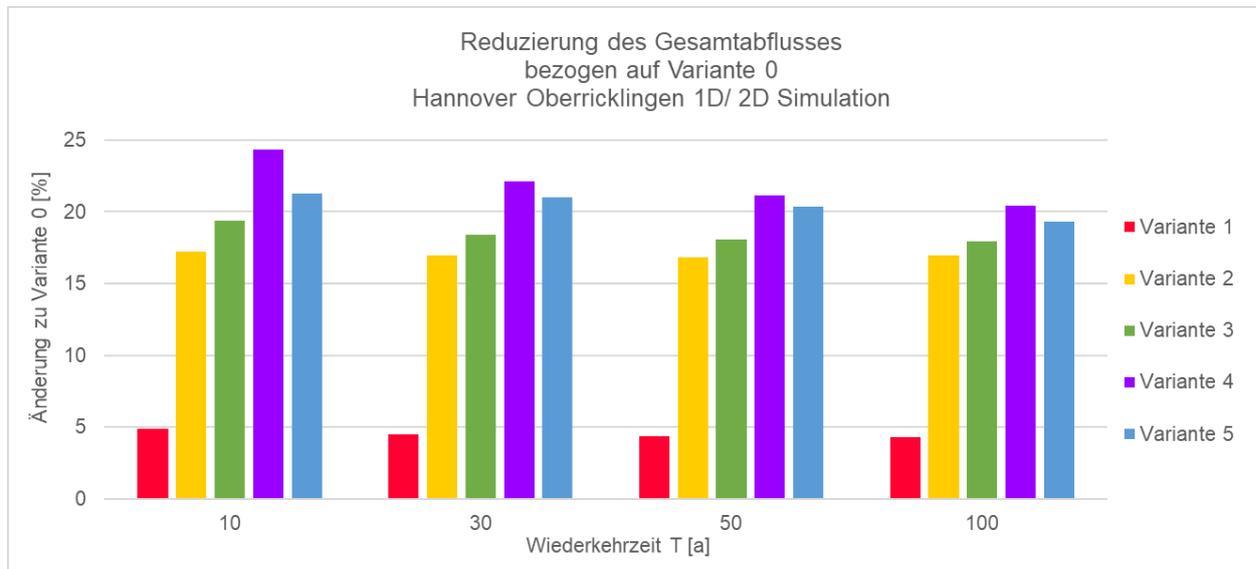


Abbildung 8.9: Reduzierung des Gesamtabflusses bezogen auf Variante 0, Hannover Oberricklingen gekoppelte 1D/2D Simulation.

Abbildung 8.9 zeigt die prozentuale Reduzierung des Gesamtabflusses der jeweiligen Variante bezogen auf Variante 0 über die Wiederkehrzeit T [a] des Modellregens. Die Implementierung der GI reduziert bei allen Varianten den Gesamtabfluss im Kanalnetz verglichen mit dem Ausgangszustand. Der Trend, dass mit steigender Wiederkehrzeit die Wirksamkeit der GI sinkt (vgl. Kapitel 8.1.1), ist ebenfalls auf den Gesamtabfluss übertragbar. Im Gegensatz zu dem Abfluss auf der Oberfläche sind die Auswirkungen der verschiedenen Intensitäten auf das Kanalnetz jedoch deutlich geringer und unterscheiden sich innerhalb der einzelnen Varianten nur um ein bis zwei Prozent. Lediglich bei Variante 4 (Violett) liegt diese Differenz mit vier Prozent zwischen 24,3 % ($T = 10$ a) und 20,4 % ($T = 100$ a) höher. Wie bereits die Ergebnisse der Ausdehnung der Überflutungsfläche zeigten (vgl. Kapitel 8.1.2), wird durch die großflächige Implementierung der GI ein größerer Anteil des Oberflächenabflusses zurückgehalten und somit wird der Zufluss in das Kanalnetz und damit der Gesamtabfluss geringer.

Im Vergleich der verschiedenen Varianten wird zunächst deutlich, dass der Gesamtabfluss durch Variante 1 (Rot) nur geringfügig reduziert wird. Vergleicht man nun Variante 1 mit Variante 2 (Gelb), fällt auf, dass der Gesamtabfluss der Variante 2 im Schnitt bei allen Modellregen ca. 12 % geringer ist als bei Variante 1. Dieser Prozentsatz entspricht in etwa dem Anteil an befestigter Fläche, welcher zwischen Variante 1 und Variante 2 durch GI, hier durch Gründächer, ersetzt wurde (vgl. Tabelle 7.7 und Tabelle 7.9). Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen aus Kapitel 8.1.2, dass nämlich durch die Abkopplung der Dachflächen vom Kanalnetz mehr Wasser auf die Oberfläche gelangt und somit eine größere Überflutungsfläche auf der Oberfläche entsteht. Infolge der größeren Abflussmengen die auf der Oberfläche verbleiben, wird weniger Abfluss in das Kanalnetz eingeleitet. Allerdings ist dieser Zusammenhang zwischen dem Anteil an implementierter GI und Reduzierung des Gesamtabflusses lediglich bei dem Vergleich zwischen

Variante 1 und Variante 2 zu beobachten. Im Vergleich der übrigen Varianten wird deutlich, dass Variante 4 den Gesamtabfluss am stärksten reduziert. Dennoch sinkt die Wirksamkeit mit zunehmender Niederschlagsintensität und nähert sich den Ergebnissen aus Variante 3 (Grün) und Variante 5 (Blau) an (vgl. Abbildung 8.9). Im näheren Vergleich der Varianten 3 und 4 ist zu beobachten, dass die umfassende Implementierung der Rasengittersteine den Gesamtabfluss des Kanalnetzes, insbesondere bei einem Modellregen der Wiederkehrzeit von $T = 10$ a, deutlich reduziert. Hier ist erkennbar, dass mit steigender Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität der versickerungsfähigen Flächen überschritten wird. Daher ist der Rückhalt von Niederschlagswasser bei Starkregenereignissen geringer und die Rasengittersteine werden „überspült“. Dieses Abflussverhalten ist ebenfalls in der Ausdehnung der überfluteten Fläche auf der Geländeoberfläche zu beobachten (vgl. Kapitel 8.1.2). Dementsprechend ist, insbesondere bei versickerungsfähigen Flächen der Zusammenhang zwischen Gesamtabfluss im Kanalnetz und der Ausdehnung der Überflutungsfläche zu beachten (vgl. Kapitel 8.1.2).

Im Gegensatz dazu sind diese Beobachtungen nicht auf Variante 5 übertragbar. Die Reduzierung des Gesamtabflusses durch Variante 5 ist niedriger als bei Variante 4, obwohl dem Niederschlagswasser ein größerer Retentionsraum auf der Geländeoberfläche durch die Mulden zur Verfügung steht. Ist der zusätzliche Retentionsraum der Mulden bereits aufgefüllt, fließt der gefallene Niederschlag über die Oberfläche ab und wird ebenfalls durch Straßenabläufe und Schächte in das Kanalnetz eingeleitet. Insbesondere bei Ereignissen hoher Intensität sind die Mulden schnell aufgefüllt und leiten den verbliebenen Niederschlag an der Oberfläche ab.

Ähnliche Ergebnisse ergeben sich auch für das Untersuchungsgebiet Göttingen Nikolausberg.

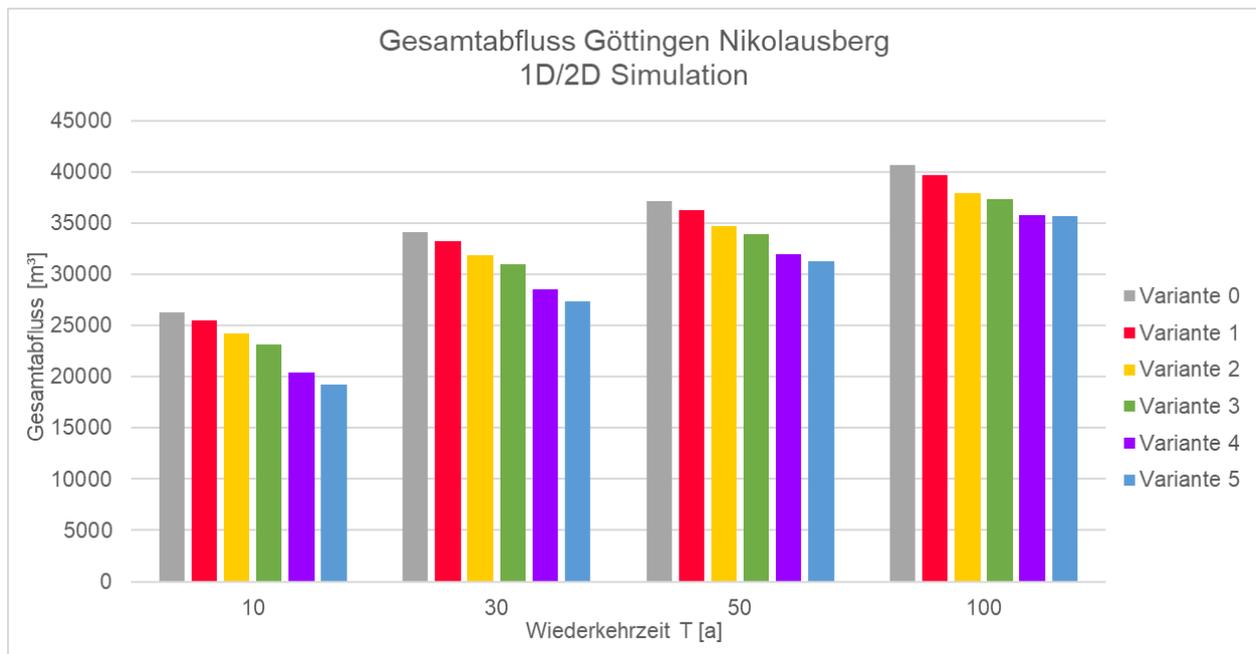


Abbildung 8.10: Gesamtabfluss in Göttingen Nikolausberg.

In Abbildung 8.10 ist der Gesamtabfluss im Kanalnetz [m³] über ausgewählte Modellregen der Wiederkehrzeiten $T = 10, 30, 50, 100$ a für alle berechneten Varianten in Göttingen Nikolausberg dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass erwartungsgemäß mit steigender Wiederkehrzeit der Modellregen zum einen der Gesamtabfluss im Kanalnetz zunimmt und zum anderen die Wirksamkeit der GI auch in Bezug auf den Gesamtabfluss abnimmt. Dennoch lässt der höhere Implementierungsgrad an GI einen geringeren Gesamtabfluss erwarten.

Wie bereits die Ergebnisse aus den Kapitel 8.1.1 und Kapitel 8.1.2 sowie die Auswertung des Kanalnetzes in Hannover Oberricklingen gezeigt haben, wird auch hier deutlich, dass die Implementierung von Gründächern auf Garagen (Variante 1, Rot) nur eine sehr geringe Wirksamkeit zeigt. Der Gesamtabfluss wird durch Variante 1 im Mittel um 2,5 % reduziert im Vergleich zu Variante 0 (Grau). Dieser Prozentanteil entspricht in etwa dem Anteil an befestigter Fläche, welcher durch GI, hier Gründächer, ersetzt wurde. Die zusätzliche Implementierung der Gründächer auf vorhandenen Flachdächern (Variante 2, Gelb) reduziert den Gesamtabfluss im Vergleich zu Variante 0 zwischen 7,79 % (T = 10 a) und 6,12 % (T = 100 a) (vgl. Abbildung 8.10). Wie in Hannover Oberricklingen zeigt auch hier der Vergleich von Variante 1 mit Variante 2, dass die Differenz, um die der Gesamtabfluss reduziert wird, in etwa dem Prozentsatz an befestigter Fläche entspricht, der durch GI ersetzt wurde. Dieser Zusammenhang zwischen dem Anteil an implementierter GI und Reduzierung des Gesamtabflusses ist lediglich bei dem Vergleich zwischen der Varianten 1 und 2 zu beobachten.

Betrachtet man nun die zusätzliche Implementierung der Rasengittersteine durch Variante 3 (vgl. Abbildung 8.10, Grün) und Variante 4 (Violett), wird deutlich, je mehr Fläche durch GI umgesetzt wird, desto eher wird der Gesamtabfluss reduziert. Im Rahmen der dritten Variante werden 14,85 % und innerhalb der vierten Variante werden 72,88 % der befestigten Fläche durch GI ersetzt (vgl. Kapitel 7.4.4 und Kapitel 7.4.5). So wird bei Variante 3 der Gesamtabfluss im Vergleich zu Variante 0 zwischen 11,72 % (T = 10 a) und 8,17% (T = 100 a) reduziert und bei Variante 4 zwischen 22,31 % (T = 10 a) und 11,92 % (T = 100 a). Bei Betrachtung des Zusammenhangs zwischen dem Flächenanteil an GI und Reduzierung des Gesamtabflusses im Kanalnetz wird auch deutlich, dass der Gesamtabfluss im Verhältnis zum umgesetzten Flächenanteil wesentlich geringer reduziert wird. Als Grund dafür lässt sich das vorhandene Geländegefälle benennen. Das Niederschlagswasser wird bei Rasengittersteinen durch Infiltration in den Untergrund abgegeben. Durch das vorhandene Gefälle ist der Anteil des Niederschlags, der auf den Rasengittersteinen verbleibt und nicht auf der Oberfläche abfließt, geringer, sodass weniger Niederschlag in den Untergrund geleitet wird. Dadurch entsteht ein höherer Oberflächenabfluss, welcher durch Straßenabläufe und Schächte in das Kanalnetz eingeleitet wird.

Der Vergleich der Variante 5 (Blau) mit der Variante 0 zeigt, dass der Gesamtabfluss zwar zwischen 26,72 % (T = 10 a) und 12,27 % (T = 100 a) reduziert wird, dieser Anteil aber im Vergleich zu Variante 4, insbesondere bei Modellregen großer Wiederkehrzeiten, gering ist. Das bedeutet, dass die zusätzlich implementierten Mulden der Variante 5 den Gesamtabfluss im Kanalnetz auch in Göttingen Nikolausberg nur gering beeinflussen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch die Implementierung der GI je nach Implementierungsgrad der Gesamtabfluss im Vergleich zur Variante 0 verringert wird. Dabei ist hervorzuheben, dass eine großflächige Implementierung der Rasengittersteine wie in Variante 4 den Gesamtabfluss bezogen auf der Kanalnetz am stärksten reduzieren kann. Eine zusätzliche Implementierung der Mulden wirkt sich in Hannover Oberricklingen hingegen negativ auf den Gesamtabfluss im Vergleich zu Variante 4 aus. Es ist jedoch hervorzuheben, dass zwar der Gesamtabfluss geringer wird, die Überflutungsfläche auf der Oberfläche bis einschließlich Variante 3 aber nicht (vgl. Kapitel 8.1.2).

8.1.5 Vergleich Oberricklingen und Nikolausberg

Um beurteilen zu können, welchen Einfluss die Topografie eines Untersuchungsgebiets auf die Wirksamkeit der GI hat, wurden die Untersuchungsgebiete Hannover Oberricklingen und Göttingen Nikolausberg ausgewählt. Die Untersuchungsgebiete unterscheiden sich zusätzlich in ihrer Bebauungsstruktur. Nikolausberg zeichnet sich durch freistehende Wohnhäuser und eine ruhige Verkehrslage aus, Industrie- Gewerbegebiete gibt es nicht. In Oberricklingen hingegen sind stark befahrene Straßen und Industrie- und Gewerbegebiete vorhanden. Daher ist der Implementierungsgrad an GI in den Untersuchungsgebieten verschieden (vgl. Kapitel 7.4.7). Für den Vergleich der Untersuchungsgebiete wird ebenfalls das Detailgebiet in Nikolausberg (vgl. Kapitel 6.2) betrachtet, sodass der Befestigungsgrad beider Gebiete ohne GI bei ca. 51,2 % liegt.

Exemplarisch wird für den Vergleich der Untersuchungsgebiete und damit für den Einfluss der Topografie Variante 5 dargestellt. Im Rahmen der fünften Variante wird je nach Untersuchungsgebiet ein unterschiedlicher Flächenanteil an GI implementiert. In Oberricklingen werden 37 % und im Detailgebiet in Nikolausberg werden 60 % der befestigten Fläche durch Elemente der GI ersetzt.

Die Reduzierung der Überflutungsfläche von Variante 5 zu Variante 0 ist über die Wiederkehrzeit T [a] für beide Untersuchungsgebiete in Abbildung 8.11 dargestellt.

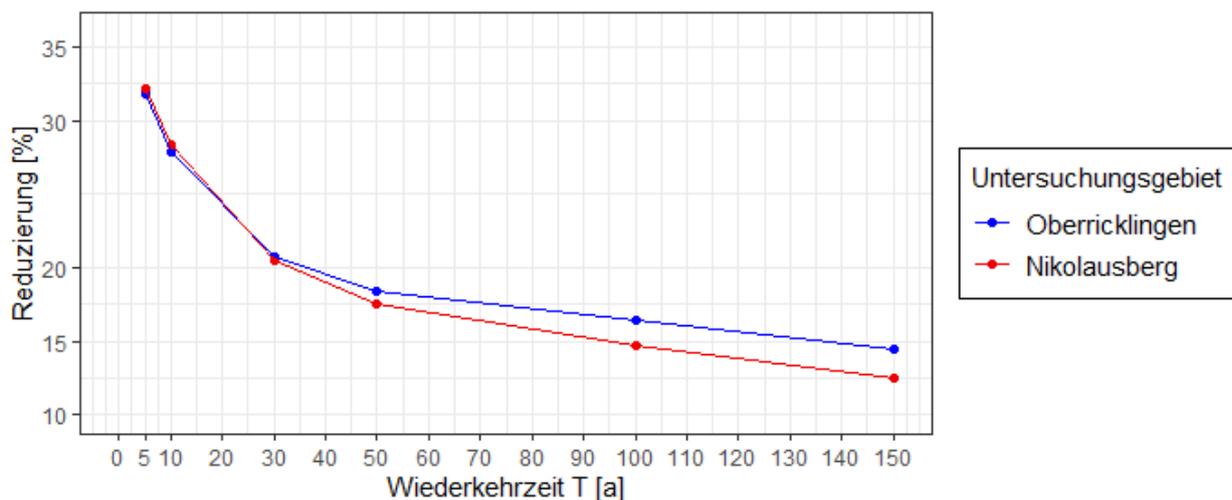


Abbildung 8.11: Reduzierung der Überflutungsflächen, Vergleich Hannover Oberricklingen und Göttingen Nikolausberg.

Obwohl in Göttingen Nikolausberg (dargestellt in Rot) ein deutlich höherer Anteil an GI implementiert ist, wird die Überflutungsfläche im Vergleich zu Hannover (dargestellt in Blau) jedoch im gleichen Maße reduziert. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der Topografie ein größerer Anteil an GI notwendig ist, um eine vergleichbare Reduzierung der Überflutungsfläche zu erhalten. Aufgrund des Gefälles ist, insbesondere die Leistungsfähigkeit von versickerungsfähigen Elementen, in dieser Arbeit Rasengittersteine, reduziert. Bei flachen Gebieten verbleibt der Niederschlag auf der Oberfläche und kann durch Infiltration der Rasengittersteine in den Untergrund abgeleitet werden. Bei Gebieten mit Gefälle hingegen verbleibt nur ein geringer Anteil des gefallenen Niederschlags am Ort der Abflussbildung und wird dort in den Untergrund abgeleitet. Der restliche Anteil strömt als Oberflächenabfluss entsprechend dem Gefälle ab und kann sich in Senken oder an Gebäuden anstauen, sodass die Überflutungsfläche erhöht wird.

Die maximalen Wasserstände der Untersuchungsgebiete werden nicht im gleichen Maß reduziert, da in Nikolausberg diese topografiebedingt bereits sehr gering sind. Allerdings wird deutlich, dass in Oberricklingen die GI einen stärkeren Einfluss auf die maximalen Wasserstände hat. In beiden Untersuchungsgebieten tritt zudem der lokale Einfluss der Mulden zutage. Ein Vergleich der Wirksamkeit bezogen auf die maximale Fließgeschwindigkeit ist auf Grund der unterschiedlichen Topografie an dieser Stelle nicht zweckmäßig.

Für diese Arbeit ist festzuhalten, dass die Topografie einen signifikanten Einfluss auf die Wirksamkeit der GI hat. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass ein größerer Anteil an GI notwendig ist, um in steileren Gebieten die Überflutungsfläche zu reduzieren.

8.2 Auswertung der reinen 2D Simulation

Zur Abschätzung, ob und inwieweit eine gekoppelte 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflusssimulation notwendig ist, werden ebenfalls 2D Oberflächenabflusssimulationen ohne Berücksichtigung des Kanalnetzes für die verschiedenen Varianten und Modellregen durchgeführt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der 2D Oberflächenabflusssimulationen sowohl für Hannover Oberricklingen (vgl. Kapitel 8.2.1) als auch für Göttingen Nikolausberg (vgl. Kapitel 8.2.2) dargestellt und erläutert.

8.2.1 Hannover Oberricklingen

Die Ergebnisse der maximalen Wasserstände der reinen 2D Simulation von Hannover Oberricklingen sind in Abbildung 8.12 gegeben. Dargestellt sind die Überflutungsflächen [ha] über die Wiederkehrzeit T [a] für ausgewählte Modellregen und für alle Varianten. Als Referenzzustand für den Vergleich wird wie bereits in dem Kapitel 8.1 auch die Variante 0 (dargestellt in Grau) gewählt.

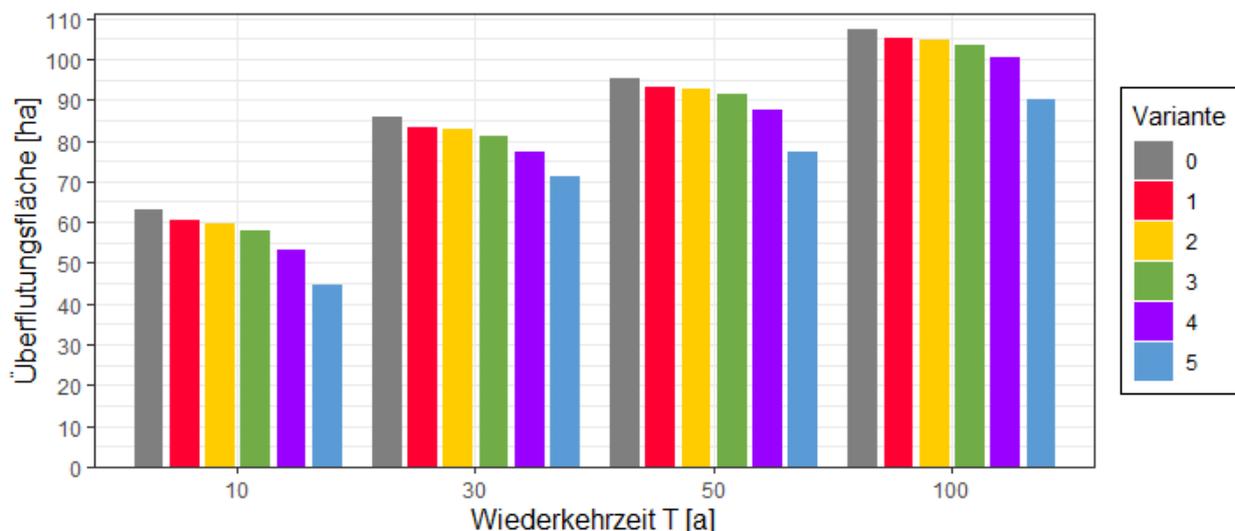


Abbildung 8.12: Überflutungsfläche Hannover Oberricklingen, reine 2D Simulation.

Die Ergebnisse zeigen, dass bis einschließlich Variante 3 (Grün) die Veränderung der Überflutungsfläche vernachlässigbar gering ist. Die Implementierung der Gründächer reduziert je nach Implementierungsgrad diese Flächen im Mittel um 2,7 % bei Variante 1 (dargestellt in Rot) bzw. um 3,6 % bei Variante 2 (Gelb). Die Zusätzliche Implementierung der Rasengittersteine in Variante 3 (Grün) reduziert die Überflutungsfläche im Mittel um ca. 6 %. Erst die großflächige

Implementierung der Rasengittersteine in Variante 4 (Violett) kann, insbesondere bei kleinen bis mittleren Intensitäten, die Überflutungsfläche merklich reduzieren. Im Vergleich zum Ausgangszustand wird die Überflutungsfläche bei einem Modellregen $T = 10$ a um 15,5 % und im Mittel um 10 % vermindert. Allerdings wird an dieser Stelle wie auch in Kapitel 8.1.2 deutlich, dass erst durch den höchsten Implementierungsgrad an GI auch bei einer reinen 2D Simulation die Überflutungsfläche signifikant reduziert wird. Im Mittel liegt dieser Wert bei einer Verringerung der Fläche um 20 %. Bei allen Varianten wird jedoch deutlich, dass mit zunehmender Intensität die Wirksamkeit GI bezogen auf die Reduzierung der Überflutungsfläche sinkt. Die Dimensionierung von Entwässerungssystemen erfolgt mit Modellregen der Wiederkehrzeit $T = 3$ a – 5 a, sodass diese schadlos abgeführt werden können. Bei einer reinen 2D Simulation hingegen wird das Kanalnetz nicht berücksichtigt, sodass lediglich die Infiltration, die Oberflächenrauheit und die Benetzungs- und Muldenverluste die Ausdehnung der überfluteten Fläche reduzieren können. Daher wird die Überflutungsfläche erst durch die großflächige Implementierung der GI (Variante 4) bzw. durch das Schaffen eines zusätzlichen Retentionsraums mit den Mulden (Variante 5) merklich reduziert. Mit steigender Niederschlagsintensität wird der Anteil, der zurückgehalten wird, geringer bzw. die Retentionskapazität der Mulden wird früher erreicht. Dies begründet die Differenz der Überflutungsflächen der implementierten Varianten zu dem Referenzzustand.

Die Ergebnisse aus der Betrachtung der Überflutungsflächen sind übertragbar auf die maximalen Wasserstände an den ausgewählten Profilschnitten auf der Geländeoberfläche. Die Ergebnisse der 2D Simulationen zeigen, dass die maximalen Wasserstände in Schnitt 1 und Schnitt 2 nur geringfügig durch GI reduziert werden. Exemplarisch ist in Abbildung 8.13 für Schnitt 2 (Kreuzung) der maximale Wasserstand [m] über die Wiederkehrzeit T [a] für jede Variante dargestellt.

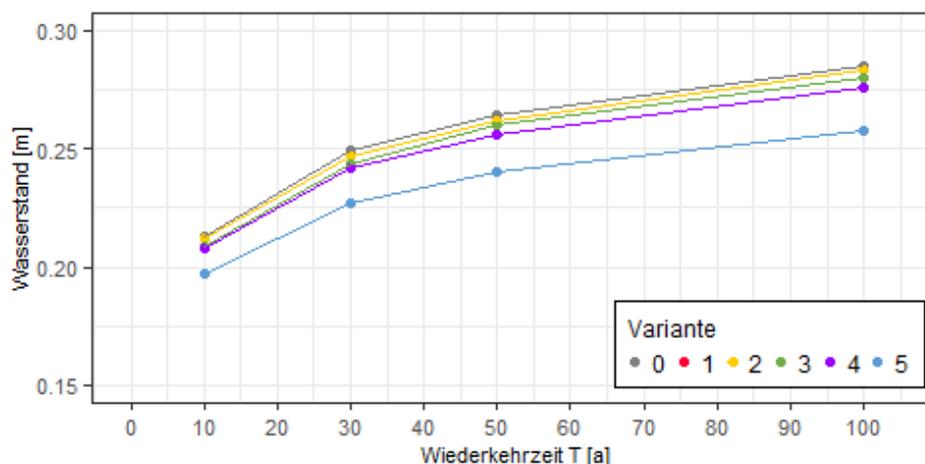


Abbildung 8.13: Maximale Wasserstände in Schnitt 2, Hannover Oberricklingen reine 2D Simulation.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt, dass die Implementierung der Gründächer in Variante 1 (Rot) und Variante 2 (Gelb) einen vernachlässigbaren Einfluss auf den maximalen Wasserstand hat. Die maximalen Wasserstände beider Varianten sind identisch, sodass in Abbildung 8.13 lediglich die Ergebnisse der Variante 2 erkennbar sind. Durch die reine Berechnung des Oberflächenabflusses gelangen Abflüsse von den Dachflächen nach Abdeckung der Benetzungs- und Muldenverluste direkt auf die Geländeoberfläche. Aufgrund des geringen Flächenanteils an GI in den ersten beiden Varianten sind die Auswirkungen vernachlässigbar gering. Diese Beobachtungen sind ebenfalls auf Variante 3 (Grün) übertragbar.

Erst durch Variante 4 (Violett) werden die maximalen Wasserstände reduziert. Innerhalb des in Abbildung 8.13 dargestellten Schnitts 2 kann der maximale Wasserstand im Mittel durch Variante 4 um 2,8 % gesenkt werden. Erst durch die zusätzliche Implementierung der Mulden in Variante 5 (Blau) wird der maximale Wasserstand im Mittel um 8,5 % (entspricht 2 cm) reduziert. Aufgrund des zusätzlichen Retentionsvermögens der Mulden wird ein größerer Anteil des Oberflächenabflusses zurückgehalten, sodass insgesamt der Wasserstand auf der Geländeoberfläche reduziert wird.

Lediglich im Bereich des Profilschnitts 3 ist eine merkbliche Änderung der maximalen Wasserstände zu erkennen. Aufgrund der unmittelbaren Nähe des Schnitts 3 zu implementierten Mulden ist ein lokaler Einfluss der Mulden deutlich. Im Mittel wird der maximale Wasserstand durch Variante 5 in Profilschnitt 3 um 40 % gesenkt. Je nach Modellregen variiert dieser Wert.

Die Änderungen der Fließgeschwindigkeiten sind für alle Modellregen und Varianten vernachlässigbar gering. Die maximalen Fließgeschwindigkeiten der 2D Simulation sind insgesamt sehr gering. Aufgrund der geringen Änderung der maximalen Wasserstände entsprechen die ebenfalls geringen Änderungen der maximalen Fließgeschwindigkeiten den Erwartungen.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Rahmen einer 2D Simulation lediglich eine großflächige Implementierung von GI sowohl die Überflutungsflächen als auch die maximalen Wasserstände reduzieren kann. Zudem ist erkennbar, dass mit steigendem Flächenanteil der GI und damit steigendem Speichervermögen der Einfluss zunimmt. Vor allem in einer 2D Oberflächenabflusssimulation ohne Betrachtung des Kanalnetzes ist der Flächenanteil der GI relevant. Als logische Konsequenz geht daraus hervor, dass bei steigendem Anteil an GI ihre Effektivität wächst. Außerdem wird deutlich, dass die Implementierung der Mulden lokal einen starken Einfluss auf die maximalen Wasserstände haben. Bei Betrachtung des gesamten Gebiets hingegen ist dieser Einfluss deutlich geringer. Wie bereits die Ergebnisse der 1D/2D Simulation zeigen, sinkt die Wirksamkeit der GI mit steigender Niederschlagsintensität.

8.2.2 Göttingen Nikolausberg

Die Ergebnisse der reinen 2D Simulation in Göttingen Nikolausberg weisen sowohl bezogen auf die Überflutungsflächen als auch auf die maximalen Wasserstände ähnliche Ergebnisse wie in Hannover Oberricklingen (vgl. Kapitel 8.2.1) auf.

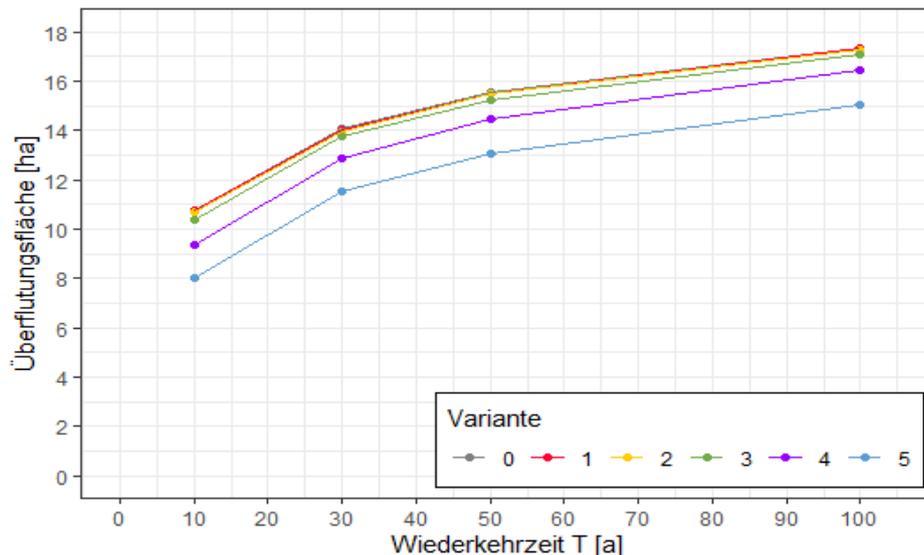


Abbildung 8.14: Überflutungsfläche Göttingen Nikolausberg, reine 2D Simulation.

Abbildung 8.14 zeigt die Überflutungsfläche [ha] über die Wiederkehrzeit T [a] für die ausgewählten Modellregen und für alle Varianten. Als Ausgangszustand für den Vergleich wird wie zuvor Variante 0 (dargestellt in Grau) definiert. Die Ergebnisse zeigen, dass bis einschließlich Variante 3 (dargestellt in Grün) lediglich eine vernachlässigbar geringe Reduzierung der Überflutungsflächen erfolgt. Diese geringen Unterschiede begründen sich in den geringen Flächenanteilen an GI innerhalb der einzelnen Varianten (vgl. Kapitel 7.4.7). Wie bisherige Ergebnisse zeigen, kann auch erst bei dieser Betrachtung die großflächige Implementierung der GI in Variante 4 (Violett) die Überflutungsfläche erkennbar reduzieren. Ebenfalls wird deutlich, dass bei steigender Niederschlagsintensität ein geringerer Teil des Oberflächenabflusses zurückgehalten wird und somit die Wirksamkeit der GI sinkt. In Variante 4 wird bei dem Modellregen T = 10 a die Fläche der maximalen Wasserstände um 13,16 % und bei dem Modellregen T = 100 a um 5,14 % reduziert. Signifikante Differenzen hingegen werden durch die Implementierung der Mulden (Variante 5, Blau) sichtbar. Das zusätzliche Retentionsvermögen der Mulden kann auch bei der reinen 2D Simulation die Fläche der maximalen Wasserstände effektiv reduzieren. Bei dem Modellregen T = 10 a wird die Überflutungsfläche um 25,38 % und bei dem Modellregen T = 100 a um 13,29 % verringert.

Die Ergebnisse der reinen 2D Simulation in Göttingen Nikolausberg weisen bezogen auf die maximalen Wasserstände an den ausgewählten Profilschnitten ähnliche Ergebnisse wie in Hannover Oberricklingen auf. Durch die GI werden die maximalen Wasserstände im Südwesten Nikolausbergs (Schnitt 1) und im Ortskern (Schnitt 2) je nach Implementierungsgrad nicht oder vernachlässigbar gering reduziert. Da die ungekoppelte 2D Oberflächenabflusssimulation lediglich das Abflussgeschehen auf der Geländeoberfläche berücksichtigt, kann der Oberflächenabfluss nur durch Infiltration, Benetzungs- und Muldenverluste reduziert und durch die Oberflächenrauheit zurückgehalten werden. Bedingt durch die Topografie und dem damit vorhandenem Geländegefälle fließt der Oberflächenabfluss schneller auf der Oberfläche ab. Der Einfluss der erhöhten Oberflächenrauheit wird durch das steilere Gefälle kompensiert. Lediglich im Nordosten (Schnitt 3) wird der maximale Wasserstand durch Variante 5 entsprechend der Niederschlagsintensität merklich gesenkt. Allerdings ist zu beachten, dass an diesem Profilschnitt ein unmittelbarer Einfluss der GI vorhanden ist. Beidseitig neben der Straßenfläche, auf welcher der Profilschnitt liegt, sind Mulden implementiert. Wie bereits die Ergebnisse in Oberricklingen zeigen, ist auch in

Nikolausberg der Einfluss der Mulden lokal begrenzt. Der maximale Wasserstand kann nur in direkter Nähe einer Mulde deutlich (im Mittel um 70 %) reduziert werden. Zudem ist erkennbar, dass mit steigender Wiederkehrzeit der Modellregen die Wirksamkeit der GI abnimmt.

8.3 Vergleich: 1D/2D Simulation - Reine 2D Simulation

Um einschätzen zu können, welchen Einfluss die Vernachlässigung des Kanalnetzes bei der Simulation auf die Größe der Überflutungsfläche hat, wird zunächst der Ausgangszustand ohne Implementierung der GI überprüft (vgl. Kapitel 8.3.1). Im nächsten Schritt erfolgt der Vergleich mit GI (vgl. Kapitel 8.3.2).

8.3.1 Untersuchungsgebiete ohne Grüne Infrastruktur

Im Folgenden sind zunächst die Ergebnisse ohne GI für beide Untersuchungsgebiete dargestellt.

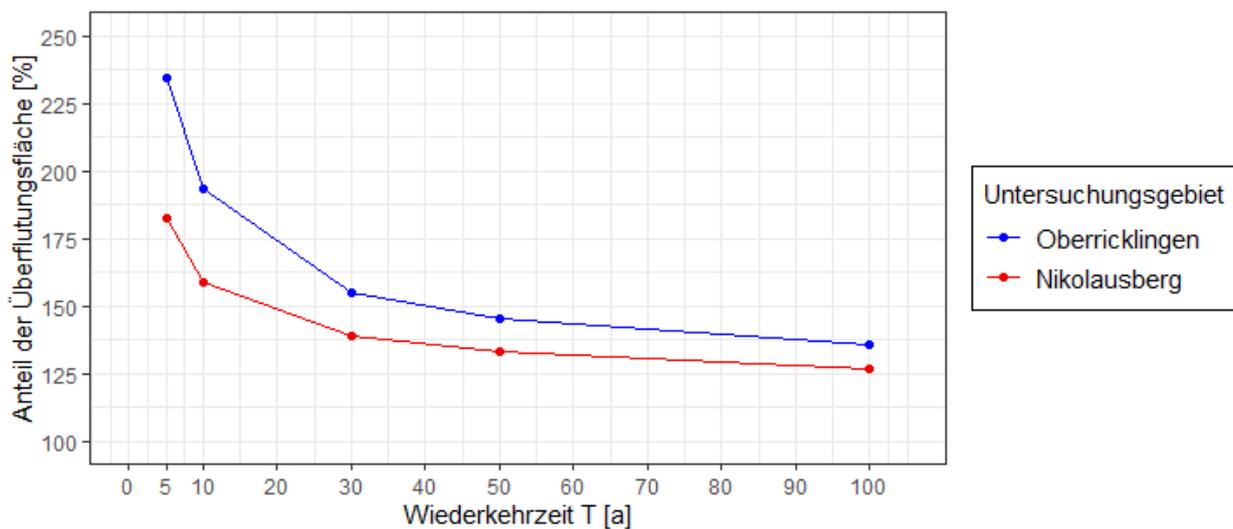


Abbildung 8.15: Abweichung der Überflutungsfläche von der 2D Simulation zu der 1D/2D Simulation, Ausgangszustand.

Abbildung 8.15 zeigt die Abweichung der Überflutungsfläche [%] einer reinen 2D Simulation zu einer 1D/2D Simulation über die Wiederkehrzeit T [a] des Modellregens für beide Untersuchungsgebiete. Darin ist Hannover Oberricklingen in Blau und Göttingen Nikolausberg in Rot gekennzeichnet. Aus der Abbildung geht hervor, dass erwartungsgemäß die reine 2D Simulation für beide Untersuchungsgebiete deutlich größere Überflutungsflächen als die 1D/2D Simulation berechnet. Eine funktionale Beziehung, die den Zusammenhang zwischen Wiederkehrzeit der Modellregen und der Abweichung der Überflutungsflächen beschreibt, lässt sich nicht herleiten. In Hannover beträgt durch die ungekoppelte 2D Simulation die Überflutungsfläche bei einem Modellregen der Wiederkehrzeit T = 5 a 234 % der Fläche, welche bei einer gekoppelten Simulation berechnet wird. Mit steigender Niederschlagsintensität sinkt die Abweichung der Überflutungsflächen. Das bedeutet, bei einem hundertjährigen Ereignis beträgt der prozentuale Anteil der Überflutungsfläche der ungekoppelten 2D Simulation 135,8 % der Fläche, die bei einer gekoppelten Simulation berechnet wurde. Diese Beobachtungen sind ebenfalls auf das Untersuchungsgebiet Nikolausberg übertragbar. Allerdings ist dort die Abweichung der Überflutungsfläche bei einem fünfjährigen Modellregen bei 182,5 % und sinkt bei einem Modellregen T = 100 a auf 126,5 %. Diese Beobachtungen zeigen, dass insbesondere bei dem fünfjährigen Modellregen die Überflutungsflächen der reinen 2D Simulation signifikant größer sind als die der 1D/2D Simulation. Im

Allgemeinen werden Kanalnetze auf eine Wiederkehrzeit zwischen drei und fünf Jahren dimensioniert, sodass als logische Konsequenz bei diesen Ereignissen die gekoppelte 1D/2D Simulation eine geringe Überflutungsfläche aufweist. Daher kann festgehalten werden, dass eine gekoppelte 1D/2D Simulation erforderlich ist, um die Überflutungsflächen sachgerecht zu berechnen.

Betrachtet man nun die einzelnen Untersuchungsgebiete, wird deutlich, dass sich in Hannover Oberricklingen bei der reinen 2D Simulation die maximalen Wasserstände an den gewählten Profilschnitten nicht ändern. Allerdings werden die maximalen Fließgeschwindigkeiten im Schnitt um 50 % gesenkt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bereits bei einer 1D/2D Simulation die Fließgeschwindigkeiten sehr gering sind. Außerdem zeigt der Vergleich der Berechnungsansätze, dass die reine 2D Simulation ein größeres Restvolumen auf der Oberfläche aufweist. Insgesamt verbleibt bei der ungekoppelten 2D Simulation ein größeres Wasservolumen auf der Oberfläche.

In Göttingen Nikolausberg hingegen sind signifikante Änderungen der maximalen Wasserstände und der maximalen Fließgeschwindigkeiten zu beobachten. Insbesondere der Profilschnitt im Südwesten Nikolausbergs (Schnitt 1) weist eine Reduzierung des maximalen Wasserstands von bis zu 50 % und eine Reduzierung der maximalen Fließgeschwindigkeit von bis zu 70 % bei einer ungekoppelten 2D Simulation auf. Durch die Vernachlässigung des Kanalnetzes und aufgrund der Topografie in Göttingen Nikolausberg zeigen die Ergebnisse der reinen 2D Simulation eine Veränderung des Fließwegs auf der Oberfläche. Diese Änderung ist in Abbildung 8.16 dargestellt.

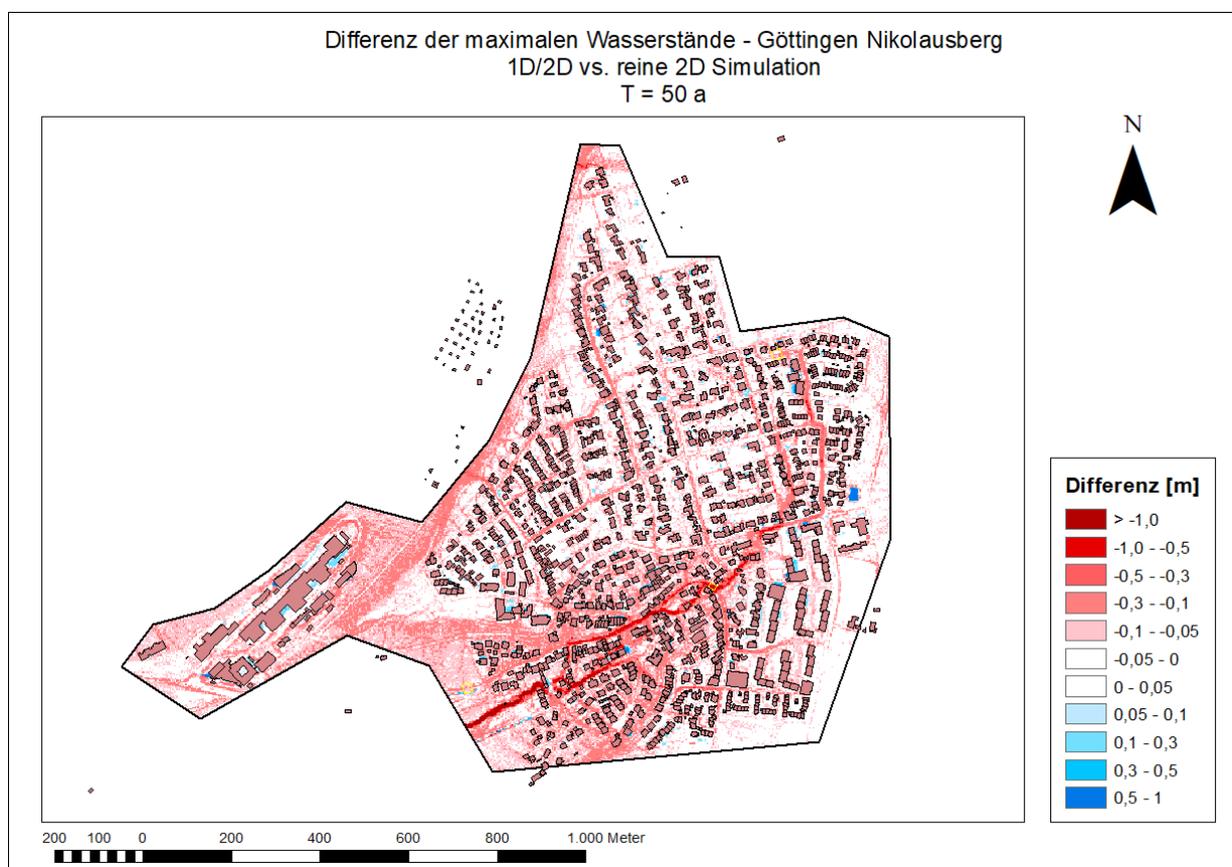


Abbildung 8.16: Differenz der maximalen Wasserstände in Göttingen Nikolausberg, T = 50 a.

Abbildung 8.16 zeigt exemplarisch die Differenzkarte der maximalen Wasserstände zwischen der 1D/2D Simulation zu der reinen 2D Simulation in Göttingen Nikolausberg für den Modellregen T = 50 a. Darin kennzeichnet Rot die maximalen Wasserstände, welche in der ungekoppelten 2D

Simulation größer sind, Blau die maximalen Wasserstände, die in der 1D/2D Simulation größer sind und in Gelb sind die Bereiche der Profilschnitte gegeben. Die Differenzkarte zeigt eine signifikante Änderung des Fließwegs auf der Oberfläche. Durch die Vernachlässigung des Kanalnetzes fließt der Oberflächenabfluss entsprechend der Topografie ab. Infolgedessen werden die maximalen Wasserstände insbesondere bei Schnitt eins (Südwesten) reduziert und bei Schnitt zwei (Mitte) erhöht. Durch die Veränderung des Fließwegs und dem damit verbundenen Oberflächenabfluss erfolgt ebenfalls eine Änderung der maximalen Fließgeschwindigkeiten.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Vernachlässigung des Kanalnetzes bei einer ungekoppelten 2D Simulation für eine Überflutungsbetrachtung zu nicht korrekten Ergebnissen führt. Die berechneten Überflutungsflächen der reinen 2D Simulation weisen deutliche Abweichungen zu den Ergebnissen der 1D/2D Simulation auf. Zudem ergeben sich Änderungen der Fließwege auf der Oberfläche je nach Topografie und Bebauungsstruktur im Vergleich zur 1D/2D Simulation. Infolge des veränderten Fließwegs weichen die maximalen Wasserstände und die maximalen Fließgeschwindigkeiten einer reinen 2D Simulation verglichen mit zu einer 1D/2D Simulation ebenfalls ab. Eine funktionale Beziehung, die diese Abweichungen der ungekoppelten 2D Simulation zu der gekoppelten 1D/2D Simulation beschreibt, kann nicht hergeleitet werden.

8.3.2 Untersuchungsgebiete mit Grüner Infrastruktur

Hannover Oberricklingen

Um einschätzen zu können, welchen Einfluss die Vernachlässigung des Kanalnetzes bei der Simulation auf die Größe der Überflutungsfläche mit implementierter GI hat, ist im Folgenden ein Vergleich der Ergebnisse der 1D/2D gekoppelten Simulation mit denen der 2D ungekoppelten Simulation für Hannover Oberricklingen aufgeführt exemplarisch.

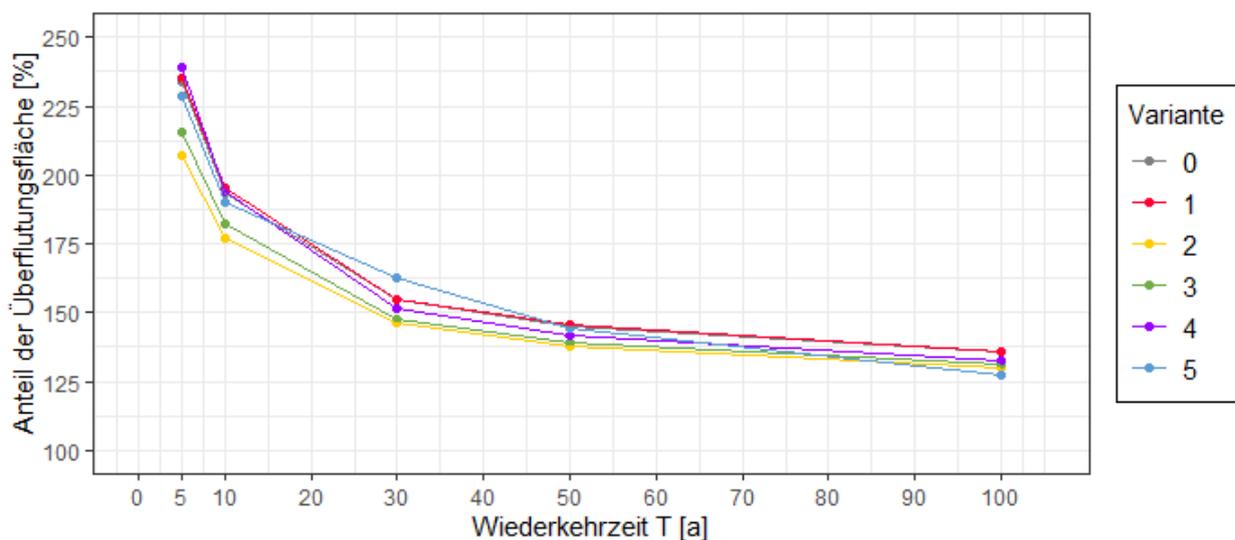


Abbildung 8.17: Abweichung der Überflutungsfläche einer reinen 2D Simulation zu einer 1D/2D Simulation, Hannover Oberricklingen.

In Abbildung 8.17 ist die Abweichung der Überflutungsfläche einer ungekoppelten 2D Simulation von einer gekoppelten 1D/2D Simulation für alle betrachteten Varianten der GI und für ausgewählte Modellregen dargestellt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Überflutungsfläche der reinen 2D Simulation bei jeder Variante und jedem Modellregen verglichen mit den Überflutungsflächen einer gekoppelten 1D/2D Simulation größer ist.

Die Implementierung der Gründächer auf den Garagen in Variante 1 (Rot) kann weder in einer 1D/2D Simulation noch bei einer reinen 2D Simulation die Überflutungsfläche merklich reduzieren. Aufgrund des geringen Flächenanteils an GI in dieser Variante kann nur ein geringer Anteil des Oberflächenabflusses zurückgehalten werden, sodass die Überflutungsfläche nahezu identisch mit dem Ausgangszustand ist. In Abbildung 8.17 ist deswegen nur Variante 1 sichtbar, diese überlagert Variante 0 (Grau).

Die verhältnismäßig geringe Abweichung der Überflutungsflächen von Variante 2 (Gelb) begründet sich in der großflächigen Implementierung der Gründächer und der damit verbundenen Abkopplung der Dachflächen von dem Kanalnetz. Die Ergebnisse der 1D/2D Simulation (vgl. Kapitel 8.1) zeigen bereits, dass die Flächen um ein Gebäude durch die Abkopplung der Dachflächen erhöhte Wasserstände aufweisen, sodass ein größerer Anteil des Oberflächenabflusses auf der Geländeoberfläche verbleibt und von dort in das Kanalnetz eingeleitet wird. Im Gegensatz dazu steht die reine 2D Simulation. Die Implementierung der Variante 2 weist keine größeren Überflutungsflächen im Vergleich zum Ausgangszustand auf. Aus diesem Grund ist die Abweichung der Überflutungsflächen der reinen 2D Simulation zur 1D/2D Simulation geringer.

Wird nun Variante 3 (dargestellt in Grün) mit Variante 2 (Gelb) verglichen, wird deutlich, dass die Abweichung der dritten Variante bei allen Modellregen ansteigt. Die Ergebnisse der gekoppelten Simulation (vgl. Kapitel 8.1) zeigten, dass die implementierten Rasengittersteine in dieser Variante den generierten Dachabfluss der Gründächer in Teilen durch Infiltration zurückhalten und damit die Überflutungsfläche reduzieren. Die großflächige Implementierung der Rasengittersteine in Variante 4 (dargestellt in Violett) erzeugt einen größeren Anteil versickerungsfähiger Fläche, sodass bei Modellregen kleiner Wiederkehrzeiten der Niederschlag in den Untergrund versickert. Bei Modellregen großer Wiederkehrzeiten ist die Abweichung der Überflutungsfläche kleiner, beträgt aber dennoch 141,8 % (T = 50 a) bzw. 132,7 % (T = 100 a). Bei Modellregen großer Wiederkehrzeiten ist der Anteil der Infiltration geringer, sodass bei einer gekoppelten Simulation die Abweichung kleiner ist, da ein Teil des Oberflächenabflusses in das Kanalnetz eingeleitet wird.

Die zusätzliche Implementierung der Mulden in Variante 5 (dargestellt in Blau) zeigt erwartungsgemäß bei geringen Niederschlagsintensitäten ebenfalls eine große Abweichung der Überflutungsfläche, die jedoch mit steigender Niederschlagsintensität sinkt. Das begründet sich auch durch die Leistungsfähigkeit eines Kanalnetzes, welches auf Ereignisse geringer Intensität dimensioniert ist. Die Abweichungen spiegeln sowohl die Ergebnisse der gekoppelten als auch der ungekoppelten Simulation wider. Die Überflutungsfläche wird durch Variante 5 bei beiden Simulationsansätzen im Vergleich zu Variante 4 (Violett) reduziert. Dennoch gilt auch hier, dass die reine Oberflächenabflusssimulation die Überflutungsfläche überschätzt.

Im Bereich der maximalen Wasserstände und der maximalen Fließgeschwindigkeiten werden durch die 1D/2D Simulationen deutlich größere Differenzen zwischen den verschiedenen Varianten als bei einer ungekoppelten 2D Simulation berechnet, sodass die reine 2D Simulation hier als ungenau beschrieben werden kann. Insgesamt ist bei einer ungekoppelten 2D Simulation ein größeres Wasservolumen auf der Oberfläche, welches nur durch den Oberflächenabfluss abgeleitet wird. Infolgedessen werden die maximalen Wasserstände, insbesondere bei implementierter GI durch eine reine 2D Simulation deutlich überschätzt werden. Bei der ungekoppelten 2D Simulation ergeben sich zudem deutlich geringere Fließgeschwindigkeiten als bei der 1D/2D Simulation. Die berechneten Fließgeschwindigkeiten einer reinen 2D Simulation sind sehr gering, sodass eine Differenzierung zwischen den einzelnen Varianten vernachlässigbar ist. Daraus geht

hervor, dass insbesondere für die Betrachtung der maximalen Fließgeschwindigkeiten eine 1D/2D Simulation erforderlich ist.

Zusammengefasst lassen sich für diese Arbeit folgende Erkenntnisse festhalten:

- Bei allen Varianten wird eine größere Überflutungsfläche durch eine reine 2D Simulation berechnet.
- Die Unterschiede zwischen den Überflutungsflächen werden mit steigender Intensität des Modellregens geringer.
- Es lässt sich kein Faktor benennen, mit welchem die Überflutungsfläche durch Vernachlässigung des Kanalnetzes erklärt wird.
- Bei kleinen bis mittleren Modellregen begründet sich die hohe Abweichung der Überflutungsflächen mit der Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes.
- Bei einem großen Anteil an GI reduziert sich mit zunehmender Wiederkehrzeit die Abweichung der Überflutungsflächen.

Göttingen Nikolausberg

Im Folgenden wird die gekoppelte 1D/2D Simulation mit der ungekoppelten 2D Simulation für das Untersuchungsgebiet Göttingen Nikolausberg verglichen. Dazu ist in Abbildung 8.18 die Abweichung der Überflutungsflächen [%] von der reinen 2D Simulation zu der 1D/2D Simulation über die Wiederkehrzeit T [a] für alle Varianten dargestellt.

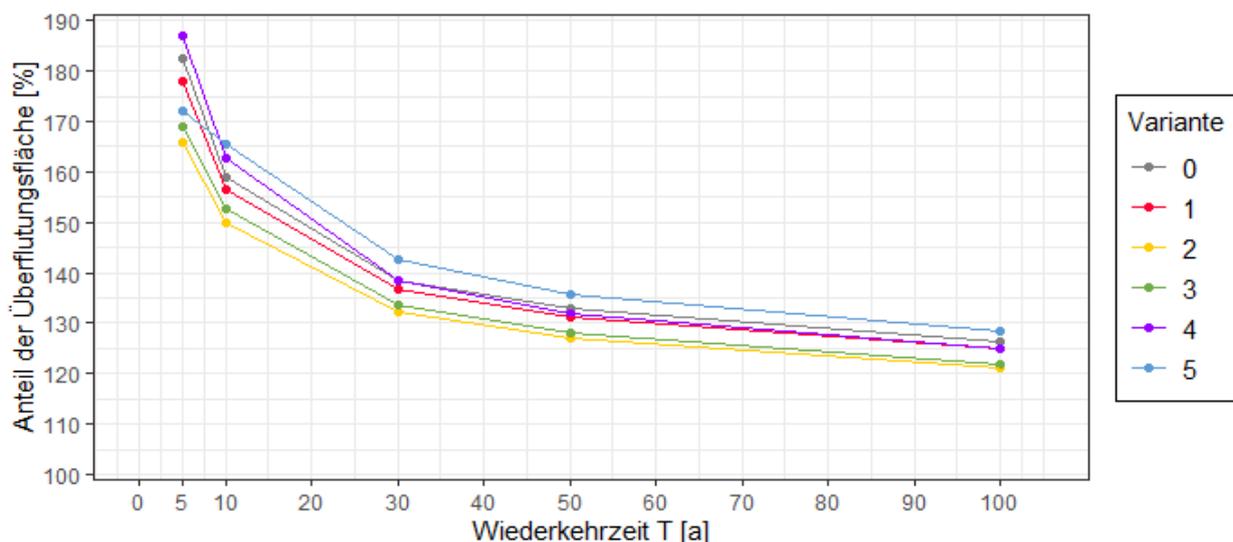


Abbildung 8.18: Abweichung der Überflutungsfläche einer reinen 2D Simulation zu einer 1D/2D Simulation, Göttingen Nikolausberg.

Wie bereits die Ergebnisse aus Hannover Oberricklingen zeigten, wird auch in Göttingen deutlich, dass die reine 2D Simulationen erwartungsgemäß bei allen Varianten und Modellregen signifikant größere Überflutungsflächen berechnen. Die Gründe dafür sind in dem Abschnitt Hannover Oberricklingen bereits aufgeführt und sind ebenfalls auf Göttingen Nikolausberg übertragbar.

Wie bereits in Kapitel 8.3.1 erläutert, erfolgt durch die reine 2D Simulation eine Änderung des Fließwegs des Oberflächenabflusses. Infolgedessen werden an dem ausgewählten Profilschnitt die maximalen Wasserstände und die maximalen Fließgeschwindigkeiten je nach Lage des Profilschnitts reduziert bzw. erhöht. Ein Vergleich ist hier nicht zweckmäßig.

Allerdings verdeutlicht die Änderung des Fließwegs auf der Oberfläche der ungekoppelten 2D Simulation, dass die 1D/2D Simulation insbesondere in Gebieten mit Geländegefälle zwingend erforderlich ist.

9 Sensitivitätsanalyse

Zur Beurteilung und Bewertung der bisherigen Simulationsergebnisse ist es notwendig die Sensitivität des Modells gegenüber einer Parameterbreite zu überprüfen. Aufgrund der langen Simulationsdauern eines 2D Modells werden im Voraus Parameter für die Sensitivitätsanalyse festgelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Parameter ausgewählt und ihre Auswirkungen überprüft:

- 2D Bodenklasse
- Verluste der Abflussparameter
- Mindestwasserstand

Die verschiedenen Parametervarianten werden mit Modellregen Euler Typ 2 der Dauer 60 min und den Wiederkehrzeiten $T = 5$ a, 10 a, 30 a, 50 a simuliert. Innerhalb der Sensitivitätsanalyse werden die Variante 0 und die Variante 5 überprüft. Im Folgenden sind exemplarisch die Ergebnisse für Variante 5 dargestellt.

9.1 2D Bodenklassen

Die 2D Bodenklassen beschreiben die Oberflächenrauheit der Einzelflächen (vgl. Kapitel 7.3.2). Innerhalb der Sensitivitätsanalyse werden die Werte um den zentralen Wert, den Wert des Ausgangszustand der Analyse, jeweils variiert um:

- ± 10 %
- ± 15 %
- ± 20 %
- ± 50 %

In Anlage A.7.1 ist eine detaillierte Übersicht über die einzelnen Werte der 2D Bodenklassen gegeben.

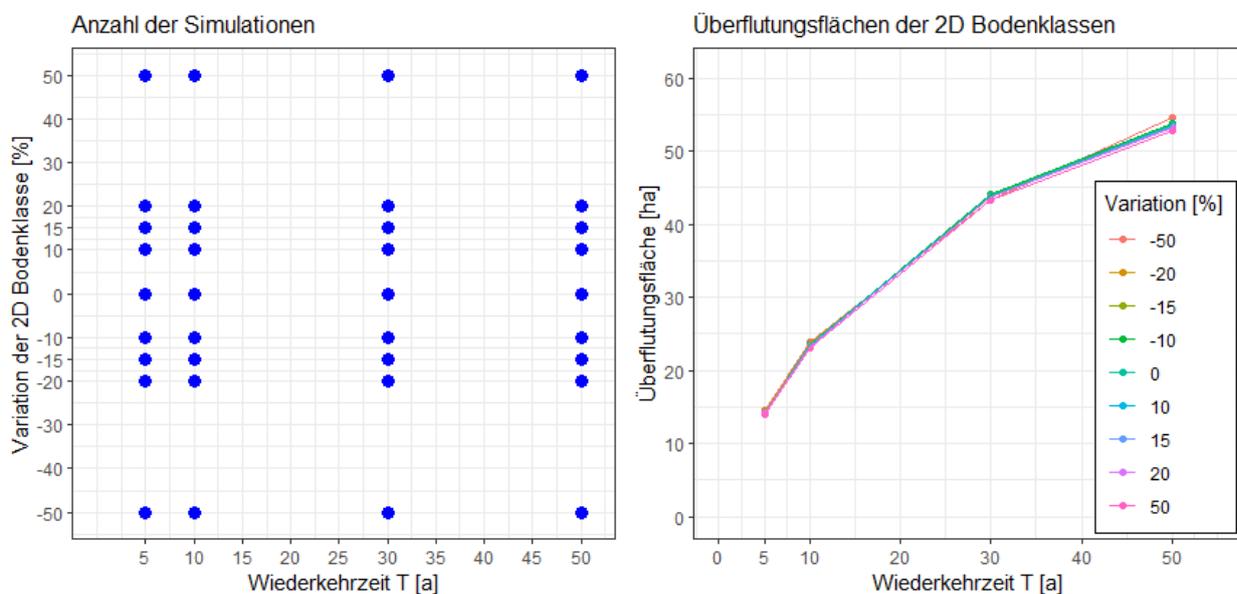


Abbildung 9.1: Sensitivitätsanalyse der 2D Bodenklasse, Variante 5.

Abbildung 9.1 zeigt einen Überblick über die Sensitivitätsanalyse der 2D Bodenklassen für Variante 5. Die linke Seite der Abbildung zeigt die Anzahl der Simulationen, dargestellt durch die

Variationen der 2D Bodenklassen [%] über die Wiederkehrzeit T [a]. Auf der rechten Seite sind die Überflutungsflächen [ha] über die Wiederkehrzeit T [a] für alle Parametervariationen abgebildet. Aus diesen Simulationsergebnissen geht hervor, dass eine Änderung der Oberflächenrauheit in Form der 2D Bodenklassen lediglich zu geringen Änderungen der Überflutungsfläche führen. Erst bei Betrachtung der Extrema in der Parametervariation (+ 50 % und – 50 %) sind Unterschiede erkennbar. Bei einer Reduzierung der Parameterwerte um 50 % (vgl. Abbildung 9.1, dargestellt in Rot) ist die Überflutungsfläche größer als im Vergleich zum Ausgangszustand. Eine Reduzierung der Parameter bedeutet, dass die k_{st} -Werte niedriger werden und somit die Oberfläche rauer wird. Durch die erhöhte Oberflächenrauheit werden die Fließgeschwindigkeiten auf der Oberfläche reduziert und somit verbleibt ein größerer Anteil des Abflusses auf der Oberfläche. Erhöht man nun die Oberflächenrauheit um 50% (vom Ausgangszustand, vgl. Abbildung 9.1, dargestellt in Magenta), so wird deutlich, dass die Überflutungsfläche geringer ist. Aufgrund der glatten Oberfläche werden höhere Fließgeschwindigkeiten (vgl. Abbildung 9.2) berechnet, sodass der Oberflächenabfluss schneller in das Kanalnetz eingeleitet wird und die Überflutungsfläche geringer ist.

Der Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Oberflächenrauheit ist exemplarisch für Schnitt 2 in Abbildung 9.2 dargestellt.

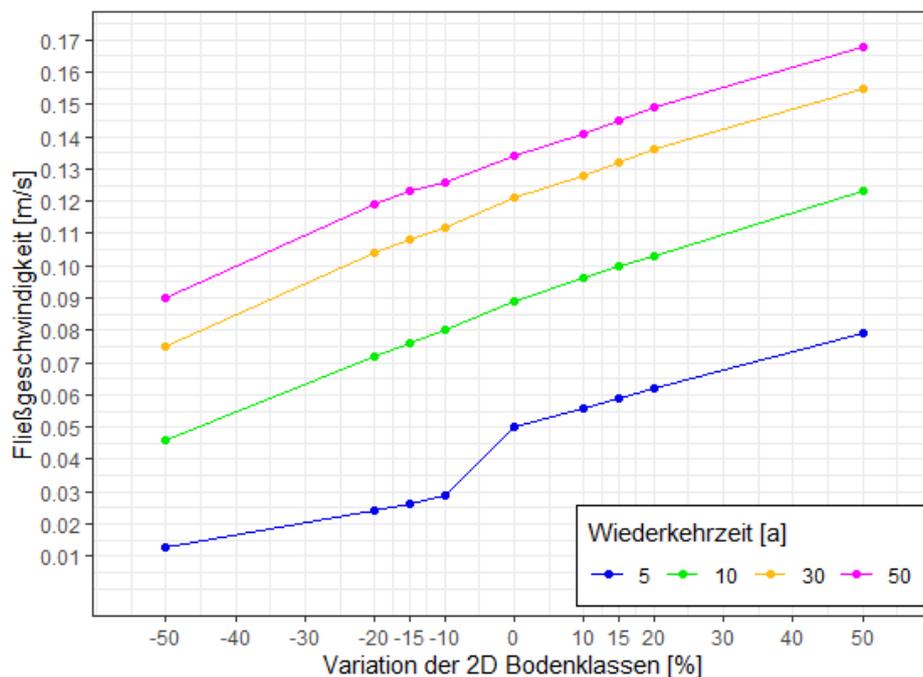


Abbildung 9.2: Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und 2D Bodenklassen, Variante 5.

Abbildung 9.2 zeigt die Fließgeschwindigkeit [m/s] auf der Oberfläche über die Parametervariation der 2D Bodenklassen [%] für ausgewählte Modellregen der Wiederkehrzeit T [a]. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass mit steigender Wiederkehrzeit und sinkender Oberflächenrauheit die Fließgeschwindigkeiten auf der Oberfläche ansteigen.

Diese Beobachtungen lassen sich ebenfalls auf Variante 0 übertragen. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse von Variante 0 sind in Anlage A.7.2 gegeben.

Daraus lässt sich für diese Arbeit schlussfolgern, dass die Oberflächenrauheit des Untersuchungsgebiets mit GI für die betrachtete Parameterbreite nur einen geringen bis vernachlässigbaren Einfluss auf die Ausdehnung der Überflutung auf der Oberfläche hat.

9.2 Verluste der Abflussparameter

Die Abflussparameter beschreiben innerhalb des Berechnungsmodells die Eigenschaften der jeweiligen Einzelfläche (vgl. Kapitel 7.3.3). Diese Eigenschaften umfassen die Benetzungs- und Muldenverluste, die abflusswirksame Fläche und bei durchlässigen Flächen die Infiltrationskapazität. Im Rahmen dieser Sensitivitätsanalyse wird überprüft, welchen Einfluss die Benetzungs- und Muldenverluste aller Einzelflächen auf die Überflutungsfläche und den maximalen Wasserstand haben. Hierfür werden die Ausgangswerte um 100 % reduziert und um 100 % erhöht. Eine Übersicht der einzelnen Parameterwerte ist in Anlage A.8.1 gegeben. Als Referenzzustand wird Variante 5 ohne Veränderung der Benetzungs- und Muldenverluste festgelegt.

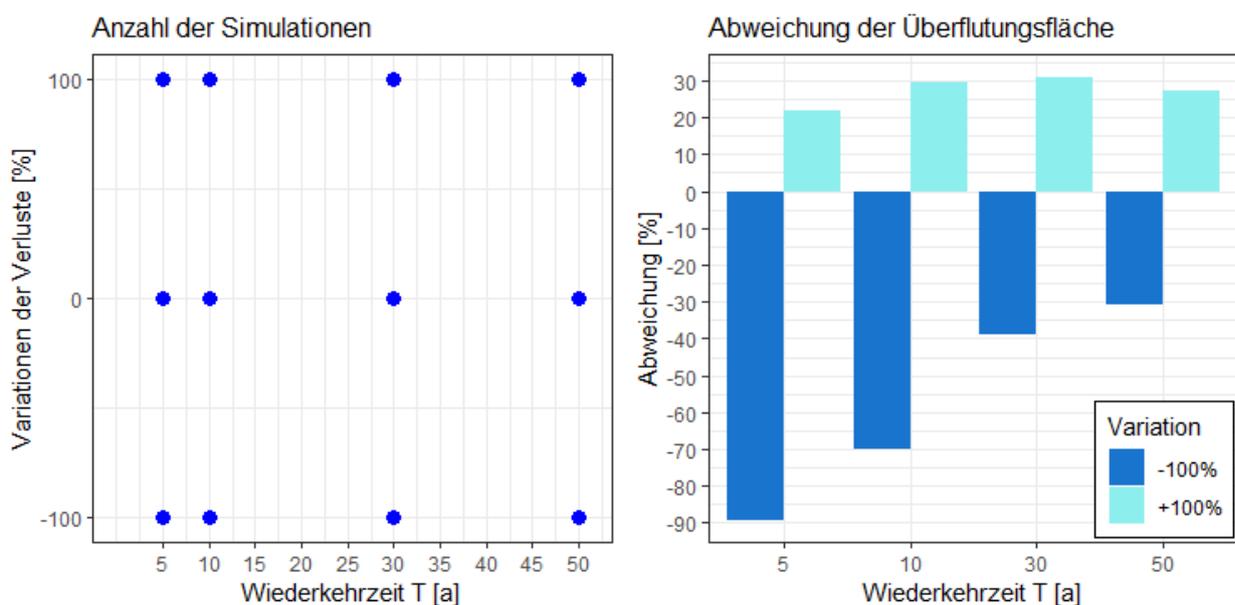


Abbildung 9.3: Sensitivitätsanalyse der Benetzungs- und Muldenverluste, Variante 5.

In Abbildung 9.3 ist auf der linken Seite die Anzahl der durchgeführten Simulationen aufgeführt. Die rechte Seite der Abbildung 9.3 zeigt die Abweichung der Überflutungsfläche [%] der beiden Parametervariationen im Verhältnis zum Ausgangszustand über die Wiederkehrzeit T [a] ausgewählter Modellregen. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass erwartungsgemäß die Reduzierung der Benetzungs- und Muldenverluste um 100 % (dargestellt und Dunkelblau) die Ausdehnung der Überflutung signifikant erhöht. Insbesondere bei kleinen bis mittleren Modellregen weichen die Ergebnisse zwischen - 89,23 % (T = 5 a) und - 70,08 % (T = 10 a) im Vergleich zu Variante 5 ohne Änderung der Verluste ab. Im Bereich der maximalen Wasserstände an den ausgewählten Profilschnitten (vgl. Kapitel 8.1.1) sind die Auswirkungen der Benetzungs- und Muldenverluste hingegen sehr gering. Die Abweichungen zum Referenzzustand liegen im Mittel bei 5 % - 10 %, sodass die maximalen Wasserstände lediglich um wenige Millimeter bis maximal fünf Zentimeter (Schnitt 1, T = 50 a) erhöht werden. Ebenso ist der Einfluss auf die maximalen Fließgeschwindigkeiten vernachlässigbar gering, diese werden leicht erhöht. Das Entfernen der Benetzungs- und Muldenverluste bedeutet, dass der gefallene Niederschlag direkt abflusswirksam ist. Daraus resultiert, dass insgesamt ein größeres Wasservolumen auf der Oberfläche steht bzw. strömt.

Durch das größere Volumen auf der Oberfläche werden die maximalen Wasserstände und die maximalen Fließgeschwindigkeiten geringfügig erhöht.

Die Parametervariation + 100 % (dargestellt in Hellblau) bewirkt nur eine vergleichsweise geringe Reduzierung der Überflutungsfläche (im Mittel um 27,5 %), der maximalen Wasserstände und der maximalen Fließgeschwindigkeiten.

Die Benetzungs- und Muldenverluste variieren in ihrer Größe je nach Art der Oberfläche. Für unbefestigte Flächen und Flächen mit GI sind die Verluste höher angesetzt als für Straßen- und Gebäudeflächen. Das bedeutet, dass ein Erhöhen dieser Verluste um 100 %, zum Beispiel bei einer Straßenfläche, andere Auswirkungen hat als bei einer Grünfläche. Betrachtet man nun die jeweiligen Flächenanteile, so wird deutlich, warum die Änderung der Überflutungsfläche bei einer Maximierung der Verluste so gering ist. Im Rahmen der Variante 5 werden insgesamt 20,53 % der Gesamtfläche, wovon 18,95 % befestigte Fläche sind, als GI implementiert. Trotz des hohen Implementierungsgrads an GI verbleibt ein Anteil von 33,22 % der Gesamtfläche als befestigte Fläche (Straßen- bzw. Gebäudeflächen). Selbst bei einer Erhöhung der Benetzungs- und Muldenverluste dieser Flächen um 100 % sind die Verlusthöhen im Vergleich zu anderen Flächen niedrig. Daher wird die Überflutungsfläche vergleichsweise gering reduziert. Werden im Gegensatz dazu die Verluste aller Flächen um 100% reduziert und somit auf null gesetzt, sind die Auswirkungen signifikant.

Diese Ergebnisse sind übertragbar auf Variante 0 (vgl. Anlage A.8.2). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Anteil an befestigter Fläche mit 51,22 % größer ist als in Variante 5. Aus diesem Grund ist die Abweichung der Überflutungsfläche bei der Parametervariation - 100 % geringer als in Variante 5.

9.3 Mindestwasserstand der Oberflächenabflusssimulation

Der Mindestwasserstand der Oberflächenabflusssimulation beschreibt den Wasserstand, ab welchem das Wasser auf der Oberfläche für eine Simulation berücksichtigt wird. Ist der Wasserstand einer Dreieckszelle kleiner als der definierte Wert, so wird diese Zelle in der Simulation übersprungen. Dabei wird angenommen, dass keine Fließbewegung auf der Oberfläche stattfindet, das Volumen aber erhalten bleibt. Der Standardwert des Mindestwasserstands beträgt 1 mm (itwh, 2020a). Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird der Mindestwasserstand auf

- 1,5 mm
- 5 mm
- 10 mm
- 20 mm

erhöht. Im Folgenden werden die Ergebnisse exemplarisch für Variante 5 in Hannover Oberricklingen dargestellt und erläutert. Die Ergebnisse der Variante 0 sind in Anlage A.9 gegeben.

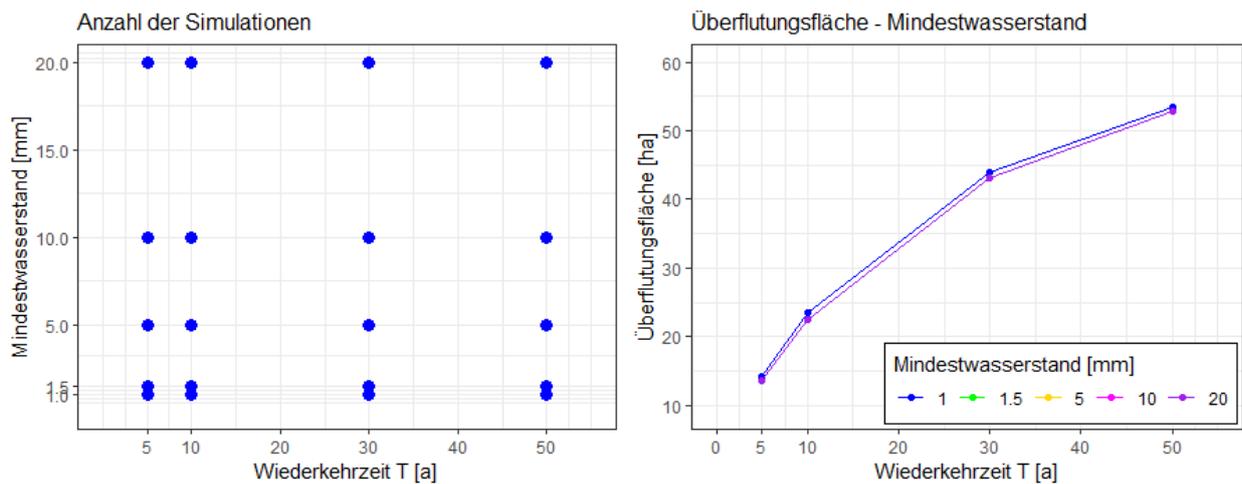


Abbildung 9.4: Sensitivitätsanalyse des Mindestwasserstands, Variante 5.

Abbildung 9.4 zeigt auf der linken Seite die Anzahl der durchgeführten Simulationen für Variante 5 über die ausgewählten Modellregen. Auf der rechten Seite ist die Ausdehnung der Überflutungsfläche [ha] der verschiedenen Parametervariationen über die Wiederkehrzeit T [a] der Modellregen dargestellt. Das Ausgangsszenario der Sensitivitätsanalyse entspricht Variante 5 mit dem Standard-Mindestwasserstand von 1 mm (abgebildet in Blau). Bei der Ermittlung der Überflutungsfläche wird ebenfalls ein Grenzwasserstand für die ingenieurtechnische Anwendung zu 0,05 m festgelegt (vgl. Kapitel 7.5.1).

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass eine Änderung des Mindestwasserstands die berechnete Ausdehnung der Überflutungsfläche lediglich zwischen 1 % ($T = 50$ a) und 4 % ($T = 5$ a) reduziert. Die betrachteten Szenarien mit verändertem Mindestwasserstand weisen identische Überflutungsflächen auf, sodass in Abbildung 9.4 lediglich das Szenario mit einem Mindestwasserstand von 20 mm (dargestellt in Violett) zu erkennen ist. Eine Erhöhung des Mindestwasserstands kann im Allgemeinen zu ungenauen Berechnungsergebnissen führen, da die Wasserstände auf der Oberfläche durch einen hohen Mindestwasserstand unterschätzt werden. Diese Tendenz zeigt sich ebenfalls in den vorliegenden Ergebnissen der Ausdehnung der Überflutungsfläche. Allerdings ist der Einfluss des Mindestwasserstands sehr gering.

Diese Ergebnisse sind übertragbar auf die maximalen Wasserstände und die maximalen Fließgeschwindigkeiten an den ausgewählten Profilschnitten (vgl. Kapitel 8.1.1). Durch eine Änderung des Mindestwasserstandes erfolgt lediglich eine vernachlässigbare Reduzierung der maximalen Wasserstände im Bereich weniger Millimeter. Ebenso erfolgt eine vernachlässigbar kleine Reduzierung der maximalen Fließgeschwindigkeiten. Eine Abminderung der Fließgeschwindigkeiten erfolgt lediglich ab einer Wassertiefe, welche zehnmal kleiner ist als der definierte Mindestwasserstand. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Mindestwasserstand maximal auf 20 mm erhöht, sodass bei diesem Szenario die Fließgeschwindigkeiten lediglich um maximal 0,003 m/s ($T = 50$ a, Schnitt 3) reduziert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit kann festgehalten werden, dass der Einfluss des Mindestwasserstands zur Lösung der Flachwassergleichungen bei der gewählten Parameterbandbreite vernachlässigbar gering ist. Allerdings ist zu vermuten, dass bei einem höheren Mindestwasserstand der Einfluss auf die Ausdehnung der Überflutungsfläche, die maximalen Wasserstände und die maximalen Fließgeschwindigkeiten zunimmt. Bei steigendem Mindestwasserstand wird die Fließgeschwindigkeit numerisch abgemindert und die Wasserspiegellage auf der Geländeoberfläche wird überschätzt.

10 Konzept zur Beurteilung

Die Wirksamkeit Grüner Infrastruktur auf die Überflutung kann nicht mit einfachen Handrechenverfahren ermittelt werden, sondern dazu sind modelltechnische Untersuchungen erforderlich. Diese unterteilen sich in verschiedene Schritte:

- Beschaffung und Aufbereitung der Eingangsdaten
- Definition eines Referenzzustands
- Festlegung des Detaillierungsgrads
- Festlegung der Stufen der Implementierung der Grünen Infrastruktur
- Definition Beurteilungskriterien
- Auswahl eines geeigneten Simulationsmodells
- Modellerstellung
- Festlegung der Werte der Modellparameter
- Festlegung der Niederschlagsbelastung
- Simulationen und deren Auswertung

Beschaffung und Aufbereitung der Eingangsdaten

Als Datengrundlage des Vergleichs sind ein DGM in ausreichender Auflösung, Kanalnetz-, Einzugsgebiets- und Flächennutzungsdaten erforderlich. Die Kanalnetz-, Einzugsgebiets- und Flächennutzungsdaten sind in der Regel bei der jeweiligen Kommune verfügbar. In der Regel sind DGM bei den entsprechenden Landesämtern verfügbar, z. B. für Niedersachsen beim Landesamt für Geoinformation und Landvermessung (LGLN, 2020).

Referenzzustand

Die Wirksamkeit der GI kann durch Vergleich der Zustände ohne (Referenzzustand) und mit GI erfolgen. Ihre Elemente werden dann stufenweise, angepasst an die lokalen Gegebenheiten, in das Modell integriert. Liegt eine Schwammstadt als zu betrachtendes Gebiet vor, so ist der Referenzzustand modelltechnisch herzustellen, d. h. die Schwammstadtelemente müssen entfernt werden und das Einzugsgebiet wird konventionell entwässert.

Festlegung des Detaillierungsgrads

Im Rahmen der Vorbereitungen der Simulationen muss bereits abgewogen werden, in welchem Detaillierungsgrad die GI modelltechnisch nachgebildet werden soll. Je detaillierter ein Simulationsmodell ist, desto länger sind die Simulationszeiten. Sofern die Implementierung der GI auf kleinen Einzelflächen wie Auffahrten oder einzelnen Gebäuden erfolgen soll, müssen diese als klar abgegrenzte Fläche digitalisiert werden (vgl. Kapitel 7.4). Sollen zusätzlich Mulden implementiert werden, sind diese in das DGM einzuprägen. Das Zusammenfassen von Flächen gleicher Elemente der GI, welche nicht in direkter Nachbarschaft innerhalb des Untersuchungsgebiets liegen, ist nur begrenzt zweckmäßig.

Festlegung der Stufen der Implementierung der Grünen Infrastruktur

In einem Planungsprozess gilt es oftmals abzuwägen, in welchem Umfang GI implementiert werden kann. Dabei spielen sowohl die örtlichen Gegebenheiten, der angestrebte Überflutungsschutz der durch die GI erreicht werden soll wie auch wirtschaftliche Aspekte eine entscheidende Rolle. Hier ist es dann sinnvoll, verschiedene Stufen der GI zu definieren, die dann modelltechnisch untersucht und hinsichtlich ihrer Zielerreichung bewertet werden können.

Kriterien zur Beurteilung

Die Kriterien zur Beurteilung orientieren sich an den möglichen Schäden durch die Überflutung bzw. der Gefahr für Leib und Leben. Maßgeblich sind somit maximale Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten an kritischen Punkten (z. B. Unterquerungen, Tiefpunkte, Garageneinfahrten) sowie die Ausdehnung der überfluteten Fläche (DWA, 2016b). Die in den verschiedenen Stufen der implementierten GI erzielten Ergebnisse werden dann mit dem Referenzzustand verglichen.

Auswahl eines geeigneten Simulationsmodells

Zur Bewertung der Wirksamkeit der GI bei extremen Starkregen ist es erforderlich, eine gekoppelte 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflusssimulation durchzuführen. Dabei sollte das 2D Oberflächenabflussmodell auf den vollständigen Flachwassergleichungen basieren. Die Vernachlässigung des Kanalnetzes führt zu signifikant verschiedenen Berechnungsergebnissen. Die vereinfachte Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes durch Reduzierung der Niederschlagsbelastung ist ebenfalls nicht zielführend. Selbst für eine Ersteinschätzung ist eine reine 2D Oberflächenabflusssimulation bei einem Gebiet ohne und mit implementierter GI nicht anwendbar (vgl. Kapitel 8.3). Liegt ein Gebiet mit Geländegefälle vor, so zeigen die reinen 2D Oberflächenabflusssimulationen eine Veränderung des Fließwegs auf der Oberfläche gegenüber einer gekoppelten Simulation.

Modellerstellung

Die Kanalnetzdaten werden für das gewählte Kanalnetzmodell aufbereitet und überprüft. Hinweise zu deren Überprüfung finden sich im DWA-M 165 (DWA, 2020). Das DGM ist hinsichtlich Brückenquerungen/Unterführungen und relevanten Strukturen zu korrigieren. Basierend auf dem DGM erfolgt die Vorbereitung und der Aufbau des 2D Oberflächenmodells. Dabei ist es sinnvoll ein unregelmäßiges 2D Berechnungsgitter zu verwenden, da insbesondere städtische Strukturen darin gut nachgebildet werden (Henonin et. al., 2014). Gebäude werden dabei als nicht überströmbares Hindernis oder als Lücke im Modell definiert. Generell sollten alle abflussrelevanten Strukturen in dem Modell nachgebildet werden. Die Größe der Berechnungselemente sollte sich an der Örtlichkeit orientieren. Je kleiner die Berechnungselemente sind, desto länger ist die Rechenzeit. Je größer die Elemente sind, desto ungenauer kann das Simulationsergebnis die lokale Situation wiedergeben.

Festlegung der Werte der Modellparameter

Für die Simulation werden diverse Modellparameter benötigt, die sowohl für die Berechnung des Abflusses im Kanalnetz als auch auf der Oberfläche erforderlich sind. Dies gilt auch für die Parameter zur Beschreibung des Abflussverhaltens der Elemente der GI. Einige Modellparameter, wie z. B. für die Lösung der Differentialgleichungen, lassen sich aus der Größe der Berechnungselemente ableiten bzw. werden vom Simulationsmodell automatisch gewählt, andere werden aus Messungen ermitteln oder aus der Literatur entnommen. Die Rauheitsbeiwerte des Referenzzustandes können aus Landnutzungsdaten übernommen werden.

Auch bei extremen Starkregenereignissen muss die Infiltration berücksichtigt werden, die Verdunstung kann jedoch vernachlässigt werden. Sie ist insbesondere in Hinblick auf die Wasserbilanzen, aber nicht für den Bereich der Überflutungsgefährdung relevant.

Dabei ist die Sensitivität der einzelnen Parameter hinsichtlich der Simulationsergebnisse zu beachten. Insbesondere die Größe der Muldenverluste kann die Ausdehnung der überfluteten

Fläche beeinflussen. Diese Aussage ist ebenfalls übertragbar auf die Anfangsbedingungen der einzelnen Parameter, z. B. den Muldenauffüllgrad.

Festlegung der Niederschlagsbelastung

Die Simulation kann anhand von gemessenen Niederschlagsereignissen oder mit Modellregen abgeleitet aus einer Niederschlagsstatistik durchgeführt werden. Dabei ist es neben der Betrachtung von extremen Starkregen zweckmäßig, zusätzlich Ereignisse geringerer Intensität sowie Starkregen längerer Dauer auszuwählen. Durch Niederschläge geringerer Intensität kann die Wirksamkeit der GI bezogen auf die Wiederkehrzeit klassifiziert werden. Ereignisse längerer Dauer können zur Füllung von Tiefpunkten führen und damit kritische Wasserstände hervorrufen, die bei Niederschlägen kürzerer Dauern unter Umständen nicht in dem Maße auftreten.

Simulationen und deren Auswertung

Die Simulationsergebnisse werden dann hinsichtlich der maximalen Wassertiefe an kritischen Punkten, der Ausdehnung der überfluteten Fläche und der maximalen Fließgeschwindigkeiten ausgewertet. Ein maßgebendes Kriterium bei der Bewertung von Überflutungsgefahren ist der maximale Wasserstand und dessen Ausdehnung auf der Geländeoberfläche (DWA, 2016b). Aus diesem Grund erfolgt vorrangig daran die Bewertung der Wirksamkeit von GI. Zur Auswertung der überfluteten Fläche auf der Geländeoberfläche wird ein Schwellenwert im Bereich weniger Zentimeter definiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Wert auf fünf Zentimeter definiert (vgl. Kapitel 7.5.1). Die Beurteilung erfolgt anhand des Verhältnisses der Überflutungsflächen zwischen dem Gebiet mit GI zum Referenzzustand.

Die Auswertung der maximalen Wasserstände sollte an kritischen Punkten innerhalb des Untersuchungsgebiets erfolgen. Bei der Wahl der Lage dieser Punkte ist zu beachten, dass die GI lokal einen großen Einfluss auf die Wassertiefe hat. Daher sollte die maximale Wassertiefe zusätzlich an einem Punkt ohne direkten Einfluss der GI überprüft werden.

Die Betrachtung der maximalen Fließgeschwindigkeiten erfolgt im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls an den ausgewählten Orten, um so kritische Überlagerungen von Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten feststellen zu können. Diese sind insbesondere in Hinblick auf die Gefahren ausgehend von einer Überflutung zu berücksichtigen. Im Bereich der maximalen Wassertiefen und maximalen Fließgeschwindigkeiten ist auch der Detaillierungsgrad der Modellierung ein maßgeblicher Einflussfaktor. Erfolgt ein Zusammenfassen von Flächen mit GI, welche nicht in direkter Nachbarschaft innerhalb des Untersuchungsgebiets liegen, werden die lokalen Einflüsse der GI vernachlässigt.

Übertragbarkeit

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit bzw. dieses Konzepts kann nur begrenzt erfolgen. Wegen der Vielzahl an Einflussfaktoren bei der Implementierung von GI ist keine allgemeine Aussage möglich, in welchem Maße Überflutungen durch GI reduziert werden können. Ausschlaggebend für eine mögliche Reduzierung der Überflutung ist der Implementierungsgrad an GI innerhalb eines Gebiets. Je höher der Grad an Implementierung ist, desto effektiver kann die Überflutung reduziert werden. Dabei erweisen sich Elemente, welche ein zusätzliches Retentionsvermögen (Mulden) haben, als sehr effektiv. Die Implementierung der GI und der (mögliche) Implementierungsgrad sind abhängig von lokalen Gegebenheiten. Liegt das Untersuchungsgebiet eher ländlich mit einer lockeren Bebauungsstruktur, so kann ein höherer Implementierungsgrad erzielt werden als in Gebieten mit gemischter Bebauungsstruktur aus Wohn- und Industriegebiet oder in Stadtzentren.

11 Diskussion

Die Diskussion dieser Arbeit ist unterteilt in die Abschnitte Wirksamkeit der GI und Modellierung.

Wirksamkeit

Die Implementierung von GI kann in einem gewissen Maße Überflutungen reduzieren. Die verschiedenen Studien bewerten die Wirksamkeit der GI im Hinblick auf Reduzierung der Überflutung unterschiedlich. Eine direkte Vergleichbarkeit ist nur eingeschränkt möglich, da Modellregen unterschiedlicher Dauerstufen und Wiederkehrzeiten verwendet wurden. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen Folgendes: Bei Modellregen mit einer Dauerstufe von 60 Minuten und einer Wiederkehrzeit von 30 Jahren sowie einer großflächigen Implementierung der GI (Varianten 4 und 5) verringern sich die maximalen Wasserstände um 8,05 % (Variante 4) bzw. 20,81 % (Variante 5) im Vergleich zum Ausgangszustand. Jedoch zeigen die Ergebnisse ebenfalls, dass die Wirksamkeit der GI mit steigender Intensität des Niederschlags signifikant sinkt. Ähnliche Ergebnisse ergeben sich in den Untersuchungen von Yin et. al. (2020). Unter Verwendung von Modellregen verschiedener Dauerstufen und Wiederkehrzeiten ergaben sich in Yin et. al. (2020) nur geringe Reduzierungen der Überflutungsflächen. Allerdings geht nicht daraus hervor, in welchem Umfang GI implementiert wurde. Im Gegensatz dazu stehen die Aussagen von Li et. al. (2020) und Schubert et. al. (2017). Die Studie von Li et. al. (2020) kommt zu der Schlussfolgerung, dass GI eine signifikante Rolle in der Reduzierung von Überflutungen einnimmt. In der Studie wurden drei verschieden Varianten der GI bei einem Ereignis der Wiederkehrzeit von 50 Jahren und der Dauerstufe von 24 Stunden untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine großflächige Implementierung der GI die Überflutungsfläche um 21 % reduzieren kann. Die Studie von Schubert et. al. (2017) ist hingegen nicht komplett übertragbar auf diese Arbeit und die bereits genannten Studien. Dort wurde die Wirksamkeit in einem Einzugsgebiet nahe einem Fluss überprüft. Die modelltechnische Umsetzung der GI erfolgte durch eine Abkopplung sämtlicher versiegelter Flächen. Durch eine vollständige Entsiegelung konnte die Überflutungsfläche bei Ereignissen kurzer Dauern im Mittel um 91 % reduziert werden.

Bezogen auf die maximalen Wasserstände und maximalen Fließgeschwindigkeiten zeigen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit nur eine begrenzte Wirksamkeit der GI an den ausgewählten Orten innerhalb der Untersuchungsgebiete. Die Varianten eins bis vier haben lediglich einen vernachlässigbaren Effekt (kleiner 10 % Reduzierung). Erst durch die modelltechnische Implementierung der Mulden in Variante 5 können die maximalen Wasserstände je nach Ereignis in Schnitt 3 zwischen 24,06 % und 59,52 % gesenkt werden. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass die GI lokal einen signifikanten Einfluss hat. Die Ergebnisse zeigen, dass an Orten mit direktem Einfluss der GI sowohl der maximale Wasserstand als auch die maximalen Fließgeschwindigkeiten reduziert werden. Ein Geschwindigkeitsprofil oder die Auswertung der Wasserstände innerhalb einzelner Zeitschritte war nicht Teil dieser Arbeit und übersteigt ihren Rahmen. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch in Webber et. al. (2019). In der Studie wurden einzelner Elemente auf ihre Wirksamkeit überprüft und dabei galt die maximale Wassertiefe als ein maßgebendes Kriterium. Wie auch in dieser Arbeit wird der maximale Wasserstand bei Webber et. al. (2019) in einem Bereich zwischen 25 % - 50 % im Vergleich zum Ausgangszustand reduziert. Ebenfalls zeigen Webber et. al. (2019) auf, dass GI am effektivsten ist, wenn ein großer Flächenanteil umgesetzt ist und die lokalen Effekte nicht zu vernachlässigen sind. Allerdings wird auch darauf verwiesen, dass bei einem Ereignis der Wiederkehrzeit $T = 100$ a nur ein geringer Einfluss der GI deutlich wird. Die Fließgeschwindigkeit wurde in dieser Studie von Webber et. al. (2019) nicht überprüft. Weitere Studien mit Berücksichtigung der maximalen Fließgeschwindigkeit lagen nicht vor. Die

Studie von Schubert et. al. (2017) untersuchte lediglich die Fließintensität, allerdings in Verbindung mit einem Untersuchungsgebiet an einem Fluss, sodass eine Übertragbarkeit nicht gegeben ist.

Darüber hinaus sind Untersuchungen erforderlich, inwieweit sich Änderungen der maximalen Fließgeschwindigkeiten und der maximalen Wassertiefen über die Zeit ergeben. Außerdem gilt es zu hinterfragen, inwieweit eine kritische Überlagerung einzelner Abflussspitzen und damit der maximalen Wassertiefen auf der Oberfläche durch GI hervorgerufen wird.

Der Flächenanteil, auf welchem GI implementiert wird, ist ein maßgebendes Kriterium für die Wirksamkeit. Dies stellen auch Zhang & Chui (2017) und De Vleeschouwer et. al. (2014) fest. Die Ergebnisse dieser Arbeiten zeigen, dass mit steigendem Anteil an GI die Überflutung reduziert wird, jedoch abhängig von dem gewählten Untersuchungsgebiet. Vorteile verschiedener Maßnahmen werden jedoch nicht betrachtet. Allerdings gilt es zu beachten, dass insbesondere die Implementierung von Mulden lokal sowohl positive als auch negative Effekte auf die Überflutung haben kann. Lokal können Mulden bei Ereignissen geringer Intensität den Wasserstand senken. Bei extremen Starkregen kann jedoch das Retentionsvermögen der Mulden überschritten werden und das Wasser tritt über die Mulden. Wie bereits Zhang & Chui (2017) verdeutlichten, ist es aufgrund der verschiedenen Einflussfaktoren, wie zum Beispiel die Topografie oder die Bebauungsstruktur des Untersuchungsgebiets, auf die GI nicht möglich, die Vorteile allgemein benennen zu können. Konzepte, die die Wirksamkeit der GI bei extremen Starkregen beurteilen, sind daher je nach Einzugsgebiet, Art der implementierten GI und vorliegenden Daten verschieden.

Die Wirksamkeit GI in Kombination mit Geländegefälle wurde im Rahmen dieser Arbeit anhand des Untersuchungsgebiets Göttingen Nikolausberg untersucht. Beim Vergleich der Ergebnisse zu Hannover Oberricklingen zeigt sich, dass die Ausdehnung des maximalen Wasserstands nur in gleichem Maße reduziert werden kann, weil der Anteil an GI höher ist. Zu einer ähnlichen Aussage gelangen auch Fiori & Volpi (2020). Die Studie von Fiori & Volpi (2020) untersuchte unter anderem den Einfluss von GI in großen Einzugsgebieten. Dabei erfolgte die modelltechnische Umsetzung der GI nur in Teilgebieten des Untersuchungsgebiets. Die Ergebnisse zeigten, dass der Einfluss der GI bei großen Gebieten geringer ist, da der Oberflächenabfluss sich entweder im Gebiet ausbreitet oder durch die Elemente der GI zurückgehalten wird. Fiori & Volpi (2020) gelangten zu der Schlussfolgerung, dass diese Ergebnisse ebenfalls übertragbar sind auf Untersuchungsgebiete mit Geländegefälle. Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und der Ergebnisse aus Fiori & Volpi (2020) gilt es zu hinterfragen, inwieweit die Implementierung der GI bei Gebieten mit Geländegefälle unter Verwendung gleicher Parameter wie Infiltrationseigenschaften, Benetzungs- und Muldenverlusten oder Oberflächenrauheit zweckmäßig ist. Aufgrund des Geländegefälles werden einzelne Elemente schneller überströmt, sodass unter anderem die Infiltrationsleistung nicht im vollen Umfang nutzbar ist. Daher wäre zu überlegen, ob eine Modifizierung einzelner Elemente, z. B. durch deren Gestaltung oder ein Untergrund mit einer höheren Infiltrationsleistung möglich und zweckmäßig ist.

Die modelltechnische Umsetzung der GI erfolgte in dieser Arbeit im Bestand und soll den Einfluss GI zeigen. Dabei wurde bei höchstem Implementierungsgrad in Hannover Oberricklingen, 37 % der befestigten Flächen, in Göttingen Nikolausberg, 60 % der befestigten Fläche, durch GI ersetzt. Die modelltechnische Umsetzung der Mulden erfolgte auf vorhandenen Grünflächen entlang der Straßenflächen. Die Implementierung setzt voraus, dass auf privaten Grünflächen Mulden eingebaut werden können. Der hohe Ausbaugrad an GI, insbesondere auf privaten Flächen, ist in der Praxis nicht immer realisierbar.

Modellierung

Die modelltechnische Umsetzung der GI erfolgt im Rahmen dieser Arbeit durch die Berücksichtigung der jeweiligen Verluste und durch das Einprägen der Mulden in das DGM. Wegen fehlender Messdaten erfolgt die Wahl der Parameter anhand von Literaturwerten. Dieses Vorgehen ist Guo et. al. (2019) oder Rosa et. al. (2020) gleichzusetzen und ermöglicht modelltechnisch GI umzusetzen. Die Wahl der Parameter hat einen Einfluss auf die Ergebnisse (vgl. Kapitel 9.2). Des Weiteren kann keine Kalibrierung der Modelle anhand von Messdaten erfolgen. Die Parameter, die für diese Arbeit gewählt wurden, erweisen sich als zweckmäßig und sinnvoll.

Die modelltechnische Umsetzung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit über angepasste Abflussparameter und bei den Mulden über das Einprägen der Mulden in das DGM, sowie das Anpassen der Infiltrationskapazität des Untergrunds. Dieser Ansatz ist im Vergleich zu dem von Yin et. al. (2020) vereinfacht. Sie verwenden für die Berechnung der GI das Niederschlags-Abflussmodell SWMM. Darin werden verschiedene Elemente mit einer Vielzahl von Parameter nachgebildet. Eine Aussage, welcher Ansatz geeigneter ist, kann nicht getroffen werden. Allerdings ist zu beachten, dass bei der vereinfachten Darstellung der erhöhten Verluste die Wahl der Parameter einfacher ist und zu ähnlichen Ergebnissen führt (vgl. Yin et. al., 2020). Die modelltechnische Umsetzung unter Anwendung der erhöhten Verluste erfolgt ebenfalls in Webber et. al. (2019) und Schubert et. al. (2017).

Die Modellierung und Simulation erfolgt in dieser Arbeit mit einem bidirektional gekoppelten 1D/2D Kanalnetz- Oberflächenabflussmodell, sodass unter anderem die physikalischen Prozesse der flächenhaften Abflussbildung auf der Oberfläche berücksichtigt werden. Die modelltechnische Umsetzung der Gründächer ist jedoch bei der Modellierung in dieser Arbeit als kritisch zu bewerten. Die Gründächer wurden durch die Abkopplung der Dachflächen von dem Kanalnetz und durch erhöhte Verluste umgesetzt. Die Ergebnisse aus den Überflutungsflächen zeigen einen erhöhten Wasserstand im Bereich der Dachflächen. Vergleichbare Ansätze lagen bisher nicht vor. Jedoch wäre zu überprüfen, ob die Implementierung von Gründächer bei einer gekoppelten 1D/2D Simulation durch eine Anpassung der Bemessungsregenspende für Dachflächen und den erhöhten Benetzungs- und Muldenverlusten möglich ist.

Yin et. al. (2020) haben die Niederschlags-Abflussprozesse in einem 1D Kanalnetzmodell und anschließend den Oberflächenabfluss in einem 2D Oberflächenabflussmodell berechnet. Abfluss, der durch Überstau an die Oberfläche tritt, dient als Zufluss für das 2D Oberflächenabflussmodell. Die Implementierung der GI erfolgte nur in dem 1D Kanalnetzmodell. Das 2D Oberflächenabflussmodell ist Cellular Automata Data basiert und bietet den Vorteil kurzer Rechenzeiten. Allerdings erfolgt keine bidirektionale Kopplung des 2D Oberflächenmodells und des 1D Kanalnetzmodells, sodass kein zeitgleicher Austausch zwischen den Modellen erfolgen kann. Weiterhin ist nicht beschrieben, in welchem Umfang GI umgesetzt wurde.

Die Beurteilung der Wirksamkeit der GI erfolgt in dieser Arbeit unter Verwendung der gekoppelten 1D/2D Simulation. Zusätzlich erfolgte die Berechnung aller Varianten mit einer reinen 2D Oberflächenabflusssimulation. Einige Leitfäden zum Starkregenrisikomanagement empfehlen eine 2D Berechnung des Oberflächenabflusses ohne Berücksichtigung des Kanalnetzes (LUBW, 2016; MULNV, 2018). Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sowohl bei dem Ausgangszustand als auch bei allen Varianten mit GI keine vergleichbaren Ergebnisse zwischen der reinen 2D Oberflächenabflusssimulation und der gekoppelten 1D/2D Simulation berechnet werden. Das Untersuchungsgebiet Nikolausberg zeigt bei einer reinen 2D Simulation zudem eine Veränderung des Fließwegs. Wie bereits in DWA (2020) und Webber et. al. (2019) angeführt, zeigen die Ergebnisse

dieser Arbeit ebenfalls, dass eine gekoppelte 1D/2D Simulation erforderlich ist für eine detaillierte Überflutungsbetrachtung. Eine erste Abschätzung der Überflutungsgefährdung sowie der Wirksamkeit der GI mittels einer reinen 2D Oberflächenabflusssimulation wie in Webber et. al. (2019) erweist sich im Rahmen dieser Arbeit als nicht zweckmäßig. Ein Zusammenhang zwischen der Abweichung der Überflutungsfläche zu einer gekoppelten 1D/2D Simulation, der Intensität des Ereignisses und dem Anteil an GI im Untersuchungsgebiet ist nicht erkennbar.

Tyrna et. al. (2017) verringern bei einer reinen 2D Simulation den Modellregen um einen Anteil, der vom Kanalnetz abgeleitet werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit erweist sich diese Vorgehensweise nicht als zweckmäßig (vgl. Anlage A.10).

Einige vorangegangene Studien (Webber et. al., 2019; Yin et. al., 2020) haben ein Framework zur schnellen Beurteilung der GI basierend auf Cellular Automata Data erstellt. Die Vorteile liegen in der schnelle Berechnungszeit, aber einige Prozesse, wie zum Beispiel die Infiltration, werden vereinfacht dargestellt (Webber et. al., 2019). Inwiefern Cellular Automata Data basierte Berechnungsansätze in Kombination mit GI ebenfalls für Einzugsgebiete mit Geländegefälle anwendbar sind, bleibt offen. Ein Vergleich der verschiedenen Berechnungsansätze mit implementierter GI übersteigt den Rahmen dieser Arbeit. Jedoch wäre in Einzugsgebieten mit GI zu überprüfen, welchen Einfluss die Berechnungsansätze auf die Ergebnisse haben.

In dieser Arbeit enthält der höchste Implementierungsgrad an GI in das DGM eingeprägte Mulden. Wegen eines numerischen Fehlers war die Implementierung von Mulden-Rigolen-Elementen nicht möglich. Wie auch vorangegangene Studien bereits angeführt haben (Webber et. al., 2019; Schubert et. al., 2017; Yin et. al., 2020), wird auch in dieser Arbeit deutlich, dass im Bereich der Überflutungsberechnung zum derzeitigen Stand zu wenig Werkzeuge zur Implementierung zur Verfügung stehen.

12 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Wirksamkeit von GI auf die Reduzierung von Überflutungen betrachtet. Insgesamt wurden jeweils fünf verschiedene Implementierungsstufen der GI sowie ein Ausgangszustand ohne GI anhand von sechs Modellregen verschiedener Wiederkehrzeiten untersucht und ausgewertet. Die beiden betrachteten Einzugsgebiete unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Bebauungsstruktur und Topografie. Die modelltechnische Umsetzung erfolgte zunächst in einer gekoppelten 1D/2D Simulation. Die Ergebnisse wurden anhand der maximalen Wasserstände, deren Ausdehnung, der maximalen Fließgeschwindigkeiten und des Gesamtabflusses im Kanalnetz ausgewertet und gegenübergestellt. Zudem erfolgten reine 2D Simulationen, deren Ergebnisse ebenfalls anhand der maximalen Wasserstände, deren Ausdehnung und der maximalen Fließgeschwindigkeiten ausgewertet wurden. Die Ergebnisse der reinen 2D Simulationen wurden anschließend mit denen der 1D/2D Simulation verglichen. Zur Validierung der Ergebnisse der 1D/2D Simulation wurde eine Sensitivitätsanalyse ausgewählter Parameter für den Ausgangszustand und Variante 5 durchgeführt. Im Anschluss wurde ein modellbasiertes Konzept zur Beurteilung der Wirksamkeit von GI auf die Reduzierung von Überflutungen entwickelt.

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Je größer der Anteil an GI ist, desto stärker ist ihr Einfluss auf das Abflussgeschehen. Gleichzeitig sinkt die Wirksamkeit von GI mit steigender Intensität der Modellregen.
- GI ist bei Wiederkehrzeiten bis maximal $T = 30$ a effektiv und zweckmäßig einsetzbar, um die Auswirkungen von Überflutungen zu reduzieren. Modellregen größerer Intensitäten werden nicht oder vernachlässigbar gedämpft.
- Lokal kann GI einen Einfluss auf die maximale Fließgeschwindigkeit haben, jedoch ist dieser insgesamt sehr gering.
- Kleinskalige Maßnahmen wie Gründächer oder Rasengittersteine auf Auffahrten haben einen vernachlässigbaren Effekt bezogen auf die Wirksamkeit bei Überflutungen.
- Der Einfluss der Topografie auf die Wirksamkeit der GI ist signifikant. Bei einem höherem Flächenanteil an GI wird die Ausdehnung des maximalen Wasserstands in Göttingen Nikolausberg nur in gleichem Maße wie in Hannover Oberricklingen reduziert.
- Eine reine 2D Simulation ist nicht zweckmäßig zur Beurteilung der Überflutung. Dabei ist kein Zusammenhang zwischen der Niederschlagsintensität und der Abweichung der Überflutungsfläche von einer 1D/2D Simulation festzustellen.
- Aufgrund der vielen Einflussfaktoren (z. B. Topografie, Bebauungsstruktur) bei der Implementierung der GI ist eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse nicht möglich. Deswegen ist eine modelltechnische Untersuchung erforderlich.
- Im Bereich der Modellierung fehlt es insgesamt an Werkzeugen für die Implementierung von GI in 2D Modelle.

13 Ausblick

In der Literatur finden sich zahlreiche Untersuchungen, in denen die Auswirkungen der GI auf Abflüsse im Kanalnetz bei verschiedenen Niederschlagsbelastungen beschrieben werden. In wenigen Studien erfolgte hingegen die Implementierung von GI bei einer gekoppelten 1D/2D Simulation zur Untersuchung der Auswirkungen auf eine Überflutung sowie die Kalibrierung des Modells auf Basis von Messdaten.

Weiterführende Studien könnten noch bisher offene Punkte klären:

- Auswirkungen längerer Niederschlagsereignisse größerer Wiederkehrzeit auf die Wirksamkeit der GI auf Überflutungen;
- Einflüsse der Anfangsbedingungen (z. B. Muldenfüllgrad, Bodenfeuchte) auf die Wirksamkeit von GI bei extremen Niederschlagsereignissen;
- Einflüsse der Infiltrationsparameter des Untergrunds bzw. die der GI auf die Wirksamkeit GI, besonders bei längeren Niederschlagsereignissen;
- ob in existierenden Schwammstädten die Überflutungsgefährdung signifikant reduziert werden kann;
- kritische Überlagerungen von maximalen Wasserständen oder Fließgeschwindigkeiten durch die Implementierung der GI;
- tieferegehende Untersuchungen des Einflusses der Topografie auf die Wirksamkeit der GI z. B. durch ein modelltechnisches „Kippen“ eines bestehenden Gebiets zur besseren Vergleichbarkeit;
- Implementierung einer existierenden Schwammstadt in einem 1D/2D Modell mit Messdaten zur Kalibrierung des Modells;
- Entwicklung von Werkzeugen für die Modellierung von GI bei 2D Modellen.

Literaturverzeichnis

- Althaus, J. (1986): Vergleich von Modellregen zur Kanalnetzberechnung. Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau, der Universität Hannover, Band 56.
- Ahiablame, L. & Shakya, R. (2016): Modelling flooding reduction effects of low impact development at a watershed scale. *Journal of Environmental Management*, 171. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.01.036.
- ATV Abwassertechnische Vereinigung e. V. (1977): Arbeitsblatt A 118: Richtlinien für die hydraulische Berechnung von Schmutz-, Regen- und Mischwasserkanälen. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., St. Augustin.
- Bayrisches Landesamt für Umwelt (2005): Regenwasserversickerung - Gestaltung von Wegen und Parkplätzen, Praxisratgeber für Grundstückseigentümer. <https://www.regensburg.de/fm/121/broschuere-regenwasserversickerung.pdf>; aufgerufen am 14.08.2020.
- Chan, F. K. S.; Griffiths, J. A.; Higgitt, D.; Xu, S.; Zhu, F.; Tang, Y.-T.; Xu, Y.; Thorne, C. R. (2018): "Sponge City" in China — A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. *Land Use Policy*, 76. doi: 10.1016/j.landusepol.2018.03.005.
- Chanson, H. & Brown, R. (2018): Stability of Individuals during Urban Inundations: What Should We Learn from Field Observations? *Geosciences*, 8 (9), 341. doi: 10.3390/geosciences8090341.
- Creabeton Matriériaux AG (2014): Technische Wegleitung Betonsteinbeläge. https://www.creabeton-materiaux.ch/media/documents/BETONSTEINBELAEGE_D.PDF; aufgerufen am 31.08.2020.
- De Vleeschauwer, K.; Weustenraad, J.; Nolf, C.; Wolfs, V.; De Meulder, B.; Shannon, K.; Willems, P. (2014): Green–blue water in the city: quantification of impact of source control versus end-of-pipe solutions on sewer and river floods. *Water Science & Technology*, 70 (11), 1825. doi:10.2166/wst.2014.306.
- DHI A/S (2020a); Mike Urban – Integrated urban water modelling, <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-urban>; aufgerufen am 29.12.2020.
- DHI A/S (2020b): MIKE FLOOD. 1D-2D Modelling – User Manual. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2020/Water_Resources/MIKE_FLOOD_UserManual.pdf, aufgerufen am 29.12.2020.
- Dilly, T. C.; Schmitt, T. G.; Dittmer, U. (2019): Smart Water: Konzepte für einen intelligenten Umgang mit Wasser in der Stadt der Zukunft. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 66 (10). doi: 10.3242/kae2019.10.002.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2016): Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 100: Bestimmungen in Verbindung mit DIN EN 752 und DIN EN 12056. DIN, Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2017): DIN EN 752: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden; Deutsche Fassung EN 752:2017. DIN, Berlin.

- DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2005): Arbeitsblatt A 138: Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. DWA, Hennef.
- DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2011): Arbeitsblatt DWA-A 118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. DWA, Hennef.
- DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2016a): Gelbdruck Arbeitsblatt DWA-A 102/ BWK-A 3: Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer. DWA, Hennef.
- DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2016b): Merkblatt DWA-M 119: Risikomanagement in der kommunalen Überflutungsvorsorge für Entwässerungssysteme bei Starkregen. DWA, Hennef.
- DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2020): Merkblatt DWA-M165: Anforderungen an Niederschlags-Abfluss- und Schmutzfrachtmodelle in der Siedlungsentwässerung – Teil 1: Anforderungen. Entwurf Weißdruck. DWA, Hennef.
- DWD Deutscher Wetterdienst (2011): Niederschlag: vieljährige Mittelwerte 1981 – 2010 – DWD. <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=mittlerer+Jahresniederschlag+G%C3%B6ttingen>; aufgerufen am 21.08.2020.
- DWD Deutscher Wetterdienst (2017): KOSTRA-DWD 2010R 3.2 - Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen.
- Fiori, A. & Volpi, E. (2020): on the effectiveness of LID infrastructures for the attenuation of urban flooding at the catchment scale. *Water Resources Research*, akzeptierter Artikel. doi: 10.1029/2020wr027121.
- Fletcher, T. D.; Andrieu, H.; Hamel, P. (2013): Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51. doi:10.1016/j.advwatres.2012.09.001.
- Fletcher, T.D.; Shuster, W.; Hunt, W.F.; Ashley, R.; Butler, D.; Arthur, S.; Trowsdale, S.; Barraud, S.; Semadeni-Davies, A.; Bertrand-Krajewski, J.-L.; Mikkelsen, P.S.; Rivard, G.; Uhl, M.; Dagenais, D.; Viklander, M. (2015): SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12 (7). doi: 10.1080/1573062X.2014.916314.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2002): FGSV 288 - Empfehlungen für Fußgängerverkehrsanlagen (EFA). FGSV, Köln.
- Fuchs, K. (2018): Betrachtung der räumlichen Auflösung eines urbanen hydrologisch-hydraulischen Modells in SWMM. Bachelorarbeit, Institut für Strömungsmechanik und Umweltphysik im Bauwesen, Leibniz Universität Hannover.
- Fuchs, L. & Schmidt, N. (2015): Vergleich von 2-dimensionalen Berechnungsansätzen für die Gefährdungsanalyse in urbanen Gebieten. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 67 (5-6). doi: 10.1007/s00506-015-0231-1.
- Guo, X., Guo, Q., Zhou, Z., Du, P., Zhao, D. (2019): Degrees of hydrologic restoration by low impact development practices under different runoff volume capture goals. *Journal of Hydrology*, 578, 124069. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124069.

- Grüning, H. & Grimm, M. (2015): Unwetter mit Rekordniederschlägen in Münster. Korrespondenz Wasserwirtschaft, 8 (2). doi: 10.3243/kwe2015.02.001.
- Henonin, J.; Russo, B.; Mark, O.; Gourbesville, P. (2013): Real-time urban flood forecasting and modelling – a state of the art. Journal of Hydroinformatics, 15 (3). doi: 10.2166/hydro.2013.132.
- Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH (2020): HYDRO_AS-2D – hydrodynamisch-numerische Software für die 2D-Simulation in den Bereichen Hochwasserschutz, Gewässerentwicklung und Starkregen. <https://www.hydrotec.de/software/hydro-as-2d/?cookie-state-change=1609255222417>, aufgerufen am 29.12.2020.
- Illgen, M.; Kissel, M.; Piroth, K. (2013): Starkregen und urbane Sturzfluten – Handlungsempfehlungen zur kommunalen Überflutungsvorsorge. Korrespondenz Wasserwirtschaft, 6 (7). doi: 10.3243/kwe2013.11.003.
- Innovyze (2020): InfoWorks ICM. <https://www.innovyze.com/en-us/products/infoworks-icm>, aufgerufen am 29.12.2020.
- Itwh (2012): Untersuchung zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Straßenabläufen. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie (itwh) GmbH, Hannover.
- itwh (2020a): HYSTEM-EXTRAN – Hydrodynamische Kanalnetzberechnung, Dokumentation Version 8.3. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie (itwh) GmbH, Hannover.
- itwh (2020b): FOG – Das Kanalnetz in GIS, Dokumentation Version 8.3. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie (itwh) GmbH, Hannover.
- itwh (2020c): Urbane Sturzfluten und Überflutung – Gefährdungsanalyse mit HYSTEM – EXTRAN 2D. Schulungsunterlagen. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie (itwh) GmbH, Hannover.
- Jonkman, S. N. & Penning-Rowsell, E. (2008): Human Instability in Flood Flows. JAWRA: Journal of the American Water Resources Association, 44 (5). doi: 10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x.
- Landeshauptstadt Hannover (2015): Information des Fachbereichs Umwelt und Stadtgrün – Dachbegrünung und Photovoltaik. Eine Handreichung der Landeshauptstadt Hannover. <https://www.hannover.de/content/download/549864/12532622/file/Information+Dachbegr%C3%BCnung+und+Photovoltaik+2019.pdf>; aufgerufen am 01.09.2020.
- LGLN, Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (2020): Digitale Geländemodelle (DGM). https://www.lgln.niedersachsen.de/startseite/geodaten/karten/3d_geobasisdaten/dgm/digitale-gelaendemodelle-dgm-143150.html, aufgerufen am 29.12.2020.
- Li, Y.; LI, H. X.; Huang, J.; Liu, C. (2020): An approximation method for evaluating flash flooding mitigation of sponge city strategies – A case study of Central Geelong. Journal of Cleaner Production, 257, 120525. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120525.
- LUBW, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2018): Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. LUBW, Karlsruhe.
- Maniak, U. (2016): Hydrologie und Wasserwirtschaft. 7., neu bearbeitete Auflage. Springer-Verlag. Berlin.

- MULNV, Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2018): Arbeitshilfe kommunales Starkregenrisikomanagement – Hochwasserrisikomanagementplanung in NRW. MULNV, Düsseldorf.
- NIBIS, Niedersächsisches Bodeninformationssystem (2020): Bodenkarten von Niedersachsen. <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>, aufgerufen am 08.07.2020.
- Rehm Software GmbH (2019): SEWERPAC. <https://www.rehm.de/software/sewerpac/>, aufgerufen am 29.12.2020.
- Rehm Software GmbH (2018): Kurzbeschreibung Programm HYKAS-2D. https://www.rehm.de/fileadmin/user_upload/Kurzbeschreibungen/HYKAS-2D.pdf, aufgerufen am 29.12.2020.
- Rosa, D. W. B.; Nascimento, N. O.; Moura, P. M.; Macedo, G. D. (2020): Assessment of the hydrological response of an urban watershed to rainfall-runoff events in different land use scenarios – Belo Horizonte, MG, Brazil. *Water Science and Technology*, 81 (4). doi:10.2166/wst.2020.148.
- Rossman, L. A. (2015): Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1. US EPA National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, USA.
- Rossman, L. A. & Huber, W. C. (2016): Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality (Revised). US EPA National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, USA.
- Rüngeler, S. (1998): Die Funktion von Dachbegrünungen in urbanen Wasserkreisläufen. Diplomarbeit, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Berlin.
- Schmitt, T. G.; Krüger, M.; Pfister, A.; Becker, M.; Mudersbach, C.; Fuchs, L.; Hoppe, H.; Lakes, I. (2018): Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 65 (2). doi: 10.3242/kae2018.02.002.
- Schubert, J. E.; Burns, M. J.; Fletcher, T. D.; Sanders, B. F. (2017): A framework for the case-specific assessment of Green Infrastructure in mitigating urban flood hazards. *Advances in Water Resources*, 108. doi: 10.1016/j.advwatres.2017.07.009.
- Shu, C. W.; Han, S. S.; Kong, W. N.; Dong, B. L. (2016): Mechanism of toppling instability of the human body in floodwaters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 39, 012038. doi: 10.1088/1755-1315/39/1/012038.
- Sieker, H. (2020): Das Konzept der Schwammstadt (Sponge-city). <https://www.sieker.de/fachinformationen/umgang-mit-regenwasser/article/das-konzept-der-schwammstadt-sponge-city-577.html>; aufgerufen am 15.11.2020.
- Sieker, H. & Bandermann, S. (2020): Rigolen. Fachinformationen – Regenwasserbewirtschaftung – Versickerung. <https://www.sieker.de/fachinformationen/regenwasserbewirtschaftung/versickerung/article/rigolen-185.html>; aufgerufen am 16.10.2020.
- Stierwahld, G.; Künne, H. D.; Vogt, W. (2005): Stadtverkehrsplanung – Grundlagen, Methoden, Ziele. 2. Neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Tandler, Gesellschaft für Umweltinformatik mbH (2020a): ++SYSTEMS. <https://www.tandler.com/de/page/software/plus-plus-systems>, aufgerufen am 29.12.2020.

- Tandler, Gesellschaft für Umweltinformatik mbH (2020b): GeoCPM. <https://www.tandler.com/de/page/software/geocpm>, aufgerufen am 29.12.2020.
- Tyrna, B.; Assmann, A.; Fritsch, K.; Johann, G. (2017): Large-scale high-resolution pluvial flood hazard mapping using the raster-based hydrodynamic two-dimensional model FloodAreaHPC. *Journal of Flood Risk Management*, 11 (S2). doi: 10.1111/jfr3.12287.
- US ACE, US Army Corps of Engineers (2020): HEC-RAS 2D User's Manual. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest>, aufgerufen am 29.12.2020.
- Van Hattum, T., Blauw, M., Jensen, M.B., de Bruin, K. (2016): Towards Water Smart Cities: climate adaptation is a huge opportunity to improve the quality of life in cities. Wageningen University & Research.
- Veit, Johannes (2009): Erstellung und Validierung eines hydrodynamischen Simulationsmodells für das Einzugsgebiet "Graz West". Diplomarbeit, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Landschaftswasserbau, Technische Universität Graz.
- Verworn, H.-R. & Kenter, G. (1993): Abflussbildungsansätze für Niederschlag-Abfluss-Modellierung. In: *Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz*. Heft 24. SuG Verlagsgesellschaft Hannover.
- Verworn, H.-R. (1999): Anwendung von Kanalnetzmodellen in der Stadthydrologie. Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz. Heft 18. SuG Verlagsgesellschaft Hannover.
- Von Horn, J.; Bonnet, C.; Schäfer, K.; Koch, M.; Thielking, K.; Gatke, D.; Jeskulke, M.; Hoppe, H. (2018): Ermittlung von Überflutungsgefahren mit vereinfachten und detaillierten hydrodynamischen Modellen. Ein Praxisleitfaden zu Begriffen, Berechnungsmethoden, Grundlagen und Einflussfaktoren. *Korrespondenz Abwasser, Abfall*, 65 (2). doi: 10.3242/kae2018.02.004.
- Wang, C. (2020): Th Research on the Rain Environment Strategy of Guizhou in the Low Impact Development View. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 435 (1), 012028.
- Webber, J. L.; Fletscher, T. D.; Cunningham, L.; Fu, G.; Butler, D.; Burns, M. J. (2019): Is green infrastructure a viable strategy for managing urban surface water flooding? *Urban Water Journal*. doi: 10.1080/1573062X.2019.1700286.
- Xia, J.; Chen, Q.; Falconer, R. A.; Deng, S.; Guo, P. (2016): Stability criterion for people in floods for various slopes. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 169 (4). doi:10.1680/wama.14.0011.
- Yin, D.; Evans, B.; Wang, Q.; Chen, Z.; Jia, H.; Chen, A. S.; Fu, G.; Ahmad, S.; Leng, L. (2020): Integrated 1D and 2D model for better assessing runoff quantity control of low impact development facilities on community scale. *Science of the Total Environment*, 720, 137630. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137630.
- Zevenbergen, C.; Fu, D.; Pathirana, A. (2018): Transitioning to Sponge Cities: Challenges and Opportunities to Address Urban Water Problems in China. *Water*, 10 (9), 1230. doi:10.3390/w10091230.

- Zhang, P., Chen, L., Hou, X., Wei, G., Zhang, X., Shen, Z. (2020): Detailed Quantification of the Reduction Effect of Roof Runoff by Low Impact Development Practices. *Water*, 12 (3), 795. doi:10.3390/w12030795.
- Zhang, K. & Chui, T. F. M. (2018): A comprehensive review of spatial allocation of LID-BMP-GI practices: Strategies and optimization tools. *Science of The Total Environment*, 621, 915–929. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.281.
- Ziese, M.; Junghänel, T.; Becker, A. (2016): Andauernde Großwetterlage Tief Mitteleuropa entfaltet Ihr Unwetterpotential mit starken Gewittern und massiven Schadensgeschehen in Deutschland. Deutscher Wetterdienst. https://14-tage-wettervorhersage.de/data/news/images/2016/06/fpd13_160604.pdf, aufgerufen am 06.08.2020.
- Zilch, K.; Diederichs, C. J.; Katzenbach, R.; Beckmann, K. J. (2012): Wasserbau, Siedlungswasserwirtschaft, Abfalltechnik. In: *Handbuch für Bauingenieure*. 2. Auflage. Springer-Verlag. Berlin, 2013.

A Anlagen

A	ANLAGEN	I
A.1	Übersicht der tiefenabhängigen Rauheitsbeiwerte	ii
A.2	Abflussparameter „A102 Gründach 10..30cm Aufbau“	iv
A.3	Abflussparameter „A102 Rasengittersteine“	v
A.4	Implementierung Variante 5	vi
A.5	Flächenanteil des gesamten Untersuchungsgebiets Nikolausberg	x
A.6	Profilschnitte der Untersuchungsgebiete	xi
A.7	Sensitivitätsanalyse 2D Bodenklassen	xii
A.7.1	Parametervariationen der 2D Bodenklassen	xii
A.7.2	Ergebnisse Variante 0	xvii
A.8	Sensitivitätsanalyse Verluste der Abflussparameter	xviii
A.8.1	Parametervariation	xviii
A.8.2	Ergebnisse Variante 0	xix
A.9	Sensitivitätsanalyse Mindestwasserstand	xx
A.10	Reduzierter Modellregen	xxi
A.11	Ereignis Münster 2014	xxiv

A.1 Übersicht der tiefenabhängigen Rauheitsbeiwerte

In FOG 2D werden die Oberflächenrauheiten durch die 2D Bodenklassen in Form des Manning-Strickler Beiwerts k_{St} [$m^{1/3}/s$] (kurz: k_{St} -Werte) berücksichtigt. Insbesondere bei natürlichen Oberflächen wie Grünflächen, Ackerland oder Wäldern verändern sich die Rauheiten mit steigender Wassertiefe auf der Oberfläche. Um dies zu berücksichtigen, können die Manning-Strickler Beiwerte als tiefenabhängige k_{St} -Werte definiert werden (itwh, 2020b). Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden die 2D Bodenklassen 2 (Grünfläche), 3 (Acker), 4 (Wald) und 5 (Gewässer) als tiefenabhängig definiert.

2D Bodenklasse 0: Straße

Tabelle A.1: Tiefenabhängig Rauheitsbeiwerte der 2D Bodenklasse 0: Straße.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]
0	0
0,05	0
0,25	60
100	60

2D Bodenklasse 2: Grünfläche/ unbefestigt

Tabelle A.2: Tiefenabhängige Rauheitsbeiwerte der 2D Bodenklasse 2: Grünfläche/ unbefestigt.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]
0	5
0,05	5
0,25	30
100	30

2D Bodenklasse 3: Acker

Tabelle A.3: Tiefenabhängige Rauheitsbeiwerte der 2D Bodenklassen 3: Acker.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]
0	5
0,05	5
0,25	25
100	25

2D Bodenklasse 4: Wald

Tabelle A.4: Tiefenabhängige Rauheitsbeiwerte 2D Bodenklasse 4: Wald.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]
0	5
0,05	5
0,25	15
100	15

2D Bodenklasse 5: Gewässer

Tabelle A.5: Tiefenabhängige Rauheitsbeiwerte der 2D Bodenklasse 5: Gewässer.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]
0	5
0,05	5
0,25	30
100	30

A.2 Abflussparameter „A102 Gründach 10..30cm Aufbau“

Durch den Abflussparameter „A102 Gründach 10..30cm Aufbau“ werden im Rahmen dieser Arbeit ab Variante 1 (vgl. Kapitel 7.4.2) die Garagen und ab Variante 2 (vgl. Kapitel 7.4.3) alle Garagen und vorhandenen Flachdächer als extensives Gründach modelliert. In Tabelle A.6 sind die einzelnen Größen des Abflussparameters dargestellt.

Tabelle A.6: Abflussparameter "A102 Gründach 10..30cm Aufbau".

		A102 Gründach 10..30 cm Aufbau
Verluste [mm]	Benetzung	1,5
	Mulden	3,0
Abflusswirksame Fläche [%]	Anfangsabflussbeiwert	0,0
	Endabflussbeiwert	100,0
	Dauerverlust	0,0

Die einzelnen Verluste ergeben sich anhand des Arbeitsblatts DWA-A 102 (itwh, 2020a). Die Zuweisung des Abflussparameters erfolgt über die Mehrfachzuweisung.

A.3 Abflussparameter „A102 Rasengittersteine“

Die Implementierung der Rasengittersteine erfolgt zum einen durch die Implementierung einer 2D Bodenklasse und zum anderen durch die Wahl des Abflussparameters „A102 Rasengittersteine“ (vgl. Kapitel 7.4.4 und Kapitel 7.4.5). Die einzelnen Größen dieses Abflussparameters sind in Tabelle A.7 gegeben und lassen sich anhand des Arbeitsblatts DWA-A 102 herleiten (DWA, 2016a).

Tabelle A.7: Abflussparameter "A102 Rasengittersteine".

		A102 Rasengittersteine
Verluste [mm]	Benetzung	1,0
	Mulden	2,0
Abflusswirksame Fläche [%]	Anfangsabflussbeiwert	30,0
	Endabflussbeiwert	100,0
	Dauerverlust	0,0

Durch das Zuweisen des Abflussparameters „A102 Rasengittersteine“ verändert sich die Flächenart von „befestigt“ zu „unbefestigt“. Deswegen wird eine Bodenklasse unterhalb der Rasengittersteine benötigt. Für diesen Untergrund wird Sand gewählt, welcher die Speicherschicht zwischen den Rasengittersteinen und dem anstehenden Untergrund abbildet (vgl. Kapitel 5.3.2). In Tabelle A.8 sind die einzelnen Größen der Bodenklasse „Sand“ dargestellt.

Tabelle A.8: Parameter der Bodenklasse "Sand".

Parameter	Sand
Anfangsinfiltrationsrate [mm/min]	2,099
Endinfiltrationsrate [mm/min]	0,16
Infiltrationsrate Start [mm/min]	1,256
Regenerationskonstante [1/d]	1,584
Rückgangskonstante [1/d]	227,9

Die einzelnen Größen der Bodenklasse „Sand“ ergeben sich anhand Literatur (itwh, 2020a; DWA, 2016a).

A.4 Implementierung Variante 5

Gekoppeltes 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenmodell

Die Implementierung der Mulden in dem Softwarepaket „Urbane Sturzfluten“ erweist sich als umfangreicher als erwartet, da bisher kein Werkzeug zur modelltechnischen Umsetzung zur Verfügung steht. Im Folgenden werden die Arbeitsschritte, die für die Implementierung von Mulden auf Grünflächen entlang von Straßen notwendig sind, beschrieben.

Implementierung der Flächen „Mulde“

Die Grundlage eines Rechnernetzes für die Berechnung des Abflusses auf der Oberfläche sind Geländehöhe in Form eines DGM (vgl. Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3). Da es sich bei Mulden um Geländesenken handelt, müssen diese in das DGM eingepägt werden. Dazu wird das Werkzeug „Maßnahme“ verwendet, welches Geländesenken/-höhen in ein DGM einpägt. Für die Mulden wird eine relative Höhe von - 0,5 m angegeben. Die Implementierung der Mulden über eingepägte Senken mit relativen Absenkungen von 0,5 m ist lediglich eine modelltechnische Vereinfachung.

Die Implementierung der Mulden erfordert Werkzeuge der Massendatenverarbeitung aufgrund der hohen Anzahl der zu implementierenden Mulden. Bevor das Einpären der Mulden stattfinden kann, muss die jeweilige Fläche der Mulde bekannt sein. Dafür wird im ersten Schritt in ArcGIS eine neue Feature Class mit dem Namen „Mulde“ erstellt. Diese Feature Class dient dazu, die Flächen der Mulden im jeweiligen Untersuchungsgebiet einzuzeichnen. Der zweite Schritt ist das Einzeichnen bzw. Erstellen der Flächen „Mulde“. Beim Erstellen der jeweiligen Fläche ist keine Angabe der Länge und Breite möglich. Aus diesem Grund variieren die Abmessungen der einzelnen Mulden. Die erstellten Flächen „Mulde“ sind zunächst unabhängig von anderen Flächen und überlappen mit den vorhandenen Grün- und Straßenflächen. Da Mulden im Allgemeinen Grünflächen sind, werden diese im weiteren Verlauf als Grünflächen definiert und in die vorhandenen Grünflächen integriert. Um Lücken zwischen den Flächen „Mulde“ und den Straßenflächen zu vermeiden, sind bei der manuellen Erstellung dieser Flächen Überlappungen zwischen den unabhängigen Flächen „Mulde“ und den Straßenflächen erforderlich. Diese Überlappungen werden im nächsten Arbeitsschritt durch das ArcGIS Werkzeug „Radieren“ entfernt. Dadurch liegen die „Mulden“ als Fläche nur auf den vorhandenen Grünflächen seitlich neben den Straßenflächen. Wie bereits erwähnt, sollen die Mulden als Grünfläche definiert und in diese integriert werden. Zu diesem Zweck werden die Flächen „Mulde“ aus den Grünflächen ausradiert. So entstehen Lücken in den vorhandenen Grünflächen, in welche die Flächen „Mulde“ integriert werden können. Allerdings weisen Mulden im Allgemeinen eine andere Oberflächenrauheit als herkömmliche Grünflächen (z. B. Rasen) auf (Rossman, 2015). Deswegen werden die Flächen „Mulden“ ebenfalls aus der 2D Bodenklassen der Grünflächen ausradiert, sodass Lücken entstehen, die durch die 2D Bodenklasse der Mulden aufgefüllt werden. Die Flächen „Mulden“ werden nun in die vorhandenen Grünflächen und 2D Bodenklassen integriert. Die Integration erfolgt über das FOG Werkzeug „GIS-Daten importieren/ aktualisieren“. Dazu wird die Feature Class der Flächen „Mulden“ sowohl in die vorhandenen Grünflächen als auch in die vorhandenen 2D Bodenklassen importiert, sodass die „ausradierten“ Lücken durch die „Muldenflächen“ aufgefüllt werden. Mittels der beschriebenen Arbeitsschritte sind nun die Mulden als Fläche integriert. Das Einpären der Muldenfläche erfolgt wie bei den Grünflächen und 2D Bodenklassen über den Import der Feature Class der Flächen „Mulde“. Die Feature Class wird für das Einpären der Senke als „Maßnahme“ importiert. Somit wird allen Muldenflächen über das Werkzeug der Mehrfachzuweisung eine relative

Höhenänderung von - 0,5 m zugewiesen. Dadurch entstehen aus den reinen „Muldenflächen“ nun abgesenkte Mulden.

In Gebieten mit Geländegefälle oder bei Mulden großer Abmessungen sind zudem Schwellen notwendig (DWA, 2005). Die Schwellen verhindern das Auftreten von hohen Fließgeschwindigkeiten und einen möglichen Geschiebetransport in einer Mulde. Je nach Untersuchungsgebiet werden die Schwellen entweder über das Werkzeug „Maßnahme“ in das DGM mit einer relativen Geländeabsenkung von – 0,1 m in das DGM eingepägt (Göttingen Nikolausberg), oder die Schwellen unterbrechen lediglich die Mulden als Erhöhung auf Geländehöhe (Hannover Oberrieklingen). Das Einfügen dieser Schwellen erfolgt mit den gleichen Arbeitsschritten wie das Erstellen der Mulden.

Bis zu diesem Schritt sind die Mulden lediglich abgesenkte Grünflächen. Eine Zuweisung von Parametern (Abflussparameter, Bodenklasse und 2D Bodenklasse) und die modelltechnische Umsetzung des Mulden-Rigolen-Elements erfolgt in den nächsten Arbeitsschritten.

Modelltechnische Umsetzung einer Versickerungsmulde

Die Implementierung einer Mulde in einem gekoppelten 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenmodell muss sowohl in dem Oberflächenmodell als auch innerhalb des Kanalnetzmodells modelltechnisch erfolgen. Die Mulde bildet das Element durch die Absenkung an der Oberfläche bzw. in dem Oberflächenmodell ab, die zugewiesenen Parameter definieren die Mulde innerhalb des Kanalnetzmodells.

Die Definition der Mulde in dem 1D Kanalnetz-Oberflächenmodell erfolgt über die Definition eines Abflussparameters sowie einer entsprechenden Bodenklasse. Der Abflussparameter mit der zugehörigen Bodenklasse ist relevant für die Abflussbildung, insbesondere für die Versickerung, welche innerhalb der Kanalnetzmodells als Verluste gelten. Für die Implementierung der Mulden wird ein neuer Abflussparameter „Mulde“ definiert. Die Verluste (Benetzungs- und Muldenverluste) des Abflussparameters wurden anhand von Literaturwerten gewählt (Rossman, 2015; Rossman & Huber, 2016). In Tabelle A.9 sind die einzelnen Größen des Abflussparameter aufgeführt.

Tabelle A.9: Abflussparameter "Mulde".

Abflussparameter		Mulde
Verluste [mm]	Benetzung	2,0
	Mulden	3,0
Abflusswirksame Fläche [%]	Anfangsabflussbeiwert	0,0
	Endabflussbeiwert	100,0
	Dauerverlust	0,0

Bevor der Abflussparameter über die Mehrfachzuweisung den entsprechenden Flächen zugewiesen werden kann, wird eine zum Abflussparameter zugehörige Bodenklasse benötigt.

Tabelle A.10: Bodenklasse "Mulde".

Parameter	Mulde
Anfangsinfiltrationsrate [mm/min]	2,099
Endinfiltrationsrate [mm/min]	1,59
Infiltrationsrate Start [mm/min]	1,8
Regenerationskonstante [1/d]	1,584
Rückgangskonstante [1/d]	227,9

Die in Tabelle A.10 dargestellten Werte gehen aus der Annahme hervor, dass die Bodenklasse „Mulde“ sowohl die Deckschicht einer Mulde, den Mutterboden, als auch eine Sandschicht zwischen der Mulde und anstehendem Untergrund abbildet (vgl. Kapitel 5.3.3). Die Sandschicht wird, insbesondere durch die Anfangsinfiltrationsrate widergespiegelt, da dieser Wert aus der Bodenklasse „Sand“ übernommen wurde (itwh, 2020a). Ebenfalls wurden die Regenerations- und die Rückgangskonstante aus dieser Bodenklasse übernommen (itwh, 2020a). Diese Parameter können im Rahmen dieser Arbeit jedoch vernachlässigt werden. Die Konstanten sind bei einer kontinuierlichen Simulation relevant, nicht aber bei der Betrachtung von kurzen Starkregenereignissen. Der Wert der Endinfiltrationsrate ergibt sich aus der Annahme, dass die Endinfiltrationsrate der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit des Mutterbodens entspricht. Die Infiltrationsrate zu Beginn eines Ereignisses (Infiltrationsrate Start) ist ein Schätzwert und ergibt sich aus der oberen Grenze (Anfangsinfiltrationsrate) und der unteren Grenze (Endinfiltrationsrate).

Die Definition des Abflussparameters und der zugehörigen Bodenklasse bildet Parameter der Mulde innerhalb des Kanalnetzmodells ab. Für die Berechnung des 2D Oberflächenabflusses ist

zudem die Oberflächenrauheit der Mulde erforderlich. Aus diesem Grund wird die 2D Bodenklasse „Mulde“ erzeugt.

Tabelle A.11: Tiefenabhängig Rauheitsbeiwerte der 2D Bodenklasse "Mulde".

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert [$m^{1/3}/s$]
0,0	2,5
0,05	2,5
0,25	5,0
100	5,0

Die einzelnen Beiwerte der 2D Bodenklasse sind in Tabelle A.11 aufgeführt. Die Manning-Strickler-Beiwerte sind anhand von Literaturwerten gewählt (Fuchs, K., 2018). Die 2D Bodenklasse wird über die Mehrfachzuweisung den Muldenflächen zugewiesen.

Mit den vorangegangenen Arbeitsschritten ist die Erstellung einer Mulde für ein 2D Berechnungsnetz sowohl für eine gekoppelte 1D/2D Kanalnetz-Oberflächenabflusssimulation, als auch für eine nicht gekoppelte 2D Oberflächenabflusssimulation möglich.

A.5 Flächenanteil des gesamten Untersuchungsgebiets Nikolausberg

Im Tabelle A.12 sind die Flächenanteile der jeweiligen Varianten für das gesamte Untersuchungsgebiet Göttingen Nikolausberg dargestellt.

Tabelle A.12: Flächenanteile der verschiedenen Varianten in Göttingen Nikolausberg.

	Fläche [ha]	Anteil an Gesamtfläche [%]	Anteil an befestigter Fläche [%]
Variante 1	2,79	0,40	3,58
Variante 2	8,43	1,22	16,35
Variante 3	14,84	2,15	22,19
Variante 4	72,87	10,53	72,88
Variante 5	74,74	10,80	72,88

A.6 Profilschnitte der Untersuchungsgebiete

Im Folgenden sind exemplarisch die maximalen Wasserstände für Hannover Oberricklingen (vgl. Abbildung A.1 und Göttingen Nikolausberg (vgl. Abbildung A.2) dargestellt.

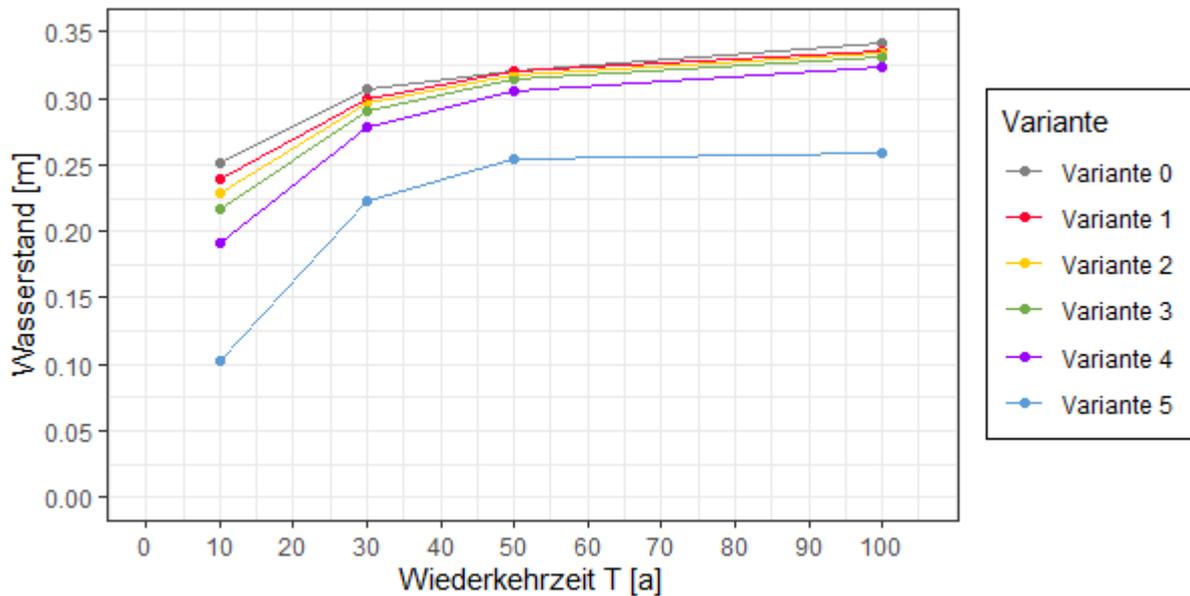


Abbildung A.1: Maximale Wasserstände in Hannover Oberricklingen für Schnitt 3.

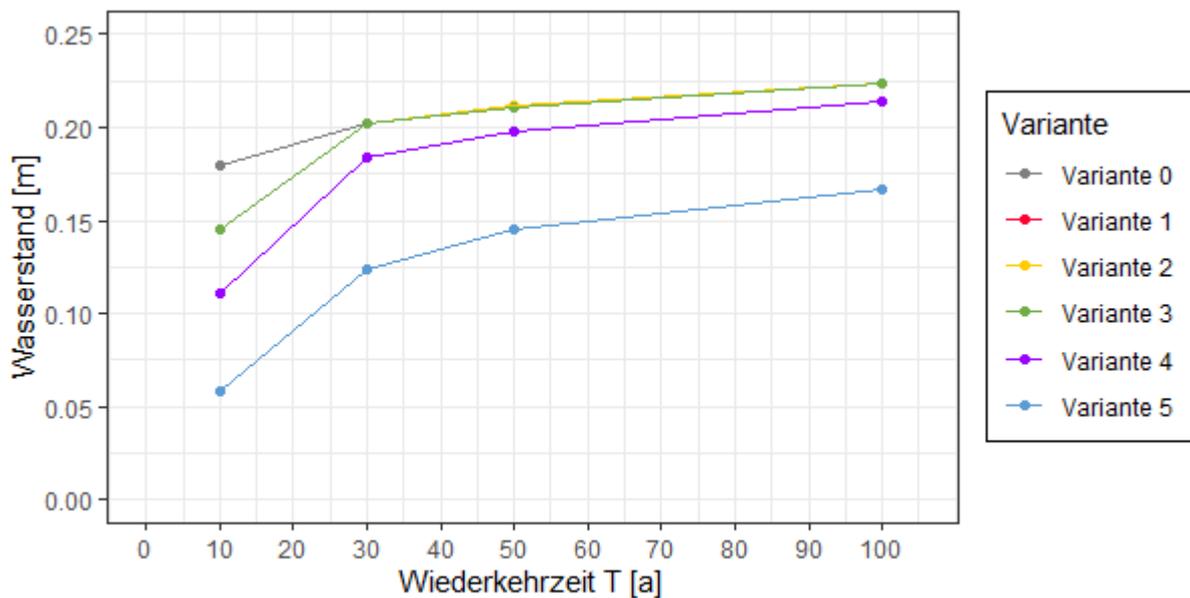


Abbildung A.2: Maximale Wasserstände in Göttingen Nikolausberg für die Schnitte 2 und 3.

A.7 Sensitivitätsanalyse 2D Bodenklassen

Im Folgenden sind die Parametervariationen der Sensitivitätsanalyse der 2D Bodenklassen aus Kapitel 9.1 dargestellt (vgl. Anlage A.7.1) sowie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Variante 0 (vgl. Anlage A.7.2).

Im Rahmen dieser Arbeit wird in Kapitel 9 eine Sensitivitätsanalyse für verschiedene Parameter durchgeführt. Im Folgenden sind die einzelnen Parameterwerte dieser Sensitivitätsanalyse aufgeführt.

A.7.1 Parametervariationen der 2D Bodenklassen

Im Folgenden sind die Parametervariationen der 2D Bodenklassen dargestellt. Zu Beginn die tiefenabhängigen Rauheitsbeiwerte des Ausgangszustands.

Ausgangszustand: 0% Variation

Tabelle A.13: Ausgangszustand Parametervariation 0% der 2D Bodenklassen.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{st} [$m^{1/3}/s$]				
	0: Asphalt	1: Gebäude	2: Grünfläche	6: Rasengittersteine	7: Mulden
0	5	-	5	5	2,5
0,05	5	-	5	5	2,5
0,25	60	-	30	15	5
100	60	-	30	15	5
Nicht tiefenabhängig	-	55	-	-	-

Variation + 10%

Tabelle A.14: Parametervariation + 10% der 2D Bodenklassen.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]				
	0: Asphalt	1: Gebäude	2: Grünfläche	6: Rasengittersteine	7: Mulden
0	5,5	-	5,5	5,5	2,75
0,05	5,5	-	5,5	5,5	2,75
0,25	66	-	33	16,5	5,5
100	66	-	33	16,5	5,5
Nicht tiefenabhängig	-	60,5		-	-

Variation + 15%

Tabelle A.15: Parametervariation + 15% der 2D Bodenklassen.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]				
	0: Asphalt	1: Gebäude	2: Grünfläche	6: Rasengittersteine	7: Mulden
0	5,75	-	5,75	5,75	2,875
0,05	5,75	-	5,75	5,75	2,875
0,25	69	-	34,5	17,25	5,75
100	69	-	34,5	17,25	5,75
Nicht tiefenabhängig	-	63,25		-	-

Variation + 20%**Tabelle A.16: Parametervariation + 20% der 2D Bodenklassen.**

Wasser- stand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]				
	0: Asphalt	1: Gebäude	2: Grünfläche	6: Rasengit- tersteine	7: Mulden
0	6	-	6	6	3
0,05	6	-	6	6	3
0,25	72	-	36	18	6
100	72	-	36	18	6
Nicht tiefen- abhängig	-	66		-	-

Variation + 50%**Tabelle A.17: Parametervariation + 50% der 2D Bodenklassen.**

Wasser- stand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]				
	0: Asphalt	1: Gebäude	2: Grünfläche	6: Rasengit- tersteine	7: Mulden
0	7,5	-	7,5	7,5	3,75
0,05	7,5	-	7,5	7,5	3,75
0,25	90	-	45	22,5	7,5
100	90	-	45	22,5	7,5
Nicht tiefen- abhängig	-	82,5		-	-

Variation - 10%

Tabelle A.18: Parametervariation - 10% der 2D Bodenklassen.

Wasser-stand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]				
	0: Asphalt	1: Gebäude	2: Grünfläche	6: Rasengit-tersteine	7: Mulden
0	4,5	-	4,5	4,5	2,25
0,05	4,5	-	4,5	4,5	2,25
0,25	54	-	27	13,5	4,5
100	54	-	27	13,5	4,5
Nicht tiefen-abhängig	-	49,5		-	-

Variation - 15%

Tabelle A.19: Parametervariation - 15% der 2D Bodenklassen.

Wasser-stand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]				
	0: Asphalt	1: Gebäude	2: Grünfläche	6: Rasengit-tersteine	7: Mulden
0	4,25	-	4,55	4,25	2,125
0,05	4,25	-	4,25	4,25	2,125
0,25	51	-	25,5	12,75	4,25
100	51	-	25,5	12,75	4,25
Nicht tiefen-abhängig	-	46,75		-	-

Variation - 20%

Tabelle A.20: Parametervariation - 20% der 2D Bodenklassen.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]				
	0: Asphalt	1: Gebäude	2: Grünfläche	6: Rasengittersteine	7: Mulden
0	4	-	4	4	2
0,05	4	-	4	4	2
0,25	48	-	24	12	4
100	48	-	24	12	4
Nicht tiefenabhängig	-	44		-	-

Variation - 50%

Tabelle A.21: Parametervariation - 50% der 2D Bodenklassen.

Wasserstand [m]	Manning-Strickler-Beiwert k_{St} [$m^{1/3}/s$]				
	0: Asphalt	1: Gebäude	2: Grünfläche	6: Rasengittersteine	7: Mulden
0	2,5	-	2,5	2,5	1,25
0,05	2,5	-	2,5	2,5	1,25
0,25	30	-	15	7,5	2,5
100	30	-	15	7,5	2,5
Nicht tiefenabhängig	-	27,5		-	-

A.7.2 Ergebnisse Variante 0

Abbildung A.3 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Variante 0.

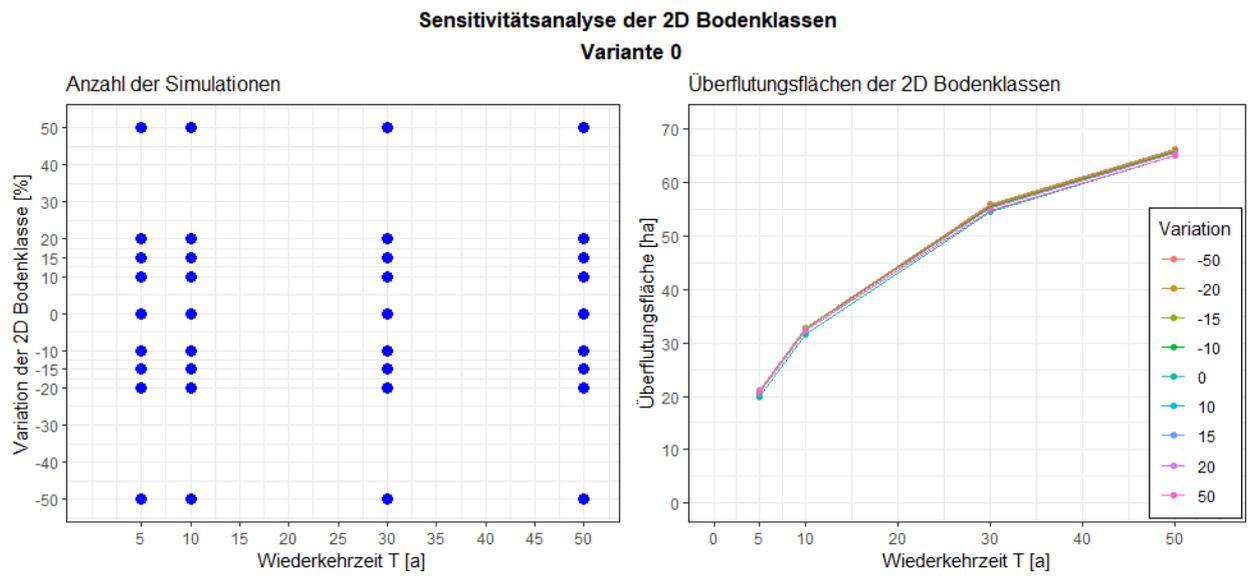


Abbildung A.3: Sensitivitätsanalyse der 2D Bodenklassen, Variante 0.

A.8 Sensitivitätsanalyse Verluste der Abflussparameter

A.8.1 Parametervariation

Die Benetzungs- und Muldenverluste der verschiedenen Einzelflächen wurden für die Ausgangsbetrachtungen anhand von Literatur ausgewählt (vgl. Kapitel 7.3.3) und sind in Tabelle A.22 dargestellt.

Ausgangszustand: Variation 0%

Tabelle A.22: Verluste der Abflussparameter des Ausgangszustands, Variation 0%.

Einzelfläche	Verluste [mm]	
	Benetzung	Mulden
Gebäude	0,3	0
Straße	0,5	0,5
Unbefestigt	5	4,0
Gründach	1,5	3,0
Rasengittersteine	1,0	2,0
Mulde	2,0	3,0

Aufgrund der langen Simulationsdauern werden die Parametervariationen bereits vor Beginn der Sensitivitätsanalyse festgelegt. Verfahren, wie das Monte-Carlo-Verfahren können im Rahmen dieser Arbeit nicht angewandt werden. Da insbesondere die Wirksamkeit der GI bei Starkregenereignissen überprüft wird, erfolgt die Parametervariation im Bereich der Extrema, sodass die Verluste um 100 % erhöht und um 100 % reduziert werden. Die einzelnen Werte der Parametervariation + 100 % sind in Tabelle A.23 dargestellt.

Variation + 100 %

Tabelle A.23: Parametervariation + 100 % der Verluste der Abflussparameter.

Einzelfläche	Verluste [mm]	
	Benetzung	Mulden
Gebäude	0,6	0,0
Straße	1,0	1,0
Unbefestigt	10,0	8,0
Gründach	3,0	6,0
Rasengittersteine	2,0	4,0
Mulde	4,0	6,0

Bei der **Parametervariation – 100 %** werden alle Benetzungs- und Muldenverluste auf 0 mm festgelegt.

A.8.2 Ergebnisse Variante 0

Abbildung A.4 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Benetzungs- und Muldenverluste bei Variante 0. Dargestellt sind auf der linken Seite die Anzahl der Simulationen [-] und auf der rechten Seite die Abweichung der Überflutungsfläche [%] jeweils über die Wiederkehrzeit T [a].

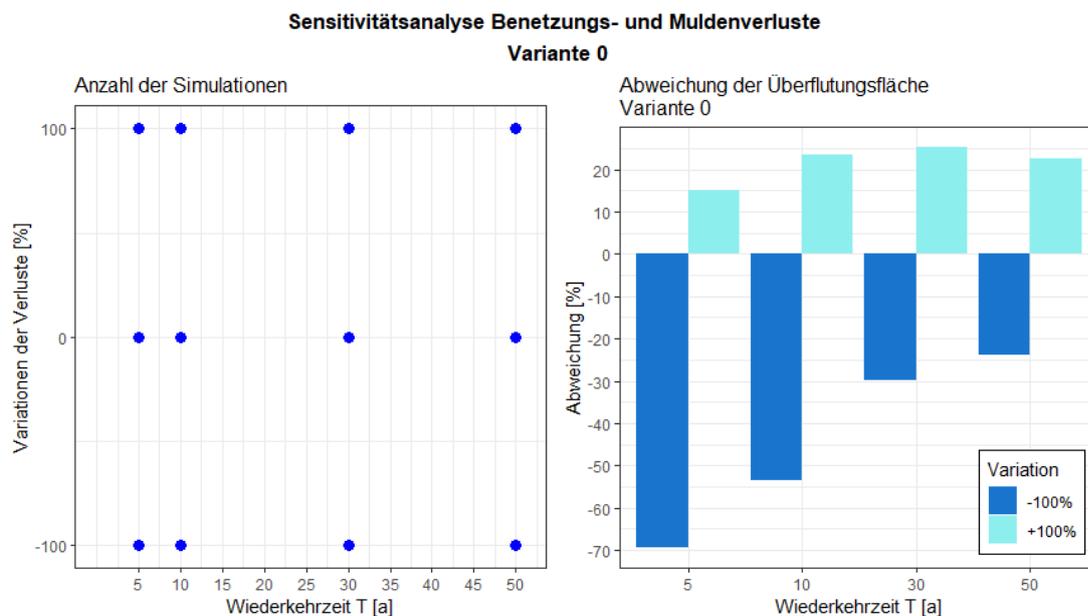


Abbildung A.4: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Benetzungs- und Muldenverluste, Variante 0.

A.9 Sensitivitätsanalyse Mindestwasserstand

Für die Sensitivitätsanalyse bei Variante 0 wurden ebenfalls die in Kapitel 9.3 aufgeführten Werte des Mindestwasserstands verwendet.

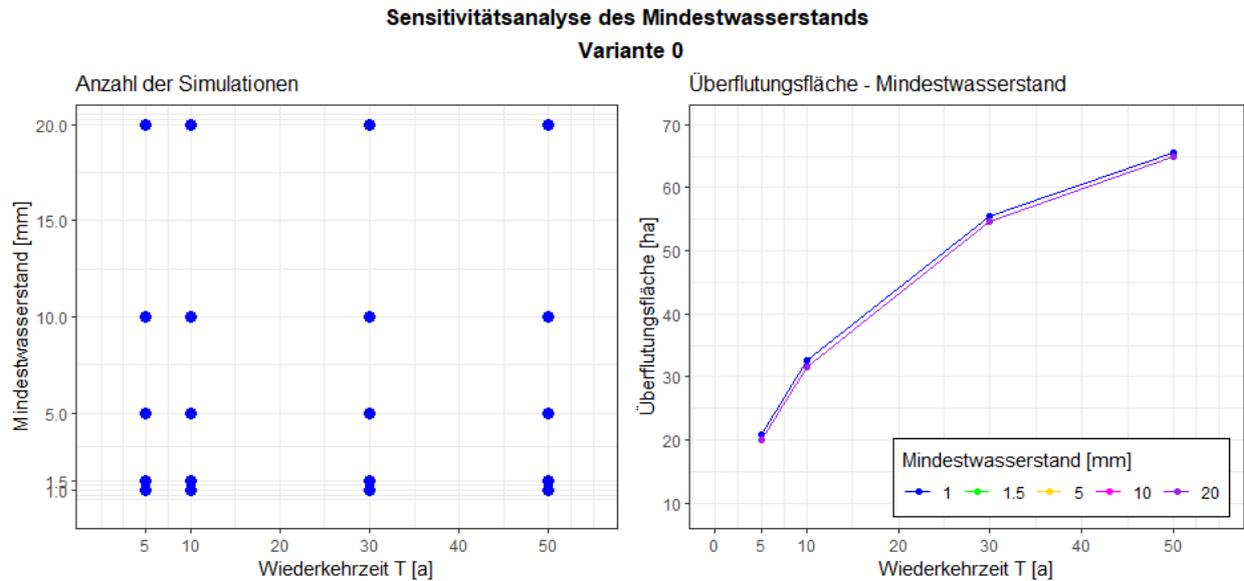


Abbildung A.5: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des Mindestwasserstands, Variante 0.

In Abbildung A.5 ist auf der linken Seite die Anzahl der durchgeführten Simulationen für die Variante 0 dargestellt. Auf der rechten Seite ist die Ausdehnung der Überflutungsfläche [ha] der verschiedenen Parametervariationen über die Wiederkehrzeit T [a] der Modellregen abgebildet. Der Ausgangszustand der Sensitivitätsanalyse entspricht der Variante 0 mit dem Standardwert des Mindestwasserstands von 1 mm (abgebildet in Blau). Bei der Ermittlung der Überflutungsfläche wird ebenfalls ein Grenzwasserstand für die ingenieurtechnische Anwendung zu 0,05 m festgelegt (vgl. Kapitel 7.5.1).

A.10 Reduzierter Modellregen

Wie die Ergebnisse aus Kapitel 8.3 zeigen, wird durch eine reine 2D Simulation und damit durch die Vernachlässigung des Kanalnetzes eine signifikant größere Überflutungsfläche berechnet. In einigen Studien (Li et. al., 2020; Tyrna et. al., 2017) erfolgt deshalb eine Reduzierung der Niederschlagsbelastung entsprechend der Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes. Dieser Ansatz wurde ebenfalls in der vorliegenden Arbeit bei Variante 0 und Variante 5 für die Modellregen der Wiederkehrzeit $T = 10$ a, 50 a, 100 a überprüft. Dabei wird angenommen, dass das Kanalnetz einen Niederschlag der Wiederkehrzeit von $T = 3$ a ableiten kann, der als Regen konstanter Intensität vom Modellregen abgezogen wird. Abbildung A.6 zeigt exemplarisch den Niederschlag [mm] über die Zeit [min] für den Modellregen der Wiederkehrzeit $T = 50$ a für Hannover Oberricklingen. In Blau gekennzeichnet ist der Anteil des Niederschlags, der der Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes entspricht und von dem Modellregen abgezogen wird. In Orange dargestellt ist der verbleibende Modellregens, der als Niederschlagsbelastung für diese Untersuchung angesetzt wird.

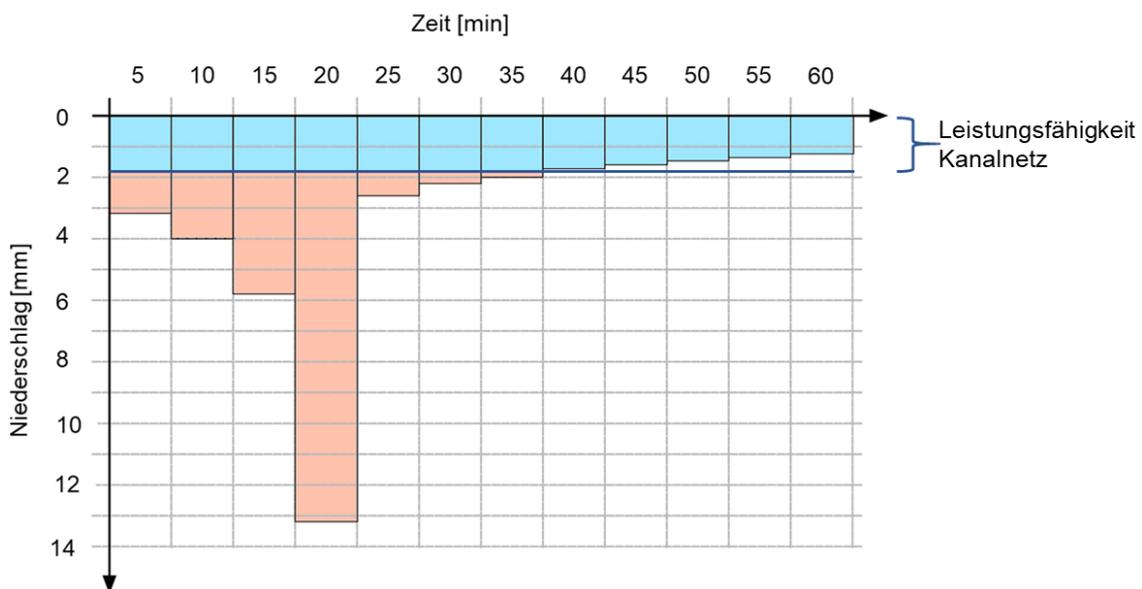


Abbildung A.6: Beispiel des modifizierten Modellregens für Hannover Oberricklingen.

Mit den reduzierten Modellregen erfolgt eine reine 2D Simulation. Im Anschluss werden die Ergebnisse mit den Ergebnissen der gekoppelten 1D/2D Simulation verglichen und sind für Hannover Oberricklingen in Abbildung A.7 und für Göttingen Nikolausberg in Abbildung A.8 dargestellt.

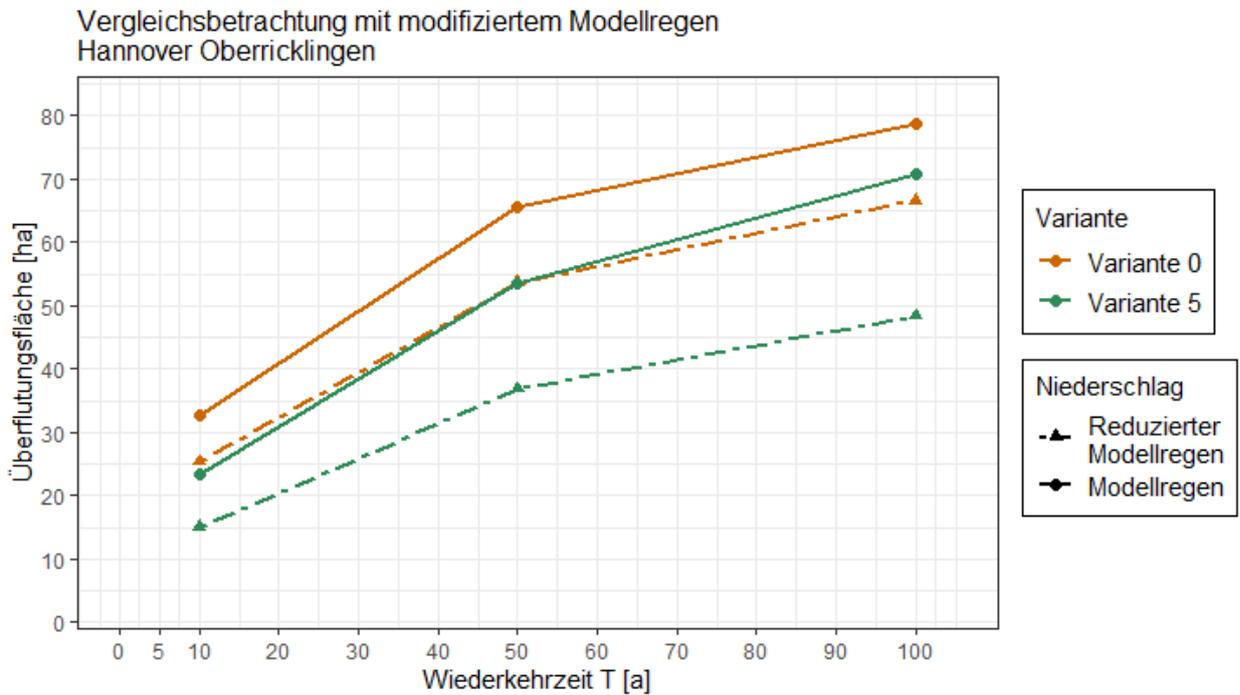


Abbildung A.7: Ergebnisse der Vergleichsbetrachtung mit modifiziertem Modellregen, Hannover Oberricklingen.

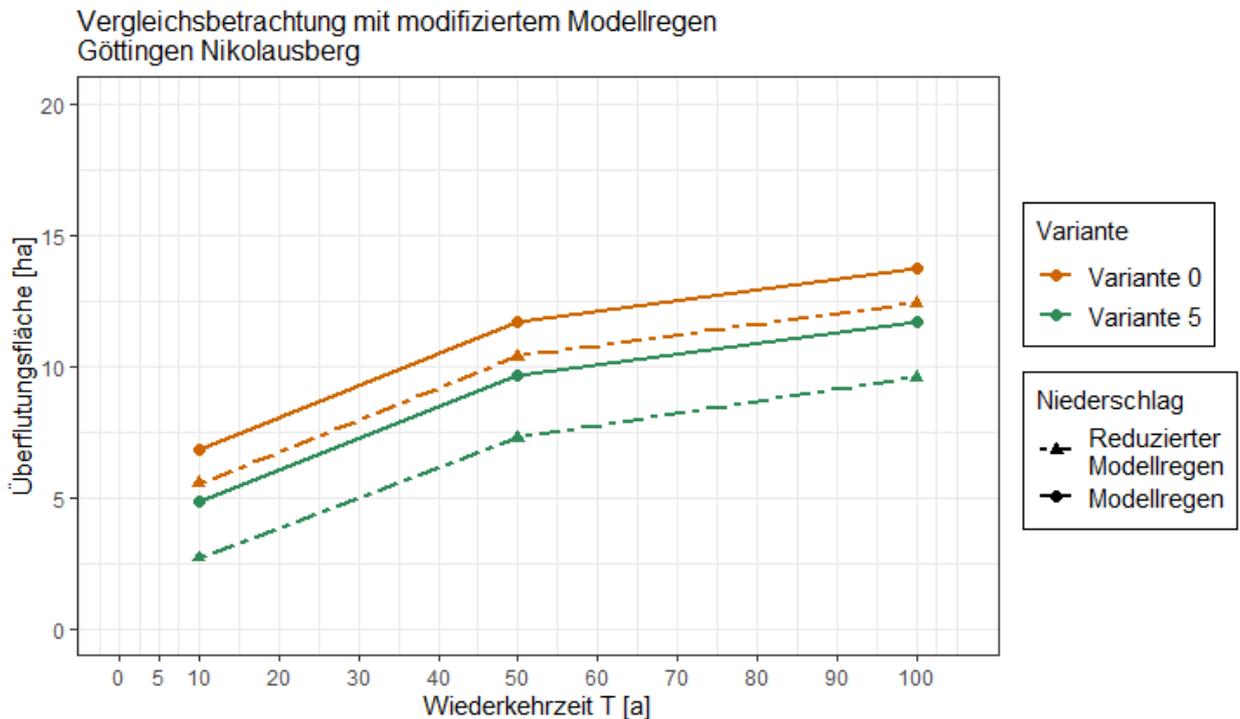


Abbildung A.8: Ergebnisse der Vergleichsbetrachtung mit modifiziertem Modellregen, Göttingen Nikolausberg.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Ansatz des reduzierten Modellregens (gestrichelte Linie) bei einer reinen 2D Simulation zu einer signifikant kleiner berechneten Überflutungsfläche führt als bei einer gekoppelten 1D/2D Simulation mit unverändertem Modellregen (durchgezogene Linie). Allerdings sind Unterschiede zwischen Variante 0 (Orange) und Variante 5 (Grün) erkennbar. So ist in Variante 0 die Überflutungsfläche des reduzierten Modellregens im Mittel um 16 % kleiner

als die der gekoppelten 1D/2D Simulation mit unverändertem Modellregen. In Variante 5 (Grün) hingegen beträgt dieser Unterschied im Mittel 31 %. Aufgrund der geringeren Niederschlagsbelastung des reduzierten Modellregens wird durch die GI ein größerer Anteil des Oberflächenabflusses zurückgehalten, sodass die Ausdehnung der überfluteten Fläche kleiner ist als im Vergleich mit dem unveränderten Modellregen.

Alles in allem zeigen die Ergebnisse, dass bei einer reinen 2D Simulation die Leistungsfähigkeit des Kanalnetzes nicht durch eine Reduzierung der Niederschlagsbelastung wiedergegeben werden kann. Insbesondere bei implementierter GI führt der Ansatz des reduzierten Modellregens bei dieser Untersuchung zu einer Unterschätzung der Überflutungsfläche. Aus diesem Grund ist der Ansatz des reduzierten Modellregens nicht zweckmäßig. Für eine detaillierte Überflutungsbetrachtung ist daher eine gekoppelte 1D/2D Simulation zwingend erforderlich.

A.11 Ereignis Münster 2014

Im Folgenden sind die berechneten maximalen Wasserstände für Hannover Oberricklingen Variante 0 und 5 für das Ereignis vom Juli 2014 in Münster dargestellt. Die gesamte Niederschlags-
höhe dieses Ereignisses betrug 285 mm.

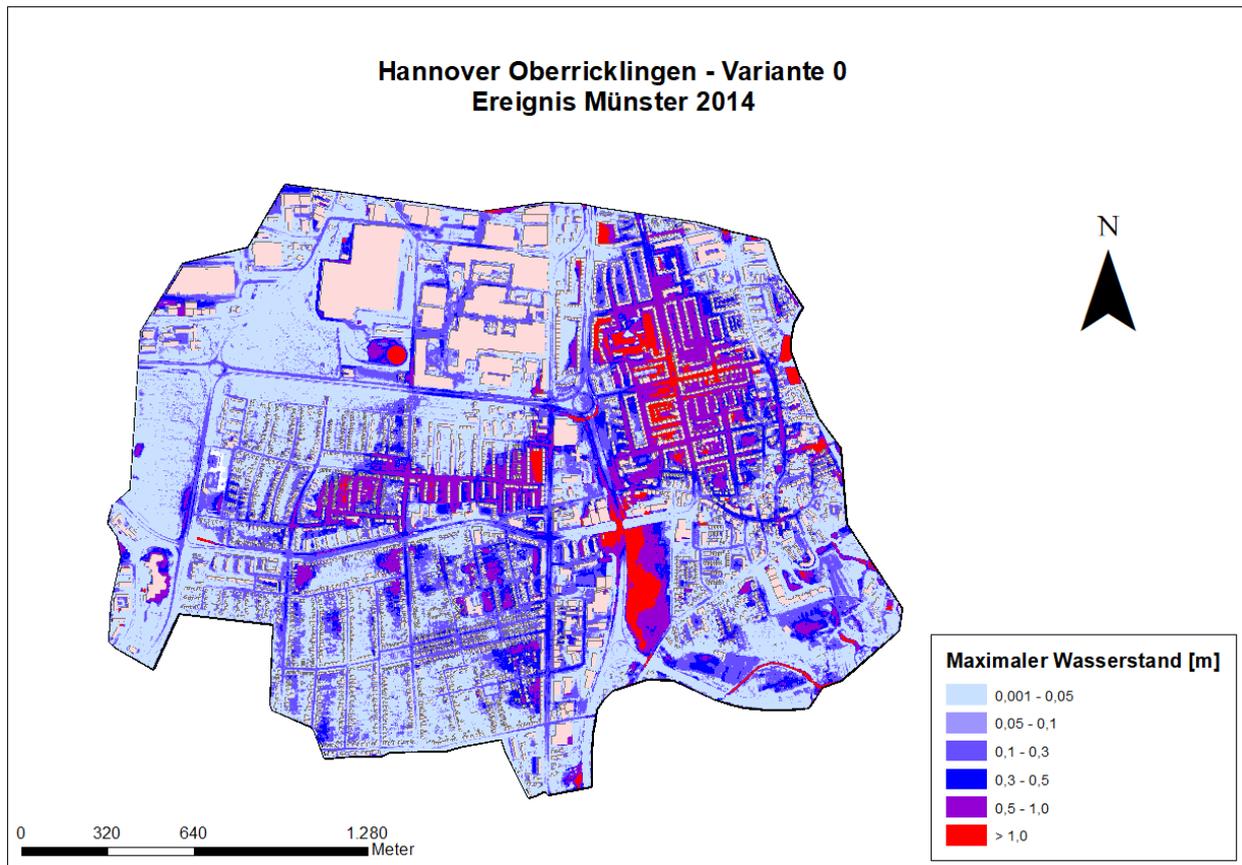


Abbildung A.9: Hannover Oberricklingen Variante 0 Ereignis Münster 2014.

Hannover Oberricklingen - Variante 5
Ereignis Münster 2014

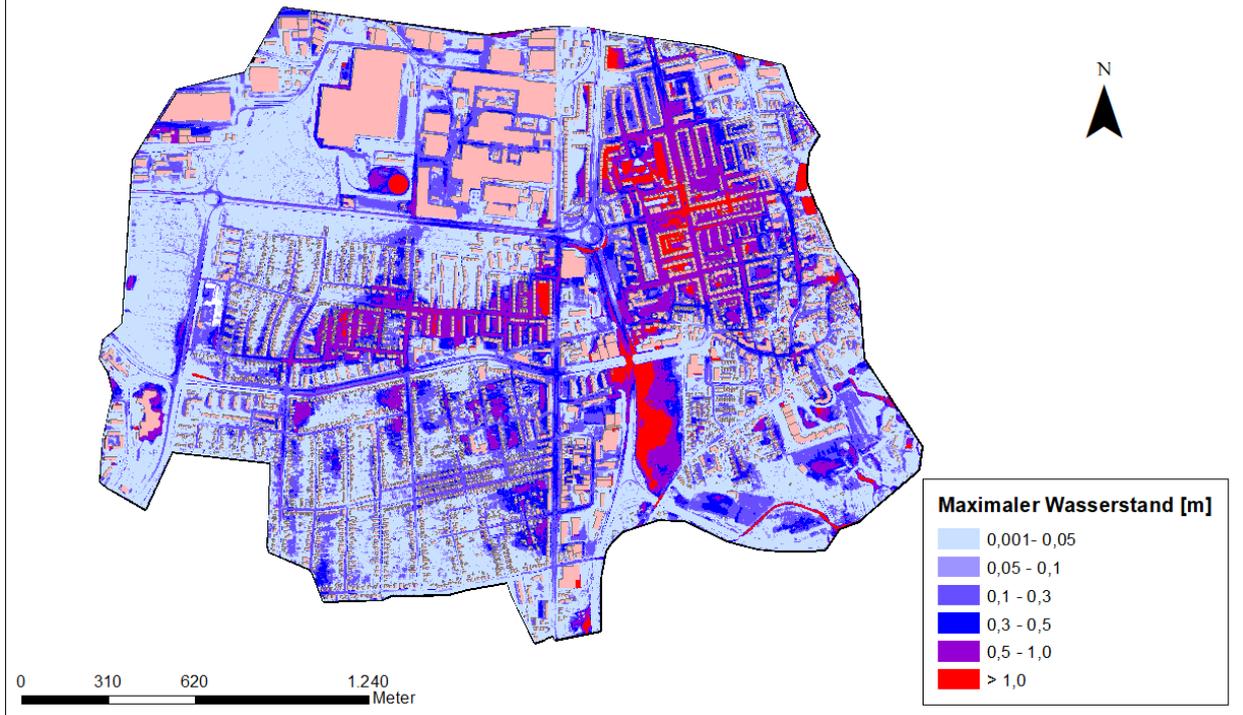


Abbildung A.10: Hannover Oberricklingen Variante 5 Ereignis Münster 2014.