

Evaluierung der Regenwasserbewirtschaftung im Vaubangelände, Freiburg i.Br.

- unter besonderer Berücksichtigung von
Gründächern und Vegetation

Endbericht, Oktober 2013



HYDR**LOGY**

ERNST+CO
BERATENDE INGENIEURE GMBH



Regiowasser



Impressum

Evaluierung der Regenwasserbewirtschaftung im Vaubangelände
- unter besonderer Berücksichtigung von Gründächern und Vegetation
Endbericht, Oktober 2013 (Projektnummer: 2009-09)

Autoren

Nicole Jackisch

Universität Freiburg
Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften
Professur für Hydrologie
E-Mail: nicole.jackisch@hydrology.uni-freiburg.de
www.hydro.uni-freiburg.de

Thomas Brendt

ERNST+CO Beratende Ingenieure GmbH
Freiburg
E-Mail: thomas.brendt@ernst-co.de
www.ernst-co.de

Prof. Dr. Markus Weiler

Universität Freiburg
Institut für Geo- und Umweltnaturwissenschaften
Professur für Hydrologie
E-Mail: markus.weiler@hydrology.uni-freiburg.de
www.hydro.uni-freiburg.de

Jörg Lange

Regiowasser e.V.
E-Mail: post@regiowasser.de
www.regiowasser.de

Finanziell gefördert durch

Eigenbetrieb Stadtentwässerung der Stadt Freiburg
www.esf.freiburg.de



und

badenova AG & Co. KG
Innovationsfonds für Klima- und Wasserschutz
www.badenova.de



Danksagungen

Wir danken dem Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz der badenova AG und dem Eigenbetrieb Stadtentwässerung der Stadt Freiburg für die finanzielle Unterstützung des Projektes.

Die erfolgreiche Durchführung des Projektes ist in erster Linie der sehr guten Zusammenarbeit mit Vertretern der badenova AG als Betreiber der Entwässerungsanlage und Vertretern der Stadt Freiburg zu verdanken. Besonderer Dank gebührt Herrn Erik Henkel für den stets offenen Diskurs, die Bereitstellung von Planungsunterlagen, Informationen und Fotos und die Vermittlung von Facharbeiten. Seitens der Stadt sei diesbezüglich insbesondere Herrn Jürgen Bolder, Herrn Peter Reuss und Frau Christel Wilhelm vom Eigenbetrieb Stadtentwässerung gedankt. Herr Schneider, Herr Weiss und Herr Weber vom Umweltschutzamt Freiburg haben durch Auskunft, Daten und Planungsdokumente maßgeblich zum Erfolg des Projektes beigetragen, herzlichen Dank! Eine sehr gute Zusammenarbeit ermöglichten auch das Garten- und Tiefbauamt und das Vermessungsamt Freiburg.

Für die offene Auskunft bei Nachfragen zur ursprünglichen Planung des untersuchten Entwässerungssystems und zu den Planungsunterlagen bedanken wir uns bei allen damals an Planung und Bau Beteiligten.

Ein herzliches Dankeschön für die Bereitstellung von Daten und/oder Dokumenten sagen wir Bernhard Paul von der Gesellschaft für angewandte Hydrologie und Kartographie mbH (AHK) Freiburg, Eric Rütschlin und Herrn Stefan Schulze von GeoSens Ebringen, Herrn Bleyer vom Staatlichen Weinbauinstitut Freiburg und Frau Alexandra Herrmann von Fichtner Water & Transportation. Einen großen Dank möchten wir auch der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg für das Bereitstellen einer Niederschlagszeitreihe und Frau Weinmann und Herrn Klein vom Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung B.W. für die Bereitstellung von Testdaten und eine ausführliche Beratung aussprechen.

Ohne die Mitarbeit von Studenten und Schülern im Rahmen von Praktika, Bachelor- und Masterarbeiten hätten viele Teilaspekte nicht annähernd genau beschrieben werden können. Ein großer Dank geht an Franziska Opferkuch, Daniel Badillo, Antoine Walther, Mériem Labbas, Christina Ludwig, Lina Santa Maria, Merle Köhn, Yolanda Rohde und Benjamin Gralher.

Herzlich gedankt sei auch Emil Blattmann von der Professur für Hydrologie, Fränk Großmann von den Physikalischen Werkstätten der Universität Freiburg und Matthias Grether für die Mithilfe beim Bau innovativer Messgeräte.

Für die sehr gute Zusammenarbeit danken wir weiterhin Johannes Engel und Alexander Krämer vom Büro WWL-Umweltplanung und Geoinformatik GbR Bad Krozingen, dem Büro Link3D Freiburg und Bernd Saler.

Allen Testpersonen der Webanwendung danken wir für die konstruktiven und hilfreichen Rückmeldungen. Ein großer Dank an Michael Stölzle und Jürgen Strub für die Beratung und die Hilfe beim Layout der Webseite.

Ein großer Dank geht auch an das Garten- und Tiefbauamt der Stadt Freiburg, das Studentenwerk Freiburg und die International Solar Energy Society (ISES) Freiburg für die Bereitstellung von Bäumen zur Installation von Messgeräten.

Ein ganz persönliches Dankeschön gilt den Bewohnern des Stadtteils, welche mit großer Offenheit und Interesse die unkomplizierte Installation von Messgeräten auf ihren Dächern und Grundstücken zugelassen und damit das Projekt überhaupt erst möglich gemacht haben. Hierbei danken wir ganz besonders Christian Höbler für die Hilfe bei der Einrichtung der online-Meteostation und das Bereitstellen des Internetanschlusses.

Das große Interesse und die Aufmerksamkeit aller Bewohner haben dazu beigetragen, dass nahezu alle Messgeräte unbeschadet ihren Dienst tun konnten.

Nicole Jackisch, Thomas Brendt, Markus Weiler
& Jörg Lange, Oktober 2013



Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Danksagungen	3
Inhaltsverzeichnis	4
1 Einführung & Fragestellung	8
2 Untersuchungsgebiet	12
3 Methoden	18
3.1 Recherche der Planungsgrößen	18
3.2 Kontinuierliche Messungen	19
3.2.1 Messnetz und Messgrößen	19
3.2.2 Niederschlagsdaten	20
3.2.3 Rigolenwasserstände	20
3.3 Ableitung von Vergleichswerten aus Planung und Messungen	22
3.3.1 Geometrie und Aufbau des Mulden-Rigolen-Systems	23
3.3.2 Gebietsrückhalt	24
3.3.3 Gebietsrückhaltevolumen und vollständiger Rückhalt	26
3.3.4 Spitzenabflüsse	26
3.3.5 Dämpfung und Verzögerung von Abflussspitzen	27
3.3.6 Beeinflussung des Abflusses im Vorfluter	28
3.3.7 Sickerleistung der Mulden	30
3.4 Einfluss von Bäumen und Gründächern auf die Abflussbildung	30
3.5 Flächenkartierung und –klassifizierung	32
3.6 Niederschlags-Abfluss-Modell	34
3.7 Einfluss dezentraler Maßnahmen mit und ohne Mulden-Rigolen-System	35
3.8 Kostenvergleich zwischen Mulden-Rigolen-System und einem konventionellen Trennsystem mit Regenrückhaltebecken	36

4	Ergebnisse	40
4.1	Bau und technische Details des zentralen Mulden-Rigolen-Systems	40
4.2	Charakterisierung der erfassten Niederschläge	43
4.3	Charakterisierung des Einstauverhaltens der Rigolen	46
4.4	Vergleich der Planungsannahmen mit den Messungen	46
4.4.1	Vergleich von Planung und Ist-Zustand hinsichtlich von Randbedingungen	46
4.4.1.1	Geometrie und Aufbau der Mulden-Rigolen	46
4.4.1.2	Flächenzusammensetzung und –parametrisierung	48
4.4.2	Vergleich von Planung und Ist-Zustand hinsichtlich der Funktionalität	56
4.4.2.1	Gebietsrückhalt	56
4.4.2.2	Gebietsrückhaltevolumen und vollständiger Rückhalt	60
4.4.2.3	Spitzenabflüsse	61
4.4.2.4	Verzögerung von Abflussspitzen	63
4.4.2.5	Beeinflussung des Abflusses im Vorfluter	64
4.4.2.6	Sickerleistung der Mulden	65
4.5	Einfluss von Gründächern und Bäumen auf die Abflussbildung	67
4.5.1	Bäume	67
4.5.2	Gründächer und andere Dachaufbauten	70
4.5.3	Flächenhafte Wirkung von Bäumen und Gründächern auf Spitzenabflüsse	72
4.6	Einfluss dezentraler Maßnahmen mit und ohne Mulden-Rigolen-System	73
4.7	Vergleich zwischen Mulden-Rigolen-System und einem konventionellen Trennsystem mit Regenrückhaltebecken	75
4.7.1	Gebietsrückhalt und Spitzenabfluss	75
4.7.2	Kosten	76
4.8	Die neue Webanwendung FReWaB zur Simulation der kleinräumigen Wasserbilanz von Regenwasserbewirtschaftungs-Maßnahmen	78
5	Zusammenfassung, Empfehlungen und Ausblick	82
5.1	Zusammenfassung	82
5.2	Empfehlungen	84
5.3	Ausblick	88
6	Öffentlichkeitsarbeit & Veröffentlichungen	90
7	Quellen	94

- 
- 1 EINFÜHRUNG & FRAGESTELLUNG
 - 2 UNTERSUCHUNGSGEBIET
 - 3 METHODEN
 - 4 ERGEBNISSE
 - 5 ZUSAMMENFASSUNG, EMPFEHLUNGEN & AUSBLICK
 - 6 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT & VERÖFFENTLICHUNGEN
 - 7 QUELLEN

Die Planung und Umsetzung von Siedlungsentwässerungskonzepten erfolgt seit geraumer Zeit nicht mehr mit dem alleinigen Ziel der Entsorgungssicherheit, sondern berücksichtigt auch ökologische, stadtklimatische und ökonomische Aspekte. Prinzipiell wird durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) seit 2009 die getrennte Ableitung von Niederschlags- und Schmutzwasser bundesweit vorgegeben (§55 WHG 2009). Dabei wurde erkannt, dass sich Maßnahmen zur Bewirtschaftung des Regenwassers und zur Vermeidung von Oberflächenabfluss wie z.B. die Entsiegelung wasserundurchlässig befestigter Flächen und die Versickerung von Niederschlagswasser positiv auf die o.g. Aspekte auswirken können.

Der Bau von Versickerungs- und Retentionsanlagen ist mittlerweile gängige Praxis. Jedoch werden die Anlagen und Konzepte nach der Fertigstellung und nach einigen Jahren Betriebszeit nur selten auf ihre Funktionalität hin überprüft. Insbesondere für urbane Einzugsgebiete existieren nur selten Messdaten, welche eine nachträgliche Evaluierung ermöglichen könnten.

Das hier vorgestellte Projekt möchte diese Lücke schließen, indem es über einen Zeitraum von 2,5 Jahren (6.7.2010–31.12.2012) die Wirkung der Entwässerungseinrichtungen kontinuierlich gemessen hat.

Untersuchungsgebiet ist der sozial-ökologische Modellstadtteil Vauban in Freiburg i.Br., welcher Regen- und Schmutzwasser überwiegend getrennt abgeleitet (modifiziertes Trennsystem). Trotz zur Versickerung schlecht geeigneter Böden hatte man sich 1996 entschlossen, das Regenwasser in einem System aus Mulden-Rigolen zurückzuhalten, um möglichst viel Regenwasser zu versickern und damit den Vorfluter (Dorfbach) zu entlasten. Um die Entstehung von Oberflächenabfluss gering zu halten, wurden weiterhin dezentrale Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung wie Dachbegrünung, durchlässige Flächenbefestigung, Grünflächen und Bäume umgesetzt.

Übergeordnete Ziele der vorliegenden Untersuchung waren:

- den Erfolg der Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung auf dem Vaubangelände zu überprüfen
- den Einflusses dezentraler Maßnahmen wie Bäume und Gründächer auf die Abflussbildung an einem konkreten Fallbeispiel aus der Praxis zu quantifizieren

Folgende konkrete Fragestellungen sollten beantwortet werden:

- Entsprechen die bei der Planung 1996 gemachten Annahmen und Berechnungen den heutigen Abflüssen, Rückhaltungsmengen und dem Niederschlags-Abfluss-Verhalten?
- Welchen Einfluss haben die zahlreichen Gründächer und Bäume auf das Abflussgeschehen, insbesondere bei Starkregen?
- Wie hoch sind die Kosten des Mulden-Rigolen-Systems (MRS) im Vergleich zu einem konventionellen System mit Regenrückhaltebecken (RRB)?

- Welche Empfehlungen für Planung, Bau und Betrieb lassen sich aus den auf Vauban gemachten Erfahrungen für zukünftige Projekte der Regenwasserbewirtschaftung ableiten?

Um die Wirkung verschiedenster Maßnahmen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftungs hinsichtlich Abflussbildung aber auch der gesamten Wasserbilanz in Zukunft abschätzen zu können, wurde ein neues, web-basiertes Modell FReWaB (Freiburger RegenwasserBewirtschaftung) entwickelt. Es steht kostenlos über:

<http://www.naturnahe-regenwasserbewirtschaftung.info>

allen Interessierten zur Verfügung.



1

EINFÜHRUNG & FRAGESTELLUNG

2

UNTERSUCHUNGSGEBIET

3

METHODEN

4

ERGEBNISSE

5

ZUSAMMENFASSUNG EMPFEHLUNGEN & AUSBLICK

6

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT & VERÖFFENTLICHUNGEN

7

QUELLEN

Untersuchungsgebiet

Der Freiburger Stadtteil Vauban in Freiburg (ca. 38 Hektar (ha), 5500 Einwohner) entstand als Wohnviertel ab 1996 auf der Fläche eines ehemaligen Kasernengeländes der französischen Streitkräfte. Neben energieeffizienten Bauweisen, Solartechnik und autoreduziertem Wohnen, wurde für einen ca. 16 ha großen Teil ein damals sehr innovatives Entwässerungskonzept im modifizierten Trennsystem mit Elementen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung bereits im Rahmen des Bebauungsplans entwickelt.



Abb. 1 Kaserne Vauban 1992 (oben) und Wohnquartier Vauban 2008 (unten) mit deutlich sichtbarem Baumbestand (Stadt Freiburg, URL1).

Das Gesamtkonzept der Oberflächenentwässerung besteht aus den Komponenten:

- dezentrale Regenwasserbewirtschaftungs-Maßnahmen auf öffentlichen und privaten Flächen (Gründächer, durchlässige Flächenbefestigung, Grünflächen, Bäume, Regenwassernutzung) zur Reduzierung des auf den Flächen entstehenden Oberflächenabflusses
- zentrales Mulden-Rigolen-System (MRS) mit freiem Überlauf in den Vorfluter für Rückhalt, Versickerung und Ableitung von Oberflächenabfluss

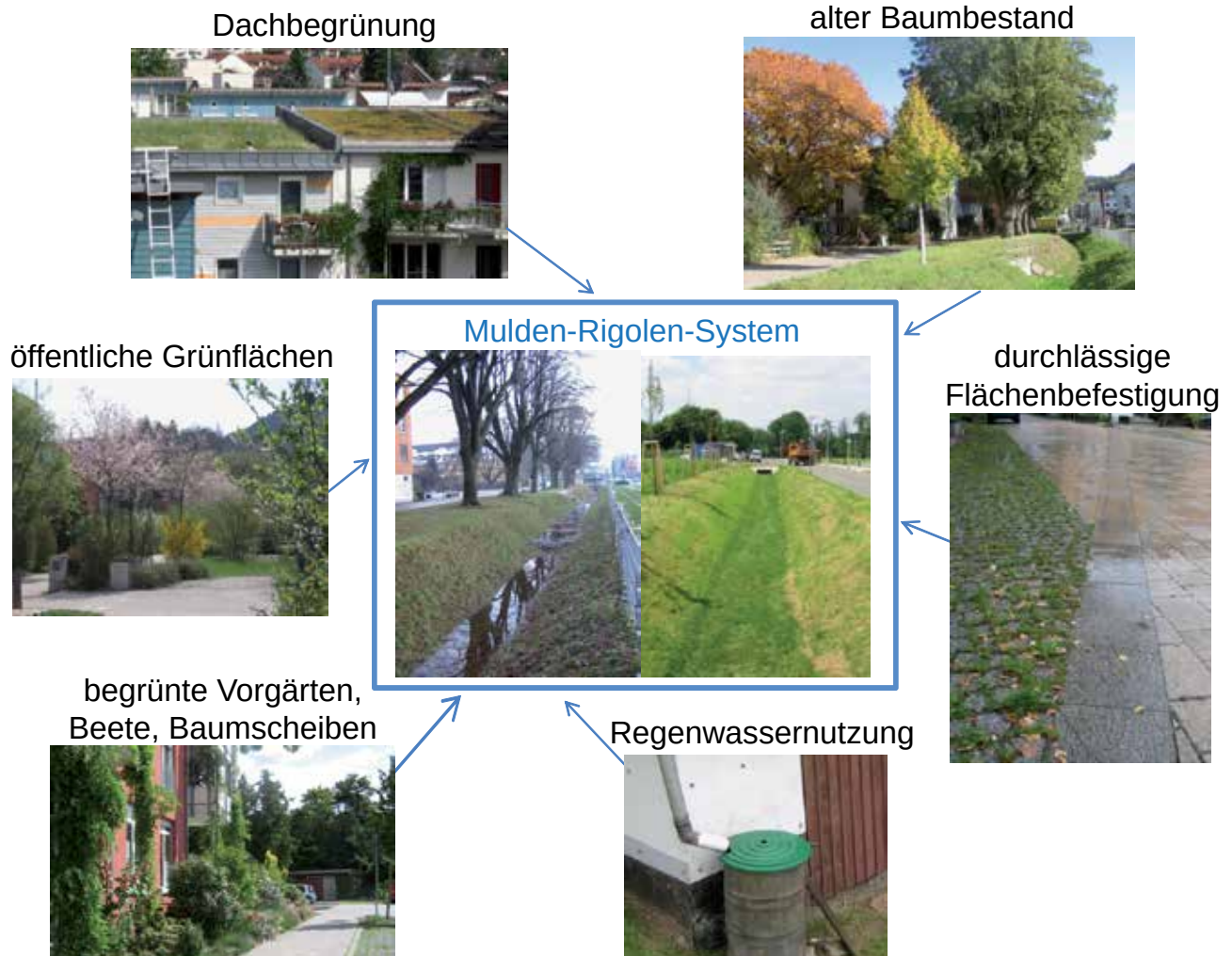


Abb. 2 Einzelne Elemente des Entwässerungskonzeptes (dezentrale Regenwasserbewirtschaftungs-Maßnahmen und zentrales Mulden-Rigolen-System).

Das MRS besteht aus einzelnen Mulden-Rigolen, welche kaskadenartig hintereinandergeschaltet sind und zwei parallel verlaufende Stränge bilden (Nordgraben, Boulevardgraben). Nach der Zusammenführung in einer gemeinsamen Mulde münden diese über einen Überlauf in den Vorfluter (St. Georgener Dorfbach). Die grabenartigen, begrünten Mulden sind durch Überlaufschwellen und Verrohrungen unter Straßen gegliedert und stellen ein gewisses oberirdisches Rückhaltevolumen dar. Sie nehmen das auf den Flächen entstehende Oberflächenwasser auf und speichern es zwischen, sodass es allmählich versickern kann. Wird das Rückhaltevolumen überschritten, erfolgt über den Überlauf eine ungedrosselte Ableitung in den Vorfluter. Die Zuleitung von den Wohnangern zu den Mulden erfolgt größtenteils über oberirdische Pflasterrinnen, die beidseitig der Straße verlaufen. Bei den Querungen der Straßen sind sie über einen Straßeneinlauf am Ende der Rinne und Gussleitungen unterir-



Abb. 3 Elemente des zentralen Mulden-Rigolen-Systems.

disch verrohrt geführt. Die Entwässerung der Hauptstrasse erfolgt aufgrund erhöhter Verkehrsbelastung nicht im Trennsystem, sondern in den Mischwasserkanal.

Die Rigolen (Abb. 4., Kap. 4.1) sind als Kiesfüllung mit Sickerrohr, als Hohlkörper (RigoFill, RigoFill inspect) oder als Kombination von beidem ausgeführt und stellen so ein zusätzliches, unterirdisches Rückhaltevolumen dar. Teilweise, v.a. im Bereich mächtiger undurchlässiger Deckschichten im östlichen Teil, sind sie als Transportrigolen miteinander verbunden. Die Anbindung an die oberirdischen Mulden erfolgt durch den Sickerweg über eine ca. 0,5m mächtige Schicht aus Oberboden und eine ca. 0,2m mächtige Lage Feinsand. Dadurch soll gleichzeitig ein gewisser Schadstoffrückhalt des Oberflächenwassers erreicht werden. Stellenweise sind die Rigolen über Überlaufbauwerke direkt mit den Mulden verbunden, sodass im Falle eines Mulden-Einstaus über der Bemessungsgrenze eine zusätzliche Ableitmöglichkeit gegeben ist.

Die wichtigsten Elemente des zentralen Mulden-Rigolen-Systems sind:

- Private Hausanschlüsse oder Rinnen
- Offene, gepflasterte Entwässerungsrinnen unter Berücksichtigung von barrierefreiem Wohnen
- Verrohrungen
- Mulden
- Rigolenkörper mit Kontrollschächten
- Überlaufbauwerke
- Einlaufbauwerke



Abb. 4 Querschnitt durch Mulden-Rigole.

Der grundwasserführende Untergrund wird von Kiesen gebildet mit darüberliegenden Deckschichten aus größtenteils undurchlässigem, z.T. tonigem Schluff mit bis zu 4m Mächtigkeit. Durch den Austausch schadstoffbelasteten Bodens im Zuge der Altlastensanierung wurden Teile durch gut versickerungsfähigen Boden ersetzt. Prinzipiell wird der Untergrund als kleinräumig sehr heterogen beschrieben (WLP 1994, Beller Consult GmbH 1996, IGG 2002).

Hinzu kommen insgesamt hohe Grundwasserstände mit temporär gespannten Verhältnissen. Bereits bei den Planungsberechnungen 1996 wurde davon ausgegangen, dass der mittlere Grundwasserstand knapp unter der geplanten Rigolensohle und der mittlere Hochwasserstand des Grundwassers stellenweise bereits unter der geplanten Muldensohle liegen würden. Bei sehr hohen Grundwasserständen würde das Grundwasser kurz unter der Geländeoberkante stehen und über die Muldensohle in den Vorfluter drainieren (WLP 1994, Beller Consult GmbH 1996). Anhand langjähriger Pegeldaten (1929 - 1994) wurde für diesen Fall ein statistisches Auftreten von drei bis acht Wochen innerhalb von fünf Jahren angenommen (Beller Consult GmbH, 1996). In späteren Berichten wird jedoch die Tendenz eher steigender Grundwasserspiegel erwähnt (Beller Consult GmbH 2004, Wagenmann-Gaiser 2004).

Um das dicht anstehende Grundwasser vor Verunreinigungen zu schützen, wurde die Muldensohle mit einer 50 cm mächtigen Oberbodenschicht geplant. Dies sollte einen Kompromiss darstellen, um angesichts des bereits hydraulisch stark beanspruchten Vorfluters und fehlender Alternativen, dennoch eine Versickerung von Regenwasser zu ermöglichen.

Folgende, für eine Regenwasserversickerung ungünstige Randbedingungen mussten bei der Planung 1996 berücksichtigt werden, weshalb das Gebiet als Grenzfall für Versickerungsanlagen betrachtet werden kann:

- Schwach durchlässige Deckschichten
- Hoher Grundwasserstand
- Stellenweise kontaminierter Boden
- Einleitbeschränkung in das aufzunehmende Gewässer

Aus diesem Grund hatten dezentrale Maßnahmen, welche die Bildung von

Oberflächenabfluss vermindern, große Priorität. So waren Gründächer als abflussmindernde Maßnahme für Flachdächer <10° Neigung im Bebauungsplan festgelegt, dem größtenteils in Form von extensiver Dachbegrünung auch nachgekommen worden ist. Außerdem findet sich im Bebauungsplan eine Empfehlung zur Nutzung von Regenwasser. Weiterhin wurden im öffentlichen Raum fünf parkähnliche Grünflächen (Grünspangen) angelegt und auf Plätzen, Fußwegen und Stellplätzen wurde großflächig durchlässige Flächenbefestigung in Form von Pflastern und Rasenfugensteinen umgesetzt. Der noch aus der Kasernenzeit stammende, alleinartig angeordnete, alte Baumbestand wurde bewusst erhalten und durch Neupflanzungen entlang der Wohn- und Fahrstraßen ergänzt. Die private Grundstücksgestaltung zeichnet sich neben den bereits erwähnten extensiven Gründächern und z.T. Regenwasserzisternen, durch eine sehr starke Begrünung aus. In Wohnangern mit stellplatzfreiem Verkehrskonzept wurden die entsprechenden Vorbehaltsflächen von den Anwohnern als bepflanzte Vorgärten gestaltet. Zahlreiche Dachterrassen und Balkone sind mit Kübelpflanzen begrünt und Hinterhöfe sind meist als Rasen mit Bepflanzung gestaltet.

Das gewählte Entwässerungskonzept sollte der Versickerung und dem Rückhalt von Niederschlag dienen und damit zu einer deutlichen Reduzierung und Verzögerung der Einleitmengen in den hochwassergefährdeten Vorfluter führen.

Bei der Analyse der Rückhaltewirkung und Abflussbildung des Gesamtkonzeptes wird unterschieden nach der Wirkung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftungs-Maßnahmen auf der Fläche (dezentrale RWB-Maßnahmen), der Wirkung des zentralen Mulden-Rigolen-Systems, welches allen Flächen nachgeschaltet ist, und der Gesamtwirkung aller Maßnahmen auf den Vorfluter.

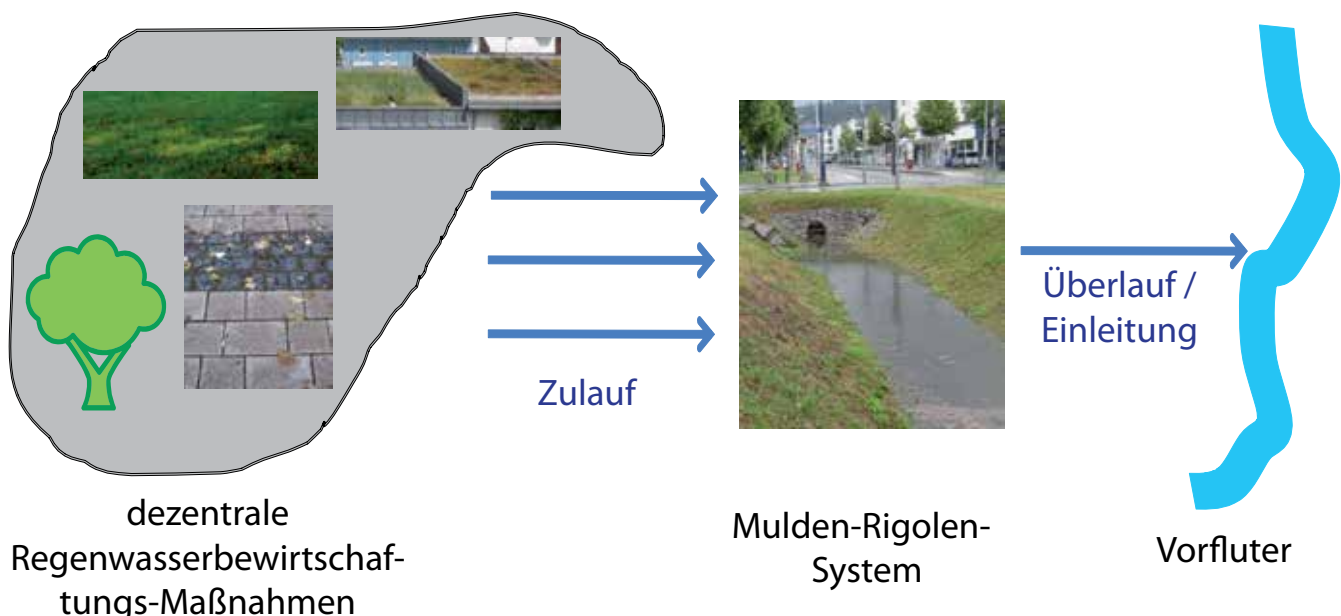


Abb. 5 Schematische Darstellung des Gesamtkonzeptes zur Oberflächenentwässerung im Untersuchungsgebiet.

- 
- 1 EINFÜHRUNG & FRAGESTELLUNG
 - 2 UNTERSUCHUNGSGEBIET
 - 3 METHODEN
 - 4 ERGEBNISSE
 - 5 ZUSAMMENFASSUNG, EMPFEHLUNGEN & AUSBLICK
 - 6 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT & VERÖFFENTLICHUNGEN
 - 7 QUELLEN

3.1 Recherche der Planungsgrößen

Ziel der Untersuchungen war es u.a., eine zusammenfassende Betrachtung zwischen Planung (1996) und Ist-Zustand (2011) zu ermöglichen, indem definierte Zielgrößen der Planung mit aktuellen Messwerten verglichen werden. Dazu erfolgten umfangreiche Recherchen in allen verfügbaren Planungsunterlagen und Gespräche mit an Planung und Bau beteiligten Personen, um den aktuellen Aufbau des Entwässerungskonzeptes sowie die der Planung zugrundeliegenden Randbedingungen zu ermitteln. Folgende Planungsunterlagen und Dokumente wurden analysiert:

- Erläuterungsbericht und Pläne der Entwurfs - und Genehmigungsplanung (Beller Consult GmbH, 1996)
- Ergebnisse der Langzeitsimulation und extremwertstatistische Auswertung der Regenreihe FR-Mitte 1951-80 (Beller Consult GmbH 1997)
- Wasserrechtliche Erlaubnis zur Einleitung von Oberflächenwasser in den St. Georgener Dorfbach sowie Versickerung von Niederschlagswasser in das Grundwasser, 24.10.1997 (Beller Consult GmbH, 1996)
- Erläuterungsbericht Hydraulische Berechnung Grabensystem Boulevard und Nord (Beller Consult GmbH, 1999)
- Erläuterungsberichte und Pläne der Ausführungsplanung und aktualisierten Ausführungsplanung des Endausbaus einzelner Bauabschnitte (April 2003 - Mai 2004), (Beller Consult GmbH, 2004)
- Aufmaßprotokolle des Endausbaus Graben Nord BA2 und Boulevardgraben BA 1-2 (Beller Consult GmbH 2003, 2005)
- Geotechnisches Gutachten Erkundung des Vauban-Geländes (WLP, 1994)
- Geotechnisches Gutachten (IGG, 2002)
- Längsschnitte und Lagepläne zum Endausbau im dwg-Format
- Bestandsvermessungen im dwg-Format

Aus den Planungsdokumenten wurden messbare Vergleichsgrößen und Zielwerte abgeleitet. Für einige Größen wurden konkrete, quantitative Zielgrößen aus der Planung dokumentiert, für einige konnten lediglich qualitative Aussagen abgeleitet werden.

Änderungen zwischen Planung 1996 und Ist-Zustand 2011 hinsichtlich Geometrie und Flächengrundlagen wurden ermittelt und entsprechend als geänderte Randbedingungen berücksichtigt. Um den aktuellen Ist-Zustand zu ermitteln, wurden kontinuierliche Messungen, Geländeversuche und Niederschlags-Abfluss-Simulationen durchgeführt.

Folgende Aspekte wurden bei der Evaluierung berücksichtigt:

Randbedingungen

- Oberirdisches Retentionsvolumen der Mulden
-> Funktion: oberirdische Zwischenspeicherung, Versickerung und teilweise Ableitung des eingeleiteten Oberflächenwassers zum Vorfluter
- Unterirdisches Retentionsvolumen der Rigolen
-> Funktion: unterirdische Zwischenspeicherung und Versickerung des

aus den Mulden infiltrierten oder übergelaufenen Oberflächenwassers zum Grundwasser

- Flächennutzung d.h. Größe, Beschaffenheit und Parametrisierung der abflussbildenden Flächen im Vorfluter (min)

Funktionalität

Tab.1 Annahmen der Planung und daraus abgeleitete Messgrößen zur Evaluierung der Funktion.		
Wasserwirtschaftlicher Aspekt	Erhoffter Nutzen/Zielvorgabe (Planungsannahmen)	Abgeleitete Messgrößen
Dämpfung und Verzögerung von Abflussspitzen	Minimierung von Einleitungsspitzen in den Vorfluter Dorfbach Verzögerung des Niederschlags-Abfluss-Prozesses im Plangebiet sowie Retention	Spitzenabfluss am Überlauf pro Ereignis (L/s) Verzögerung von Abflussspitzen durch das Gesamtkonzept (min) Verzögerung von Abflussspitzen durch Bäume und Gründächer (min) Dämpfung von Abflussspitzen durch Bäume und Gründächer (%)
Rückhalt von Niederschlag bzw. Oberflächenabfluss	Minimierung des Einleitvolumens in den Vorfluter Zwischenspeicherung und Versickerung von Oberflächenwasser Naturnaher Wasserhaushalt	Gebietsrückhalt pro Ereignis (%) jährlicher Gebietsrückhalt (%) Gebietsrückhaltevolumen (mm) pro Ereignis Rückhalt von Niederschlag durch Bäume und Gründächer (%)
Beeinflussung des Abflusses im Vorfluter	Hydraulische Entlastung des Vorfluters v.a. bei erhöhten Pegelständen	Zeitversatz zwischen Spitzenabfluss am Überlauf und Scheitelabfluss im Vorfluter (min) Verstärkung des Scheitelabflusses durch die Siedlungseinleitung (%)
Sickerleistung der Mulden (oberirdisch)	Zwischenspeicherung und Versickerung von Oberflächenwasser erhöhte Grundwasserneubildung naturnaher Wasserhaushalt	Infiltrationskapazitäten (kf-Werte) der Einzelmulden (m/s) Sickerleistung des gesamten Muldensystems (L/s)

3.2 Kontinuierliche Messungen

3.2.1 Messnetz und Messgrößen

Um die tatsächliche Funktion des gesamten Entwässerungskonzeptes aber auch den Einfluss einzelner Maßnahmen wie Gründächer und Bäume beurteilen zu können, wurde ein Messnetz installiert (Abb.6 und Tab.2). Dabei kamen z.T. neuartige Messkonzepte wie die Messung der Baum-Interzeption oder des Oberflächenabflusses einzelner Teilflächen zum Einsatz.

Alle Messgrößen wurden kontinuierlich und in hoher zeitlicher Auflösung (1-10min) erfasst. Aus einigen Messdaten sind Größen ableitbar, welche direkt mit Zielgrößen der Planung vergleichbar sind. Andere Messungen, z.B. Rigolenwasserstände, werden dazu verwendet, den Zustand des Systems zu beschreiben, um dadurch Einflussfaktoren feststellen zu können, welche die Funktionalität beeinträchtigen können.



Abb. 6 Lage der Messpunkte im Untersuchungsgebiet. Dunkelgrüne Bereiche markieren die Lage von Mulden.

3.2.2 Niederschlagsdaten

Die gemessenen Niederschläge und klimatischen Messwerte wurden zunächst mit Daten der ca. 300 m entfernten Station des staatlichen Weinbauinstituts mit 10-minütiger Auflösung (Merzhausener Straße) plausibilisiert und es wurden kurze Datenlücken ergänzt. Anschließend erfolgte für die Niederschläge eine Korrektur für Benetzungsverluste (0,1 mm pro Ereignis, nach Seibert und Moren 1999) und für die Unterschätzung der Messung durch Windeinfluss nach der Methode des Dynamic Correction Model (Førland et al. 1996, Michelson 2004). Zur Abgrenzung von Einzelereignissen wurden i. d. R. eine Regenpause von 4h und eine Mindesthöhe von 0,2 mm verwendet. Um eine annähernde Vergleichbarkeit der gemessenen Niederschläge mit den für die Planung verwendeten Bemessungsregen der Dauerstufe 15 min herzustellen, wurde nach Berechnung eines Gleitenden Durchschnittes bei 15 min-Glätungsintervall jeweils die maximale mittlere Intensität berechnet (=Intensität für 15 min).

3.2.3 Rigolenwasserstände

Um das Einstauverhalten einzelner Rigolen beobachten zu können, wurden exemplarisch in 6 Rigolen unterschiedlichen Aufbaus und in östlicher als auch westlicher Lage (Abb. 3.1) im Untersuchungsgebiet kontinuierlich Wasserstände erfasst. Dazu wurden kapazitive Wasserstandsmessgeräte (Marke: Odyssey) und Drucksonden (Marke: OTT CTD) in Rigolen-Kontrollschächten,

Tab.2 Komponenten des Messnetzes und Messgrößen.

Klima und Niederschlag	Dachabfluss	Oberflächenabfluss
 Kontinuierliche Messung Niederschlag, Lufttemperatur, Windrichtung und –geschwindigkeit, relative Luftfeuchte, Strahlungsintensität; zeitliche Auflösung: 1 min; Messzeitraum: 26.2.2010 – aktuell, Station online unter: http://www.hydrology.uni-freiburg.de/vauban/wetterstation.html	 Kontinuierliche Messung Dachabfluss + Temperatur + Leitfähigkeit + Substratfeuchte an 4 verschiedenen Dachaufbauten (Kies, extensiv begrünt, intensiv begrünt, Eternit); zeitliche Auflösung: 1 min Messzeitraum: Mai 2010 – Nov. 2010, März 2011 – Sep. 2011	 Kontinuierliche Messung Oberflächenabfluss von 4 Wohnangern in den Straßeneinlaufschächten der offenen Entwässerungsrinnen; zeitliche Auflösung: 1 min Messzeitraum: Juli 2010 – Nov. 2010, April 2011 – Sep. 2011
Baum-Interzeption	Vorfluter	Grundwasserstände
 Kontinuierliche Messung von Niederschlag als Kronendurchlass von 3 verschiedenen Baumarten (Tanne, Platane, Linde); zeitliche Auflösung: 1 min Messzeitraum: 6.5. 2011 – 19.12. 2012	 Kontinuierliche Messung des Wasserstandes des Vorfluters ca.100 m oberhalb der Einleitstelle des Trennsystems, zeitliche Auflösung: 10 min Messzeitraum: 5.1. 2010 – aktuell	 Kontinuierliche Messung von Grundwasserständen + z.T. Leitfähigkeit + Temperatur in 15 Grundwasser-Messstellen im An- und Abstrombereich der Mulden-Rigolen, zeitliche Auflösung: 10 min; Messzeitraum: März/Okt. 2010 – 19.12. 2012
Muldenwasserstände	Rigolenwasserstände	Überlauf zum Dorfbach (Vorfluter)
 Kontinuierliche Messung von Wasserständen + Leitfähigkeit + Temperatur + Bodenfeuchte (2 Tiefen) in 3 Versickerungsmulden, zeitliche Auflösung: 1-5 min; Messzeitraum: Juni 2010 – Nov. 2010; März 2011 – Dez. 2011	 Kontinuierliche Messung von Wasserstand + Leitfähigkeit + Temperatur in 6 Rigolen in Rigolen-Kontrollschächten oder Mulden-Überlaufschächten, zeitliche Auflösung: 10 min; Messzeitraum: Juni 2010 – Okt./Dez. 2012	 Kontinuierliche Messung des Wasserstandes am Überlauf zum Vorfluter, zeitliche Auflösung: 1 min Messzeitraum: Juli 2010 – aktuell

Mulden-Überlaufbauwerken oder Zulaufrohren von Mulden-Überlaufbauwerken installiert (Tab.2).

Bei Bezug der Wasserstände auf mNN kann so zum Einen beurteilt werden, bis in welche Schichten sich ein Rigoleneinstau ausgewirkt hat. Zum Anderen kann anhand der Porosität der Rigole das jeweils aufgefüllte Retentionsvolumen berechnet werden. Um eine aussagekräftige Angabe für das gesamte Rigolensystem für einzelne Niederschlagsereignisse zu erhalten, wurden die Ganglinien der Füllgrade der einzelnen Rigolen gemittelt und der Wert jeweils zu Beginn eines Niederschlagsereignisses extrahiert. Diese Angabe repräsentiert exemplarisch den freien unterirdischen Speicher des gesamten Mulden-Rigolen-Systems jeweils zu Ereignisbeginn.

3.3 Ableitung von Vergleichswerten aus Planung und Messungen

Planung

Für die Planung des Mulden-Rigolen-Systems wurden 1996 verschiedene Berechnungen durchgeführt. Zunächst erfolgte die Dimensionierung des Grabensystems und der Verdolungen zur Unterquerung von Straßen als reines Ableitsystem auf der Basis hydraulischer Berechnungen mit einem Bemessungsregen $r_{15\text{min},n=0.2}$ (15-minütiger Regen der Jährlichkeit 0,2) (siehe Tab.5). Der dabei von den Flächen zufließende, maximale Oberflächenabfluss berechnete sich abhängig von den flächengewichteten Flächenparametern der verschiedenen Teil-Einzugsgebiete (Tab.9). Der daraus resultierende Spitzenabfluss in den Vorfluter wurde als maximale Einleitrates wasserrechtlich beantragt und genehmigt. Ein ausreichendes Freibord sollte die schadlose Ableitung eines 15-minütigen Bemessungsregens mit 50-jährigem Wiederkehrintervall gewährleisten. Für die Ausgestaltung der Gräben zur Regenwasserversickerung wurden kaskadenartige Teil-Mulden angelegt. Für deren Bemessung und Aufbau kam das damals gültige Regelwerk ATVA-138 zur Anwendung. Die Sickerleistung des Oberbodens ging aus Sicherheitsgründen mit einem halbierten kf-Wert von $5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ein (Beller Consult 1996).

Weiterhin erfolgte eine Bilanzierung von Niederschlag, Abfluss und Versickerung bei angenommenem Muldenspeichervolumen und Sickerleistung durch Berechnung mit verschiedenen Bemessungsregen unterschiedlicher Dauer und Jährlichkeiten (siehe Tab.3). Daraus wurden ereignisabhängige Aussagen zu Rückhalt, Versickerungsmenge und Einleitungsmenge in den Vorfluter abgeschätzt (Beller Consult 1996).

Für Aussagen zur wasserrechtlich relevanten Jahresbilanz von Abfluss und Versickerung erfolgte eine Bilanzierung mit dem langjährigen, mittleren Jahres-Niederschlag (933 mm) (siehe Tab.4). Diese mittlere Jahres-Wasserbilanz sowie das Einhalten der maximal zulässigen Einleitmenge in den Vorfluter wurden 1997 mittels Kontinuumsimulation der Mulden und Rigolen mit einer 10-jährigen Regenreihe (MURISIM, Beller Consult GmbH 1997) rechnerisch nachgewiesen und in Folge die wasserrechtliche Genehmigung erteilt.

Aus diesen Angaben sowie grundsätzlichen Äußerungen zur Funktion und erhofften Wirkung sollen im Folgenden evaluierbare Zielgrößen abgeleitet werden, welche im Weiteren als „Planungsannahmen 1996“ bezeichnet

werden. Im Laufe der Baumaßnahmen (1997-2004) wurden Neuberechnungen der Grabenhydraulik und der Mulden-Rigolen-Dimensionierung nötig („Ausführungsplanung“), wodurch zwar die Randbedingungen der ursprünglichen Planung geändert wurden, die Zielgrößen jedoch gleichgeblieben sind.

Die für die Planung verwendeten Niederschlagsangaben entstammen der Station Freiburg i. Br. (WA) no. 70354 auf 269 mNN, was heute der Station Freiburg-Mitte (DWD und LUBW) entspricht. Die Station befand sich bis 2006 in der Stefan-Meier Straße in Freiburg und ist heute am Flugplatz zu finden. Die extremwertstatistische Auswertung zur Ermittlung der Bemessungsregen bezog sich auf die Auswertemonate Mai-September im Zeitraum 1951-1980 (Beller Consult GmbH, 1996, 1997, 2003, 2004).

Volumenangaben des „Planungs-Zustandes 1996“ in mm beziehen sich in den vorliegenden Ausführungen stets auf die zur Planung angenommene, im Trennsystem entwässerte Fläche ($A_{\text{ges}} = 16,09 \text{ ha}$).

Messungen

Um die von Juli 2010 – Dezember 2012 erhobenen Messwerte mit Zielgrößen der Planung vergleichen zu können, wurden diese zunächst in die entsprechenden Vergleichsgrößen umgerechnet und dann ereignisabhängig und als Jahressummen ausgewertet, was im Weiteren als „Ist-Zustand“ bezeichnet wird. Volumenangaben des „Ist-Zustandes“ in mm beziehen sich in den vorliegenden Ausführungen stets auf den Anteil der im Trennsystem entwässerten Fläche, welcher an das Mulden-Rigolen-System angekoppelt ist ($A_{\text{ges}} = 15,34 \text{ ha}$).

Sowohl für Planung als auch Messungen bezeichnen alle verwendeten Niederschlagsangaben stets den gefallenen Niederschlag (Bruttoniederschlag). Prozentuale Angaben zu Rückhalt, Abfluss, Überlauf und Versickerung beziehen sich immer auf diesen Bruttoniederschlag, da eine Differenzierung in Bruttoniederschlag und Nettoniederschlag (effektiver, abflusswirksamer Niederschlag) messtechnisch nicht möglich war.

3.3.1 Geometrie und Aufbau des Mulden-Rigolen-Systems

Zielgrößen aus Planungsannahmen

In den Planungsangaben 1996 ging man von einem bestimmten, oberirdischen Rückhaltevolumen durch die Muldenkaskaden sowie einem bestimmten unterirdischen Retentionsvolumen durch das Porenvolumen der Rigolen aus. Die entsprechenden Angaben sind in Tab. 7 enthalten und wurden hier als Randbedingung der ursprünglichen Planung betrachtet.

Berechnungen aus Messungen

Um den Ist-Zustand (2011) der Mulden und Rigolen zu ermitteln, wurden die aktuellsten verfügbaren Angaben zu Geometrie und Aufbau in Ausführungsplänen, Bestandsvermessungen und Aufmaßprotokollen recherchiert und mit Geländebeobachtungen und mündlichen Aussagen am Bau beteiligter Personen abgeglichen. Weiterhin wurden alle Mulden-Sohlhöhen neu vermessen, um nachträgliche Veränderungen des Mulden-Rückhaltevolumens durch Sedimentation, Erosion oder Verfüllung feststellen zu können. Alle Höhenangaben beziehen sich hier auf das Bezugssystem: „NN 1997 städt. Verzeichnis“.

3.3.2 Gebietsrückhalt

Der gesamte, im Untersuchungsgebiet auf den Flächen anfallende Oberflächenabfluss wird im zentralen Muldensystem gesammelt, welches über eine letzte gemeinsame Mulde einen freien Überlauf zum Vorfluter besitzt. Dieser Überlauf stellt somit den gesamten Gebietsauslass des zu entwässernden Gebietes dar und entwässert über eine zentrale Einleitstelle (Abb. 3) in den Vorfluter. Bei einer Betrachtung der Wasserbilanz entspricht somit das Überlaufvolumen dem Abfluss aus dem Gebiet und gleichzeitig dem Einleitvolumen in den Dorfbach. Die Differenz aus Niederschlagsvolumen (V_{NS}) und Überlaufvolumen (V_U) stellt hingegen das Gebietsrückhaltevolumen ($V_{Rück}$) dar, welches durch die Gesamtheit aller dezentralen Maßnahmen und dem Mulden-Rigolen-System im Gebiet zurückgehalten wird und somit für Versickerung, Verdunstung und Transpiration zur Verfügung steht. Die Auswertung des Gebietsrückhaltes erfolgt ereignisabhängig und als Jahreswert.

Zielgrößen aus Planungsannahmen

In den Planungsunterlagen sind Angaben zu Regenwasserabfluss (=Oberflächenabfluss von den Flächen), Abfluss (= Überlauf) und Versickerung für verschiedene Bemessungsregen (Tab. 3), als langjährige mittlere Jahressumme und als Summe einer Langzeitsimulation (10 Jahre) dokumentiert. Prozentuale Angaben werden dabei in der Planungspraxis sehr häufig auf den effektiven Niederschlag, d.h. den zum Abfluss kommenden Niederschlag (Netto-Niederschlag) bezogen. Diese Bezugsgröße ist aufgrund der zahlreichen Zuleitungen zum Mulden-Rigolen-System messtechnisch nicht erfassbar. Zudem sollte auch die Rückhaltewirkung der dezentralen Maßnahmen auf der Fläche berücksichtigt werden. Deshalb wurden für die Ermittlung der Zielgrößen für den Gebietsrückhalt alle dokumentierten Volumenangaben prozentual auf den Brutto-Niederschlag bezogen. Dieser Ansatz schließt so zusätzlich zum Mulden-Rigolen-System auch Annahmen an den Rückhalt auf den Flächen (dezentrale RWB-Maßnahmen) mit ein und ermöglicht die direkte Vergleichbarkeit mit den Messergebnissen.

Tab. 3 Planungsannahmen 1996 zur ereignisabhängigen Bilanzierung von Niederschlag (NS), Abfluss und Versickerung mit Hilfe von Bemessungsregen (A_{red} : 6,73 ha, A_{gesamt} : 16,09 ha siehe Tab. 12, Benetzungsverlust: 0,7mm, Muldenverlust: 1,8mm) und daraus abgeleitete Zielgrößen für den Gebietsrückhalt und den Rückhalt auf den Flächen während Einzelereignissen.

Bemessungsregenspende (L/s/ha)	Bemessungskriterium	Niederschlags-Höhe (mm)	Regenwasserabfluss von den Flächen (m³)	Überlauf = Einleitungs-menge in den Dorfbach (m³)	Rückhalt auf den Flächen in % Brutto-NS (bezogen auf A_{gesamt})	Gebietsrückhalt in % Brutto-NS (Flächen + MRS) (bezogen auf A_{gesamt})
138,89	$r_{15; n=1}$	12,5	673	380	67	81
175,55	$r_{15; n=0,5}$	15,8	895	603	65	76
224,44	$r_{15; n=0,2}$	20,2	1191	899	63	72
67,41	$r_{45; n=1}$	18,2	1056	754	64	74
87,04	$r_{45; n=0,5}$	23,5	1413	1111	63	71
112,97	$r_{45; n=0,2}$	30,5	1885	1582	62	68
4,96	$r_{24h; n=1}$	42,9	2713	2131	61	69
4,07	$r_{24h; n=0,5}$	35,2	3231	1446	43	74
7,03	$r_{24h; n=0,2}$	60,7	3910	3162	60	68
2,14	$r_{72h; n=1}$	55,5	3534	2028	60	77
1,72	$r_{72h; n=0,5}$	44,6	4354	1129	39	84
3,13	$r_{72h; n=0,2}$	81,1	5236	3565	60	73

Für eine ereignisabhängige Betrachtung wurden die in Tab.3 bilanzierten Bemessungsregen verwendet und der geringste, berechnete Gebietsrückhalt von 68 % als Zielgröße für Einzelereignisse definiert. Bei den verwendeten Bemessungsregen ging man bei der Planung 1996 davon aus, dass diese relativ starke, statistisch eher selten auftretende Ereignisse wiedergeben, die eher ungünstig für die Versickerung sind. Der tatsächlich auftretende Gebietsrückhalt pro Ereignis sollte also nicht unter der Zielgröße von 68 % liegen. Bei kleineren, häufiger im Jahr auftretenden Niederschlagsereignissen ging man davon aus, dass diese vollständig im Gebiet zurückgehalten werden (Beller Consult GmbH, 1996).

Während ereignisabhängige Betrachtungen eine Momentaufnahme darstellen, beziehen sich die Vorgaben der wasserrechtlichen Genehmigung meist auf Jahreswerte. Laut Planungsberechnungen (Tab.4) ging man von einem mittleren jährlichen Abfluss in den Vorfluter von $< 19.000 \text{ m}^3/\text{a}$ aus, wofür auch eine wasserrechtliche Erlaubnis erteilt wurde. Bezogen auf den zu Grunde gelegten, langjährigen, mittleren Niederschlag entspräche dies einem Gebietsrückhalt von $\geq 87\%$ pro Jahr, was hier einer Zielgröße gleichgesetzt wurde. Mit den Berechnungen der Langzeitsimulation von 1997 (Tab.4) wurde dieser Gebietsrückhalt bestätigt unter der Voraussetzung optimaler Versickerungsbedingungen der Rigolen. Im Falle eines nahezu vollständigen Dauereinstaus der Rigolen durch erhöhte Grundwasserstände wurde mit einer Reduzierung des mittleren Gebietsrückhaltes auf 72% gerechnet. Im Falle eines kompletten Versagens der Sicker- und Retentionswirkung des Mulden-Rigolen-Systems wäre nur noch der Rückhalt auf den Flächen wirksam, was je nach Berechnungsmethode zwischen 55 % (Langzeitsimulation, Beller Consult GmbH 1997) und 75 % (langjährige Mittelwerte, Beller Consult GmbH 1996) betragen würde.

Tab.4 Planungsannahmen 1996 zur Jahres-Bilanzierung von Niederschlag (NS), Abfluss und Versickerung mit Hilfe von langjährigen Mittelwerten ($A_{\text{red}}: 6,73 \text{ ha}$, $A_{\text{gesamt}}: 16,09 \text{ ha}$ siehe Tab.12, Benetzungsverlust: 0,7mm, Muldenverlust: 1,8mm) und 10-Jahresbilanz aus Langzeitsimulation ($A_{\text{ges}}: 14,67 \text{ ha}$, Parameter siehe Tab.10) und daraus abgeleitete Zielgrößen für den mittleren jährlichen Gebietsrückhalt und den mittleren jährlichen Rückhalt auf den Flächen.							
	Brutto-NS	Abflusswirksamer NS (abzüglich Anfangsverluste)	Regenwasserabfluss von den Flächen	MRS-Versickerung	Abfluss = Einleitungsmenge in den Dorfbach	Mittlerer jährl. Rückhalt auf den Flächen in % Brutto-NS bezogen auf A_{gesamt}	Mittlerer jährl. Gebietsrückhalt (Flächen + MRS) in % Brutto-NS bezogen auf A_{gesamt}
Langjähriger Mittelwert							
	933 mm/a	560 mm/a	37.700 m^3/a	19.000 m^3/a	$< 19.000 \text{ m}^3/\text{a}$	75%	$> 87\%$
Langzeitsimulation (1971-1980)							
kf: 10^{-5} m/s , ohne GW-Einstau	9066 mm/10a	4078 mm/10a	598.305 $\text{m}^3/10\text{a}$	432.282 $\text{m}^3/10\text{a}$	155.163 $\text{m}^3/10\text{a}$	55%	88%
kf: 10^{-5} m/s , mit GW-Einstau	9066 mm/10a	4078 mm/10a	598.305 $\text{m}^3/10\text{a}$	219.631 $\text{m}^3/10\text{a}$	370.322 $\text{m}^3/10\text{a}$	55%	72%

Berechnung aus Messungen:

Der Niederschlag wurde mit einer Kippwaage direkt im Untersuchungsgebiet erfasst (Tab. 2). Die Messung des Überlaufes erfolgte als Wasserstandsmessung mit einer Drucksonde (Marke DIVER) in der letzten Verdolung (Trapezprofil) vor der Einleitstelle in den Vorfluter (Tab. 2). Mit einem hydraulischen 1D-Modell (HEC-RAS) wurde dieser unter Einbeziehung möglicher Rückstaueffekte durch den Dorfbach in Überlaufdaten (L/s) umgerechnet. Aus Überlaufvolumen und gemessenem Niederschlag wurde für jedes Niederschlagsereignis und für die Jahresbilanz der Gebietsrückhalt berechnet und anschließend den Zielgrößen der Planung gegenübergestellt.

$$\text{Gebietsrückhalt (\%)} = \left(V_{NS}(\text{mm}) - \frac{V_{\text{Ü}}(L)}{A_{ges}(\text{m}^2)} \right) * \frac{100}{V_{NS}(\text{mm})}$$

3.3.3 Gebietsrückhaltevolumen und vollständiger Rückhalt

Das Volumen, das letztendlich pro Ereignis im Gebiet zurückgehalten wird, ist abhängig von den Speicher- und Sickereigenschaften der dezentralen und zentralen Maßnahmen und deren jeweils verfügbaren Retentionsvolumina. Dies kann je nach Vorregen, Niederschlagscharakteristik, klimatischen Bedingungen und Grundwasserständen unterschiedlich sein.

Je nach Art der Flächen, Geländemorphologie, Vegetation und vorhandenem Mulden-Retentionsvolumen können Niederschläge vollständig im Gebiet zurückgehalten werden (100 % Rückhalt).

Zielgrößen aus Planungsannahmen

In den Planungsunterlagen von 1996 wird bei geringeren Niederschlagsintensitäten von einem vollständigen Rückhalt bis zu Niederschlagshöhen von 6,2 - 7,2 mm (Mittelwert: 6,7 mm) ausgegangen, wobei das Retentionsvolumen der Versickerungsmulden sowie Benetzungs- und Muldenverluste auf den Flächen in die Überlegungen eingingen. Für sehr hohe Niederschlagsintensitäten wird von einem um 10-30% reduzierten, kompletten Rückhalt ausgegangen, was ca. 2,9 - 3,9 mm (Mittelwert: 3,4 mm) Niederschlagshöhe entspricht. Diese Annahmen wurden hier einer Zielvorgabe gleichgesetzt.

Berechnung aus Messungen

Analog Kap. 3.3.2 wurde für jedes Niederschlagsereignis das entsprechende Volumen an Gebietsrückhalt berechnet.

$$\text{Gebietsrückhalt (mm)} = V_{NS}(\text{mm}) - \left(\frac{V_{\text{Ü}}(L)}{A_{ges}(\text{m}^2)} \right)$$

Um den vollständigen Rückhalt des Gesamtsystems beurteilen zu können, wurden v.a. die Niederschlagshöhen von Ereignissen näher betrachtet, welche zu keinem Überlauf in den Vorfluter führten.

3.3.4 Spitzenabflüsse

Der Spitzenabfluss bezeichnet die pro Überlaufereignis maximal aufgetretene Überlauftrate (L/s) aus dem Gebiet, was gleichbedeutend ist mit der maximalen Einletrate in den Vorfluter.

Zielgrößen aus Planungsannahmen

Die Berechnung des maximal zu erwartenden Spitzenabflusses von 1511 L/s am Überlauf, erfolgte 1996 mit einem Bemessungsregen $r_{15\text{min},n=0,2}$ unter Annahme der in Kap.4.4.1.2 aufgeführten Flächen und Parameter und unter Annahme einer reinen Ableitung, d.h. ohne Retention und Versickerung des Mulden-Rigolen-Systems. Ebenfalls unter Annahme reiner Ableitung wird ein Spitzenabfluss von 940 L/s für einen Bemessungsregen $r_{15\text{min},n=1}$ aus dem Generalentwässerungsplan Freiburg zitiert. Unter Einbeziehung der Retentions- und Versickerungswirksamkeit des Mulden-Rigolen-Systems wurden mittels Langzeitsimulation (Beller Consult GmbH, 1997) für vergleichbare Niederschlagsereignisse und unter Variierung optimaler aber auch ungünstiger Randbedingungen Maximalwerte zwischen 1457–1701 L/s berechnet. Daraufhin wurde die Einleitung von maximal 1511 L/s einmal pro Jahr wasserrechtlich genehmigt, was im Folgenden einer maximalen Zielgröße gleichgesetzt wird.

Tab.5 Planungsannahmen und Zielgrößen für Spitzenabflüsse.			
Spitzenabfluss (L/s)	Bemessungskriterium (NS-Spende)	Bemerkungen	Quelle
Berechnungen mit Bemessungsregen			
1511	$r_{15\text{min},n=0,2} = 224,44 \text{ L/s/ha} = 20,2 \text{ mm in 15min}$	Maximal genehmigte Einletrate in Vorfluter mit $n=1a$	wasserrechtliche Genehmigung 1997
1511,01	$r_{15\text{min},n=0,2} = 224,44 \text{ L/s/ha} = 20,2 \text{ mm in 15min}$	aus Vordimensionierung 1996 (16,09 ha, $\alpha: 0,42$), bei reiner Ableitung ohne Muldenretention und -versickerung	Entwurfs- und Genehmigungsplanung 1996
940	$r_{15\text{min},n=1} = 140 \text{ L/s/ha} = 12,6 \text{ mm in 15 min}$	Einletrate lt. GEP bei reiner Ableitung ohne Muldenretention und -versickerung	Entwurfs- und Genehmigungsplanung 1996
Ereigniswerte aus Langzeitsimulation			
1695 (1701*)	34,4 mm in 7h 55min mit $I_{15\text{min}}$: 20,9mm ($r_{15\text{min},n=0,1-0,2}$)	kf: 10^{-5} m/s	Langzeitsimulation 1997 der Entwurfs- und Genehmigungsplanung
1572 (1588*)	39,6mm in 19h 5 min mit $I_{15\text{min}}$: 17,8mm ($r_{15\text{min},n=0,2-0,5}$)	kf: 10^{-5} m/s	Langzeitsimulation 1997 der Entwurfs- und Genehmigungsplanung
1457 (1479*)	48,8mm in 5h 25min mit $I_{15\text{min}}$: 15,6mm ($r_{15\text{min},n=0,5}$)	kf: 10^{-5} m/s	Langzeitsimulation 1997 der Entwurfs- und Genehmigungsplanung
* mit Grundwassereinstau der Rigolen			

Berechnungen aus Messungen

Wie bereits in Kap. 3.3.2 beschrieben, wurde über eine Wasserstandsmessung die Überlaufrate ermittelt, woraus das Maximum pro Ereignis als Spitzenabfluss (L/s) extrahiert wurde.

3.3.5 Dämpfung und Verzögerung von Abflussspitzen

Zielgrößen aus Planungsannahmen

In den Planungsunterlagen ist vermerkt, dass durch die kaskadenartige Anordnung des Muldensystems eine zeitliche Verzögerung und eine Reduzierung von Abflussspitzen erzielt werden sollte, was jedoch nicht näher quantifiziert wird. Hinsichtlich der Reduzierung von Abflussspitzen gingen die Planungsannahmen davon aus, dass Regenereignisse mit hoher Intensität und

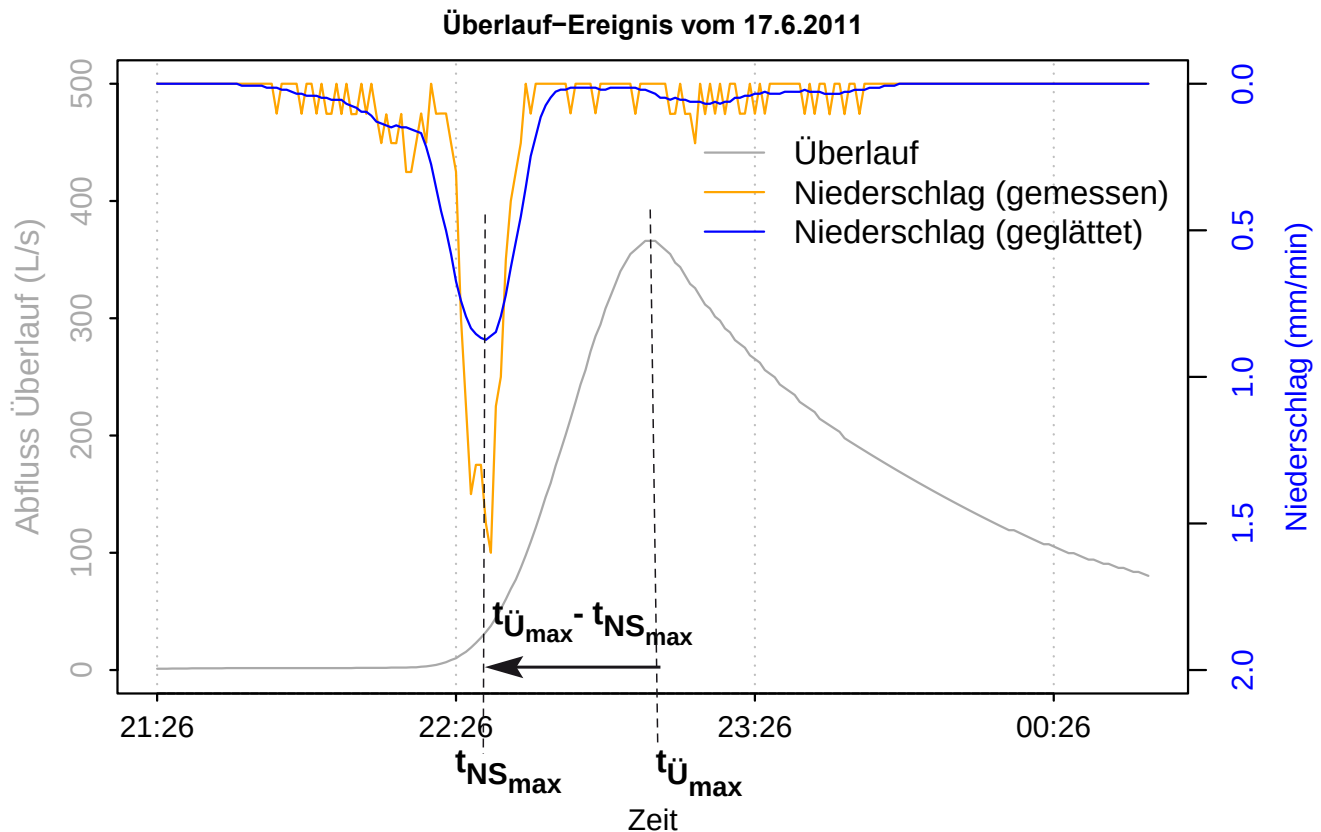


Abb.7 Berechnung der integralen Abflussverzögerung (=Abflusskonzentrationszeit) des gesamten Untersuchungsgebietes gemessen am Überlauf (grau) am Beispiel eines Niederschlags-Überlauf-Ereignisses. Die Niederschlagsdaten (mm/min) wurden mittels Gleitendem Durchschnitt (15 min-Fenster) zuvor geglättet.

länger als 30 min nicht mehr gedämpft werden. Bezüglich der Wirkung von dezentralen Maßnahmen sind keine Hinweise vermerkt.

Berechnung aus Messungen

Die Verzögerung von Abflussspitzen durch die Gesamtwirkung aller Maßnahmen wurde am Überlauf (= Einleitung zum Vorfluter) ermittelt, indem ereignisweise der Zeitpunkt des maximalen Spitzenabflusses am Überlauf vom Zeitpunkt der maximalen Niederschlagsintensität subtrahiert wurde (Abb.7). Die im 1 min-Intervall gemessenen Niederschlagsdaten wurden zuvor durch Anwendung eines Gleitenden Durchschnittes mit 15 min-Intervall geglättet. Nach grafischer Prüfung konnten 37 Ereignisse ausgewertet werden. Die so berechnete Abflussverzögerung kann näherungsweise als die Abflusskonzentrationszeit des entwässerten Siedlungsgebietes betrachtet werden.

Die Dämpfung von Abflussspitzen wurde exemplarisch für einzelne, dezentrale Maßnahmen (Bäume, Gründächer) experimentell ermittelt (siehe Kap.4.3). Die Gesamtwirkung lässt sich aus den in Kap.4.4.2.4 beschriebenen Spitzenabflüssen am Überlauf zum Vorfluter ableiten.

3.3.6 Beeinflussung des Abflusses im Vorfluter

Zielgrößen aus Planungsannahmen

Aus den Planungsunterlagen geht hervor, dass sich von dem Entwässerungskonzept auch eine hydraulische Entlastung des bereits durch Einleitungen im Oberlauf stark beanspruchten Vorfluters (St. Georgener Dorfbach) erhofft

wurde. Neben einer möglichst minimal zu haltenden Einletrate in den Dorfbach wird die Annahme formuliert, dass auszuschließen ist, dass die Abflussspitze des Dorfbaches zeitgleich mit der Abflussspitze des Überlaufes auftritt (Beller Consult GmbH, 1999). Aus diesen rein qualitativen Angaben wurde abgeleitet, dass der Zeitversatz zwischen Spitzenabfluss am Überlauf und Scheitelabfluss im Vorfluter ungleich Null sein sollte, was als Zielgröße definiert wurde. Außerdem sollte die prozentuale Verstärkung des Scheitelabflusses durch die Einleitung aus der Siedlung möglichst gering sein.

Berechnungen aus Messungen

Für die Auswertung wurden die zeitlich hoch aufgelösten Wasserstandsganglinien von Überlauf und Flusspegel verwendet. Letzterer befindet sich ca. 100m oberhalb der Einleitstelle, was aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten jedoch vernachlässigt werden kann. Um den Zeitversatz zwischen Siedlungseinleitung (Überlauf) und Abfluss im Bach für jedes Überlaufereignis zu berechnen, wurde der Zeitpunkt des maximalen Scheitelabflusses von dem Zeitpunkt des maximalen Spitzenabflusses am Überlauf subtrahiert (Abb.8).

Um eine Aussage treffen zu können, wie stark der Scheitelabfluss im Bach durch die Siedlungseinleitung jeweils verstärkt wurde, wurde zunächst die Wasserstandsmessung im Fluss über eine Kalibrierung in Abfluss umgerechnet. Dabei wurden 2 Kalibrierbereiche unterschieden. Bis zu einem Wasserstand von 253mNN, was in etwa dem Ausufern des Dorfbaches im Bereich der Einleitstelle entspricht, erfolgte eine Kalibrierung mit Salzverdünnungsmessungen. Bei Pegelständen >253mNN wurde eine Kalibrierung mittels hydraulischer Berechnungen (stationär, 1D) mit der software HEC-RAS unter

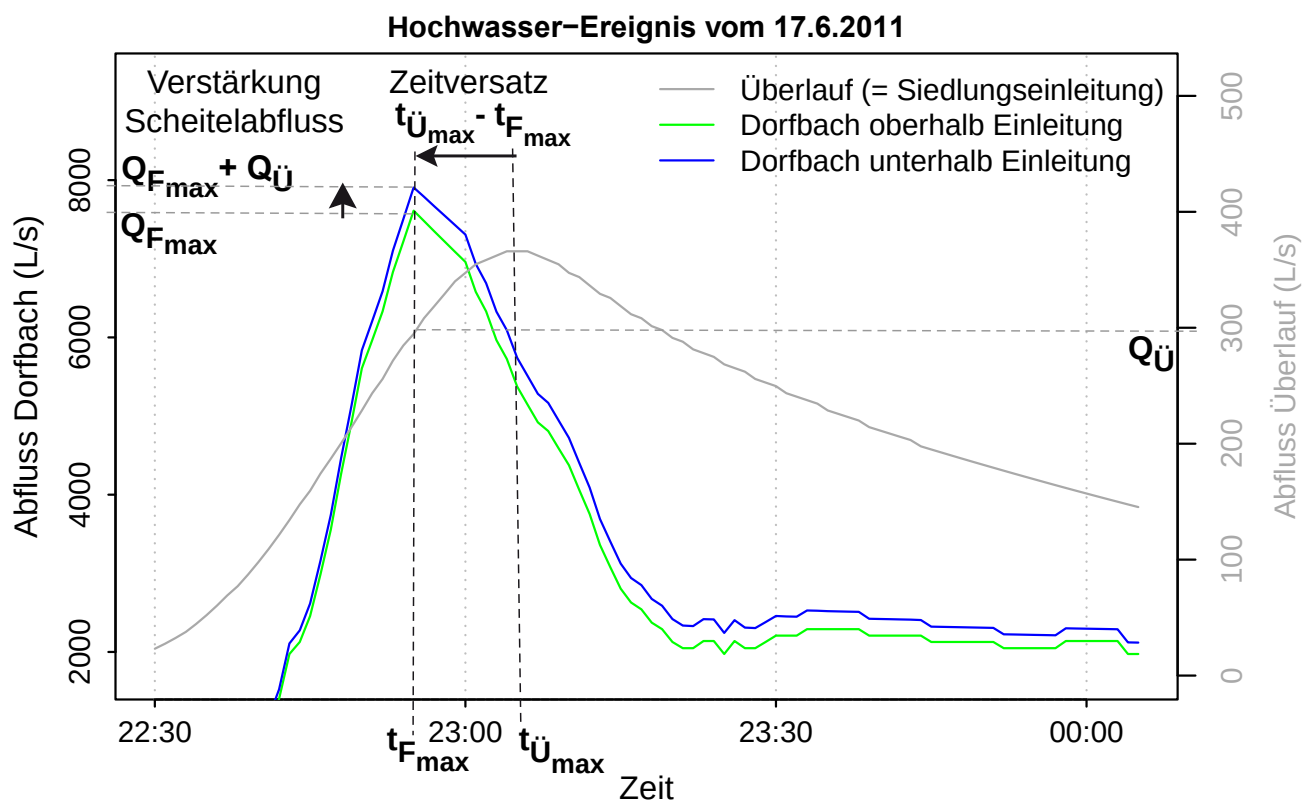


Abb.8 Zeitlicher Verlauf der Abflüsse von Dorfbach oberhalb der Einleitstelle (grün), der Siedlungseinleitung (Überlauf, grau) und der Aufsummierung von Dorfbach und Siedlungseinleitung (blau) während des Hochwasserereignisses vom 17.6.2011 und Angabe der aus den Messdaten berechneten Größen.

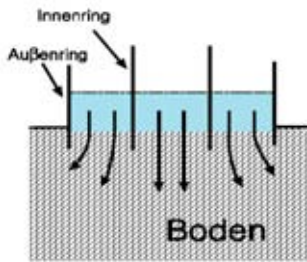


Abb. 9

Versuchsaufbau und Prinzip des Doppelringinfiltrometers. Bild unten: Ein Innenring mit einem Durchmesser von 31,5 cm und ein Außenring mit einem Durchmesser von 54,4 cm werden 8 - 10 cm in den Boden geschlagen und mit Wasser aufgefüllt. Bild oben: Das Wasser im äußeren Ring verhindert ein laterales Fließen im inneren Ring und ermöglicht somit ein möglichst eindimensionales, vertikales Fließen (verändert nach Duner 2003 in Opferkuch 2012).



Verwendung vermessener Querprofile des Flussabschnittes durchgeführt. Die so ermittelten Abflussganglinien des Dorfbaches oberhalb der Einleitung (grüne Linie Abb.8) wurden mit der Abflussganglinie des Überlaufes (grau) aufsummiert (blau). Für diese Überlagerung, welche dem Abfluss des Dorfbaches unmittelbar unterhalb der Einleitstelle entspricht, wurde die prozentuale Erhöhung des maximalen Scheitelabflusses berechnet.

3.3.7 Sickerleistung der Mulden

Zielgrößen aus Planungsannahmen

Die oberirdische Versickerung erfolgt über den 0,3–0,5m mächtigen Oberboden der Mulden sowie 0,1–0,3 m Feinsand bis in die Rigole. Um eine optimale Versickerung aber auch einen ausreichenden Schadstoffrückhalt zu ermöglichen, sollte laut damals (ATV A-138) und heute (DWA A-138) gültigem Regelwerk die vertikale, gesättigte, hydraulische Leitfähigkeit k_f (Infiltrationskapazität) zwischen $5 \cdot 10^{-5}$ und 10^{-5} m/s liegen, was hier als Zielgröße für Einzelmulden definiert wurde.

Für die Berechnung der Gesamtsickerleistung des Muldensystems ging bei der Planung 1996 die Mulden-Sohlfläche als versickerungswirksam ein, woraus bei $k_f = 10^{-5}$ m/s eine maximale Gesamtsickerleistung von 26,5 L/s berechnet wurde und wofür eine wasserrechtliche Genehmigung erteilt wurde (Tab.16). Diese maximale Sickerleistung wurde hier einer Zielgröße gleichgesetzt.

Berechnungen aus Messungen

Um die tatsächliche Sickerleistung der zentralen Muldenversickerung nach mehrjähriger Betriebsdauer zu überprüfen, wurden im November 2009 und Mai-Juni 2012 zunächst in nahezu allen Teil-Mulden Doppelring-Infiltrometer-Versuche durchgeführt, um die jeweilige Infiltrationskapazität zu bestimmen (Abb.9). Genauere Angaben zu Versuchsaufbau und –durchführung können dem Teilbericht „Ergebnisbericht der Infiltrationsversuche in den Versickerungsgräben im Stadtteil Vauban, Freiburg“ von 2009 entnommen werden (http://www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/regenwasservauban/Bericht_Infiltr_Vauban_2009_11.pdf). Eine detaillierte Untersuchung zur Infiltrationskapazität aber auch zum Aufbau und zur Beschaffenheit des Oberbodens der Mulden erfolgte durch Opferkuch (2012).

Die im Geländeversuch ermittelten k_f -Werte wurden für jede Teil-Mulde jeweils gemittelt und mit der aktuellen Muldensohlfläche (Stand 2011) multipliziert. Die Versickerung aller Teilmulden wurde als aktuelle oberirdische Sickerleistung (L/s) der Zielgröße der Planung gegenübergestellt.

3.4 Einfluss von Bäumen und Gründächern auf die Abflussbildung

Um den Einfluss von Bäumen und Gründächern auf die Reduzierung von Oberflächenabfluss, aber auch die Dämpfung und Verzögerung von Abflussspitzen zu erfassen, wurden neuartige Messgeräte und –aufbauten entwickelt (Tabelle 3.2). Die Messung der Bauminterzeption erfolgte indirekt als Bestandsniederschlag mit modifizierten Niederschlagswippen an drei verschiedenen Baumarten (Linde, Platane, Tanne) mit 1-minütiger Auflösung (Abb.10). Die Differenz zum Freiland- bzw. Gesamtniederschlag ergibt den Anteil, welcher



Abb.10 Messeinrichtung zur Messung der Interzeption unter einem Nadelbaum.

durch Interzeption auf den Blättern zurückgehalten wird. Dieser interzeptierte Niederschlag entspricht der Reduktion des Oberflächenabflusses.

Um die Wirkung von Gründächern im Vergleich mit anderen Dachaufbauten vergleichen zu können, wurde der Dachabfluss an vier verschiedenen Flachdach-Aufbauten gemessen (konventionelles Eternitdach, Kiesdach, extensives Gründach, Mischform mit intensivem Gründach). Das dafür entwickelte Messgerät (Abb.7) funktioniert nach dem Thomson-Wehr-Prinzip, wonach über eine Kalibrierung mit verschiedenen Durchflüssen eine Wasserstands-Durchfluss-Beziehung für jedes Gerät erstellt wurde. Die kontinuierliche Messung der Wasserstände im 1-min-Intervall kann so direkt in den Dachabfluss (L/s) umgerechnet werden. Aus dem Vergleich der Abflussvolumina und Abflussmaxima der untersuchten Dächer mit den Messwerten des konventionellen Eternitdaches als Referenzdach wurde die abflussmindernde Wirkung abgeleitet.

Aufbau der beprobten Dächer

Konventionelles Dach

- Eternitplatten

Kiesdach mit PV-Anlage + Betonsockel und Vordach aus Glas:

- Betondecke + ca. 20-24 cm Styrodur + PE-Folie (Sanafill) + Wurzelschutzmatte aus Recyclingmaterial + Wurzelschutzvlies + ca. 5 cm mächtige Kiesauflage (DM ca. 4 cm)

Extensives Gründach mit PV-Anlage + Betonsockel und Vordach aus Glas:

- Betondecke + ca. 20-24cm Styrodur + PE-Folie (Sanafill) + Wurzelschutzmatte aus Recyclingmaterial + Wurzelschutzvlies + ca. 6-7 cm mächtiges Gründachsubstrat (Boden + Lavakies) mit Seduum- und Moosbewuchs mit ca. 50 cm breitem, umlaufendem Kiesstreifen

Mischform Dachterrasse mit Gründach + Vordach aus Glas:

- extensive Begrünung Überdachung Wintergarten
- Kiesaufbau und Pflanzkübel für Dachterrasse
- ca. 30 cm breiter, ca. 15 cm mächtiger umlaufender Streifen mit intensiver Begrünung
- Vordach aus Glas

Tab.6 Bauliche Angaben zu den untersuchten Flachdächern.

Dachart	erfasste Fläche	Abstand Dachfirst zu Traufe	Dachneigung
Konventionell (Eternit)	103 m ²	14 m	10°
Kies	195 m ²	11 m	ca. 3°
Gründach extensiv	242 m ²	11 m	ca. 3°
Mischform – Gründach intensiv	ca. 160 m ²	ca. 10 m	ca. 3°

Da der Abfluss der Dächer im Bestand gemessen wurde, sind die aus den Messungen ermittelten Volumenangaben, welche sich auf die Dachfläche beziehen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, da immer mehrere Fallrohre vorhanden waren und es u.U. zu Verstopfungen von Fallrohröffnungen kommen konnte.

Die für Bäume und Dächer erfassten Niederschlagsereignisse wurden ausgewertet hinsichtlich:

Reduzierung des Abflussvolumens**Bäume**

im Vergleich zum Bruttoniederschlag durch die Interzeption des jeweiligen Baumes [als Mittelwert des Rückhaltes aus allen Einzelereignissen (in mm und %)]

Dächer

im Vergleich zum Referenzdach (Eternit) [als Gesamtrückhalt über den gesamten Messzeitraum (in %)]

Dämpfung der Abflussspitzen**Bäume**

abgeleitet aus der Differenz zwischen der maximalen Intensität des Bruttoniederschlags und der maximalen Intensität des Bestandsniederschlags für das 1min-Messintervall pro Ereignis (in mm/min und %)

Dächer

abgeleitet aus der Differenz zwischen der maximalen Abflussspitze des Referenzdaches und der maximalen Abflussspitze des jeweiligen alternativen Daches, normiert auf die jeweilige Dachfläche (in %)

Zeitliche Verzögerung der Abflussspitzen (Vgl. Abb. 7)**Bäume**

als Zeitdifferenz zwischen Intensitätsmaximum des Bruttoniederschlags und Intensitätsmaximum des Bestandsniederschlags für die mittels Gleitendem Durchschnitt (5 min-Intervall) geglätteten Messdaten (in min)

Dächer

als Zeitdifferenz zwischen maximaler Abflussspitze des Referenzdaches und der maximalen Abflussspitze des jeweiligen alternativen Daches (in min)

3.5 Flächenkartierung und –klassifizierung

Um die zwischen Baubeginn 1997 bis zum aktuellen Stand (2011) tatsächlich umgesetzte Flächennutzung zu ermitteln, wurden die unterschiedlichen bestehenden Flächennutzungen und Oberflächenbeschaffenheiten mittels

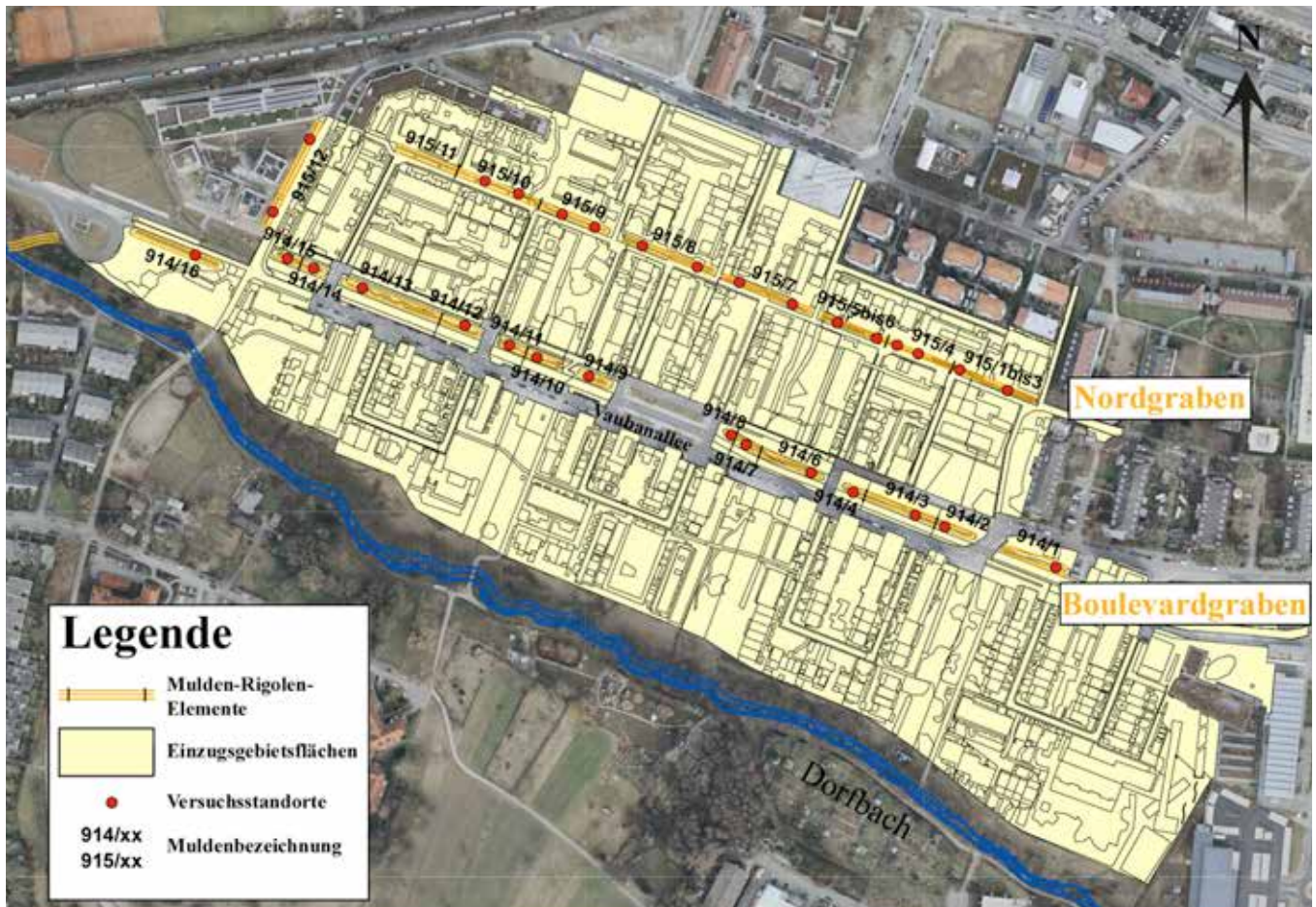


Abb. 11 Lageplan und Bezeichnung der Teil-Mulden und jeweiliges Teil-Einzugsgebiet sowie Markierung der Versuchsstandorte der Doppelring-Infiltrometer-Versuche (aus: Opferkuch, 2012).

Luftbild, vorhandener Flächendigitalisierung aus Luftbildern 2001 und 2009 und Geländekartierung hochaufgelöst digitalisiert. Anschließend erfolgte eine eigens für das Projekt entwickelte Klassifizierung in 53 Klassen, welche der unterschiedlichen Abflusswirksamkeit der verschiedenen Oberflächen gerecht wird (siehe Kap.4.4.1.2). Diese Flächenklassifizierung dient zugleich als Grundlage für den Aufbau und die Parametrisierung des im Kap.3.6 beschriebenen Niederschlags-Abfluss-Modells und in etwas vereinfachter Form für die im Kap.4.8 erläuterte Webanwendung.

Zusätzlich wurden alle Baumstandorte neu kartiert und jeweils Kronenradius, Baumart, Höhe und Stammdurchmesser im Gelände vermessen, um die von Bäumen überschatteten Flächen berechnen zu können.

Einige Flächen konnten aufgrund der muldenartigen Geländemorphologie, durch freien Ablauf ins Mischsystem der Hauptstrasse oder aufgrund nach innen zu Grünflächen entwässernden Balkonen als vom Trennsystem abgekoppelte Flächen identifiziert werden (Abb.29). Diese Flächen wurden von der Gesamtfläche abgezogen, um die aktuelle, ans Trennsystem angeschlossene Gesamtfläche (Stand 2011) zu erhalten.

Die tatsächliche Ausdehnung und Lage der ans Trennsystem angeschlossenen Flächen wurde mit den aktuellsten Lageplänen und einem Abgleich im Gelände auskartiert und für jede Mulde als Teil-Einzugsgebiet erfasst (Abb.11). Alle Flächen liegen als shape-files in ArcGIS 9 vor.

3.6 Niederschlags-Abfluss-Modell

Um das Zusammenwirken der abflussbildenden Flächen, dezentralen Maßnahmen und Mulden-Rigolen-Elemente unter variierenden Randbedingungen nachbilden zu können, wurde entsprechend dem aktuellsten Stand (2011) von Aufbau und Geometrie der Mulden-Rigolen sowie anhand der unter 3.5. beschriebenen Flächenklassifizierung ein Niederschlags-/Abflussmodell mit KOSIM 6.3 XL erstellt. Die 53 Flächenklassen (Tab.14) sind dabei entsprechend ihrer spezifischen Eigenschaften wie Wasserspeichervermögen und Infiltrationsvermögen parametrisiert, wobei insbesondere dem hohen Wasserspeichervermögen von Gründächern und teildurchlässigen Belägen befestigter Flächen Rechnung getragen wurde. Ebenso geht die Versickerungswirksamkeit von teildurchlässigen Belägen ein, indem sie im Modell als durchlässige Flächen angenommen werden. Anhand der Endabflussbeiwerte pro Flächenklasse wurde der aktuelle Gesamtabflussbeiwert berechnet. Angaben zum natürlichen Untergrund entstammen hydrogeologischen Gutachten (WLP 1994, Wagenmann-Gaiser 2004) und die Versickerungsleistung der einzelnen Mulden wird als Idealzustand entsprechend der Vorgabe nach DWA A-138 mit $k_f 10^{-5} \text{ m/s}$ angenommen. Da den Mulden modellintern keine Fließzeit zugeordnet werden kann, wird die Gesamtließzeit vom Modell unterschätzt. Um dies auszugleichen, wurden zwischen den Mulden fiktive Transportelemente eingebaut. Über diese wurde die Fließzeit im Modell anhand einiger gemessener Überlaufereignisse, bei denen ein Rigoleneinstau auszuschließen war, kalibriert (Abb.12, Abb.13).

Bei der Einbindung der Bäume im Modell ist im Gegensatz zu anderen Flächen zu beachten, dass die unter der Baumkrone vorhandene Fläche ebenfalls einen Einfluss besitzt. Dies wurde so gelöst, dass unter Annahme von durchschnittlich 50% Abflussreduzierung durch Bäume (siehe Kap.4.5.1) die Wirkung eines

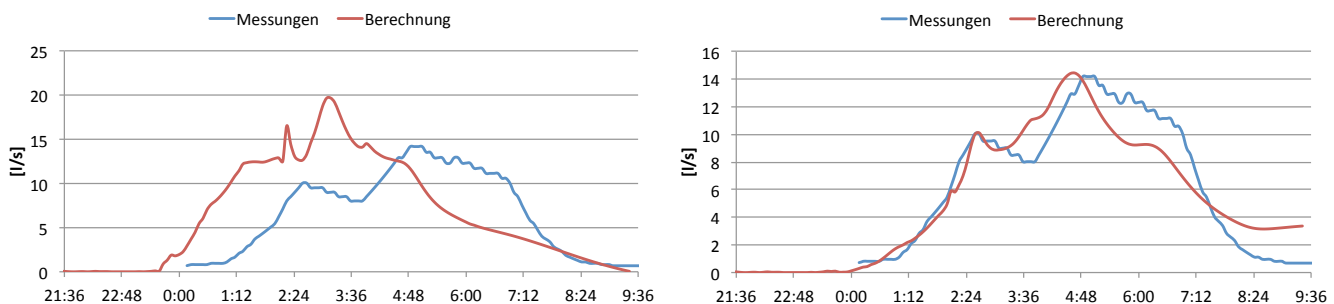


Abb. 12 Gemessene (blaue Linie) und modellierte (rote Linie) Spitzenabflüsse am Überlauf zum Dorfbach vor (links) und nach (rechts) Modellanpassung für Einzelereignis am 30.08.2010.

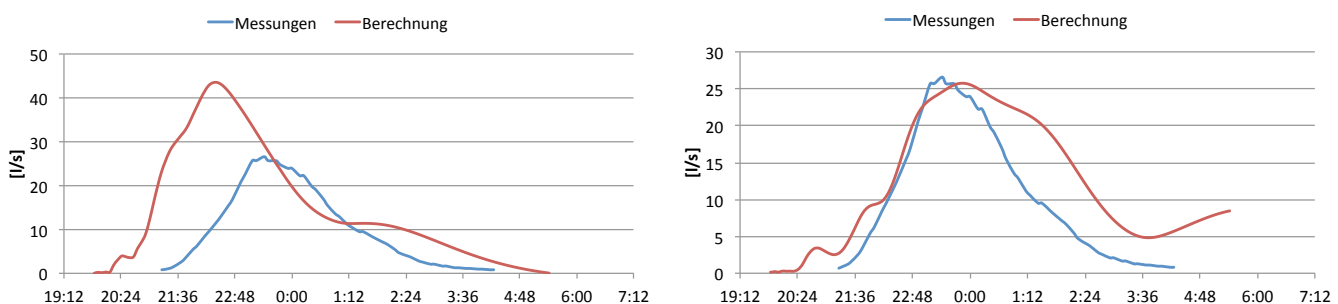


Abb. 13 Gemessene (blaue Linie) und modellierte (rote Linie) Spitzenabflüsse am Überlauf zum Dorfbach vor (links) und nach (rechts) Modellanpassung für Einzelereignis am 12./13.09.2010.

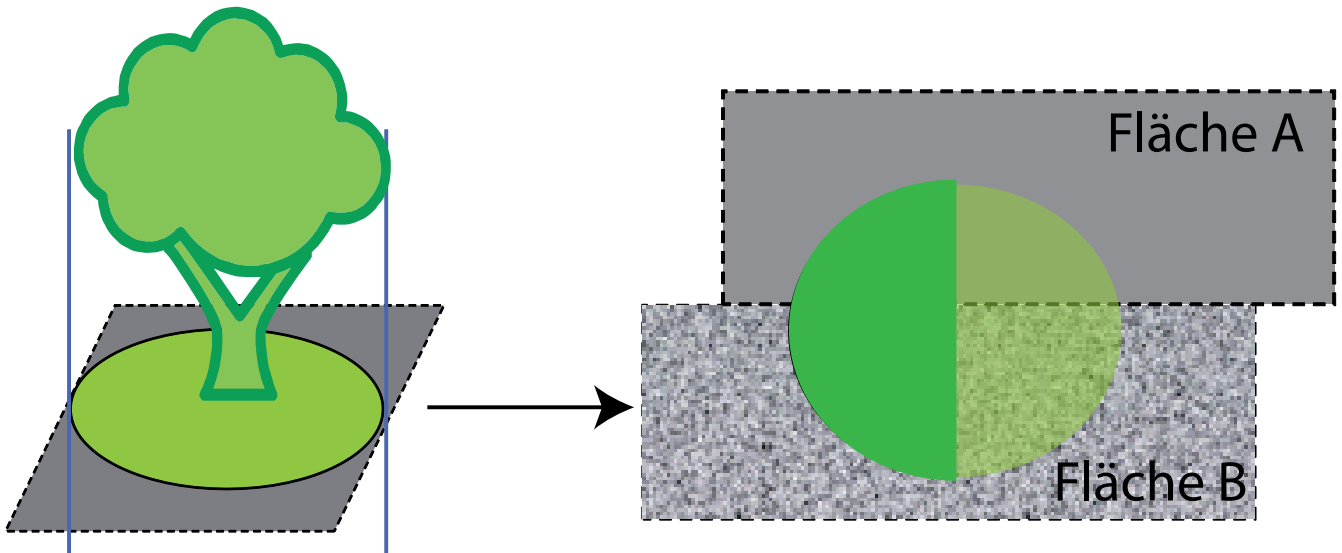


Abb. 14 Schematische Darstellung der Umsetzung der Bäume im Modell.

Baumes zu einer Halbierung der jeweils darunterliegenden Flächengröße führt, was einer Abflussreduzierung um 50% entspricht (Abb. 14).

3.7 Einfluss dezentraler Maßnahmen mit und ohne Mulden-Rigolen-System

Um die Auswirkung einzelner Gruppen von Regenwasserbewirtschaftungs-Maßnahmen (RWS) in ihrer tatsächlich vorhandenen Flächenausdehnung auf den Gebietsrückhalt des Untersuchungsgebietes quantifizieren zu können, wurden Langzeitsimulationen mit dem unter Kap. 3.6 beschriebenen Modell unter Verwendung einer 30-jährigen, synthetischen Regenreihe (LUBW 2007a) durchgeführt.

Folgende Gruppen von dezentralen RWB-Maßnahmen wurden unterschieden:

- 1) Bäume
- 2) Gründächer (inkl. Fahrradschuppen)
- 3) Durchlässige Flächenbefestigungen (verschiedene Fugenpflaster, Rasenfugenpflaster)
- 4) Öffentliche und private Grünflächen, bepflanzte Vorgärten, Beete

Dabei wurden sukzessive einzelne Maßnahmengruppen fiktiv in konventionell gestaltete Flächen (asphaltierte Flächen bzw. Blechdächer) überführt und anschließend das Gesamtsystem simuliert. Um den Einfluss des Mulden-Rigolen-Systems, welches allen dezentralen Maßnahmen nachgeschaltet ist, quantifizieren zu können, wurde jeweils der Gebietsrückhalt mit und ohne Mulden-Rigolen-System betrachtet. Letzterer Fall würde in der Praxis der Kombination dezentrale RWB-Maßnahmen + Regenwasserkanal entsprechen.

3.8 Kostenvergleich zwischen Mulden-Rigolen-System und einem konventionellen Trennsystem mit Regenrückhaltebecken

Um einen Kostenvergleich zwischen Mulden-Rigolen-System und einem konventionellen Trennsystem mit Regenrückhaltebecken (Erdbauweise) durchführen zu können, wurde für die aktuelle Flächenzusammensetzung des Untersuchungsgebietes ein Regenwasserkanalnetz (Abb.15) konzipiert, in HYSTEM-EXTRAN 6.5. hydrodynamisch überrechnet und die erforderlichen Nennweiten festgelegt. Am Ende des Systems wurde ein Regenrückhaltebecken (RRB) platziert. Auf eine Kläreinheit wurde verzichtet, da es sich bei dem Gebiet um ein weitgehend autoreduziertes, reines Wohngebiet handelt.

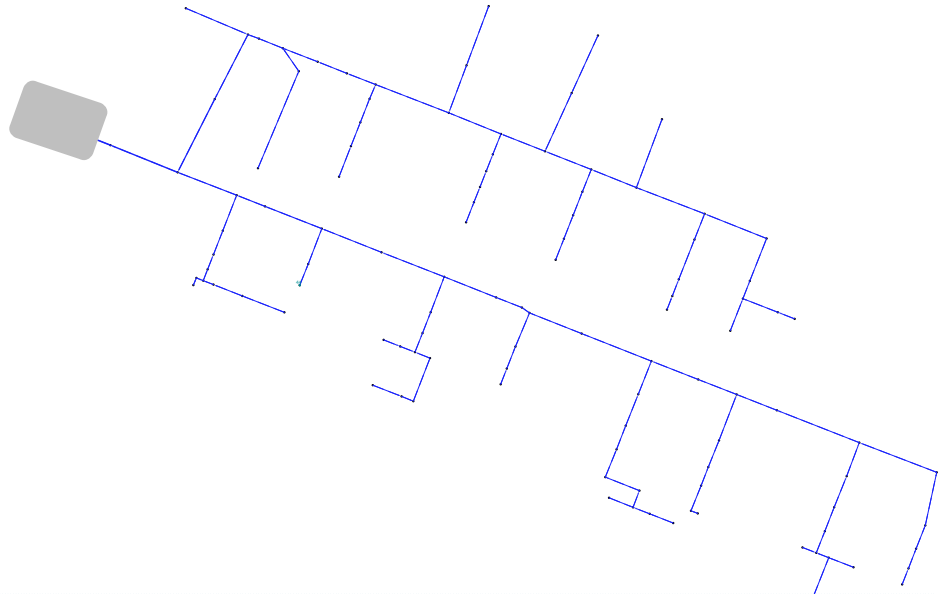


Abb. 15 Fiktives, konventionelles Trennsystem mit Regenwasserableitung und Regenrückhaltebecken für das Untersuchungsgebiet.

Da die zu vergleichenden Systeme völlig unterschiedlich arbeiten, ist eine Auslegung des Regenrückhaltebeckens in Anlehnung an die Leistungsfähigkeit des Mulden-Rigolen-Systems nicht möglich. Insbesondere die Festlegung eines Drosselabflusses stellt hierbei eine Schwierigkeit dar. Um die Höhe des Drosselabflusses festzulegen, wurden verschiedene Herangehensweisen getestet (LfU 2005, LfU 2006, DWA 2007, BWK 2004) und letztendlich ein Drosselabfluss von 200 L/s festgelegt. Dies entspräche dem natürlichen Abfluss einer unbebauten Fläche derselben Größe bei Abflussbeiwert 0,10 und einer Regenspende der Dauer 30 Minuten und Jährlichkeiten zwischen 0,20 und 0,50 [1/a].

Das Regenrückhaltebecken wurde mittels kontinuierlicher Langzeitsimulation nachgewiesen, wobei der Drosselabfluss zu 200 L/s und das Rückhaltevolumen zu 1.000 m³ angesetzt wurden, was je nach verwendeten Regendaten zu einer Überlaufhäufigkeit von 0,17 – 0,19 [1/a] führt.

Für diese Vergleichsvariante wurden sowohl hydraulisch-hydrologische Berechnungen durchgeführt, als auch eine Kostenschätzung.

Investitionskosten

Die Herstellungskosten für das existierende Mulden-Rigolen-System sind bekannt und wurden seitens des Betreibers (badenova AG) mitgeteilt.

Die Kosten für das Trennsystem wurden im Rahmen dieser Arbeit für das Kanalnetz auf dem Niveau einer Kostenberechnung und für das Regenrückhaltebecken (Erdbauweise) auf dem Niveau einer Kostenschätzung ermittelt.

Um eine Vergleichbarkeit herzustellen, sind nur diejenigen Kosten für den Regenwasserkanal des Trennsystems berücksichtigt, die auch beim Neubau der Anlage zum damaligen Zeitpunkt angefallen wären. So sind beispielsweise die Kosten für den Straßenaufbau entsprechend der Grabenbreite nicht in den hier dargestellten Kosten enthalten, da die Straße im Zuge der Erschließung unabhängig vom Entwässerungssystem sowieso erstellt wurde.

Grundlage der Kostenberechnung ist eine detaillierte Massenermittlung, die auf der Planung eines fiktiven Kanalnetzes aufbaut.

Da sich die ermittelten Kosten für das Mulden-Rigolen-System auf das Herstellungsjahr 1997 beziehen, wurden sie über den Baupreisindex (hier: 12%) angepasst, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

- 
- 1 EINFÜHRUNG & FRAGESTELLUNG
 - 2 UNTERSUCHUNGSGEBIET
 - 3 METHODEN
 - 4 ERGEBNISSE
 - 5 ZUSAMMENFASSUNG, EMPFEHLUNGEN & AUSBLICK
 - 6 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT & VERÖFFENTLICHUNGEN
 - 7 QUELLEN

4.1 Bau und technische Details des zentralen Mulden-Rigolen-Systems

Mit Baubeginn 1997 wurde zunächst ein provisorisches Entwässerungssystem aus Gräben und Dolen zur Abführung von Bauwasser errichtet, um eine eventuelle Verunreinigung der Versickerungselemente zu vermeiden. Die Bebauung erfolgte von 1997 - 2004 in 4 Bauabschnitten (BA): Graben Nord BAI, Boulevardgraben BA I und II und Graben Nord BAI. Erst nach Beendigung der Hochbautätigkeiten und dem Straßenbau im jeweiligen Bauabschnitt wurde der Endausbau des Mulden-Rigolen-Systems mit dem Einbau der Rigolenkörper, der Überlaufbauwerke, des Oberbodens mit Rollrasen und die Modellierung der Mulden ausgeführt.

Im Laufe der Bebauung wurden zusätzliche Flächen an das Entwässerungssystem angeschlossen, es erfolgten Änderungen im Bebauungsplan und die ursprünglich geplante Ausführung der Mulden-Rigolen musste den örtlichen Gegebenheiten wie Lage von Kanalisationsrohren, Stadtbahntrasse, Baumwur-



Abb.18 Bauliche Ausführung der Mulden-Rigolen (Fotos: E. Henkel).

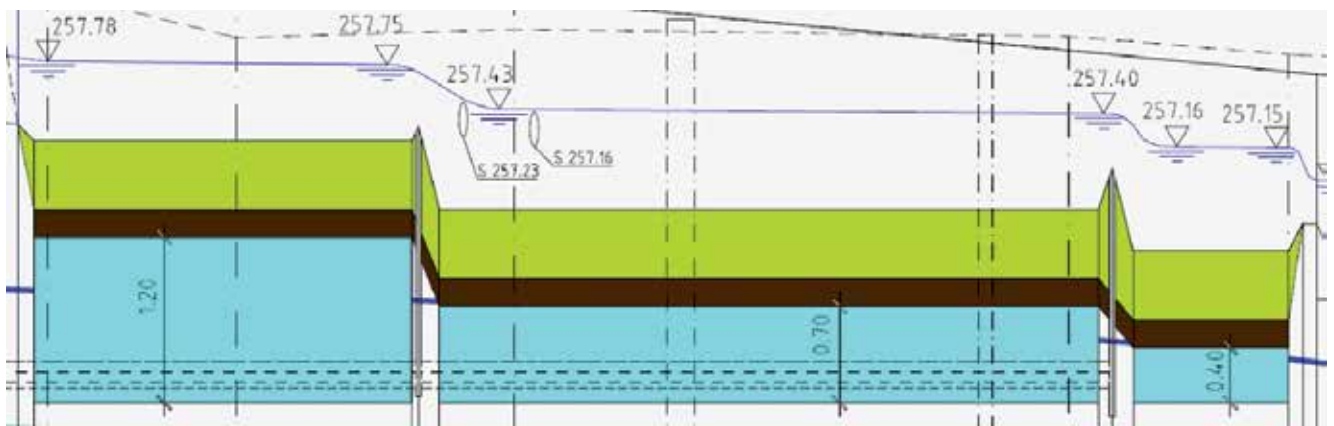
zeln usw. angepasst werden. Dadurch war mehrmals eine Neuberechnung der Grabenhydraulik erforderlich (Beller Consult GmbH 1999, 2003, 2004). Das z.T. erheblich verkleinerte Muldenvolumen sollte durch ein höheres Rückhaltevolumen der Rigolen und zusätzliche Mulden-Überlaufbauwerke ausausgeglichen werden, um ausreichenden Überflutungsschutz herzustellen. Abweichend von der ursprünglichen Planung wurden vermehrt Hohlköperrigolen vom Typ RigoFill, später RigoFill inspect mit Kontrollschächten (Firma Fränkische) verbaut, da diese im Vergleich zu Kies (35%) ein viel größeres Porenvolumen (96%) aufweisen.

Im Anschluss an den eigentlichen Endausbau des Oberflächen-Entwässerungssystems wurden weitere Umbau- und Nacharbeiten notwendig. Aufgrund teilweise sehr steiler Muldenflanken mussten Boden und Rollrasen mehrmals erneuert werden bevor ein stabiler Zustand erreicht war. Die Verfüllung der Muldenvertiefung mit Kies oder Mutterboden sollte das in einigen Mulden austretende Schichtenwasser ausgleichen. Durch eine Havarie wurde ein weiterer Bodenaustausch notwendig.

Mit dem Schließen der letzten Baulücken sind seit ca. September 2011 alle vorgesehenen Grundstücke an das Grabensystem angeschlossen.

Rigolen:

Das Grundprinzip der Mulden-Rigolenversickerung zeigen Abb.19 u. Abb.4. Im östlichen Teil beider Gräben wurden Transportrigolen gebaut.



Legende



Oberboden mit Rasensaat, H = 0,50 m
 $k_f = 10^{-5} \text{ m/s}$, pH > 6,5



Sandschicht, H = 0,20 m
 $k_f \geq 5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$



Rigole, Kies 16/32, $k_f \geq 10^{-3} \text{ m/s}$
mit Geotextil ummantelt



Wasserspiegellinie mit freiem
Auslauf in den Dorfbach



Sickerrohr DN 200

Abb. 19

Längsschnitt Mulden-Rigolen-Elemente mit Kiesrigole. Die kaskadenartig angeordneten Versickerungsmulden sind durch Überlaufschwellen gegliedert, welche gleichzeitig die Kontrollschächte der Rigolen enthalten. Die Rigolen sind z.T. über das Sickerrohr und den Kontrollschacht miteinander verbunden (verändert nach Beller Consult GmbH 2003).

Bei Überschreiten der Speicherkapazität einer Rigole kann so das Wasser über eine Verbindungsleitung an die folgende Rigole weitergegeben werden, wodurch die Speicher- und Versickerungskapazitäten des verbundenen Systems optimaler ausgenutzt werden (Beller Consult GmbH, 1996).

Mulden-Überlaufschächte

In einigen Mulden wurde über Überlaufschächte (Abb.20) eine direkte Verbindung zur Rigole geschaffen, sodass im Falle eines Mulden-Einstaus über der Bemessungsgrenze eine zusätzliche Ableitmöglichkeit gegeben ist.

Für die Weiterleitung zur nächsten Mulde und für den Muldenüberlauf in die Rigole ist im letzten Bauabschnitt (Nordgraben BAII) ein kombiniertes Überlauf- und Einlaufbauwerk ausgeführt (Abb.21).

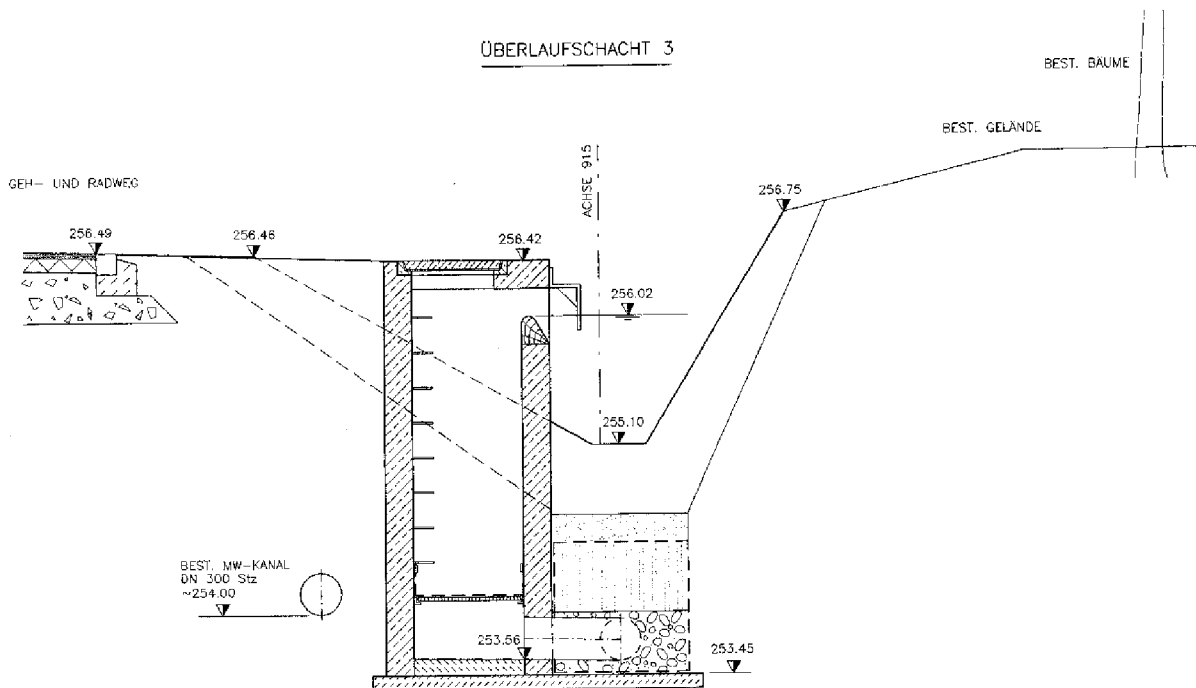


Abb. 20 Mulden-Überlaufschacht im Bereich des Nordgrabens BA 1 (Beller Consult GmbH, 2004).

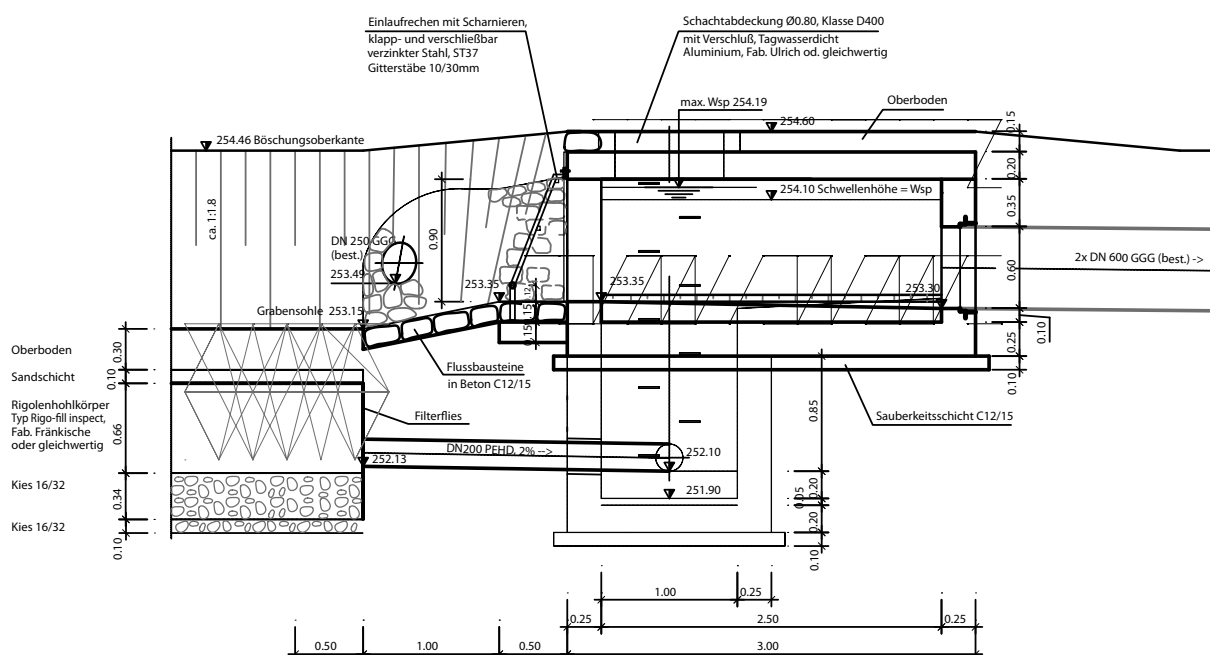


Abb. 21 Kombiniertes Ein- und Überlaufbauwerk (Beller Consult GmbH, 2004).

4.2 Charakterisierung der erfassten Niederschläge

Der gesamte Messzeitraum vom 6.7.2010–31.12.2012 umfasste 30 Monate, in denen mit 374 Niederschlagsereignissen fast alle in die Auswertung einbezogen wurden. Die gemessenen, mittleren Monatssummen im Vergleich zu langjährigen Mittelwerten (Abb.22) zeigen bereits, dass einige der erfassten Monate deutlich feuchter (August 2010, Dezember 2011, Juni 2012, September - Dezember 2012) aber auch deutlich trockener (Februar – Mai 2011, November 2011, Februar – März 2012) waren als im Durchschnitt.

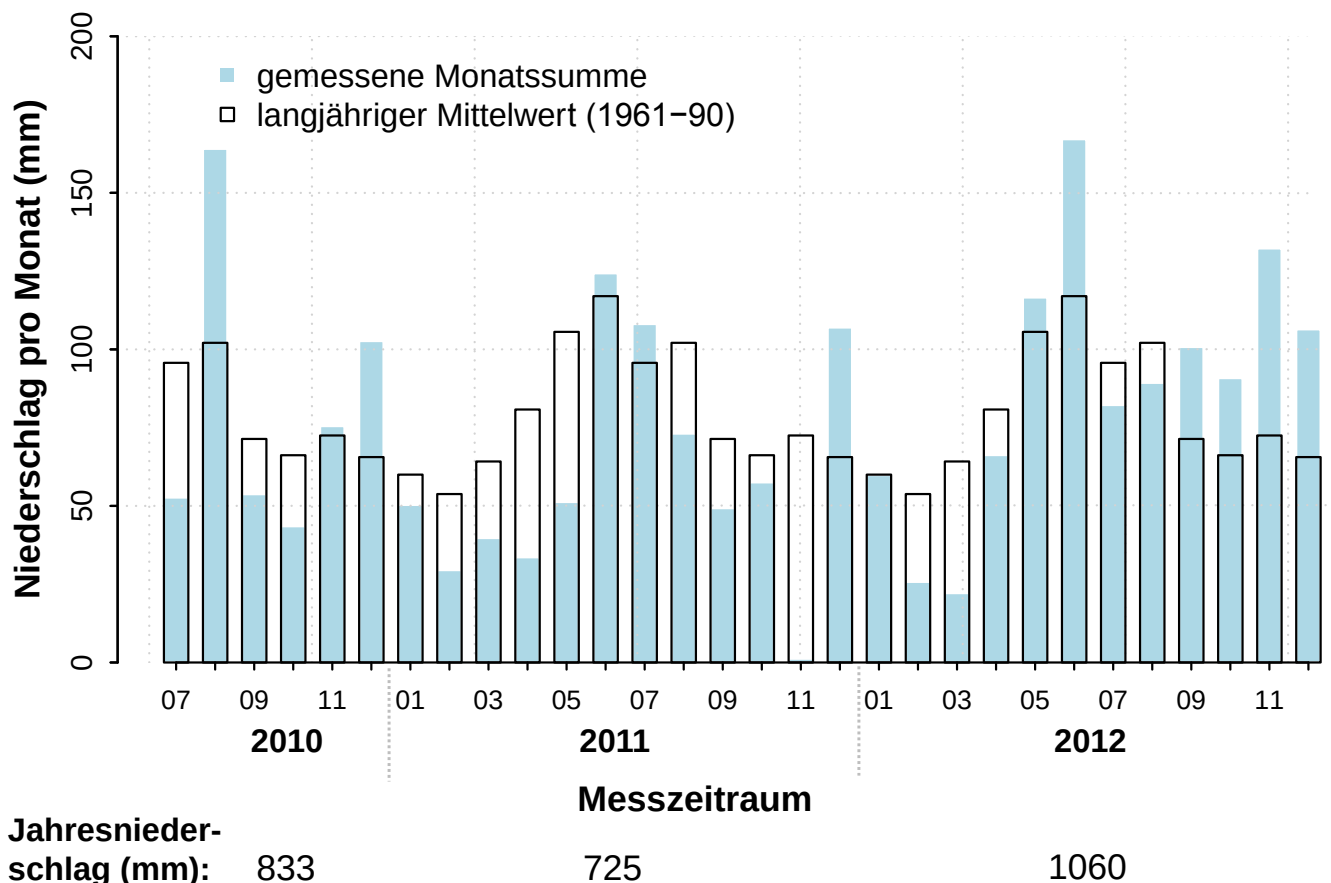


Abb. 22 Monatssummen und Jahressummen der Niederschläge im Untersuchungszeitraum im Vergleich zu langjährigen Mittelwerten (1961 - 90) der Station Freiburg-Mitte (no. 61596, Datenquelle: LUBW). Langjähriges Jahresmittel der Station Freiburg-Mitte: 933mm (1951 - 80, Datenquelle: Beller Consult GmbH, 1997), wie es für die Planung 1996 verwendet wurde.

Bei den Jahressummen (Abb.22) zeigt sich, dass 2010 und v.a. 2011 zwischen 11 - 22% weniger Niederschlag gefallen ist als im Vergleich zum langjährigen Mittel von 933mm, welches für die Planungsberechnungen 1996 verwendet wurde. Das Jahr 2012 hingegen war um ca. 14 % feuchter als der Durchschnitt.

Der Jahresverlauf der gemessenen Niederschlagsintensitäten [mm/min] zeigt, dass die höchsten Intensitäten v.a. in den Sommermonaten Juni – Anfang August 2011 und von Ende Mai – Juni 2012 auftraten (Abb.23).

Obwohl die Vergleichbarkeit zwischen gemessenen Niederschlägen und für die Planung verwendeten, 15-minütigen Bemessungsregen (Blockregen, Kap.3.3) äußerst schwierig herzustellen ist, wurde versucht anhand der berechneten maximalen mittleren Intensitäten für das 15 min-Glättungsintervall (Kap.3.2.2) eine Einordnung der gemessenen Niederschläge in statistische Wiederkehr-

intervalle zu ermöglichen (Abb.24). Ereignisse mit Intensitäten zwischen 0,25 und 1 Jahr Wiederkehrzeit wurden für die weitere Auswertung als „mittlere Intensitäten“ definiert, Ereignisse größer eins und zwei Jahren als „hohe Intensitäten“. Hohe Intensitäten weisen ausschließlich Ereignisse sehr kurzer Dauer auf, weshalb sie hier als Starkregenereignisse eingestuft werden. Hinsichtlich der Wirksamkeit der Muldenversickerung ist anzunehmen, dass sie eher Grenzfälle darstellen.

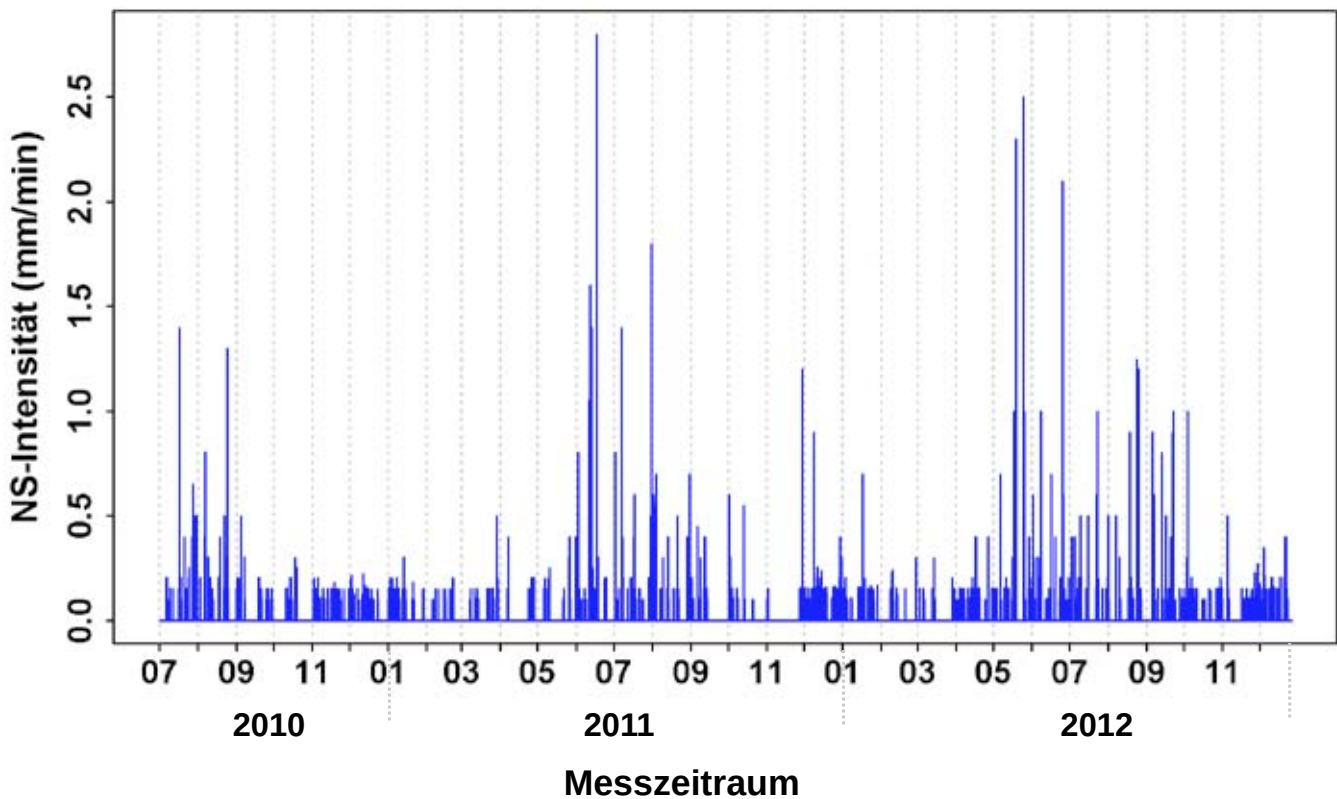


Abb. 23 Spektrum der gemessenen Niederschlagsintensitäten (mm/min) im Untersuchungszeitraum.

Für die generelle Funktionalität des Entwässerungskonzeptes sind insbesondere die häufig im Jahr auftretenden Niederschläge von Belang, deren Charakteristika aus den Häufigkeitsverteilungen in Abb.25 ablesbar sind. So wiesen 95% der erfassten Niederschläge eine Niederschlagshöhe von weniger als 21mm, eine Intensität von weniger als 20mm/h für das 15 min-Intervall und eine Dauer von weniger als 20,5 h auf.

Das Spektrum der erfassten Niederschlagshöhen zeigt Abb.30. Als Besonderheit traten insbesondere im Winter 2010/2011 und in abgeschwächter Form im Winter 2011/2012 Wechsel von längeren Perioden mit Temperaturen deutlich unter 0°C und wärmeren Perioden über 0°C auf, welche im Folgenden als „Frost“ bezeichnet werden (grünes Kreuz, Abb.24). Dadurch muss mit zusätzlichem Schmelzwassereintrag der akkumulierten Schneedecke gerechnet werden. Zusätzlich gefror das sich in den Mulden sammelnde Schmelz- oder Regenwasser und bildete über eine längere Zeit eine geschlossene Eisdecke, durch welche die Versickerungseigenschaften vermutlich stark eingeschränkt waren.

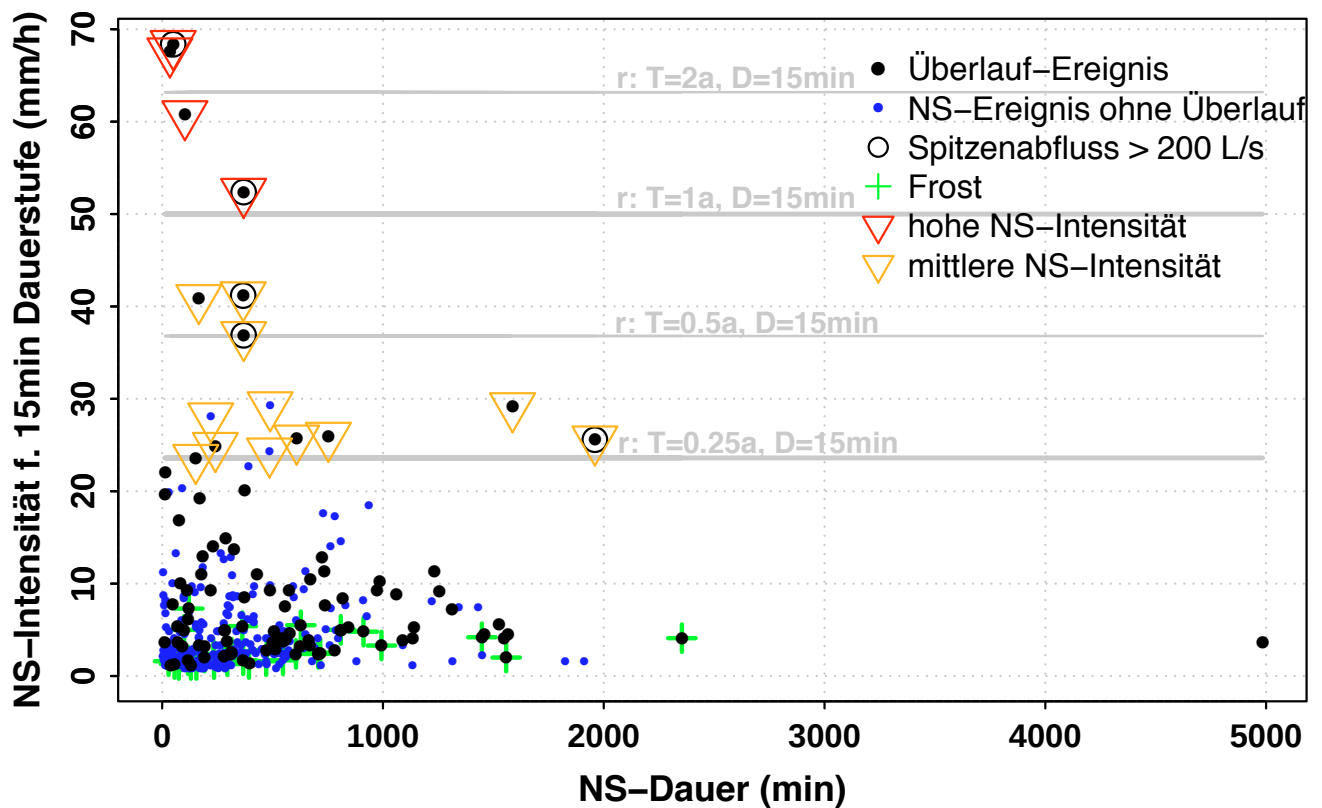


Abb. 24 Spektrum der erfassten Niederschlagsereignisse hinsichtlich Ereignisdauer (min) und Intensität (mm/h) für das 15min Glättungsintervall. Die Angaben der Wiederkehrzeiten T von 0.25 (bzw. 4 mal pro Jahr) bis 2 Jahren (bzw. 1 mal alle 2 Jahre) für eine Dauerstufe D von 15min entstammen einer extremwertstatistischen Auswertung der Station Freiburg-Mitte für die Monate Mai-September 1951-80, welche für die Planung 1996 verwendet wurde (Beller Consult GmbH, 1997). Zur besseren Übersichtlichkeit sind Niederschlagsereignisse, die komplett zurückgehalten wurden in blau dargestellt, während Ereignisse, die nur teilweise zurückgehalten wurden in schwarz abgebildet sind.

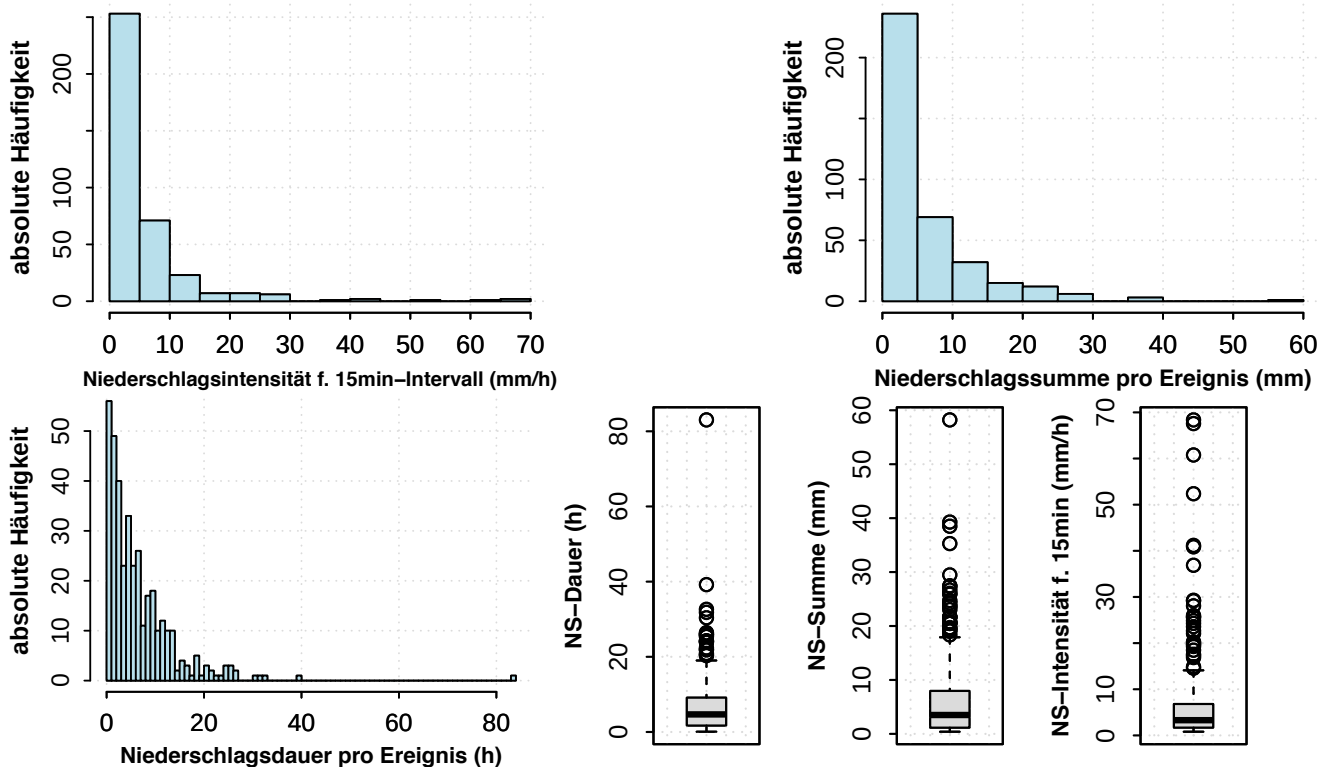


Abb. 25 Häufigkeitsverteilungen und Streuungs- und Lagemaße (Boxplots) der erfassten Niederschlagscharakteristika aller 374 Ereignisse im Untersuchungszeitraum.

4.3 Charakterisierung des Einstauverhaltens der Rigolen

Die gemessenen Wasserstände in 6 Rigolen (Abb.26) zeigen, dass diese im gesamten Untersuchungszeitraum in der Regel zumindest teilweise eingestaut waren. Das zeitweilig steile Abfallen der Wasserstandsganglinien nach dem Füllen der Rigole deutet auf eine prinzipiell gute Anbindung an den durchlässigen Untergrund hin. Die Tatsache, dass trotzdem in allen Rigolen nur selten eine vollständige Entleerung stattfand, ist auf erhöhte Grundwasserstände zurückzuführen. An einigen Standorten erfolgte häufig ein Einstau bis in die Oberbodenschicht hinein. Einige Standorte (915/6, 915/11) zeigen an, dass zeitweilig auch ein Einstau bis über die Muldensohle (grüne Linie) hinaus stattfand, wodurch es statt zu Versickerung, zu einem Wasseraustritt an der Muldensohle mit anschließender Ableitung kam (Juni 2012).

Eine Übersichtsdarstellung des mittleren Füllgrades aller untersuchten Rigolen (Abb.31 unten) zeigt, dass im Dezember 2010 - Januar 2011, Juni 2012 und Oktober - Dezember 2012 davon ausgegangen werden kann, dass zum Beginn von Niederschlagsereignissen das gesamte Rigolensystem bereits bis zu 100% gefüllt war und somit kein unterirdisches Retentionsvolumen zur Verfügung stand.

4.4 Vergleich der Planungsannahmen mit den Messungen

4.4.1 Vergleich von Planung und Ist-Zustand hinsichtlich von Randbedingungen

4.4.1.1 Geometrie und Aufbau der Mulden-Rigolen

Wie bereits in Kap.4.1 erläutert, erfolgten während der ca. achtjährigen Bauphase und auch noch nach Fertigstellung des Endausbaus Änderungen am Mulden-Rigolen-System. Dadurch verringerte sich das oberirdische Rückhaltevolumen der Mulden bei Volleinstau, d.h. bis zum Erreichen der maximalen Stauhöhe, von ursprünglich geplanten 286 m³ der Planung 1996 über 190 m³ während der Ausführungsplanung 2004 auf ein aktuell ermitteltes Volumen von 54 m³ (Tab. 7). Dies entspricht einer Verringerung auf 19% gegenüber der ursprünglichen Planung. Die Verringerung des Muldenvolumens nach Ende der Fertigstellung kann durch die Auffüllung einiger Mulden mit Kies und Boden, dem nachträglichen Austausch von Bodenmaterial und dem eventuellen Herabrutschen von Bodenmaterial durch zu steile Flanken oder Bespielung verursacht sein. Des Weiteren ist ein gewisser Eintrag von feineren Sedimenten mit dem eingeleiteten Oberflächenwasser denkbar, da die Einlaufschächte der Pflasterrinnen lediglich einen Schlammfang besitzen. Außerdem entwässern die Radwege parallel zu den Gräben über gepflasterte Vertiefungen direkt über die Grabenschulter. In der Nähe von Baumstandorten (v.a. östlicher Teil Nordgraben) könnte auch die rasche Zersetzung eingetragenen Laubs durch bodenbildende Prozesse zu einer Aufhöhung der Muldensohle geführt haben, welches momentan zweimal pro Jahr entfernt wird.

Die im Laufe der Bauzeit notwendig gewordene Verkleinerung einiger Muldenabschnitte sollte durch zusätzliches Rigolenvolumen und Überlaufbau-

werke im jeweils letzten Bauabschnitt kompensiert werden. Ein Vergleich des ursprünglich zu Grunde gelegten unterirdischen Retentionsvolumens der Rigolen von 206 m³ in der Planung 1996 mit dem aktuell ermittelten Volumen von 578 m³ (Tab.7) zeigt, dass die ursprüngliche Annahme fast verdreifacht

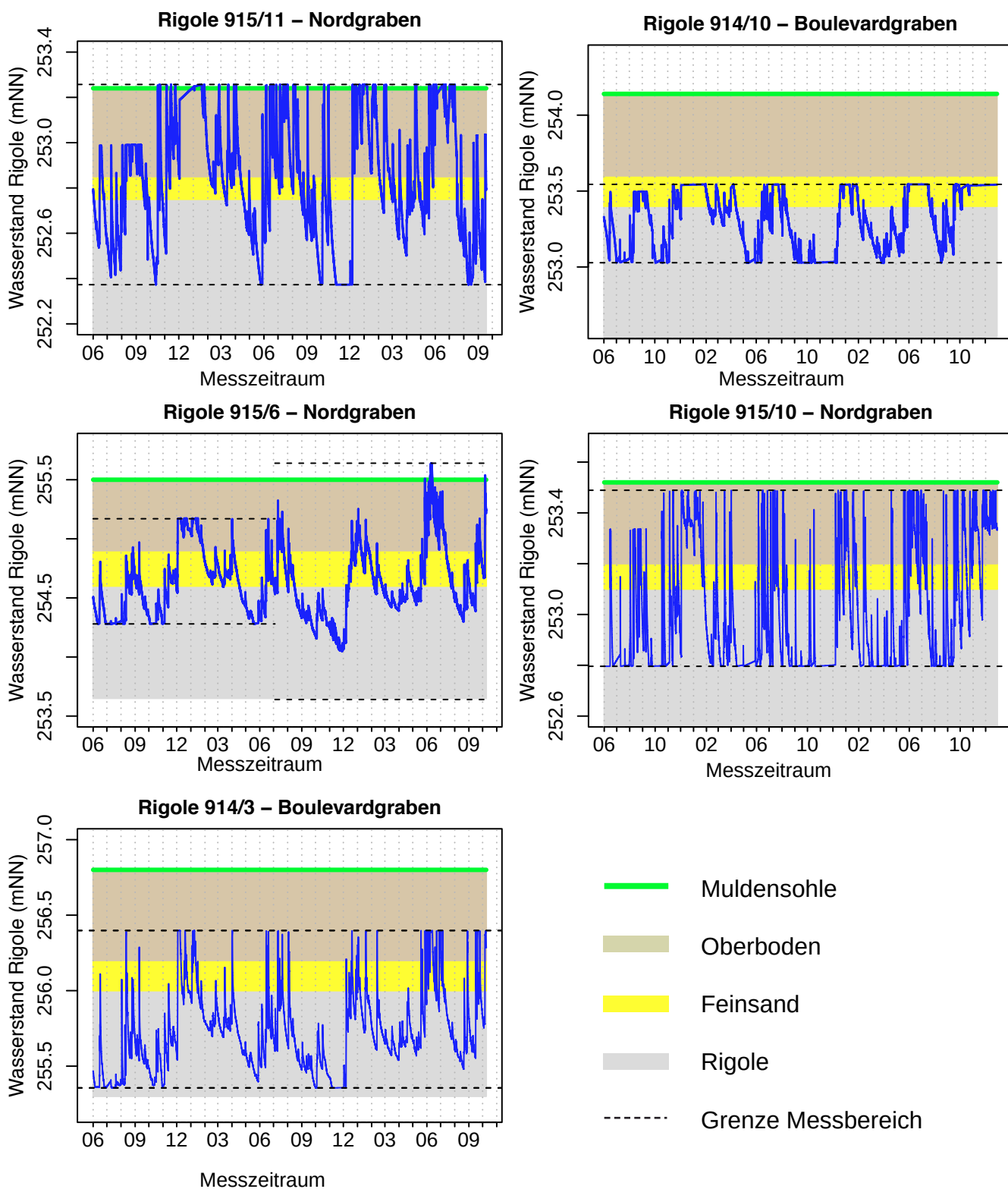


Abb. 26 Gemessene Rigolenwasserstände einzelner Standorte im Untersuchungszeitraum (in mNN) mit Markierung der jeweiligen Lage von Rigole (grau), Feinsand (gelb), Mutterboden (braun) und Muldensohle (grün). Bei untereinander verbundenen Rigolen sind die jeweils untersten des Systems abgebildet. Die schwarze Strichlinie markiert die Grenzen des jeweiligen Messbereichs der Wasserstandssonden.

Tab. 7 Mulden- und Rigolengeometrie für verschiedener Zustände.

Stand	Muldenvolumen (= oberirdisches Retentionsvolumen) m ³ bei Volleinstau (mm=bezogen auf A _{gesamt})	Rigolen-Porenvolumen (= unterirdisches Retentionsvolumen) m ³	Quelle
Entwurfsplanung 1996	286 (1,8mm)	206 (Raumvolumen: 823, S: 0,25, Rigolen: Kies) 45,8 (bei MHW-Einstau) (0,3mm)	Erläuterungsbericht - Entwurfs- und Genehmigungsplanung 1996 und Langzeitsimulation 1997
Ausführungsplanung 2004	190 (1,1mm)	512 (Raumvolumen: 827, S: 0,35 / 0,96 / 1, im Mittel: 0,62; Rigolen: Kies, RigoFill, SickuPipes)	Erläuterungsbericht - Aktualisierte Entwurfsplanung 2003/2004
IST-Zustand 2011	54 (0,4mm)	578 (3,8mm) (Raumvolumen: 986, S: 0,35 / 0,95 / 1, im Mittel: 0,59 Rigolen: Kies, RigoFill, SickuPipes)	Ausführungsplanung 2003/2003 + Aufmaßprotokolle + Vermessung

wurde. Dies resultiert größtenteils aus der großräumigen Verwendung von Hohlkörperrigolen mit einem Speicherkoeffizienten von 0,95 im Gegensatz zur ursprünglichen Planung mit Kiesrigolen mit angenommenem Speicherkoeffizienten von 0,25. Der aktuelle mittlere Speicherkoeffizient des Rigolensystems beträgt ca. 0,6.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das unterirdische Rückhaltevolumen deutlich größer gebaut wurde als ursprünglich geplant (Faktor 3), während das oberirdische Rückhaltevolumen, welches v.a. für die schnelle Zwischenspeicherung von Niederschlägen und das maximal versickerbare Volumen von Bedeutung ist, im Vergleich zur Planung deutlich geringer ausfällt (Faktor 0,2).

4.4.1.2 Flächenzusammensetzung und –parametrisierung

In allen Planungsberechnungen zur Hydrologie/Hydraulik oder Gesamtbilanz des Mulden-Rigolen-Systems werden die im Einzugsgebiet vorhandenen oder geplanten Flächen zunächst über Abflussbeiwerte (Spitzenabflussbeiwerte) und Anfangsverluste (Mulden- und Benetzungsverluste) parametrisiert, woraus sich die 100% abflusswirksame Fläche (A_{red}) und ein flächengewichteter Gesamtabflussbeiwert (ψ_{ges}) ergeben. Je nach angesetzter Niederschlagsbelastung (Blockregen, Jahressumme, Langzeitreihe) berechnet sich daraus der zum Abfluss kommende Niederschlag als Eingangsgröße für das Versickerungs- und Ableitsystem. Eine generelle Unsicherheit resultiert dabei aus den für die Flächenparametrisierung gewählten Zahlenwerten und dem gewählten Differenzierungsgrad der Flächenbeschaffenheit. Bei Neuerschließungen besteht zusätzlich die Unsicherheit der tatsächlichen zukünftigen Bebauung. Die Neuerschließung von Gebieten wird durch den Bebauungsplan geregelt. Je nachdem wie konkret die darin enthaltenen Vorgaben zu Gebäude- und Flächengestaltung sind, können die tatsächliche Umsetzung von Bebauungen und die Art der Flächenbefestigung insbesondere auf privaten Liegenschaften sehr variable Größen sein. Demzufolge sind für die Parametrisierung und Ausdehnung einzelner Flächen in der Planungsphase meist nur vereinfachte Annahmen oder Schätzungen möglich. Andererseits hat sich gezeigt, dass Abflussberechnungen sehr sensitiv auf die Änderung von Abflussbeiwerten und Flächen reagieren. Dies zeigt die hohe praktische Relevanz der zu Grunde liegenden Flächenannahmen. Um einen Vergleich für das Untersuchungsgebiet herzustellen, wurden die für die Planungsberechnungen (Vordimensionierung 1996, Langzeitsimulation 1997) jeweils verwendeten Flächenannahmen

recherchiert sowie die aktuell vorhandene Flächenzusammensetzung (Stand 2011) ermittelt und mit sehr hohem Differenzierungsgrad klassifiziert.

Vordimensionierung 1996

Für die Vordimensionierung des Mulden-Rigolen-Systems in der Entwurfs- und Genehmigungsplanung 1996 erfolgte zunächst eine Differenzierung in die in Tab.8 genannten Flächenklassen, welche anschließend zu Teil-Einzugsgebieten (EZG) für einzelne Muldenabschnitte zusammengefasst wurden (Tab.9).

Tab.8 Rekonstruierte Abflussbeiwerte einzelner Flächen zur hydraulischen Berechnung von Rinnen und Gräben bei der Vordimensionierung 1996 (mdl. Auskunft, 26.5.2013)	
Flächennutzung und -beschaffenheit	Spitzen-Abflussbeiwert
Straße	0,9 - 1,0
Gepflasterte Rinnen	0,95
Straßenseitige Grundstücksfläche (Vorgärten, Vorzonen inkl. Zuwegung, Terrassen)	< 0,5
Straßenabgewandte Grundstücksfläche	< 0,5
Häuser	0,9
Grünspangen	0,1 – 0,15
Rasenfugenpflaster Stellplätze	0,5
Betonplatten Fußwege	0,8 – 0,9

Laut mündlicher Auskunft an der Planung Beteiligten wurde die zukünftige Lage, Ausdehnung und Beschaffenheit von Straßen, Rinnen, öffentlichen Grünflächen (Grünspangen) und Fußwegen aus Festlegungen im damaligen Bebauungsplan entnommen. Während die zukünftige Gestaltung mit durchlässiger Flächenbefestigung für öffentliche Stellplätze (Rasenfugenpflaster) und Fußwege (Betonplatten) bereits festgelegt war und somit berücksichtigt werden konnte, war die Ausdehnung und Gestaltung der öffentlichen Plätze mit der heute vorhandenen Pflasterung (Paula-Modersohn Platz, Alfred-Döblin Platz) damals noch unklar. Für die private Grundstücksbebauung lieferte der Bebauungsplan lediglich eine Parzellierung mit Unterscheidung in mehrgeschossige Wohnungen und Einzelhäuser, sodass mit Flächenzusammensetzungen von Mustergrundstücken gearbeitet wurde. Gründächer waren zwar für Flachdächer < 10° Neigung bereits im Bebauungsplan vorgeschrieben, allerdings

Tab.9 Zur hydraulischen Berechnung von Spitzenabflüssen bei der Vordimensionierung verwendete Teil-EZG und Abflussbeiwerte (Beller Consult 1996).			
Mulden-Teil-EZG und Grabenstrang	Gesamtfläche (ha)	Mittlerer Spitzenabflussbeiwert	Bemerkung
EZG 1 - Boulevard	0,18	0,32	Grünfläche + Mulden
EZG 2 - Boulevard	0,26	0,39	Radweg + Mulden
EZG 3 - Boulevard	0,22	0,42	Radweg + Mulden
EZG 4 - Boulevard	0,13	0,63	Radweg
EZG 5 - Boulevard	0,24	0,45	Radweg + Mulden
EZG 6 - Boulevard	0,19	0,45	Radweg + Mulden
EZG 7 - Boulevard	0,09	0,45	Radweg + Mulden
EZG 8 - Nord	0,11	0,35	Radweg + Mulde
EZG 9 - Boulevard	0,25	0,2	Grünfläche + Radweg
EZG 10 - Boulevard	7,45	0,38	Wohnanger südlich Vaubanallee inkl. Gründspangen
EZG 11 - Nord	6,97	0,46	Wohnanger nördlich Vaubanallee inkl. Gründspangen

existierten noch keine Hinweise, wo und in welchem Umfang diese umgesetzt werden würden, sodass sie nicht berücksichtigt werden konnten. Für die zu Teil-Einzugsgebieten zusammengefassten Flächen wurden die in Tab.9 dargestellten flächengewichtete Abflussbeiwerte verwendet.

Die später im Laufe der Bauzeit erfolgten Neuberechnungen der Hydraulik des Grabensystems greifen auf diese Werte (Tab.9) zurück, fassen jedoch andere Teil-Einzugsgebiete zusammen.

Langzeitsimulation 1997

Für den rechnerischen Nachweis des Mulden-Rigolen-Systems mittels Langzeitsimulation wurden 1997 die Flächenannahmen in Tab.10 verwendet. Entsprechend der Anzahl an Teilmulden wurden 30 Teil-Einzugsgebiete unterschieden.

Tab.10 Flächen und –parametrisierung der Langzeitsimulation MURISIM 1997 (NS: Station Freiburg 1.1.1971 – 31.12.1980, Auflösung: 5min, Verdunstung: 657 mm/a, Mutterboden: 0,5m mit kf: $5 \cdot 10^{-6}$ und 10^{-5} m/s, Rigolen: 25% Porenvolumen, kf Untergrund: 10^{-6} m/s bei Lehm, $5 \cdot 10^{-5}$ m/s bei Kiesen).

	Gebäudeflächen	abflusswirksame Grünflächen	Private Zufahrten	Verkehrsflächen
Flächenanteil (ha):	5,7	5,9	1,5	1,6
Gewählter Parametersatz in MURISIM:	geneigte Dachflächen	flache Dachflächen (jedoch wie Grünfläche parametrisiert)	Hof- und Wegeflächen	Strassenflächen
Benetzungshöhe (mm):	0,2	2	0,7	0,5
Muldenverlust (mm):	0	5	1,8	1,8
Anfangs-Abflussbeiwert:	0,9	0	0	0
End-Abflussbeiwert:	0,9	0,2	0,4	0,95

Ist-Zustand 2011

Um der unterschiedlichen Abflusswirksamkeit der aktuell vorhandenen Flächen Rechnung zu tragen, wurden 53 Flächenklassen unterschieden (Tab.13, Abb.25) und jeweils separat unter Verwendung von Literaturwerten parametrisiert. Dabei wurden insbesondere verschiedene Dachaufbauten und Pflasterungen berücksichtigt.

Unter Zusammenfassung der 53 Flächenklassen zu Gruppen ergibt sich die in Tab.11 dargestellte momentane Flächennutzung.

Tab.11 Aktuelle Flächennutzung im Untersuchungsgebiet

Flächennutzung	Anteil von Gesamtfläche
Konventionelle Dächer (inkl. Fahrradschuppen und Carports), Balkone ohne Begrünung	13,4 %
Begrünte Dächer (inkl. Fahrradschuppen und Carports), Balkone mit Pflanzen	13,1 %
Kiesdächer	1,4 %
Asphalтиerte Straßen, Wege, Parkplätze, Undurchlässig befestigte Terrassen, Entwässerungsrinnen	11,8 %
Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, private Grundstücksflächen mit durchlässiger Pflasterung oder Forstmischung, Gleisbett Stadtbahn	15,9 %
Öffentliche und private Grünflächen	35 %
bepflanzte Vorgärten, Beete, bepflanzte Baumscheiben und Trennbeete zwischen Parkplätzen	9,5 %



Abb. 27 Einige Beispiele für die Klassifizierung der im Gebiet vorhandenen Flächen nach Abflusswirksamkeit und Speichereigenschaften. Übersicht und Codierung siehe Tab. 13 und Tab. 14.

Zum Zeitpunkt der Kartierung Mitte Mai 2011 waren einige letzte Baugrundstücke noch unbebaut, jedoch teilweise als Brachfläche bereits an das Trennsystem angeschlossen. Straßenabgewandte Balkone, Terrassen zu Innenhöfen und zu Grasflächen, sowie die Grünspangen südlich der Vaubanallee, welche zwar innerhalb des Trennsystems liegen, entsprechend der aktuellen Situation jedoch frei über die Straßeneinläufe in den Mischwasserkanal entwässern, wurden als nicht abflusswirksame Flächen betrachtet. Um diese abgekoppelten Flächen wurde die Gesamtfläche reduziert und für weitere Berechnungen verwendet (Tab. 12).

Tab. 12 Vergleich von Flächenannahmen der Planung und Ist-Zustand 2011.

Stand	Gesamtfläche Trennsystem und angekoppelte Fläche A_{gesamt} in ha	100% abflusswirksame Fläche A_{red} (ha)	Gesamtabflussbeiwert ψ_{ges}	Quelle
Vordimensionierung 1996	16,09 (16,09 angekoppelt)	6,72	0,42 (bezogen auf Spitzenabflussbeiwerte)	Entwurfs- und Genehmigungsplanung 1996 (Beller Consult GmbH, 1996)
Langzeitsimulation 1997	- (14,67 angekoppelt)	8,4	0,57 (bezogen auf Endabflussbeiwerte)	Nachtrag Entwurfs- und Genehmigungsplanung 1997 (Beller Consult GmbH, 1997)
Ist-Zustand 2011	17,3 (15,34 angekoppelt)	7,2	0,47 (bezogen auf Endabflussbeiwerte)	Eigene Kartierung und Parametrisierung

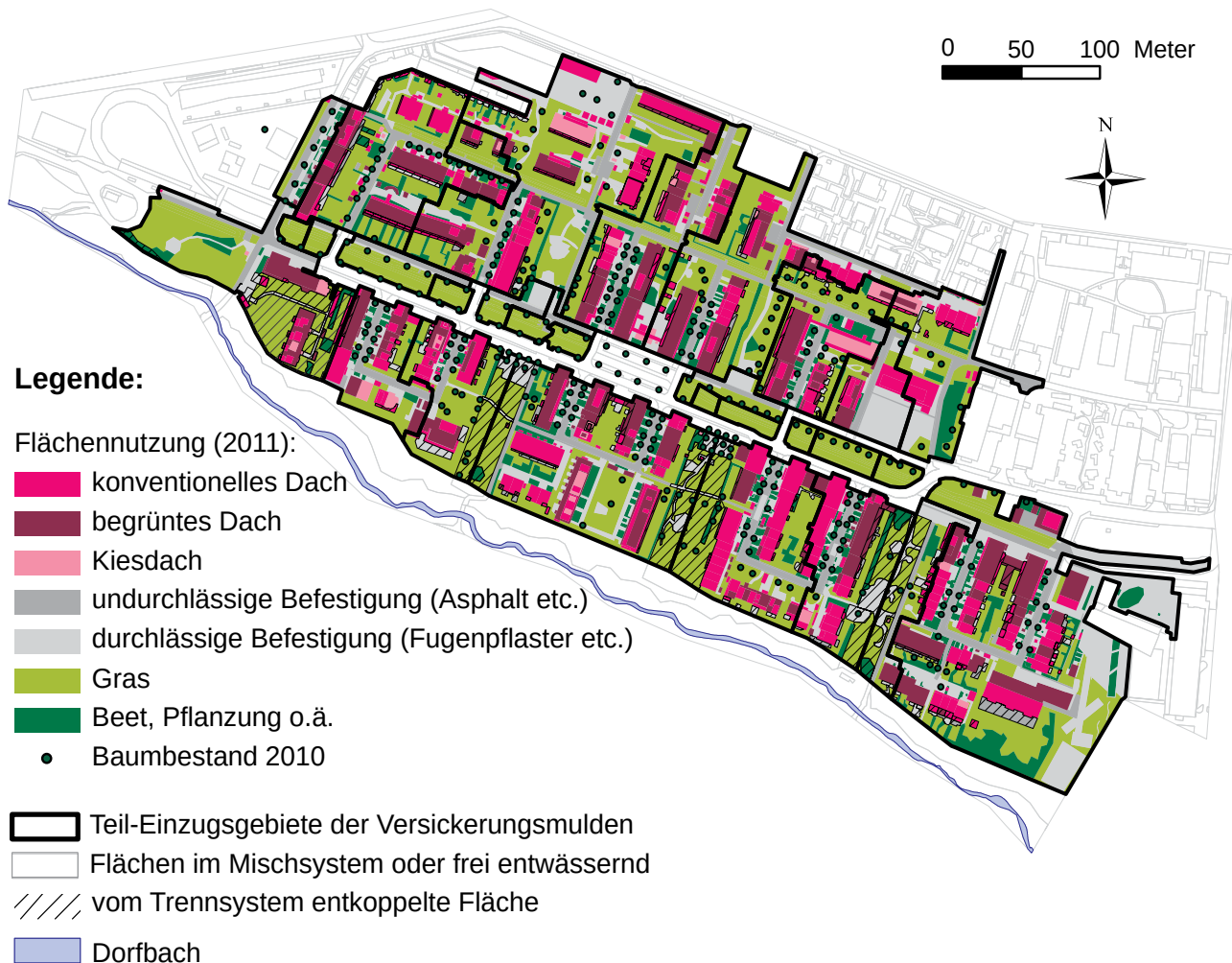


Abb. 28 Aktueller Stand der Flächenzusammensetzung (Mai 2011): Schematische Darstellung der im Trennsystem entwässerten Flächen im Stadtteil Vauban mit Unterscheidung nach Flächentyp und Oberflächenmaterial entsprechend Codierung Tab.13, Tab.14 und Gruppierung nach Tab.12.

Eine zusammenfassende Betrachtung zwischen Planung und Ist-Zustand (Tab.12) zeigt, dass sich die gesamte, im Trennsystem liegende Fläche zwischen 1996 und 2011 zwar um ca. 1 ha vergrößert hat, sich die tatsächlich angekoppelte Fläche im Vergleich zur Planung jedoch kaum verändert hat.

Die aktuell ermittelten Flächenangaben (Tab.14) sind im Vergleich zur üblichen ingenieurtechnischen Planung räumlich deutlich aufgelöster und auch hinsichtlich der hydrologischen Klassifikation wesentlich detaillierter, was in der Praxis nur in einem flächendifferenzierten Modell umsetzbar wäre. Bei Zusammenfassung der aktuellen Flächendifferenzierung zu einem flächengewichteten Gesamtabflussbeiwert ψ_{ges} und abflusswirksamer Fläche A_{red} (Tab.12) zeigt sich, dass diese aktuell (2011) weitgehend denen aus der ursprünglichen Planung von 1996 entsprechen. Dies lässt den Schluss zu, dass die Vergleichbarkeit zwischen Zielgrößen der Planung und aktuellen Messwerten hinsichtlich der zu Grunde liegenden Flächenannahmen als Randbedingung gegeben ist.

Tab. 13 Projektspezifische Flächenklassifizierung und Codierungsschlüssel für den im Trennsystem entwässerten Teil des Stadtteils Vauban unter besonderer Berücksichtigung der Abfluss- und Speichereigenschaften.

Flächentyp („Typ“)	Typ	Flächenausprägung („Art“)	Art
Dächer (Codierung Klasse = 1)			
Flachdach, Dachterrasse (d.h. keine augenscheinliche Neigung, Dachterrassen meist an Regenrinne angeschlossen)	1	Blech, Wellblech, Metall	1
Pulldach	2	Dachziegel, Schiefer	2
Sattel-oder Walmdach	3	Eternit	3
Fahrradschuppen, Carport o.ä. (d.h. nur geringe Höhe vom Boden)	4	Kies	4
Balkon, Veranda (am Haus hängend; meist von Rinnen abgekoppelt)	5	Dachpappe	5
		Glas, Kunststoff	6
		Extensiv begrünt (<8.5cm)	7
		Intensiv begrünt bzw. Dachterrasse mit Pflanzkübeln (>8.5cm Substrat)	8
		Terrassenplatten	9
Befestigte Fläche (Codierung Klasse = 2)			
Straße, Radweg	1	Asphalt	1
Zuwegung (inkl. Zufahrten)	2	Rasenfugenpflaster (ca. 30mm Rasenfuge)	2
Platz, Bordstein mit Fußweg	3	Pflastersteine grau (Betonpflaster, mittelgroß, ca. 2mm Fuge)	3
Hof, ebenerdige Terrasse	4	Pflastersteine bunt (Betonpflaster, mittelgroß, ca. 4mm Fuge)	4
offene Entwässerungsrinne	5	Pflastersteine gelb (Betonpflaster, mittelgroß, ca. 3 mm Fuge)	5
Parkplatz	6	Natursteinpflaster Granit (Granitpflaster mit offener Fuge, Kleinstein)	6
		Terrassenplatten (Kunststeinplatten ohne Fuge)	7
Unbefestigte Fläche (Codierung Klasse = 3)			
Vorgarten (gen Straße)	1	Rasen	1
Hof, Platz, Bolzplatz, Weg	2	Forstmischung (Splitt, Sand o.ä. loses Material)	2
Grünfläche	3	Bepflanzung, Beet (Sträucher, kleine Bäume, Blumen)	3
Gleisbett Stadtbahn	4	Mischform mit morpholog. Vertiefungen (nur öffentl. Grünspangen)	4
Offenes Baugelände	5		
Versickerungsmulde - Sohle	6		
Versickerungsmulde - Flanke	7		

Tab. 14 Codierung und Beschreibung der verwendeten Flächenklassen sowie Flächenanteile an der gesamten, ans Trennsystem angeschlossenen Fläche (Stand: Mai 2011)

Codierung	Beschreibung Flächenklasse	Flächen- gruppe	Anteil an gesamter, angekoppelter Fläche (%)
Dachflächen			
111	Flachdach, Dachterrasse/ Metall	undurchlässig	0,84
113	Flachdach, Dachterrasse/ Eternit (=Faserzement)	undurchlässig	0,03
114	Flachdach, Dachterrasse/ Kies	undurchlässig	1,23
115	Flachdach, Dachterrasse/ Dachpappe	undurchlässig	0,69
116	Flachdach, Dachterrasse/ Glas,Kunststoff	undurchlässig	0,05
117	Flachdach, Dachterrasse/ extensiv begrünt (=humusiert <10cm Aufbau, hier: 5cm)	undurchlässig	8,99
118	Flachdach, Dachterrasse/ intensiv begrünt (=humusiert >=10cm Aufbau, hier: 15cm), Kübelpflanzen	undurchlässig	0,28
119	Flachdach, Dachterrasse/ Terrassenplatten (Kunstplatten mit Fugenverguß)	undurchlässig	3,73
121	Pulldach/ Blech	undurchlässig	2,81
122	Pulldach/ Dachziegel (Schiefer)	undurchlässig	1,20
123	Pulldach/ Eternit	undurchlässig	0,15
124	Pulldach/ Kies	undurchlässig	0,08
125	Pulldach/ Dachpappe	undurchlässig	0,95
126	Pulldach/ Glas,Kunststoff	undurchlässig	0,55
127	Pulldach/ extensiv begrünt (=humusiert <10cm Aufbau, hier: 5cm)	undurchlässig	3,08
131	Walmdach/Blech	undurchlässig	0,05
132	Walmdach/Dachziegel	undurchlässig	1,20
141	Schuppen/Blech (analog Flachdach)	undurchlässig	0,46
142	Schuppen/ Ziegel (analog Flachdach)	undurchlässig	0,00
144	Schuppen/ Kies (analog Flachdach)	undurchlässig	0,05
145	Schuppen/ Dachpappe (analog Flachdach)	undurchlässig	0,21
146	Schuppen/ Glas,Kunststoff (analog Flachdach)	undurchlässig	0,18
147	Schuppen/ extensiv begrünt (=humusiert <10cm Aufbau, hier: 5cm)	undurchlässig	0,44
156	Balkon,Veranda/Glas, Kunststoff	undurchlässig	0,00
158	Balkon,Veranda/intensiv begrünt (=humusiert >=10cm Aufbau, hier: 15cm), Kübelpflanzen	undurchlässig	0,32
159	Balkon,Veranda/Terrassenplatten (analog Flachdach) (Kunstplatten mit Fugenverguß)	undurchlässig	0,29
Befestigte Flächen			
211	Straße,Radweg/Asphalt	undurchlässig	8,99
216	Straße,Radweg/Natursteinpflaster Granit (mit offenen Fugen) auf bindigem Untergrund	durchlässig	0,77
221	Zuwegung/Asphalt	undurchlässig	0,12
223	Zuwegung/Betonpflaster grau, mittlere Größe, mit offener, begrünbarer Fuge (ca.0,5cm), auf bindigem Untergrund	durchlässig	0,49
226	Zuwegung/Natursteinpflaster Granit mit offener, begrünbarer Fuge (ca. 1cm), auf bindigem Untergrund	durchlässig	4,59
233	Platz, Bordstein m. Fußweg/Betonpflaster grau, mit offener, begrünbarer Fuge (ca.0,5cm), auf bindigem Untergrund	durchlässig	1,19
234	Platz, Bordstein m. Fußweg/Betonpflaster bunt, mittlere Größe, mit offener Fuge (ca. 0,4cm), auf bindigem Untergrund	durchlässig	1,79
235	Platz, Bordstein m. Fußweg/Betonpflaster gelb, mittlere Größe, mit offener Fuge (ca. 0,3mm), auf bindigem Untergrund	durchlässig	0,92
236	Platz, Bordstein m. Fußweg/Natursteinpflaster Granit mit offener, begrünbarer Fuge (ca. 1cm), auf bindigem Untergrund	durchlässig	0,05
241	Hof, ebenerdige Terrasse/Asphalt	undurchlässig	0,05
245	Hof, ebenerdige Terrasse/Betonpflaster gelb, mittlere Größe, mit offener Fuge (ca. 0,3mm), auf bindigem Untergrund	durchlässig	0,02
246	Hof, ebenerdige Terrasse/Natursteinpflaster Granit mit offener, begrünbarer Fuge (ca. 1cm), auf bindigem Untergrund	durchlässig	0,34
247	Hof, ebenerdige Terrasse/Terrassenplatten (Kunstplatten mit Fugenverguß)	undurchlässig	0,38
256	offene Entwässerungsrinne/Natursteinpflaster Granit im Mörtelbett, geneigt, auf bindigem Untergrund	undurchlässig	2,30
262	Parkplatz/Rasenfugenpflaster mit ca. 3,5cm Rasenfuge, auf bindigem Untergrund	durchlässig	0,19

Unbefestigte Flächen			
311	Vorgarten/Rasen auf natürl. Untergrund	durchlässig	0,11
312	Vorgarten/Forstmischung, locker, auf natürl. Untergrund (wie Schotterrasen)	durchlässig	0,02
313	Vorgarten/Bepflanzung, Beet auf natürl. Untergrund	durchlässig	4,23
322	Hof, Platz, Bolzplatz, Weg/Forstmischung, fest, auf natürl. Untergrund (wie Kiesbelag fest)	durchlässig	4,06
331	Grünfläche/Rasen auf natürl. Untergrund	durchlässig	28,20
333	Grünfläche/Bepflanzung, Beet auf natürl. Untergrund	durchlässig	5,22
334	Grünfläche/Mischform mit Vertiefungen (Grünspangen) auf natürl. Untergrund	durchlässig	2,01
341	Gleisbett Stadtbahn/Rasenplatte auf Schottertragschicht	durchlässig	1,75
342	Gleisbett Stadtbahn/Forstmischung auf Schottertragschicht	durchlässig	0,40
352	Offenes Baugelände/natürl. Untergrund	durchlässig	1,04
361	Versickerungsmulde Sohle/Rasen auf Mulden-Oberboden	durchlässig	0,67
371	Versickerungsmulde Flanke/Rasen auf Mulden-Oberboden	durchlässig	2,24

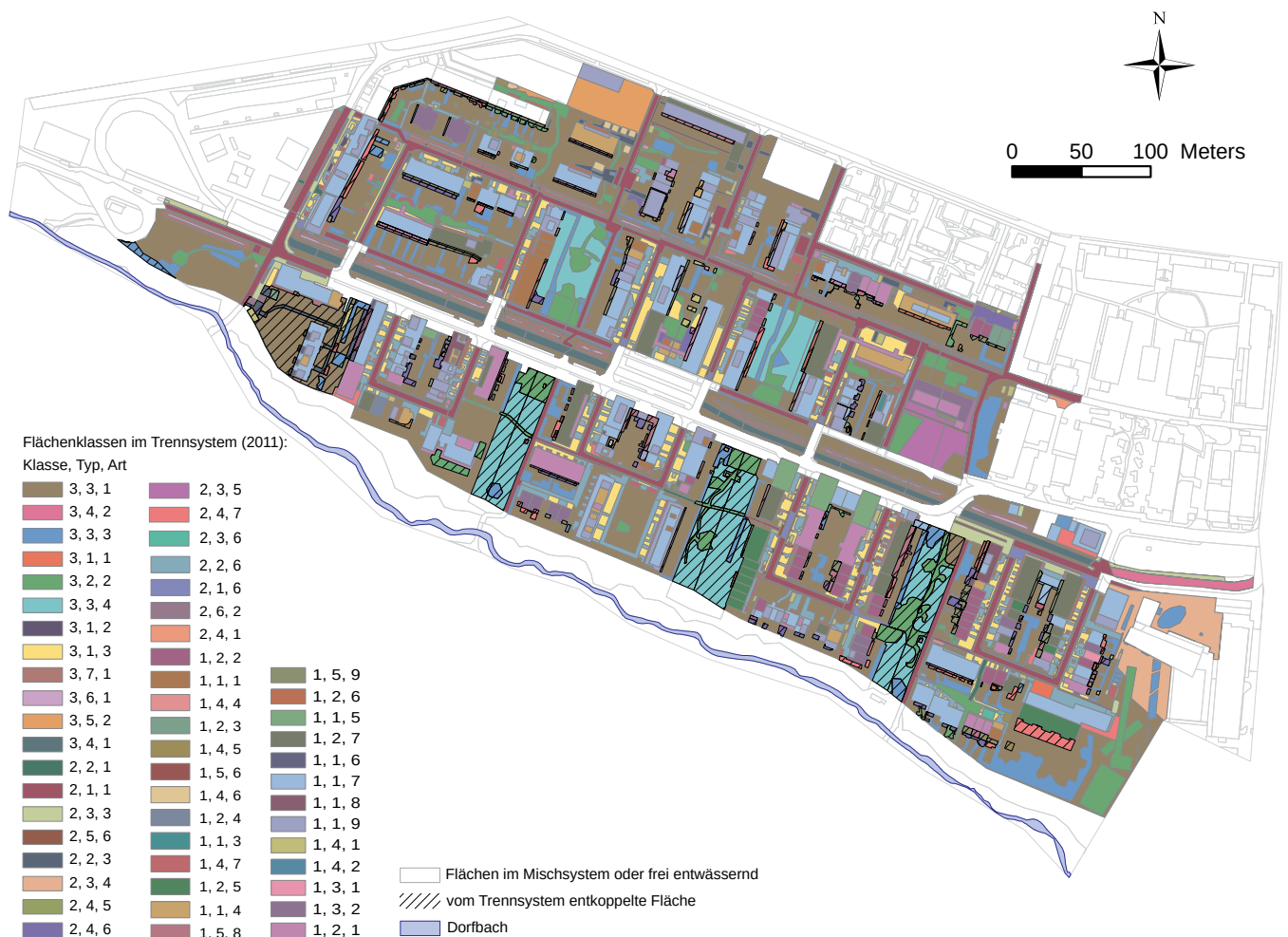


Abb. 29 Lage der verwendeten Flächenklassen im Untersuchungsgebiet (Stand: Mai 2011).

4.4.2 Vergleich von Planung und Ist-Zustand hinsichtlich der Funktionalität

Im Folgenden werden die bei der Planung 1996/1997 in Form quantitativer Zielgrößen oder qualitativer Aussagen getroffenen Annahmen zur Funktionalität des Entwässerungskonzeptes (siehe Kap.3.3) mit den Ergebnissen von 30 Monaten Messungen verglichen. Dies ermöglicht zum Einen eine Erfolgskontrolle, wobei hier davon ausgegangen wird, dass sich zwar Randbedingungen erheblich geändert haben (Kap.4.4.1), die funktionellen Zielgrößen dabei jedoch gleich geblieben sind. Zum Anderen wird eine experimentelle Datengrundlage zur Größenordnung und Variabilität von planungsrelevanten Größen geschaffen, die es in Zukunft ermöglicht, für vergleichbare Gebiete mit ähnlicher Komplexität Zielgrößen realistischer einschätzen zu können.

4.4.2.1 Gebietsrückhalt

Der Gebietsrückhalt beschreibt den Niederschlagsanteil, welcher durch die Gesamtheit aller dezentralen Regenwasserbewirtschaftungs-Maßnahmen und des Mulden-Rigolen-Systems im Gebiet zurückgehalten wird und somit nicht in den Vorfluter gelangt (siehe Kap.3.3.2). Die dadurch bewirkte Redu-

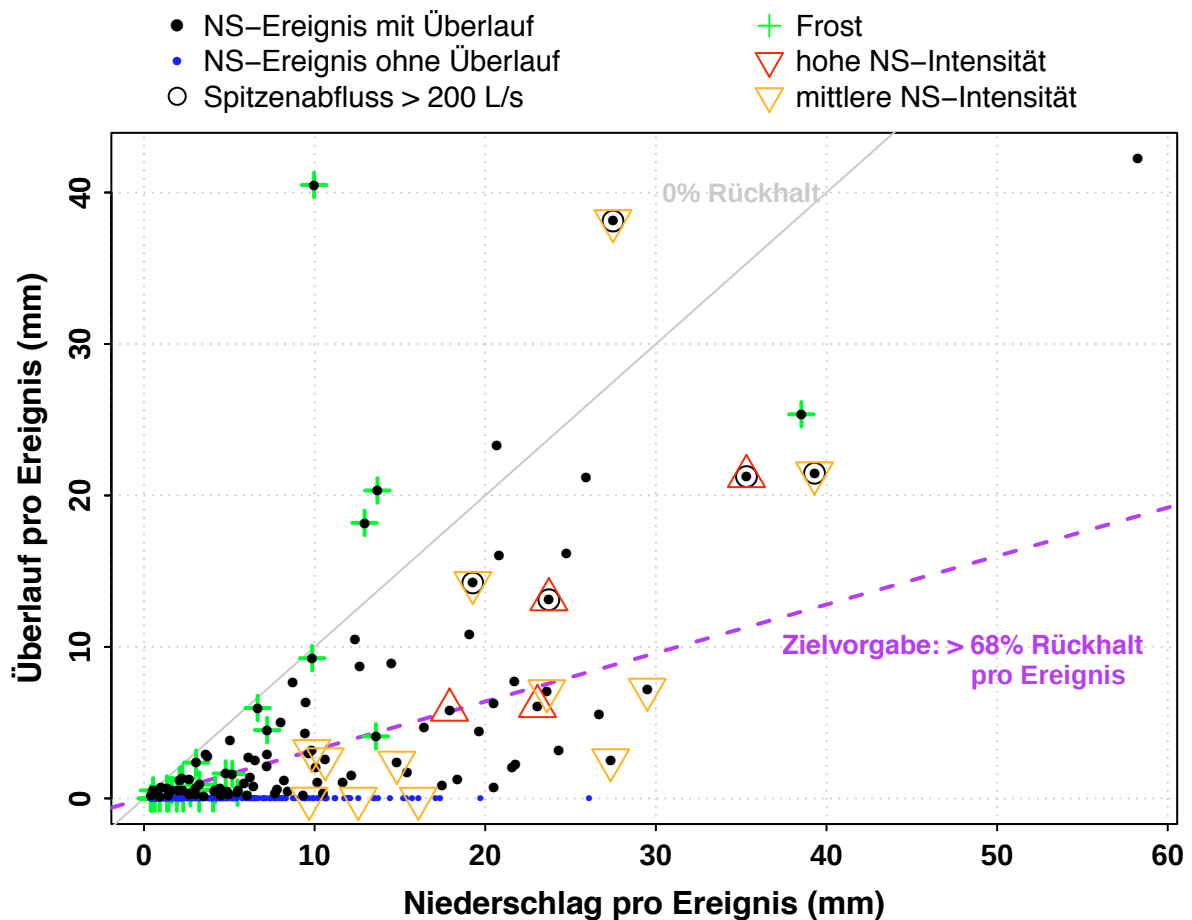


Abb.30 Spektrum der gemessenen Niederschlagshöhen (Regen und Schnee) und entsprechenden Überlaufvolumina (gleichbedeutend mit Abfluss) in den Vorfluter für alle auswertbaren Ereignisse im Messzeitraum (6.7.2010 – 31.12.2012). Die violette Linie markiert die Grenzlinie für einen Rückhalt entsprechend der Zielvorgabe der Planung von mindestens 68% Rückhalt pro Ereignis, sodass Ereignisse unter der Linie die Vorgaben erfüllen. Zur besseren Übersichtlichkeit sind Niederschlagsereignisse, die komplett zurückgehalten wurden, in blau dargestellt, während Ereignisse, die nur teilweise zurückgehalten wurden in schwarz abgebildet sind.

zierung des Abflussvolumens bzw. des Einleitvolumens in den Vorfluter war der wichtigste Aspekt, weshalb man sich bei der Planung für ein System aus Mulden-Rigolen entschieden hatte und nicht für ein konventionelles Trennsystem mit Ableitung. Die Auswertung erfolgte ereignisbezogen und als Jahressummen.

In 30 Monaten Untersuchungszeitraum wurden 374 Niederschlagsereignisse erfasst, die für eine Auswertung des Gebietsrückhaltes verwendet werden konnten. Das gesamte Spektrum der erfassten Niederschläge zeigen Abb.30 und Abb.24, wovon 73% der Ereignisse (274) komplett im Gebiet zurückgehalten wurden (blaue Punkte). Stark vereinfacht entspricht dies einer mittleren Überlaufhäufigkeit von ca. dreimal pro Monat bzw. 40 pro Jahr. Von den 27%, welche Abfluss zum Vorfluter erzeugten (Überlauf), lag ca. die Hälfte der Ereignisse im Bereich der Zielvorgabe von $\geq 68\%$ Gebietsrückhalt pro Ereignis (Abb.31). Bei einer ereignisbezogenen Betrachtung zeigten somit 88% aller

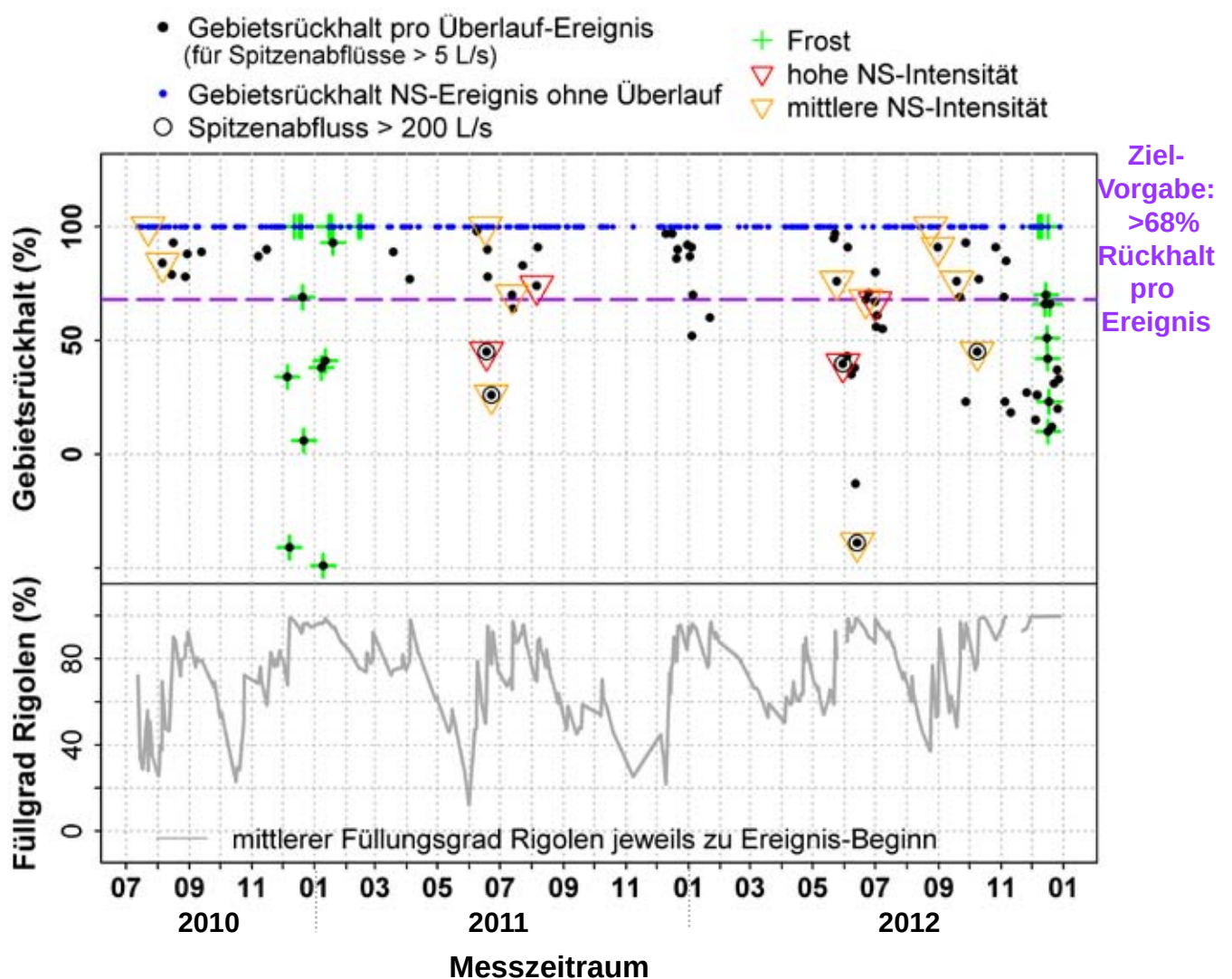


Abb.31 Gebietsrückhalte (in % vom Brutto-Niederschlag) für alle gemessenen Niederschlagsereignisse (Regen + Schnee) (schwarz, oben), sowie mittlerer Füllgrad des Rigolensystems jeweils zu Ereignisbeginn (unten). Ereignisse mit maximalen Überlaufraten < 5 L/s sind aufgrund der erhöhten Messunsicherheit nicht dargestellt. Die violette Linie markiert die Zielgröße von mindestens 68% Gebietsrückhalt pro Ereignis. Der Vollständigkeit wegen sind auch Niederschlagsereignisse, die komplett zurückgehalten wurden, enthalten (blau).

Niederschlagsereignisse die geplante Rückhaltewirkung. Diese positive Wirkung war bei einigen Niederschlägen bis zu 30mm (Abb. 30) beobachtbar. Bei Betrachtung der Niederschlags-Intensität zeigte sich, dass Ereignisse mit mittleren Intensitäten größtenteils gut, z.T. sogar komplett zurückgehalten wurden und auch zwei von insgesamt vier Ereignissen mit Starkregencharakteristik innerhalb der Vorgaben lagen.

Bei genauerer Betrachtung der Ereignisse mit zu geringem Gebietsrückhalt als geplant, zeigten die Messungen, dass dies teilweise bereits ab Niederschlagssummen von ca. 4mm auftreten kann (Abb.30). Ab Niederschlägen von > 35mm, welche allerdings nur selten auftraten, wurden alle beobachteten Ereignisse unzureichend zurückgehalten. Eine Betrachtung im Jahresverlauf und unter Einbeziehung des Füllgrades des Rigolensystems (Abb.31) deutet darauf hin, dass bei bereits zu Ereignisbeginn vollständig gefüllten Rigolen die Tendenz stark zunimmt, dass weniger Rückhalt erreicht wird als ursprünglich geplant.

Weiterhin zeigt sich ein verringerter Rückhalt vermehrt während winterlicher Frost- und Schmelzperioden (grüne Kreuze), da sich dann u. U. eine geschlossene Eisdecke bilden kann, welche die Versickerung erschwert oder ein zusätzlicher Eintrag durch Schmelzwasser erfolgt. Letzteres kann sogar dazu führen, dass mehr Niederschlagsvolumen in den Vorfluter gelangt, als an Regen unmittelbar gefallen ist. Hinzukommt, dass im Zeitraum Mitte Dezember bis ca. Mitte Februar 2010, 2011 und 2012 nahezu vollständig gefüllte Rigolen vorhanden waren, was auf erhöhte Grundwasserstände zurückzuführen ist, welche die Rigolen einstauen. Da die hauptsächliche Grundwasserneubildung jahreszeitlich bedingt v.a. im Winter und Frühjahr stattfindet, ist davon auszugehen, dass dieser Zustand regelmäßig erreicht werden wird. Finden in solch einer Periode andauernde und ergiebige Niederschläge statt, wie im November-Dezember 2012 (vgl Abb.22), kann dies, noch verstärkt durch Frost- und Schmelzereignisse, zu einem dauerhaft reduzierten Gebietsrückhalt bei größeren Ereignissen bis auf 20% führen. Als eine weitere Periode mit teilweise verringertem Rückhalt erwiesen sich die Sommermonate Mitte Mai – Juni, in denen nicht nur sehr ergiebige Niederschläge, häufig über dem monatlichen Durchschnitt, fielen sondern auch die höchsten Niederschlags-

Tab. 15 Jahressummen von Gebietsrückhalt und Abflussvolumen im Vergleich zum langjährigen Mittelwert der Planung. Planungsannahmen beziehen sich auf 16,09 ha Gesamtfläche, Messwerte auf 15,34 ha. n.m.= nicht messbar.

	Jährliches Rückhaltevolumen	Jährliches Abflussvolumen	Jährliches Sickervolumen des MRS	Oberflächen-Abfluss von den Flächen	Jährliches Niederschlagsvolumen
	Planungsannahme (langjähriges Mittel 1971-90)				
	> 131.120 m³	< 19.000 m³	> 19.000 m³	37.700 m³	150.120 m³
in % vom Niederschlag	> 87%	< 13%	13%	25%	100%
	Messwerte 2011				
	94.373 m³	13.917 m³	n.m.	n.m.	108.290 m³
in % vom Niederschlag	87%	13%	–	–	100%
	Messwerte 2012				
	104.660 m³	52.961 m³	n.m.	n.m.	157.621 m³
in % vom Niederschlag	66%	34%	–	–	100%

intensitäten gemessen wurden (Abb.22). Treffen diese Starkregen auf bereits durch ergiebige Vorregen und/oder erhöhte Grundwasserstände randvoll gefüllte Rigolen, kann sich der Rückhalt auf bis zu 25 % reduzieren. Im Juni 2012 trat bei zwei Ereignissen sogar mehr Abfluss auf als an Niederschlag gefallen war (Vgl. Abb.30, Abb.31). Zwei der untersuchten Rigolen (915/6, 915/11, Abb.26) zeigen dabei an, dass es sehr wahrscheinlich zu einem Wasseraustritt von Grundwasser über die Muldensohle kam, wodurch zusätzliches Volumen über das Grabensystem abgeleitet wurde.

Neben der bereits erwähnten Winterperiode treten dauerhaft eingestaute Rigolen tendenziell v.a. in Monaten mit durchschnittlich bis überdurchschnittlichem Niederschlagsvolumen auf (Vgl. Abb.22). Dies führt einerseits zu einem hohen Eintrag von Sickerwasser. Andererseits steigen durch die erhöhten Niederschläge die Grundwasserstände bereits im Anstrom an, was durch die Nähe zur Hanglage der Vorberge des Schwarzwaldes vermutlich noch verstärkt wird und in Folge zu einem zusätzlichen Einstau der Rigolen von unten führt.

Prinzipiell werden während der geschilderten Perioden mit ungünstigen Ausgangsbedingungen auch Ereignisse komplett oder innerhalb der Vorgaben zurückgehalten, allerdings häufen sich dann die Ereignisse mit verringertem Rückhalt, was auf das ungünstige Zusammentreffen verschiedener Niederschlagscharakteristika und Ausgangsbedingungen zurückzuführen ist. Dazu gehört auch die Vorsättigung der oberflächigen Speicher wie Grün- und Kiesdächer, Unterbau durchlässiger Pflaster und Interzeptionsspeicher durch vorausgegangene Niederschläge, was jedoch nicht näher untersucht wurde. Diese Ereignisse bzw. Kombinationen zeigen die Schwachstellen des gesamten Entwässerungskonzeptes an.

Um den gesamten Gebietsrückhalt pro Jahr mit der Zielgröße der Planung zu vergleichen, wurden in erster Linie prozentuale Werte verwendet, um den unterschiedlichen Jahressummen an Niederschlag gerecht zu werden.

Es zeigt sich, dass der Jahresrückhalt für 2011 mit 87 % genau der gewünschten Zielvorgabe entspricht, während 2012 mit 66 % deutlich unter dem Zielwert liegt (Tab.15). Das jährliche Abflussvolumen in den Vorfluter betrug 2011 14.455 m^3 , was ebenfalls innerhalb der Zielvorgabe von $< 19.000 \text{ m}^3/\text{a}$ liegt und auch in etwa mit den aus der Langzeitsimulation ermittelten Planungswerten für Rückhalt und Abfluss übereinstimmt (Tab.4). Das Abflussvolumen 2012 liegt mit 55.285 m^3 deutlich über den angestrebten und wasserrechtlich genehmigten Planungsberechnungen 1996, welche langjährige Mittelwerte repräsentieren. Es ist eher vergleichbar mit den mittels Langzeitsimulation 1997 prognostizierten Werten für den Fall erheblichen Rigoleneinstaus (Tab.4), wie er tatsächlich auch während der Untersuchungen eingetreten ist. In Anbetracht der jeweiligen Jahressummen von 725mm (2011) und 1060mm (2012) im Vergleich zum mittleren Planungswert von 933mm wird deutlich, dass zwar 2011 ein optimaler Rückhalt über das Jahr stattfand, jedoch auch deutlich weniger Niederschlag gefallen ist als im langjährigen Mittel (Tab.15). Im Gegensatz dazu erwies sich das Jahr 2012 als etwas feuchter. Dieser gegenüber der Planung etwas höhere Niederschlag, führte jedoch nicht zu einer Ausschöpfung des ursprünglich angenommenen, jährlichen Gebietsrückhaltes von $> 131.120 \text{ m}^3$, sondern dieser lag deutlich darunter und es wurde eine

deutlich höhere Abflussmenge verzeichnet. Es stellt sich die Frage, inwieweit aus langjährigen Mittelwerten abgeleitete oder über einen längeren Zeitraum bilanzierte Zielgrößen überhaupt geeignet sind, um einzelne Jahreswerte zu überprüfen. Eventuell wäre die Angabe von planerischen Zielgrößen in Abhängigkeit von der Jahres-Niederschlagssumme, von Monatswerten oder von ereignisabhängigen Vorgaben zukünftig besser geeignet.

4.4.2.2 Gebietsrückhaltevolumen und vollständiger Rückhalt

Die pro Ereignis im Gebiet zurückgehaltenen Niederschlagsvolumina (Abb. 32) lagen insgesamt zwischen 0,3 und maximal 26 mm. Bei Niederschlägen, die komplett zurückgehalten wurden (blaue Punkte) gibt der Wert gleichzeitig die Niederschlagssumme an. Im Vergleich mit der Zielvorgabe der Planung von ca. 7 mm vollständigem Rückhalt bei geringen und ca. 3 mm bei hohen Niederschlagsintensitäten (Kap. 3.3.3), liegen die gemessenen, 100% zurückgehaltenen Ereignisse (blaue Punkte) mit bis zu 26 mm um den Faktor 4 über der Vorgabe. Der untere Wertebereich von Ereignissen, die nur teilweise zurückgehalten wurden (schwarze Punkte) zeigt mit einem Minimum von 0,3 mm jedoch an, dass sich die tatsächlichen Rückhaltevolumina unter bestimmten Bedingungen auch weit unter der Zielgröße bewegen können. Prinzipiell ist eine große Variabilität beobachtbar. Tendenziell wurde dabei während der Wintermonate Dezember-Januar weniger Volumen zurückgehalten, was mit den bereits in Kap.4.4.2.1 geschilderten Faktoren zusammenhängt. Der Rigolenfüllgrad (Abb.32 unten) ist hierbei Ausdruck häufiger und ergiebiger Niederschläge. Die höchsten Rückhaltevolumina waren im Spätsommer und

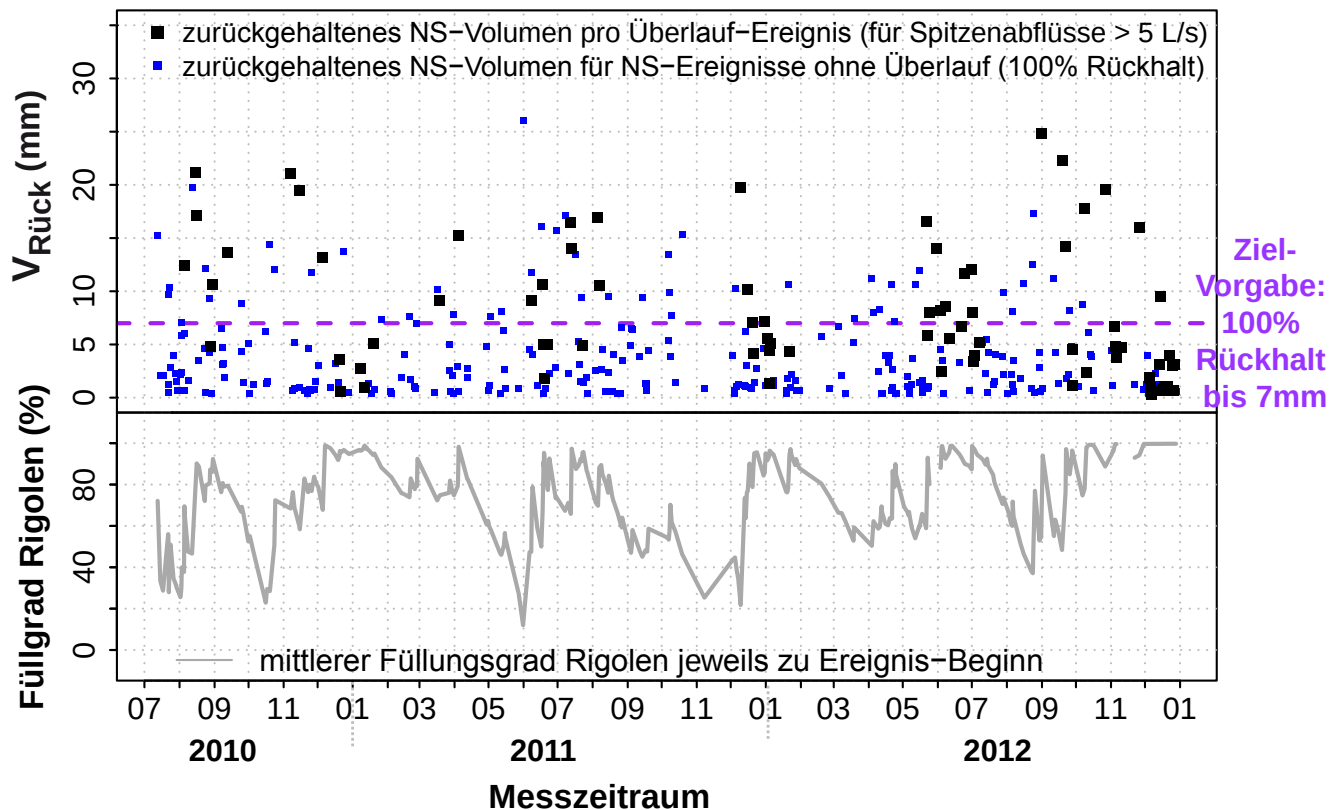


Abb. 32 Gebietsrückhaltevolumen für alle messtechnisch erfassten Ereignisse (oben), sowie mittlerer Füllgrad des Rigolensystems jeweils zu Ereignisbeginn (unten). Der violette Balken markiert die Zielgröße von rund 7 mm für kompletten (100%) Rückhalt bei schwachen Niederschlagsintensitäten. Zur besseren Übersichtlichkeit sind Niederschlagsereignisse, die komplett zurückgehalten wurden, in blau dargestellt, während Ereignisse, die nur teilweise zurückgehalten wurden, in schwarz abgebildet sind. Ereignisse mit Gebietsrückhalten < 0% (siehe Abb. 31) sind nicht dargestellt.

Herbst (August – Oktober) zu verzeichnen. Im Vergleich mit monatlichen Niederschlagssummen (Abb. 22) und dem Füllgrad der Rigolen zeigt sich, dass dies unterdurchschnittlich trockene Monate waren (2010, 2011) aber auch in eher feuchten Monaten (September-Oktober 2012) noch recht hohe Rückhaltevolumen erreicht werden konnten. In den Sommermonaten Mai-Juni lag das zurückgehaltene Volumen im Schnitt bei um die 10 mm.

Der Rückhalt dieses Volumens entsteht zum Einen durch Benetzungs-, Mulden- und Interzeptionsverluste auf Flächen und Vegetation und durch die Geländemorphologie, zum Anderen durch das Speichervolumen von Gründächern, durchlässigen Pflasterungen und dem Volumen des Mulden-Rigolensystems. Da alle diese Einzelspeicher durch natürliche Versickerungs- und Verdunstungsprozesse entleert werden, ist das jeweils zur Verfügung stehende Speichervolumen sehr stark abhängig von den klimatischen Bedingungen und vor allem von den Vorbedingungen bzw. dem Abstand zwischen Niederschlagsereignissen. So waren alle maximalen Rückhaltevolumina (Juni 2011, August 2012) mit gut geleerten Speichern assoziiert, was exemplarisch am Beispiel des Rigolen-Füllgrades abgebildet ist (Abb. 32 unten). Unter Vernachlässigung der parallel zum Niederschlag stattfindenden Versickerung, kann das hier ermittelte Rückhaltevolumen näherungsweise als das Speichervolumen aller dezentralen und zentralen Maßnahmen in Summe interpretiert werden. Über einen längeren Zeitraum gemessen, können die beobachteten Maximalwerte als Richtwert für das maximal im Gebiet verfügbare Speichervolumen gesehen werden, nach dessen Überschreiten das System überläuft. Dies ist insofern aufschlussreich, als dass das tatsächliche Speichervolumen der zahlreichen dezentralen Maßnahmen nicht messbar ist, während es von Mulden und Rigolen berechnet werden kann.

Die im Beobachtungszeitraum erreichten Maximalwerte lagen bei 25 - 26 mm. Nach Abzug des aktuellen Rückhaltevolumens von Mulden (0,4 mm) und Rigolen (3,8 mm) können die so erhaltenen 15,8 mm als das maximal mögliche Rückhaltevolumen der Summe aller dezentralen Maßnahmen in der Fläche interpretiert werden. Da das Rückhaltevermögen der dezentralen Maßnahmen stark abhängig ist von der Charakteristik des Niederschlages, den klimatischen Bedingungen und Vorregenereignissen ist die Verfügbarkeit dieses Speichers sehr variabel.

4.4.2.3 Spitzenabflüsse

Aufgrund des bereits durch Siedlungseinleitungen im Oberlauf stark beanspruchten Vorfluters (Dorfbach) waren die maximal auftretenden Spitzenabflüsse der Einleitungen in den Vorfluter ein sehr wichtiger Aspekt bei der Planung. Die in den Planungsunterlagen 1996 vermerkte, wasserrechtlich genehmigte und hier als Zielgröße definierte Grenze von 1511 L/s stellt eine maximal zulässige Rate dar, die nicht überschritten werden sollte. Dabei ging man als worst-case von einer reinen Ableitung durch das Grabensystem aus. Ziel der Regenwasserrückhaltung war eine deutliche Reduzierung der Abflussspitzen unter diesen Maximalwert.

Die im Untersuchungszeitraum erfassten Überlaufereignisse (Abb. 33) lagen mit einem maximal gemessenen Spitzenabfluss von 600 L/s deutlich unter diesem Richtwert. Allerdings erreichten die erfassten Regenereignisse auch nicht die Charakteristik des zur Berechnung angenommenen Bemessungsregens

($r_{15\text{min},n=0,2}$ siehe Tab.5). Um dennoch einen Vergleich zu Planungsannahmen herstellen zu können, wurde der Wert 940 L/s verwendet, welcher mit einem Bemessungsregen $r_{15\text{min},n=1}$ berechnet wurde (Tab.5) und dessen Charakteristik vier der gemessenen Regen in etwa erreichten (17.6.2011, 5.8.2011, 30.5.2012, 30.6.2012, Abb.33). Die dafür beobachteten Spitzenabflüsse von 132–366 L/s liegen dabei um das ca. 3- bis 7-fache unter dem berechneten Planungswert. Dies deutet an, dass die tatsächliche Wirkung aller Regenwasserbewirtschaftungs-Maßnahmen auf die Reduzierung von Spitzenabflüssen bei der Planung unterschätzt worden ist.

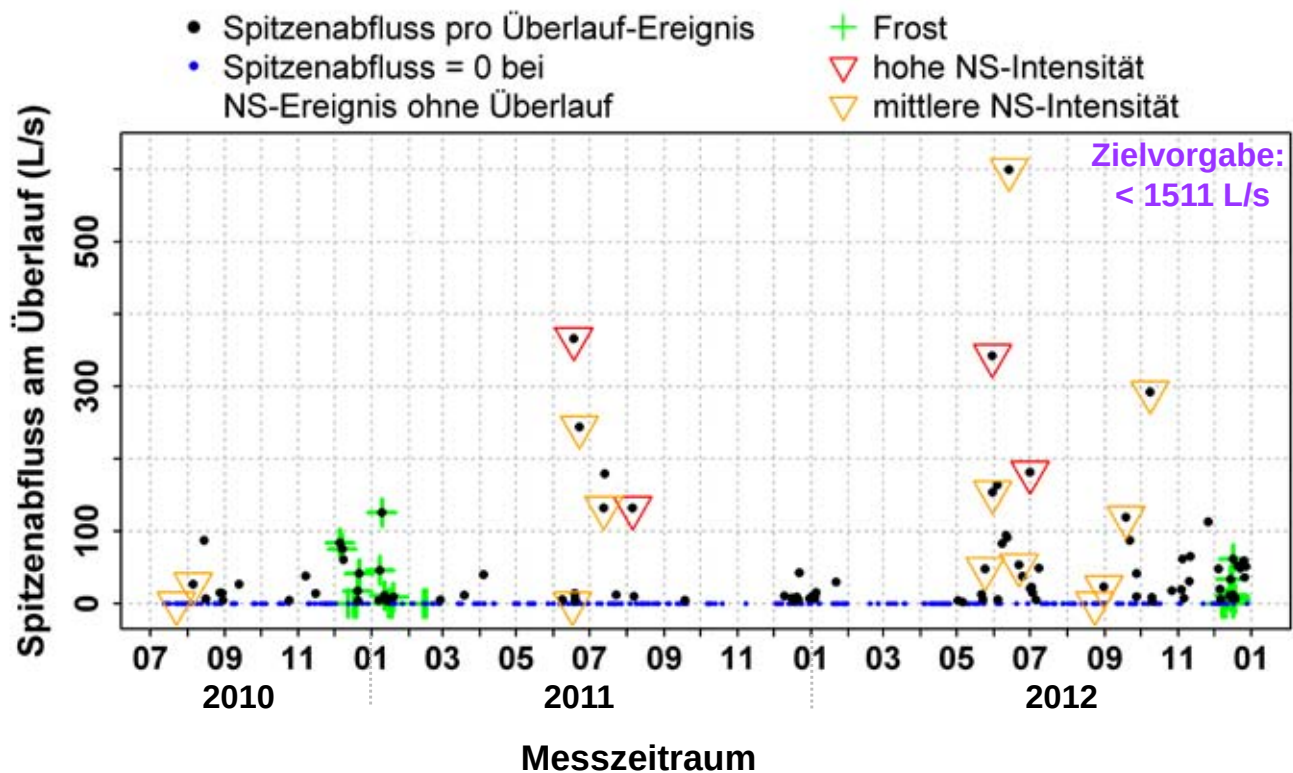


Abb. 33 Am Überlauf zum Vorfluter aufgetretene Spitzenabflüsse (L/s) aller gemessenen Ereignisse im Untersuchungszeitraum (schwarz). Die violette Zahl beschreibt die Zielgröße der maximal zulässigen Einletrate. Der Vollständigkeit wegen sind auch die Ereignisse enthalten, die komplett im Gebiet zurückgehalten wurden (blaue Punkte).

Angeichts der momentanen Planungspraxis nach aktuellem Regelwerk (BWK 2004, DWA 2007, LfU 2005, LfU 2006) erscheint die maximal zulässige Einletrate von 1511 L/s als sehr hoch. Eigene, überschlägige Berechnungen (Kap. 3.8) lassen vermuten, dass nach aktuellem Stand des Wissens eine Größenordnung von etwa 200 L/s angesetzt werden könnte.

Im Jahresverlauf traten Spitzenabflüsse >200 L/s fast ausschließlich Ende Mai-Ende Juni auf und sind mit ergiebigen (>20mm), sommerlichen Starkregen oder auch Ereignissen mit mittleren Intensitäten assoziiert. Hinsichtlich des Gewässerschutzes haben diese sommerlichen Ereignisse das höchste Gefährdungspotential, da sie relativ zur meist geringen Wasserführung im Vorfluter hohe Einleitungen erzeugen können. Der maximale, im Messzeitraum erfasste Wert von 600 L/s trat bei einer Kombination von mittel intensiv, jedoch ergiebigem (> 20mm) Niederschlag mit 100% gefüllten Rigolen und gleichzeitigem Grundwasseraustritt an der Muldensohle auf. Die in den Winterperioden beobachteten Spitzenabflüsse unter Einfluss von Schmelz- und Frostereignissen (grüne Kreuze) waren mit maximal 126 L/s eher gering.

4.4.2.4 Verzögerung von Abflussspitzen

Die bei der Planung gewünschte, jedoch dort nicht näher quantifizierte Abflussverzögerung wird im Folgenden anhand des Zeitversatzes zwischen Zeitpunkt der maximalen Niederschlagsintensität und Zeitpunkt der Abflussspitze am Überlauf untersucht (Abb.7,Kap.3.3.5). Dabei wurden nur die Ereignisse verwendet, bei denen die Peaks eindeutig zuordenbar waren.

Diese Betrachtung schließt die abflussverzögernde Wirkung dezentraler Maßnahmen in der Fläche und die Wirkung des nachgeschalteten, kaskadenartigen Muldensystems ein.

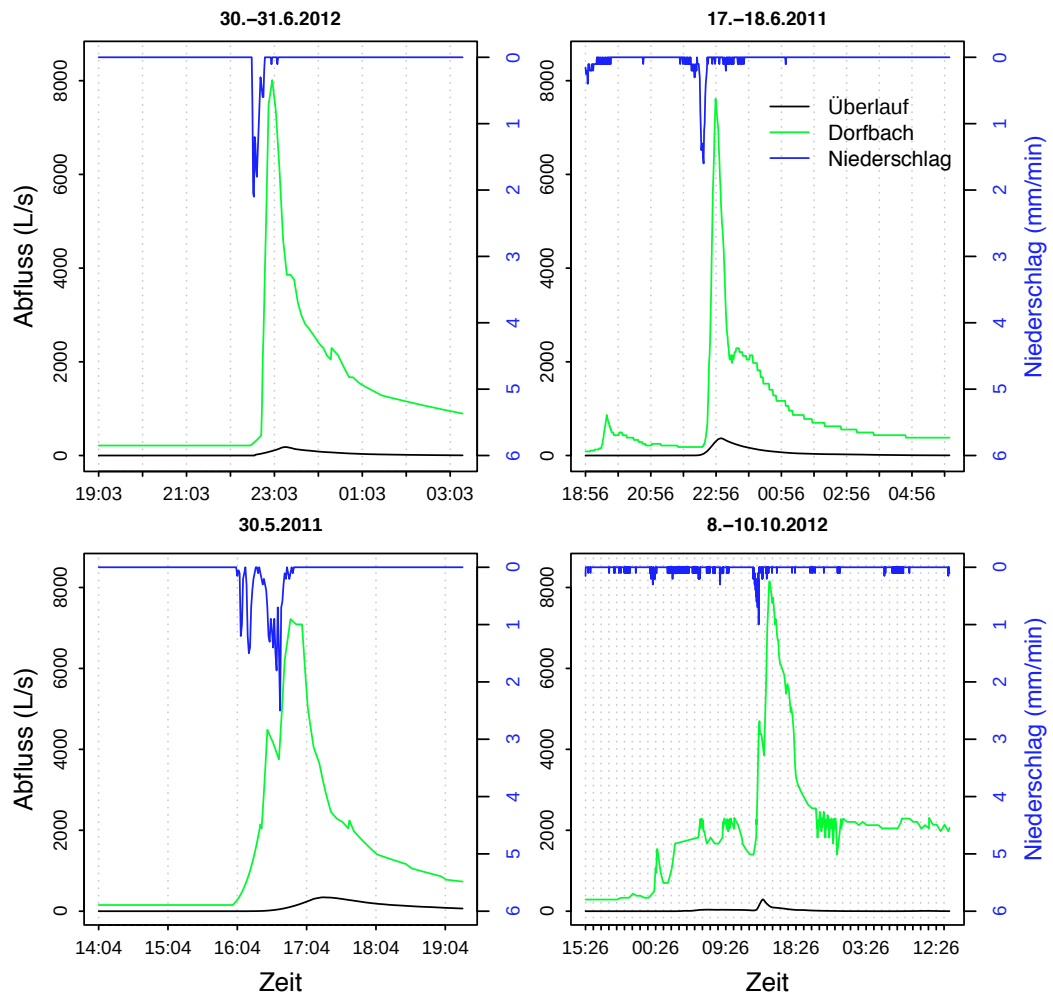


Abb. 34 Überlaufereignisse (schwarz) mit dazugehörigem Niederschlagsereignis (blau) und Abflussgeschehen im Dorfbach kurz oberhalb der Einleitstelle (grün) für vier Beispiel-Ereignisse.

Die ereignisweise berechnete Abflussverzögerung lag zwischen 30 und 189min (Mittelwert: 72 min, Median: 85 min) (Abb.35). Näherungsweise kann diese Zeitdifferenz als die Abflusskonzentrationszeit des gesamten entwässerten Gebietes betrachtet werden.

Prinzipiell war auch hier eine hohe Variabilität beobachtbar, was wiederum Ausdruck dafür ist, dass die Abflussbildung bei den vorhandenen Bewirtschaftungsmaßnahmen stark von klimatischen Faktoren und der Vorsättigung der Böden und oberflächigen Speicher abhängig ist. Es ist weiterhin anzunehmen, dass die Höhe und Dichte des Bewuchses in den Mulden, welche je nach Vegetationsperiode und Mahd sehr unterschiedlich ausgeprägt sein kann, einen maßgeblichen Einfluss auf die Fließzeit im Grabensystem hat.

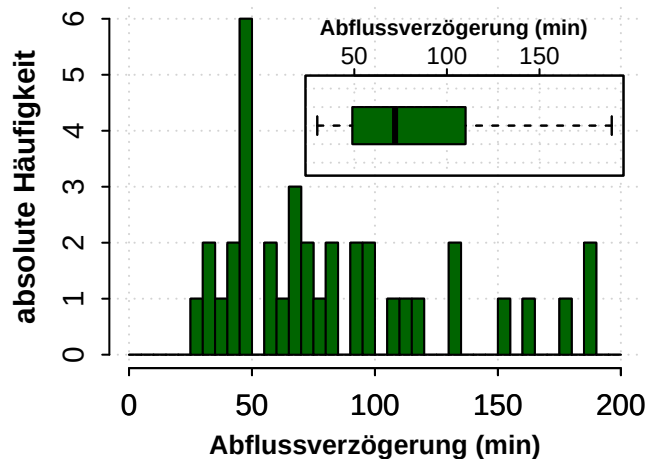


Abb. 35 Absolute Häufigkeitsverteilung und statistische Größen für die Abflussverzögerung am Überlauf (min) aller auswertbaren Ereignisse (37 Ereignisse) im Untersuchungszeitraum.

4.4.2.5 Beeinflussung des Abflusses im Vorfluter

Von dem umgesetzten Entwässerungskonzept erhoffte man sich u.a. einen Beitrag zum Hochwasserschutz des Vorfluters, was jedoch nicht näher quantifiziert wurde. Diese Fragestellung wurde anhand des zeitlichen Versatzes zwischen Spitzenabfluss der Einleitung und Hochwasserscheitel im Fluss, sowie der prozentualen Verstärkung des Scheitelabflusses durch die Einleitung untersucht (Kap.3.3.6). Dabei wurden nur Ereignisse verwendet, bei denen Peaks eindeutig zuordenbar waren. Die im Untersuchungszeitraum erfassten Abflussereignisse im Fluss entsprechen dabei eher geringen Jährlichkeiten (Abb.36). Eine Beurteilung für aus Hochwassersicht relevantere Ereignisse mit Wiederkehrzeiten von 50 oder 100 Jahren ist deshalb nicht möglich bzw. würde einen deutlich längeren Messzeitraum erfordern.

Der zeitliche Versatz der Abflussspitzen (Abb.36 oben) zeigt, dass im Falle erhöhter Abflüsse im Vorfluter >6000 L/s die Einleitungsspitze aus der Siedlung mit 9 bis 29 min dem Scheitelabfluss hinterherläuft. Bei einem Ereignis wurde hingegen auch ein Vorlaufen der Siedlungseinleitung um 49 min beobachtet. Durch diese Verzögerung wird der Scheitelabfluss im Dorfbach nur anteilig durch die zusätzliche Einleitung verstärkt. Zum Zeitpunkt des Eintreffens der Scheitelwellen aller Ereignisse war eine maximale Verstärkung durch die Entwässerung aus der Siedlung von 4,5% beobachtbar (Abb.36, unten). Im Falle erhöhter Abflüsse lag die Verstärkung zwischen 0,4 - 4%.

Fast alle erhöhten Abflüsse (>6000 L/s) sind mit den bereits beschriebenen, sommerlichen Starkregenereignissen assoziiert, welche teilweise auch zu Spitzenabflüssen über 200 L/s aus der Siedlung führten. Das Ereignis mit maximalem Spitzenabfluss von 600 L/s (Abb. 33) konnte aufgrund des Ausfalls eines Messgerätes im Bach nicht in die Auswertung einbezogen werden.

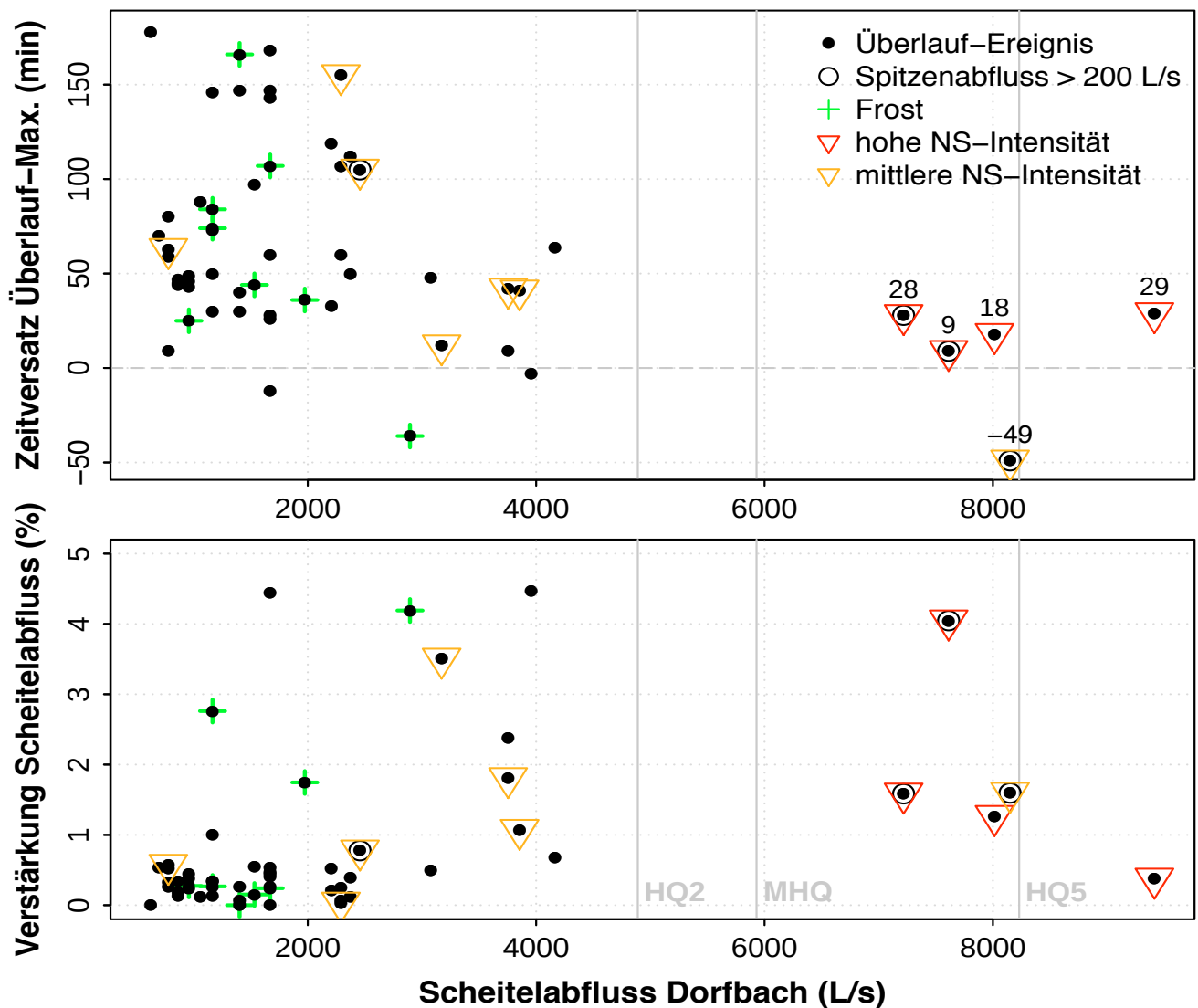


Abb. 36 Gemessene Scheitelabflüsse im Vorfluter (Dorfbach) im Untersuchungszeitraum (L/s) und dabei aufgetretener Zeitversatz (min) zwischen Spitzenabfluss der Siedlungseinleitung zu Scheitelabfluss (oben) sowie die jeweilige Verstärkung des Scheitelabflusses durch die Einleitung zum Zeitpunkt des Scheitels (unten). Die statistischen H_Q -Kennwerte wurden aus einer Hochwasserregionalisierung abgeleitet (LUBW, 2007b).

4.4.2.6 Sickerleistung der Mulden

Die Gesamt-Sickerleistung des Muldensystems ging in die Planungsüberlegungen 1996 ein, um einerseits das im Jahresmittel erzielbare Sickervolumen (Tab.15) und andererseits eine Bilanzierung der pro Ereignis zu erwartenden Anteile an Gebietsrückhalt und Abfluss zum Dorfbach abschätzen zu können (Tab.3). Wasserrechtlich genehmigt wurde eine Sickerleistung von 27 L/s. Die Sickerleistung ist abhängig von der hydraulischen Leitfähigkeit bzw. Infiltrationskapazität (kf) des Oberbodens und der versickerungswirksamen Fläche, wobei entsprechend der Planung 1996 nur die Muldensohlfläche einbezogen wird. Als Zielgröße des kf-Wertes wurde der Bereich von $5 \cdot 10^{-5} - 10^{-5} \text{ m/s}$ nach DWA A-138 definiert. Dies stellt ein Optimum dar, zwischen möglichst schneller Infiltration und gleichzeitig ausreichend langer Verweilzeit im Boden, welche für einen entsprechenden Schadstoffrückhalt in der Bodenzone notwendig ist. Infiltrationsversuche in nahezu allen Teilmulden (Kap.3.3.7) zeigten, dass bis auf wenige Ausnahmen die Infiltrationskapazität der Mulden im optimalen Bereich liegt (Abb.37).

Ausnahmen bildeten vier Teilmulden, welche langsamer versickern als die Mindestdurchlässigkeit, sowie drei Teilmulden, die zu schnell versickern, sodass die Verweildauer zu kurz sein könnte, um einen ausreichenden Schadstoffrückhalt zu gewährleisten. Generell tritt bei Infiltrationsversuchen eine starke Streuung mehrerer Messwerte innerhalb eines Standortes auf, was v.a. durch die Heterogenität des Untergrundes verursacht wird.

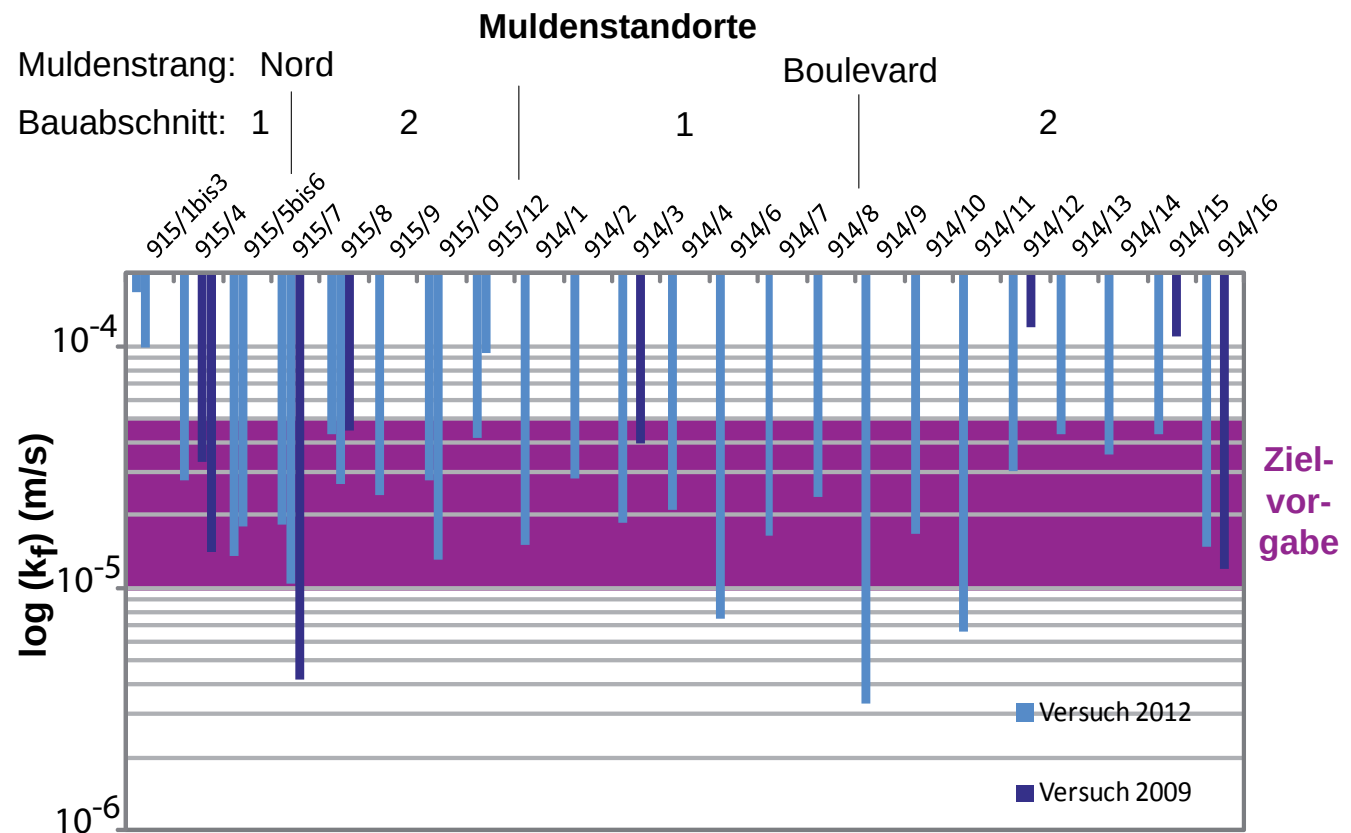


Abb. 37 Experimentell ermittelte Infiltrationskapazitäten k_f in m/s (logarithmische Skala) in 24 Teilmulden des Nord- und Boulevardgrabens von 2009 und 2012. Der violette Balken markiert den entsprechend Regelwerk DWA A-138 definierten Optimalbereich als Zielgröße.

Bezüglich der versickerungswirksamen Fläche ergaben Recherchen und eigene Vermessungen, dass sich die zur Planung 1996 angenommene Versickerungsfläche von 1138m² auf aktuell 732m² verringert hat (Tab.16). Bei Berechnung der aktuellen Gesamtsickerleistung mit den experimentell ermittelten und für jede Teilmulde gemittelten k_f -Werten zeigte sich jedoch, dass die aktuelle Sickerleistung von ca. 23 L/s in etwa der Zielgröße von 27 L/s entspricht. Die verringerte Muldensohlfläche wird hierbei durch die generell etwas höher als 10^{-5} m/s liegenden und teilweise stark erhöhten k_f -Werte einiger Teilmulden kompensiert.

Tab. 16 Angaben zur Gestaltung, Geometrie und Sickerleistung des Muldensystem für verschiedene Zeitpunkte.					
Stand	Anzahl Muldenkaskaden	Mittlere Einstauhöhe (m)	versickerungswirksame Muldenfläche (m²)	Sickerleistung der Mulden	Quelle
1996	30	0,2 (0,1 – 0,3)	1138 (nur Sohlfläche)	5,3 (bei $k_f/2$: $5 \cdot 10^{-6}$ m/s) 26,5 (bei k_f : 10^{-5} m/s)	Erläuterungsbericht - Entwurfs- und Genehmigungsplanung 1996
2003/2004	27	0,2 (0,1 – 0,3)	1305,5 (Sohlfläche + Flanken)	6,54 (bei $k_f/2$: $5 \cdot 10^{-6}$ m/s) 13,08 (bei k_f : 10^{-5} m/s)	Erläuterungsbericht - Aktualisierte Entwurfsplanung 2003/2004
2011	24	0,07 (0,01 – 0,24)	732,4 (nur Sohlfläche)	22,6 (bei k_f experimentell)	Ausführungsplanung 2003/2004 + Aufmaßprotokolle + Vermessung

Um das im Jahresmittel oder pro Ereignis erzielbare Sickervolumen beurteilen zu können, ist zusätzlich zur Sickerleistung auch das gesamte Rückhaltvolumen aller Teilmulden in Betracht zu ziehen. Da sich dieses im Vergleich zur Planung auf ca. 1/5 verkleinert hat (Tab. 7, Kap. 4.4.1.1) ist trotz optimaler Sickerleistung prinzipiell von einem geringeren Sickervolumen als ursprünglich angenommen auszugehen. Bei einer aktuellen mittleren Stauhöhe der Teilmulden von 0,07 m im Vergleich zu ursprünglich geplanten 0,2 m (Tab. 16) tritt ein Überlaufen der Muldenkaskade früher ein, sodass v.a. bei länger andauernden oder intensiven Niederschlägen weniger Niederschlagsvolumen zunächst zwischengespeichert werden kann, bevor es anschließend durch Infiltration allmählich entleert wird.

4.5 Einfluss von Gründächern und Bäumen auf die Abflussbildung

Eine ausführliche Darstellung verschiedener dezentraler Regenwasserbewirtschaftungs-Maßnahmen findet sich auf der im Rahmen des Projektes entwickelten Webseite:

<http://www.naturnahe-regenwasserbewirtschaftung.info>.

Während Gründächer mittlerweile relativ etabliert sind, wird die positive Wirkung von Bäumen auf die Abflussbildung im urbanen Raum bisher weder in die Planungen mit einbezogen, noch ist sie umfassend erforscht. Im Folgenden wurde die Abflussbildung unter drei verschiedenen Baumarten (Linde, Platane, Tanne) und an vier verschiedenen Flachdachaufbauten mit Messungen untersucht (siehe Kap. 3.4): Konventionell (Eternit), Kies, extensive Begrünung, Mischform (Dachterrasse mit extensiver und intensiver Begrünung). Anschließend wurde der flächenhafte Gesamteffekt dieser Maßnahmen auf den Gebietsrückhalt und den Spitzenabfluss des Untersuchungsgebietes mittels Niederschlags-Abfluss-Modell (Kap. 3.6) simuliert und der Einfluss abgeschätzt. Des Weiteren wurden die Messungen der Bäume verwendet, um Modellberechnungen für einzelne Bäume im neu entwickelten Webmodell (Kap. 4.8) zu parametrisieren.

4.5.1 Bäume

Die abflussrelevante Wirkung von Bäumen besteht darin, dass Niederschlag auf Blättern oder Nadeln zurückgehalten wird (Interzeption) und entweder verdunstet oder erst verzögert nach unten fällt, was mit entsprechenden Messgeräten (Abb. 38) registriert werden kann. Dadurch wird eine Reduzierung des letztendlich unter dem Baum zum Abfluss kommenden Niederschlages erreicht aber auch die Verzögerung und Dämpfung von Niederschlags- bzw. Abflussspitzen.



Abb. 38 Messeinrichtung zur Messung des Bestandsniederschlages unter einer Platane zur Bestimmung der Interzeption.

Im 12- bis 20-monatigen Untersuchungszeitraum waren je nach Standort 122 (Tanne), 189 (Linde) und 211 (Platane) Niederschlagsereignisse auswertbar. Niederschläge in Form von Schnee sind dabei nicht enthalten. Davon wurden von der Linde 40%, von der Platane 29% und von der Tanne 62% der Ereignisse vollständig zurückgehalten, kamen also gar nicht zum Abfluss (Abb.40). Die dabei beobachteten Niederschlagshöhen lagen bis zu 6mm bei der Linde (Mittelwert: 1mm, Median: 0,9mm), bis zu 3mm bei der Platane (Mittelwert: 1mm, Median: 0,7mm) und bis zu 13,5mm bei der Tanne (Mittelwert: 2,1mm, Median: 1,3mm). Von den Niederschlägen, die zum Abfluss kamen, wurden von Linde und Platane im Mittel pro Ereignis 52% bzw. 43% des Niederschlagsvolumens zurückgehalten und beim Nadelbaum 77% (Tab.17).

Tab.17 Rückhalt, Dämpfungsbetrag der Abflussspitzen und Abflussverzögerung für Linde, Platane und Tanne als Mittel- und Medianwerte aus allen auswertbaren Ereignissen im Messzeitraum 7.5.2011-20.12.2012 (1.5.2012), die anteilig von den Bäumen zurückgehalten wurden (Linde: < 114, Platane: <153, Tanne: < 47)

		Rückhalt pro Ereignis		Dämpfungsbetrag der Abflussspitzen		Abflussverzögerung
		mm	%	mm/min	%	min
Linde	arithmetisches Mittel	4,2	52	0,3	60	5
	Medianwert	3,4	49	0,1	67	2
	Spannweite (Min. – Max.)	<0,1 – 14	1 - 95	0 - 1,6	0 - 99	0 - 33
Platane	arithmetisches Mittel	2,8	43	0,3	61	5
	Medianwert	2,3	39	0,1	67	3
	Spannweite (Min. – Max.)	<0,1 – 12,6	2 - 85	0 - 1,7	0 - 99	0 - 27
Tanne	arithmetisches Mittel	7,9	77	0,4	79	9,5
	Medianwert	6,8	85	0,3	75	8
	Spannweite (Min. – Max.)	0,4 – 22,7	26 - 96	0,1 - 1,5	44 - 99	0 - 28

Die großen Unterschiede zwischen Laub- und Nadelbäumen sind zum einen auf die unterschiedliche Ausprägung der Äste und das dichtere Kronendach der Nadelbäume zurückzuführen. Zum Anderen stellt das Nadeldach immer-

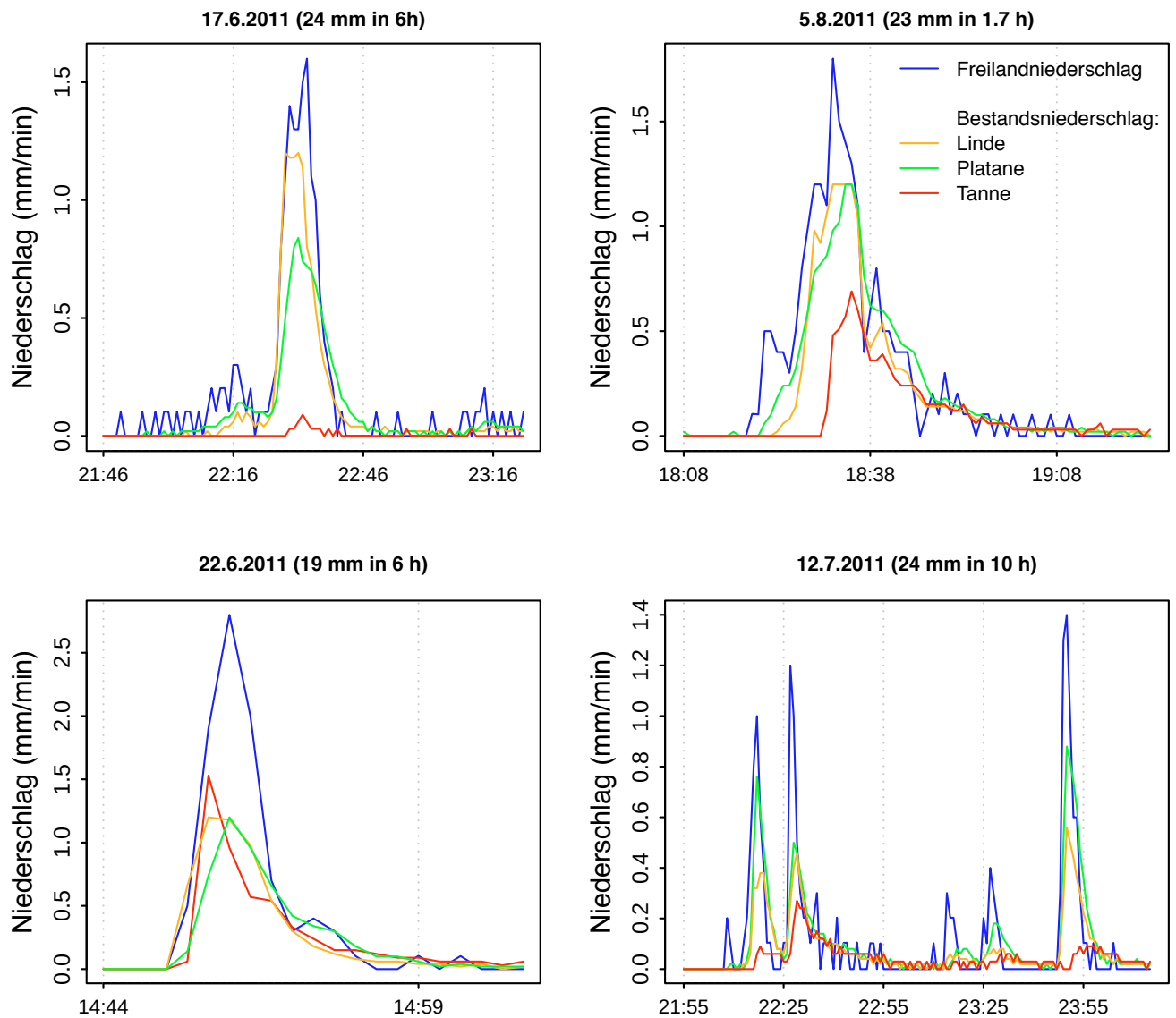


Abb. 39 Gemessener Freilandniederschlag (blau) und Bestandsniederschlag unter dem Kronendach von Linde, Platane und Tanne für Ausschnitte aus vier verschiedenen Starkregen-Ereignissen.

grüner Bäume einen konstanten Interzeptionsspeicher dar, während sich bei Laubbäumen im Herbst und Winter aufgrund des Verlustes der Blätter die Interzeption verringert. Es ist jedoch auch möglich, dass ein Teil des Niederschlages, v.a. bei sehr dichter Belaubung, an der Außenfläche des Kronendaches oder am Stamm entlang geflossen ist, was mit den hier verwendeten

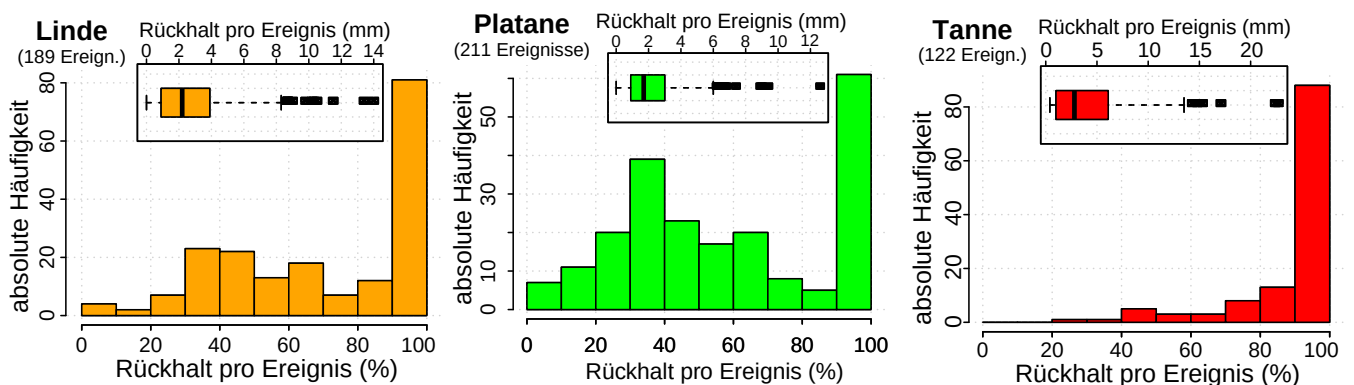


Abb. 40 Häufigkeitsverteilung der prozentualen Rückhalte pro Ereignis und Streuungs- und Lagemaße (Boxplots) des Rückhaltevolumens pro Ereignis (in mm) für Linde, Platane und Tanne für alle vollständig und anteilig zurückgehaltenen Niederschlagsereignisse.

Messgeräten nicht erfasst wurde. Die Dämpfung von Abflussspitzen betrug im Mittel über 60% bei allen Baumarten, wobei eine große Streuung zwischen Einzelereignissen auftrat (Tab.17).

Die Messungen zeigen, dass die Dämpfungs- und Rückhaltefunktion des Blätter- bzw. Nadeldaches auch bei stärkeren Niederschlagsintensitäten, wie sie gehäuft in den Sommermonaten auftreten, wirksam ist (Abb.39). So wurden bei den 4 statistisch relevanten Starkregen (Abb.24) im Mittel von der Linde noch 34% des Niederschlages zurückgehalten (6-14mm) und die Abflussspitze um rd. 39% gedämpft (um 0,4 – 1,4 mm/min). Die Platane hielt im Mittel noch 32% des Niederschlages zurück (5-13mm) und dämpfte die Abflussspitze um rd. 51% (um 0,6 – 1,7 mm/min). Bei der Tanne wurden 2 Starkregen im Mittel mit 79% zurückgehalten (14-23mm) und die Abflussspitze um rd. 78% (um 1,1 und 1,5 mm/min) reduziert.

Die Abflussverzögerung, d.h. die zeitliche Verschiebung des Zeitpunktes der maximalen Niederschlagsintensität, lag bei den 3 Baumarten zwischen 0 und ca. 30 min (Tab.17). Linde und Platane verzögerten sehr ähnlich um im Mittel rd. 5 min (Median: 2-3 min). Bei der Tanne war mit 9,5 min (Median: 8 min) eine fast doppelt so lange Verzögerung beobachtbar.

4.5.2 Gründächer und andere Dachaufbauten

Die Wirkung von Gründächern besteht v.a. darin, dass sie Regen im Substrat zwischenspeichern und Abfluss gedrosselt abgeben. Dadurch wird eine Verzögerung und Dämpfung der Abflussspitze und eine Reduzierung des zum Abfluss kommenden Niederschlagsvolumens erreicht. Gespeicherter Niederschlag kann verdunsten, was sich positiv auf einen naturnahen Wasserhaushalt auswirkt.

Für die untersuchten Dächer wurden alle Größen relativ zum konventionellen Dach als Referenzdach ausgewertet. Während das Kiesdach im gesamten Untersuchungszeitraum betrachtet 41% zurückhielt, lagen die begrünten Dachformen mit 70% deutlich höher (Tab.18). Das dadurch zurückgehaltene Volumen wird direkt oder durch die Bepflanzung verdunstet, was bei den

Tab.18 Gesamtückhalt, Gesamtabflussbeiwert bezogen auf die Summe im Untersuchungszeitraum sowie ereignisbezogene Mittel- und Medianwerte für Dämpfung und zeitliche Verzögerung der Abflussspitzen durch die verschiedenen Dachaufbauten relativ zum konventionellen Eternitdach im Untersuchungszeitraum 11.6.2010 -25.9.2011.

Dachaufbau	Gesamtückhalt relativ zum Eternitdach (%)	Gesamtabflussbeiwert relativ zum Eternitdach	Dämpfungsbetrag der Abflussspitzen relativ zum Eternitdach % (Mittelwert / Median / Spannweite)	Zeitliche Verzögerung Abflussspitze relativ zum Eternitdach (min) (Mittelwert / Median/ Spannweite)
konventionell (Eternit)	-	-	-	-
Kies	41%	0,59	71% / 76% / 24 – 100%	8 / 6 / 0 – 38 min
Gründach, extensiv	70%	0,3	90% / 91% / 42 – 100%	6 / 3 / 0 – 38 min
Mischform -Gründach, intensiv	71%	0,29	91% / 93% / 58 – 100%	7 / 4 / 0 – 45 min

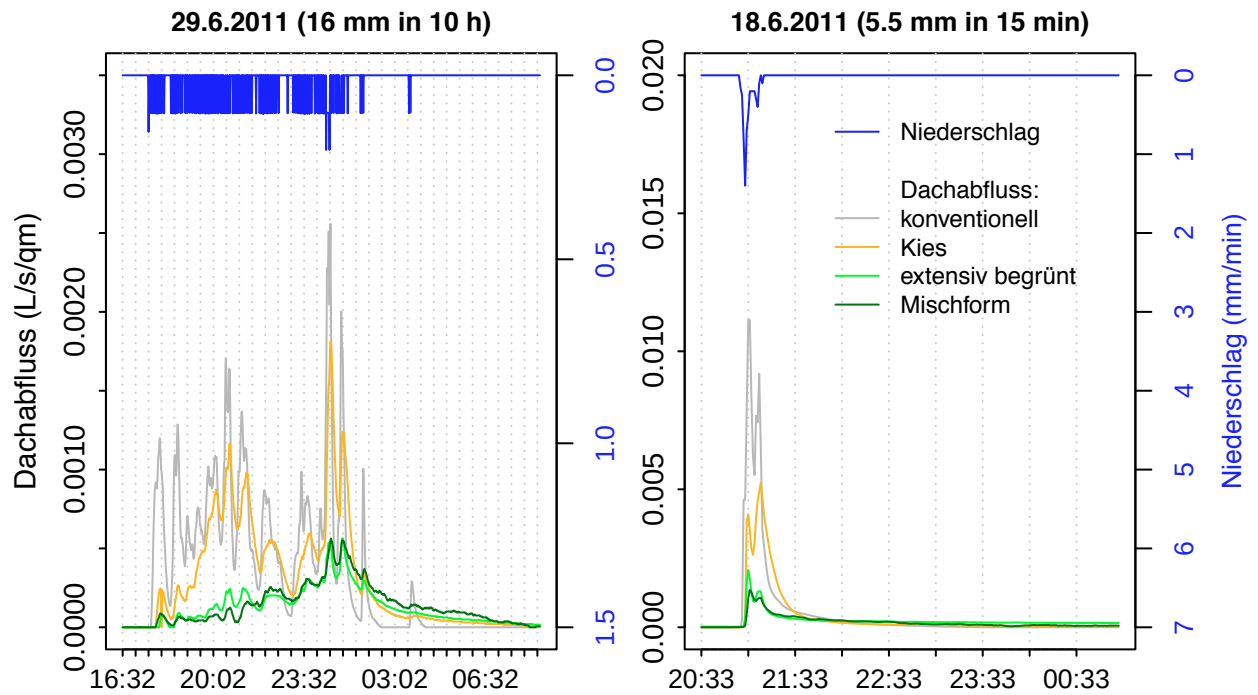


Abb.41 Gemessene Dachabflüsse von konventionellem (Eternit), bekiestem und extensiv begrüntem Dachaufbau sowie einer Mischform (intensiv begrünt) relativ zum Niederschlag (blau) für 2 Niederschlagsereignisse mit erhöhter Intensität.

Gründächern in der Größenordnung der Verdunstungskomponente einer natürlichen Fläche liegt.

Die Dämpfung der Abflussspitzen relativ zum konventionellen Dach betrug durch das Kiesdach im Mittel 71%, bei den Gründachaufbauten um die 90% (Tab.18).

Weiterhin zeigten die Messungen, dass diese Dämpfungsfunktion auch bei höheren Niederschlagsintensitäten erhalten bleibt (Abb.41). So lag bei starken Intensitäten der Dämpfungsbetrag beim Kiesdach bei ca. 40%, bei den Gründachaufbauten um die 80%. Bei mittleren Niederschlagsintensitäten trat i. d. R. bereits wieder ein sehr hoher Dämpfungsbetrag auf.

Die zeitliche Verzögerung der Abflussspitze relativ zum konventionellen Dach betrug im Mittel 8min beim Kiesdach, 6min beim extensiven Gründach und 7min bei der Mischform (Tab.18). Eine starke Streuung dieser Werte weist bereits auf die Abhängigkeit von anderen Faktoren wie meteorologische Bedingungen, Grad der Vorsättigung und Charakteristik des Niederschlages hin. Während das Kiesdach nach Regenende relativ rasch entleert wird, bleibt Niederschlag im Gründachsubstrat lange gespeichert, wodurch die Abflussspitze eines darauffolgenden Ereignisses nur noch weniger stark verzögert wird. Im Gegensatz zum extensiv begrüntem Dach unterlag das gemischte Dach einer teilweisen Nutzung als Dachterrasse, wobei Kübelpflanzen z.T. künstlich bewässert wurden. Die Messungen zeigen, dass dann eine ähnliche Wirkung auftritt wie bei einer rein extensiven Begrünung.

4.5.3 Flächenhafte Wirkung von Bäumen und Gründächern auf Spitzenabflüsse

Um die flächenhafte Wirkung von Bäumen und Gründächern auf die Spitzenabflüsse im Untersuchungsgebiet abschätzen zu können, wurde eine Simulation mit einer 30-jährigen, synthetischen Regenreihe (LUBW 2007a) und dem in Kap.3.6 beschriebenen Modell durchgeführt, in welches flächentreu alle Gründächer und Baumkronenflächen im Untersuchungsgebiet eingingen. Die im Gelände auskartierten und vermessenen Kronendurchmesser ergeben eine Gesamt-Baumkronenfläche von ca. 1,55 ha, was fast 10% der angekoppelten Gesamtfläche des Untersuchungsgebietes entspricht. Von der insgesamt vorhandenen Dach- und Balkonfläche (Grundfläche) von rd. 4,3 ha bestehen 1,96 ha aus Gründächern und begrünten Balkonen (ca. 13 % der Gesamtfläche). Damit besitzen etwa die Hälfte aller Dächer einen Gründachaufbau, wobei es sich überwiegend um extensive Dachbegrünung handelt. Darin enthalten sind auch Dächer von Nebengebäuden wie z.B. Fahrradschuppen.

Für die modelltechnische Betrachtung des Einflusses auf die maximalen Wasserstände in Teilmulden wurden Teil-Einzugsgebiete ausgesucht, die eine hohe Anzahl an Bäumen und Gründächern aufweisen. Die Simulationen zeigten, dass die Bäume im Modell im Mittel den maximalen Wasserstand in den Mulden um ca. 15% senken und die Gründächer um ca. 30%.

Die simulierten Spitzenabflüsse am Überlauf zum Vorfluter wurden durch die vorhandenen Bäume im Modell im Mittel um ca. 5% gesenkt und durch die Gründächer um ca. 20% (Abb.42).

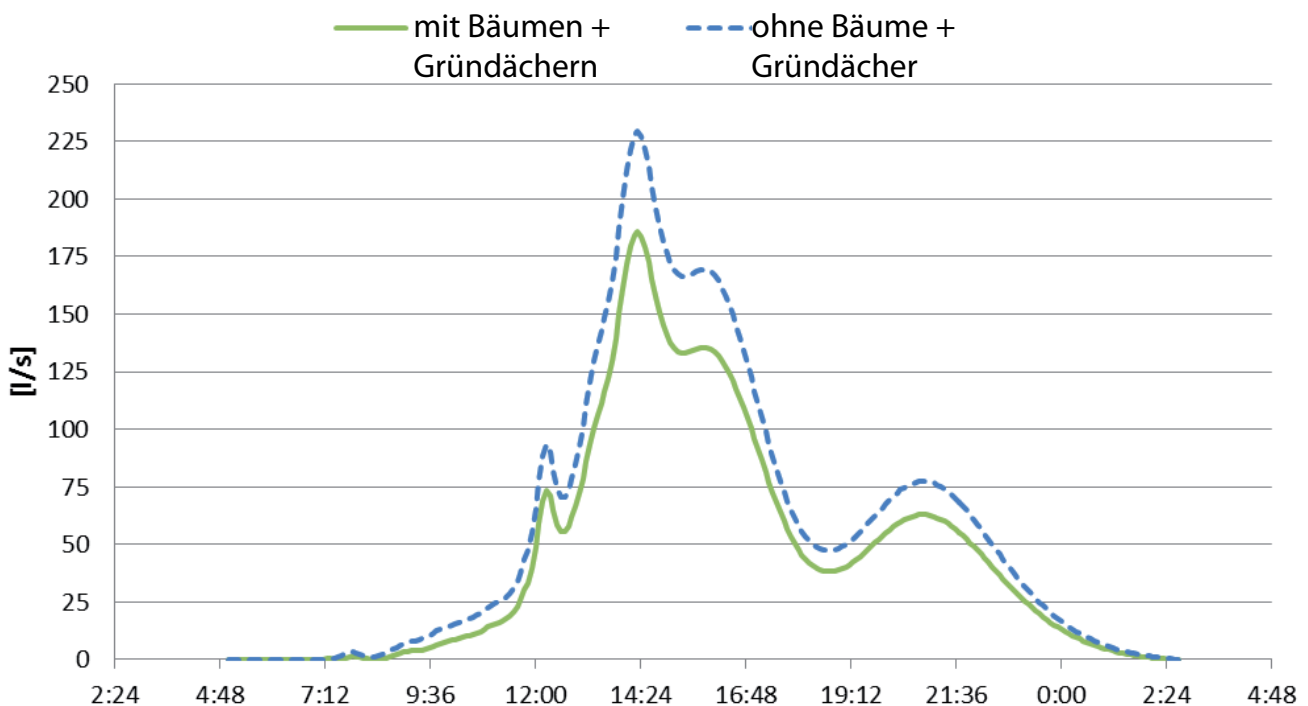


Abb.42 Modellierter Spitzenabfluss am Überlauf für das Ereignis 30.05.1996 der 30-jährigen, synthetischen Regenreihe (Datenquelle: LUBW 2007a) mit (grün) und ohne (blau) Berücksichtigung von Bäumen und Gründächern.

4.6 Einfluss dezentraler Maßnahmen mit und ohne Mulden-Rigolen-System

Um den Einfluss der dezentralen Regenwasserbewirtschaftungs-Maßnahmen (RWB) in ihrem jeweiligen Flächenanteil auf den Gebietsrückhalt des Untersuchungsgebietes quantifizieren zu können (Kap. 3.7), wurden Langzeitsimulationen mit dem in Kap. 3.6 beschriebenen Modell durchgeführt. Dabei

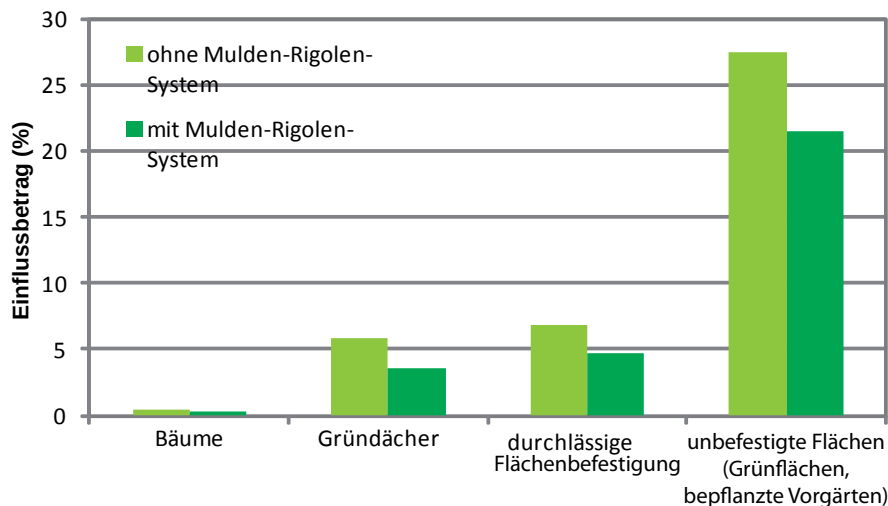


Abb. 43 Einfluss einzelner RWB-Maßnahmen auf den Gebietsrückhalt des Untersuchungsgebietes ermittelt aus Langzeitsimulation (30a, synthetisch, LUBW 2007a) für den Fall, dass wie bestehend ein Mulden-Rigolen-System nachgeschaltet ist (dunkelgrün) oder eine reine Ableitung stattfindet (hellgrün).

wurde die Rückhalte- und Speicherwirkung einzelner dezentraler Maßnahmengruppen sukzessive unwirksam gemacht, indem sie in konventionell gestaltete Flächen (asphaltierte Flächen bzw. Blechdächer) umgewandelt wurden. Um zusätzlich den Einfluss des Mulden-Rigolen-Versickerungssystems, welches allen dezentralen Maßnahmen nachgeschaltet ist, quantifizieren zu können, erfolgte jeweils eine Betrachtung mit und ohne Mulden-Rigolen-System. Der Fall ohne Mulden-Rigolen-System entspräche praktisch einem Entwässerungskonzept aus dezentralen Maßnahmen + Regenwasserkanal mit reiner Ableitung, sodass dann die gesamte Rückhaltewirkung auf den Flächen erzeugt würde.

Die Simulation des individuellen Einflusses der Maßnahmengruppen

- 1) Bäume --> ca. 10% Flächenanteil
- 2) Gründächer --> ca. 10% Flächenanteil (inkl. Nebengebäude, wie z.B. Fahrradschuppen)
- 3) Durchlässige Flächenbefestigungen --> 10,4% Flächenanteil (verschiedene Fugenpflaster, Rasenfugenpflaster)
- 4) Unbefestigte Flächen (öffentliche und private Grünflächen, bepflanzte Vorgärten, Beete) --> ca. 44% Flächenanteil

zeigt, dass bei Kombination mit Mulden-Rigolen-System die Bäume den Gesamtrückhalt um 0,3% erhöhen können (Abb. 43), die vorhandenen Gründächer um 3,5% und die durchlässigen Flächenbefestigungen um 4,8%. Den größten Einfluss auf die Rückhaltewirkung haben modelltechnisch die vorhandenen Grün- und Beetflächen mit 21,5%. Bei einem Wegfall des Mulden-Rigolen-Systems würde sich der Einfluss des Rückhaltes auf den Flächen mit

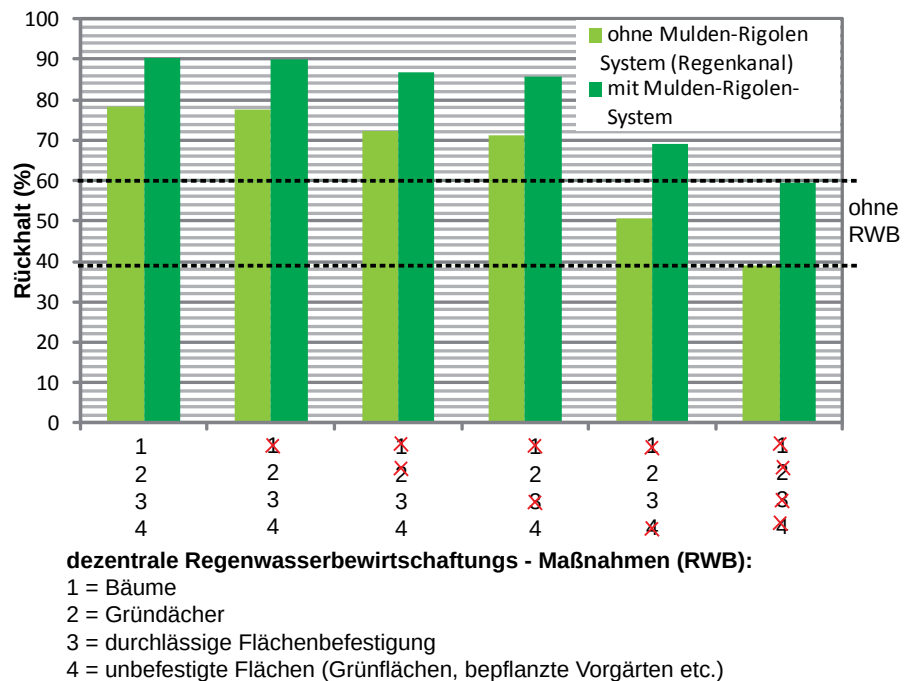


Abb. 44 Einfluss verschiedener Kombinationen dezentraler RWB-Maßnahmen auf den Gebietsrückhalt des Untersuchungsgebietes ermittelt aus Langzeitsimulation (30a, synthetisch, LUBW 2007a) für den Fall, dass wie bestehend ein Mulden-Rigolen-System nachgeschaltet ist (dunkelgrün) oder reine Ableitung stattfindet (hellgrün).

Beträgen von 0,4 %, 5,9 %, 6,8 % und 27,4 % noch stärker geltend machen, da dann die in gewisser Weise puffernde Wirkung der nachgeschalteten Rückhaltung/Versickerung entfallen würde. Normiert auf den Flächenanteil an der Gesamtfläche ergibt dies 0,04 % mehr Rückhalt pro 1 % Flächenanteil an Bäumen, 0,6 % pro 1 % Gründächer, 0,7 % pro 1 % durchlässige Flächenbefestigung und 0,6 % pro 1 % unbefestigte Fläche. Die hier ermittelten Einflussbeträge können als Erhöhung des Gebietsrückhaltes aber gleichzeitig auch als Verringerung des Abflusses gesehen werden.

Die Betrachtung verschiedener Kombinationen von dezentralen RWB-Maßnahmen mit und ohne Mulden-Rigolen-System (Abb.44) soll verschiedenen Szenarien entsprechen (z.B. "wie wäre der Rückhalt, wenn es keine Grünflächen und bepflanzten Vorgärten gebe" usw.). Es zeigt sich, dass zwischen einem Szenario ohne jegliche dezentrale Regenwasserbewirtschaftung (gestrichelte Linie) und einer großflächigen Umsetzung von RWB wie beim bestehenden Konzept eine Differenz von 31 % Gebietsrückhalt liegt. Im Fall ohne Mulden-Rigolen-System wären es ca. 39 % Differenz. Bei einem worst-case-Szenario ohne dezentrale Bewirtschaftung würde mit einem Gebietsrückhalt von nur 59 % mit bzw. 39 % ohne Mulden-Rigolen-System eine deutlich höhere Abflussmenge anfallen. Bei der Steigerung des Rückhaltes tragen die einzelnen Gruppen an Maßnahmen unterschiedlich stark bei. Es ist weiterhin erkennbar, dass mit zunehmendem Rückhalt auf den Flächen der zusätzliche Effekt des Mulden-Rigolen-Systems abnimmt. Von ca. 21 % Anteil am Gesamtrückhalt im Falle eines Konzeptes ohne jegliche dezentrale Regenwasserbewirtschaftung bis zu 12 % Anteil im Falle großflächig umgesetzter RWB wie im vorgestellten Untersuchungsgebiet. Da bei dezentraler RWB weniger Oberflächenabfluss entsteht, gelangt auch weniger in das Muldensystem, wodurch es weniger ausgelastet wird. Beim Vergleich zwischen einem Konzept mit Ableitung und mit

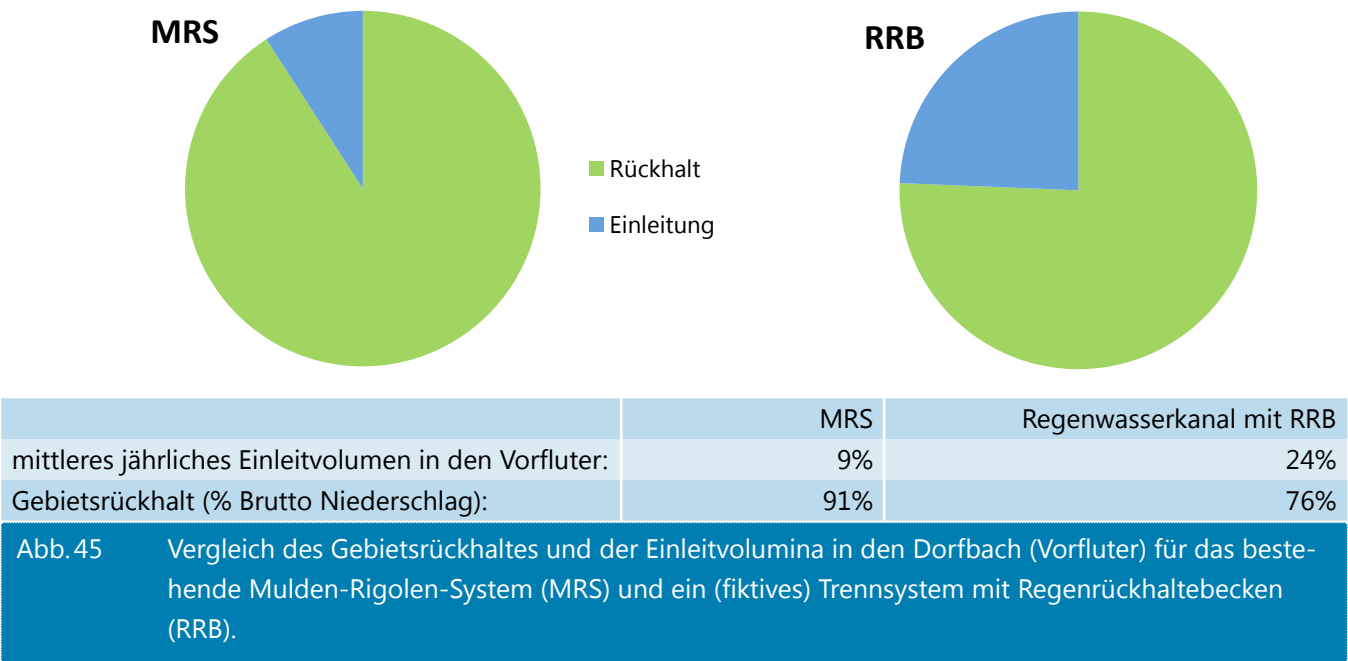
Mulden-Rigolen-System deutet sich an, dass bereits durch die Umsetzung von Gründächern + unbefestigte Flächen oder durchlässiger Flächenbefestigung + unbefestigte Flächen ohne ein Mulden-Rigolen-System ein vergleichbarer Rückhalt erzielt werden könnte, wie bei einer rein konventionellen Flächengestaltung, deren Oberflächenabfluss durch eine Mulden-Rigolen-Versickerung entwässert würde.

4.7 Vergleich zwischen Mulden-Rigolen-System und einem konventionellen Trennsystem mit Regenrückhaltebecken

Aufgrund der gegenwärtigen, gesetzlichen Bestimmungen (WHG, 2009) stellt sich bei Neuerschließungen die Wahl zwischen Trenn- oder Mischsystem nicht mehr, sondern es geht nun eher darum, wie der Niederschlagsanteil bewirtschaftet werden soll. Normalerweise erfolgt in der Praxis die Wahl eines grundsätzlichen Entwässerungssystems ohne Durchführung eines Kostenvergleichs aufgrund technischer, betrieblicher und politischer Randbedingungen. Bei den Investitionskosten wird in der Regel davon ausgegangen, dass Mulden-Rigolen-Systeme teurer sind als konventionelle Systeme. Vor allem wird aber häufig der Flächenverbrauch innerhalb des Baugebietes sowie die Pflege und Wartung solcher Anlagen gescheut. Der hier gezeigte Vergleich von Mulden-Rigolen-System (MRS) mit einem konventionellen Entwässerungssystem aus Regenwasserkanal mit Regenrückhaltebecken (RRB) hinsichtlich Kosten aber auch Rückhalt von Niederschlagswasser sollen Diskussionsgrundlage bilden, um zukünftige Siedlungsentwässerungsprojekte unter verschiedenen Aspekten zu bewerten.

4.7.1 Gebietsrückhalt und Spitzenabfluss

Um vergleichende Aussagen zu Gebietsrückhalt und Einleitvolumen und Spitzenabfluss in den Vorfluter der zwei unterschiedlichen Entwässerungssysteme zu erhalten, wurden für beide Möglichkeiten kontinuierliche Modell-

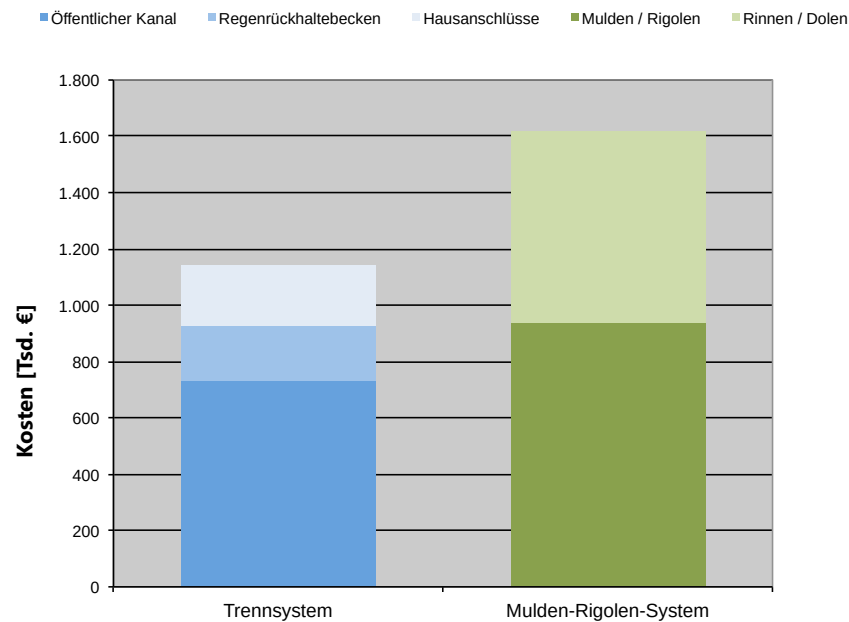


Simulationen mit einer 30-jährigen, synthetischen Regenreihe (LUBW 2007a) durchgeführt (Kap.3.8). Zunächst ist festzustellen, dass die Häufigkeit der Einleitereignisse in den Vorfluter beim Mulden-Rigolen-System geringer wäre als bei einem Trennsystem mit RRB. Kleinere Niederschlagsereignisse hält das Mulden-Rigolen-System komplett zurück, während größere Mengen nur anteilig und gedämpft eingeleitet werden. Im Gegensatz dazu kommen bei einem Rückhaltebecken alle Niederschläge, die nicht durch die dezentralen Maßnahmen auf der Fläche zurückgehalten werden vollständig zum Abfluss. Durch die Drosselung des Rückhaltebeckens sind so Spitzenabflüsse bis zu 200 L/s möglich. Höhere Abflüsse treten aus dem Trennsystem mit Regenrückhaltung nur dann auf, wenn das Beckenvolumen erschöpft ist und das Becken überläuft. Die dann auftretenden, maximalen Spitzenabflüsse sind in etwa vergleichbar mit den maximalen Spitzenabflüssen aus dem Mulden-Rigolen-System. Weiterhin wird durch das Mulden-Rigolen-System (MRS) im Vergleich zum konventionellen Trennsystem (TS) mit RRB eine um das ca. 3-fache Reduzierung der Einleitmengen in den Vorfluter erreicht (Abb.45). Die allgemein hohe Rückhaltewirkung des Untersuchungsgebietes ist auf die dezentralen Regenwasserbewirtschaftungs-Maßnahmen und die Flächenstruktur des Gebietes zurückzuführen.

4.7.2 Kosten

Im Folgenden werden die Investitions-, Betriebs- und Jahreskosten für das im Projekt vorhandene Mulden-Rigolen-System und ein fiktives konventionelles Trennsystem mit Regenrückhaltung gegenübergestellt (Kap.3.8). Sämtliche Kosten sind als Nettokosten aufgeführt.

Investitionskosten



Trennsystem mit RRB		Mulden-Rigolen-System	
Kanalnetz	940.000 €	Mulden / Rigolen	940.000 €
Regenrückhaltebecken	200.000 €	Rinnen / Dolen	680.000 €
Summe	1.140.000 €	Summe	1.620.000 €

Abb. 46 Gegenüberstellung der Investitionskosten von (fiktivem) Trennsystem mit Regenrückhaltebecken (RRB) und dem bestehenden Mulden-Rigolen-System (MRS).

Betriebskosten

Die Betriebskosten enthalten die üblichen Kosten für Wartung und die Sicherstellung des laufenden Betriebes. Beim Mulden-Rigolen-System sind dies vor allem die Mäharbeiten der Mulden, während beim konventionellen Trennsystem insbesondere die Kanalreinigung des Kanalnetzes und die Mäharbeiten des Regenrückhaltebeckens zu nennen sind. Alle Werte sind tatsächlich anfallende Kosten bzw. übertragene Daten aus anderen ähnlichen Entwässerungssystemen der Stadt Freiburg.

Tab. 19 Tatsächliche Betriebskosten des bestehenden Mulden-Rigolen-Systems.		
Arbeiten	Kosten pro Jahr [€]	
Mäharbeiten / Kontrolle	7201	
Inspektion	992	
KI-Sonderfahrzeug	240	
Summe	8433	
Summe gerundet	8400	

Tab. 20 Hypothetische Betriebskosten eines konventionelles Trennsystems mit Regenwasserkanal und Regenrückhaltebecken.		
Arbeiten	Kosten / lfd. m Kanal	Kosten pro Jahr [€]
Kanalinspektion	0,17	290
Sonderfahrzeug	0,04	68
Kanalreinigung	0,87	1486
Sonderfahrzeug Jährlich	0,21	359
Kontrolle / Mäharbeiten RRB	-	2800
Summe	-	5003
Summe gerundet	-	5000

Jahreskosten:

Die Jahreskosten umfassen die Investitions- und die Betriebskosten und geben die auf lange Sicht vorhandenen jährlichen Kosten wieder. Der Kapitalwiedergewinnungsfaktor (Annuitätenfaktor) errechnet sich nach

$$FAKR(i; n) = \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

mit den angesetzten Werten

Zinssatz [i] 3 %

Abschreibungsdauer [n] 66 a (einheitlicher Satz, Ansatz badenova)

Damit ergeben sich die folgenden Jahreskosten:

Abb. 47 Berechnung der Jahreskosten für beide Systeme.		
Kostenart	Mulden-Rigolen-System	konventionelles Trennsystem
	[EUR]	[EUR]
Investitionskosten	1.620.000	1.140.000
Betriebskosten	8.400	5.000
Berechnung der Jahreskosten	1.620.000 x KFAKR(3;66) + 8.400	1.140.000 x KFAKR(3;66) + 5.000
KFAKR(3;66)	0,03497	0,03497
Jahreskosten	65.053,18	44.867,05

4.8 Die neue Webanwendung FReWaB zur Simulation der kleinräumigen Wasserbilanz von Regenwasserbewirtschaftungs-Maßnahmen

Die im Rahmen des vorliegenden Projektes neu entwickelte Webanwendung FReWaB (<http://www.naturnahe-regenwasserbewirtschaftung.info>) konzeptionalisiert verschiedene Maßnahmen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung:

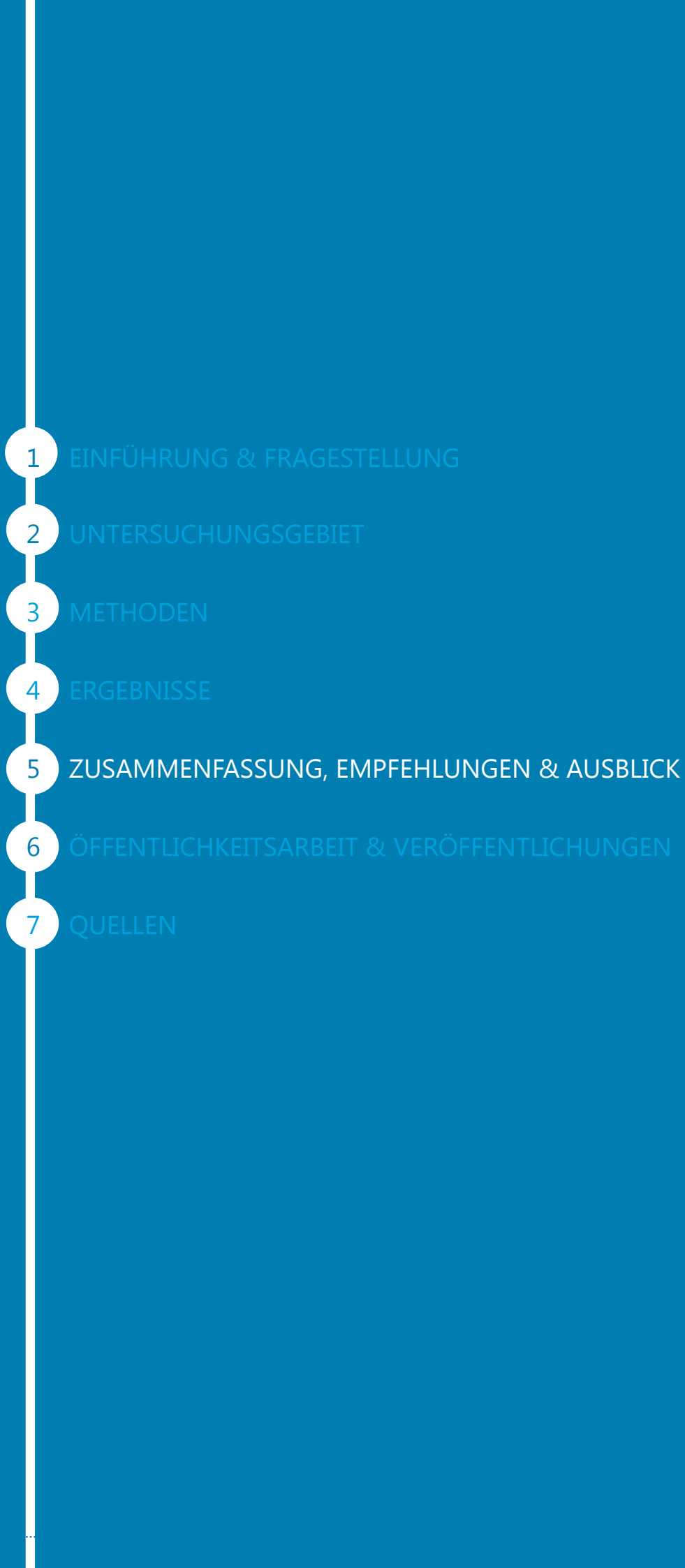
- verschiedene durchlässige Flächenbeläge
- verschiedene Dachaufbauten
- Laub- und Nadelbäume
- Mulden- und Mulden-Rigolenversickerung
- Regenwassernutzung

Es ermöglicht, sich für verschiedene Kombinationsmöglichkeiten und Flächengrößen die kleinräumige Wasserbilanz eines Grundstückes simulieren zu lassen. Als Vergleich dient die potentiell natürliche Bilanz einer unbebauten Fläche. Außerdem ist es möglich, sich für Einzelereignisse die direkte Reaktion der Bilanzkomponenten des gewählten Konzeptes anzuschauen (u.a. Ludwig, 2012).

Somit wird es Behörden, Gemeinden, Versorgern und Privatpersonen ermöglicht, den Einfluss von verschiedenen dezentralen Maßnahmen abzuschätzen und hinsichtlich eines naturnahen Zustandes zu bewerten. Der Planer oder Entscheidungsträger kann dadurch Szenarien direkt vergleichen und neben anderen Randbedingungen auch unter dem Aspekt „naturnaher Wasserhaushalt“ bewerten. Eingebunden in eine umfassende Informationsplattform zum Thema naturnahe Regenwasserbewirtschaftung soll sie zugleich die breite Öffentlichkeit für die Themen Flächenversiegelung, dezentrale Regenwasserbewirtschaftung und naturnaher Wasserhaushalt sensibilisieren. Die Anwendung ist kostenlos und ohne Anmeldung verfügbar.



Abb. 48 Weboberflächen der neuen Webanwendung FReWaB zur Simulation der kleinräumigen Wasserbilanz und zu dezentraler Regenwasserbewirtschaftung.

- 
- 1 EINFÜHRUNG & FRAGESTELLUNG
 - 2 UNTERSUCHUNGSGEBIET
 - 3 METHODEN
 - 4 ERGEBNISSE
 - 5 ZUSAMMENFASSUNG, EMPFEHLUNGEN & AUSBLICK
 - 6 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT & VERÖFFENTLICHUNGEN
 - 7 QUELLEN

Zusammenfassung, Empfehlungen und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Einige grundsätzlich positiven Aspekte von Regenwasserversickerung und dezentraler Regenwasserbewirtschaftung (RWB) im Vergleich zu konventionellen, zentralen Maßnahmen wie reine Ableitung oder Regenrückhaltebecken sind:

- Niederschlag wird bereits am Ort des Entstehens bzw. im zu entwässernden Gebiet zurückgehalten und kann ortsnahe versickern und verdunsten
- durch Versickerung über eine belebte Bodenschicht kann trotz Flächeninanspruchnahme eine Grundwasserneubildung stattfinden und gleichzeitig findet eine Reinigung über die Filterpassage statt
- durch die höhere Verdunstung wird das Kleinklima verbessert
- durch die Reduzierung von Abflussvolumen und Spitzenabflüssen und die zeitliche Verzögerung von Abflussspitzen werden Kanalisation und/oder Vorfluter entlastet, wodurch Kosten gespart werden und Gewässer aus ökologischer und Hochwassersicht entlastet werden
- prinzipiell ist eine Annäherung an eine naturnahe Wasserbilanz möglich

Bei dem hier untersuchten Entwässerungskonzept aus dezentralen RWB-Maßnahmen in der Fläche (Gründächer, durchlässige Flächenbefestigung, Grünflächen, Bäume) kombiniert mit einer nachgeschalteten Versickerung über ein Mulden-Rigolen-System konnte mit 87 % (2011) und 66 % (2012) ein sehr hoher jährlicher Gebietsrückhalt erreicht werden. Gebiete ohne jegliche Form der RWB weisen lediglich 20-40 % Gebietsrückhalt auf (Sartor, 2002).

Da in beiden Jahren erhöhte Grundwasserstände bis hin zu temporärer Grundwasserdrainage über die Muldensohle auftraten, kann geschlussfolgert werden, dass trotz zur Versickerung schlecht geeigneter Bedingungen (undurchlässige Deckschichten, hohe Grundwasserstände) eine naturnahe Bewirtschaftung von Regenwasser möglich ist. In Zeiten mit hohen Grundwasserständen und überdurchschnittlich ergiebigen Niederschlägen ist dann mit 66 % von einem eingeschränkten aber immer noch hohen Jahresrückhalt auszugehen.

Bei einer ereignisweisen Betrachtung des Gebietsrückhaltes lagen 88 % aller Ereignisse innerhalb der Vorgaben, was bei Niederschlägen bis zu 30 mm beobachtbar war. Größere Ereignisse führten alle zu erhöhtem Abfluss in den Vorfluter, traten jedoch auch nur selten auf. Angesichts des Vergleiches mit Planungsannahmen wurden einzelne Ereignisse teilweise deutlich besser aber auch deutlich schlechter zurückgehalten als ursprünglich angenommen. So wurden sommerliche Starkregen, die z.T. mit Jährlichkeiten von 1-0,5 Jahren vergleichbar sind, und Ereignisse mit mittleren Intensitäten sowohl innerhalb als auch außerhalb der Vorgaben zurückgehalten. Insbesondere bei andauernden und ergiebigen Niederschlägen ohne längere Trockenzeiten, die in Summe zu meist überdurchschnittlichen Monatssummen führten, war der potentiell mögliche Rückhalt nur eingeschränkt wirksam. Einerseits, da die Rigolenspei-

cher durch die dann ebenfalls großflächig reagierenden Grundwasserstände eingestaut werden. Andererseits, da für die dezentralen Maßnahmen zu wenig Zeit zur Verfügung steht, um die Speicher durch Verdunstung oder Versickerung zu regenerieren. Im Winter wird dies noch verstärkt, da weniger Verdunstungsenergie zur Verfügung steht.

Das maximal aufgetretene Rückhaltevolumen von ca. 25mm, wovon schätzungsweise 16mm auf die dezentralen Maßnahmen entfallen, liegt weit über den Erwartungen der Planung. Es zeigt das große Rückhaltepotential von dezentralen Maßnahmen und Mulden-Rigolen-Versickerung, vorausgesetzt, dass zwischen Niederschlagsereignissen eine ausreichende Entleerung der Einzelspeicher erfolgt ist und optimale Randbedingungen gegeben sind.

Anhand von Messungen an Bäumen und Gründächern im Stadtgebiet konnte gezeigt werden, dass freistehende Bäume je nach Ereignis mit 43-77 % und kiesgefüllte oder begrünte Dachaufbauten mit 40 % bzw. 70 % sehr große Mengen an Niederschlag zurückhalten können. Gleichzeitig dämpften die Bäume und Gründächer Abflussspitzen um im Mittel 60 % bzw. 90 %. Durch alternative Dachaufbauten konnte weiterhin eine Verzögerung der Abflussspitze von im Mittel 6-8min erreicht werden. Diese Effekte bleiben in etwas schwächerer Form auch bei Starkregen wirksam. Die simulierten Rückhalte weiterer dezentraler RWB-Maßnahmen wie durchlässige Flächenbefestigung und unbefestigte Flächen einzeln und in Kombination zeigen, dass im Mittel je nach Maßnahme jeweils pro 1% Flächenanteil bis zu 0,7% mehr Rückhalt erreicht werden kann als bei einer konventionell gestalteten Fläche. Je flächiger dezentrale Maßnahmen eingesetzt werden, desto größer ist der Effekt. Diese Reduzierung des Oberflächenabflussvolumens durch Rückhalt auf der Fläche kann bei entsprechendem Flächenanteil vergleichbar bis höher sein als es mit einem reinen Mulden-Rigolen-System erreichbar wäre und somit zentrale Versickerungs-Maßnahmen kompensieren.

Bei der Planung 1996 wurde primär das Sicker- und Retentionsverhalten des Mulden-Rigolen-Systems bilanziert, während die Rückhalteigenschaften auf den Flächen und dezentralen RWB-Maßnahmen, insofern überhaupt bekannt, über pauschale Anfangsverluste und Abflussbeiwerte in die Berechnungen eingingen. Die Untersuchungen zeigten, dass die Sickerleistung des Mulden-Rigolen-Systems im Bereich des Planungswertes liegt. Durch ein nachträglich verringertes oberirdisches Retentionsvolumen und ein durch Grundwasser-einstau häufig nur begrenzt verfügbares unterirdisches Retentionsvolumen, ist anzunehmen, dass das bestehende Mulden-Rigolen-System allein eher weniger Niederschlagsvolumen zurückhält und versickert als ursprünglich angenommen. Die Tatsache, dass dennoch auch bei großen und intensiven Niederschlägen ein sehr guter Rückhalt beobachtbar war, lässt den Schluss zu, dass dies auf die dezentralen Maßnahmen zurückzuführen ist, welche die geringere bis temporär ausgesetzte Wirkung des Mulden-Rigolen-Systems kompensieren. Diese Möglichkeit konnte hypothetisch durch Modellsimulationen belegt werden.

Die Kombination dezentraler RWB und kaskadenartig angelegtem Mulden-Rigolen-Versickerungssystem erreichte eine durchschnittliche Überlaufhäufigkeit von ca. 40 Überläufen pro Jahr und hielt 73 % aller Niederschläge komplett zurück. Angenommen, dass ohne diese Maßnahmen bei einer rein konven-

tionellen Entwässerung alle Niederschläge mehr oder weniger zum Abfluss kommen würden, entspräche dies einer fast 4-fachen Verringerung der Überlaufhäufigkeit. Dies wirkt sich prinzipiell positiv auf das vorflutende Gewässer aus. Die dabei auftretenden Spitzenabflüsse zeigten im Messzeitraum bei äußerst ungünstigen Randbedingungen einen Maximalwert von 600 L/s. In Anbetracht einer gewünschten hydraulischen Entlastung des Vorfluters lagen diese damit deutlich unterhalb des einmal pro Jahr zulässigen Maximalwertes. Bei Niederschlägen mit ähnlicher Charakteristik wie zur Planung verwendete Bemessungsregen zeigte sich, dass die tatsächlich gemessenen Spitzenabflüsse um Faktor 3 bis 7 geringer ausfielen, als von der Planung her erwartet wurde. Dies lässt den Schluss zu, dass die Dämpfung von Abflussspitzen durch das Gesamtkonzept unterschätzt worden ist.

Weiterhin werden kleinere Niederschläge bzw. die ersten Anteile von Niederschlägen, welche meist die Haupt-Schadstofffrachten enthalten, entweder bereits auf der Fläche zurückgehalten oder verbleiben im Muldensystem, wo sie durch Versickerung über die belebte Bodenzone gereinigt werden. Dadurch werden grundsätzlich Stoffeinträge in den Vorfluter verringert. Die gemessenen Abflusskonzentrationszeiten zwischen Niederschlag und Abfluss am Überlauf von mindestens 30 min zeigen eine starke Verzögerung des Niederschlags-Abfluss-Prozesses im zu entwässernden Gebiet durch die umgesetzten Maßnahmen an. Im Zusammenspiel mit der Abflussdynamik des Vorfluters traf im Untersuchungszeitraum die maximale Einleitung aus der Siedlung bei größeren Ereignissen geringer Jährlichkeiten in der Regel 8-19 min nach dem Scheitelabfluss ein. Die dadurch verursachte Erhöhung des Scheitelabflusses im Dorfbach lag bei maximal 4,5 %.

Im Allgemeinen war bei allen funktionellen Größen, insbesondere auf der Skala von Ereignissen, eine große Variabilität beobachtbar, was Ausdruck für das komplexe Zusammenspiel zwischen meteorologischen Bedingungen, Niederschlagscharakteristik, Vorregenereignissen und Grundwasserständen ist. Dies führt zwar aus planerischer Sicht zu einer größeren Unsicherheit bei der Berechnung, spiegelt jedoch grundsätzlich eher einen naturnahen Zustand wider als eine konventionell und zentral gestaltete Entwässerung.

Um allgemeingültige Aussagen für das bestehende System treffen und konkrete Einflussfaktoren hinreichend genau quantifizieren zu können, wären längere Datenreihen nötig, um die Reaktion auf ein breites Spektrum an v.a. seltenen Niederschlagsereignissen und speziellen klimatischen Bedingungen einbeziehen zu können.

5.2 Empfehlungen

Planung

Für die Planung von Entwässerungskonzepten mit dezentraler RWB und in Kombination mit Mulden-Rigolen-Systemen wurde in dieser Studie eine experimentelle Datengrundlage geschaffen, um Zielgrößen in Zukunft realistischer einschätzen zu können. Weiterhin wurden Schwachpunkte der Funktionalität aufgezeigt, die auf Niederschlags- und äußere Randbedingungen zurückzuführen sind und die bei einer zukünftigen Planung im Voraus bedacht werden können.

Im Allgemeinen wird die Funktionalität v.a. durch das Zusammentreffen mehrerer, ungünstiger Bedingungen eingeschränkt, wie z.B. starker Vorsättigung mit Rigoleneinstau plus Niederschläge mit hoher Intensität. Da diese Komplexität der Niederschlags-Abfluss-Reaktion mit Bemessungsregen und mittleren Jahreswerten nicht abschätzbar ist, empfiehlt sich prinzipiell eine Kontinuumsimulation, aus der dann bedarfsweise einzelne Ereignisse entnommen werden können. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass es im Winter zu Schneeakkumulation und –schmelze oder frostbedingter Bildung einer Eisdecke kommen kann, was den Rückhalt stark einschränken kann.

Bei der Durchführung von Modellberechnungen ist generell zu berücksichtigen, dass einige Einflussfaktoren wie Schneeakkumulation und Schmelze aber auch Rigoleneinstau durch steigende Grundwasserspiegel i.d.R. nicht implementiert sind, weshalb Modelle die Abflüsse für diese Periode stark unter- bzw. überschätzen. Weiterhin werden die Abfluss-, Sicker- und Verdunstungsprozesse vieler RWB-Maßnahmen oft nicht oder nur unzureichend von Modellen abgebildet. So konnte z.B. festgestellt werden, dass die Hydraulik eines längeren Systems begrünter Mulden nicht ausreichend genau implementiert war. Da Maßnahmen einer naturnahen RWB im Idealfall quasi-natürlichen Flächen entsprechen, unterliegen sie andererseits auch einer großen Variabilität hinsichtlich der Niederschlags-Abfluss-Reaktion, was wiederum an Modelle aber auch die Parametrisierung durch den Anwender neue Herausforderungen stellt.

Bei Neuerschließungen oder Konversionen besteht zusätzlich die Unsicherheit der tatsächlichen zukünftigen Bebauung. Um die zur Abschätzung des zukünftigen Regenwasserabflussvolumens notwendigen Flächenparameter bereits bei der Planung möglichst genau einbeziehen zu können, erscheint es zielführend, wenn bereits zu Beginn konkrete Angaben zu Ausdehnung und genauer Beschaffenheit der Flächen z.B. im Bebauungsplan vorhanden sind. Es ist weiterhin empfehlenswert, für Berechnungen die explizit zur dezentralen RWB geeigneten Flächen entsprechend ihren Speicher- und Abflusseigenschaften abzubilden, da sie je nach Flächenanteil einen maßgeblichen Einfluss auf die Dynamik und das Volumen von Oberflächenabfluss haben können.

Die abflussmindernde und abflussverzögernde Wirkung von Bäumen und Gründächern in verschiedenen Ausprägungen konnte bestätigt und mit konkreten Zahlen quantifiziert werden. Je flächiger diese umgesetzt werden, desto größer ist der Effekt auf Rückhalt, Abflusssdämpfung und –verzögerung. Zusätzlich können Bäume, Vegetation und Gründächer einen beträchtlichen Anteil des zurückgehaltenen Niederschlages verdunsten, und so einen naturnahen Wasserhaushalt wiederherstellen. Zusammen mit zahlreichen weiteren positiven Wirkungen auf Stadtklima, Lebensqualität und Biodiversität stellen Bäume und Gründächer ein großes Potential für die nachhaltige Stadtplanung dar.

Bei der Beurteilung und Angabe von Zielgrößen sollte die ereignisabhängige Variabilität und die Dynamik der Prozesse je nach beeinflusstem Umweltsystem unbedingt berücksichtigt werden. Über einen längeren Zeitraum betrachtet, mitteln sich ereignisabhängige Variabilitäten aus, sodass eine Jahresbilanz innerhalb bestimmter Vorgaben liegen kann, während einzelne Ereignisse stark von den Vorgaben abweichen können. Aufgrund dessen

erscheint die Angabe von Jahresbilanzen lediglich für Wasserhaushaltsbetrachtungen ausreichend. Um den gewässerökologischen oder hochwasserrelevanten Einfluss auf das vorflutende Gewässer abschätzen zu können, ist eine ereignisabhängige Betrachtung notwendig, die zudem die Dynamik verschiedener Abflussvorgänge berücksichtigt.

Angesichts der beobachteten Abflusskonzentrationszeiten von mindestens 30 min und einem maximal aufgetretenen Rückhaltevolumen von ca. 25 mm scheinen die zur Berechnung der Hydraulik des Grabensystems bei der Planung verwendeten Bemessungsregen von 20,2 mm in 15 min und 13 mm in 15 min den Flächeneigenschaften nicht optimal gerecht zu werden.

Der Kostenvergleich zwischen naturnahem und konventionellem System zeigt, dass ein Mulden-Rigolen-System hinsichtlich der Jahreskosten um ca. 45 % höher liegen kann als ein vergleichbarer konventioneller Regenwasserkanal mit Regenrückhaltebecken in Erdbauweise. Hinsichtlich der naturnahen Versickerung, der Rückhaltewirkung, der maximalen Spitzenabflüsse und der Häufigkeit der Einleitungen in den Vorfluter erweist sich das Mulden-Rigolen-System jedoch als deutlich besser als das konventionelle System. Hier könnten kurzfristig höhere Kosten durch eine langfristige Einsparung bei Kosten für gewässerökologische und wasserhaushaltsbezogene Maßnahmen kompensiert werden, was jedoch näher untersucht werden müsste.

Praktisches zu Bau, Umsetzung, Wartung, Betrieb

Das abschnittsweise Anlegen des Mulden-Rigolen-Systems nach Fertigstellung des Hochbaus erwies sich als sehr sinnvoll, da die untersuchten Rigolen keine Hinweise auf Kolmation zeigten.

Durch Rollrasen, welcher zu Beginn mit Holzpflocken befestigt wird, kann sofort nach Fertigstellung der Mulden eine gewisse Schutzwirkung vor Verunreinigung aber auch vor Bodenerosion erzielt werden. Eine temporäre Umzäunung der Mulden beugte einem Herabrutschen des anwachsenden Rollrasens durch umherlaufende Tiere oder spielende Kinder vor. Die dauerhafte Umzäunung der Mulden würde einer teilweise auftretenden Zerstörung der Grasnarbe und einer Bodenverdichtung der Mulden durch Bespielung und Tiere vorbeugen. Andererseits passt sich die Anordnung der Mulden ohne Zaun besser ins Stadtbild ein und die so zusätzlich geschaffene Grünfläche wird von spielenden Kindern gern genutzt, was wiederum die Akzeptanz in der Bevölkerung erhöht. Grundsätzlich wäre eine Doppelnutzung begrünter Mulden als Entwässerungsanlage und als Spielfläche denkbar, was jedoch frühzeitig in die Bauleitplanung integriert werden müsste. Aus Sicherheitsgründen sind verrohrte Bereiche, Zuleitungen und Öffnungen von Überlaufschächten ausreichend mit Schutzgittern zu sichern. Die mit Wildblumen und Wildkräutern artenreich gestalteten Mulden, welche lediglich 2-mal pro Jahr gemäht werden, bereichern im Sommer das Stadtbild und stellen Lebensraum für Insekten dar. Durch das temporäre Sichtbarmachen des Wassers wird außerdem wieder ein Bezug zur Natur und natürlichen Prozessen hergestellt, der von den Anwohnern als sehr positiv empfunden wird.

Durch nachträgliche Anpassungen während des Baus mussten einige Muldenböschungen sehr steil ausgeführt werden, was sich im Nachhinein als unvorteilhaft erwiesen hat. Zum Einen erodieren die Flanken schneller und eine

Begrünung wächst schwerer an. Zum Anderen gestalten sich Wartungsarbeiten wie Mahd oder ein eventuelles Ausschälen und Austauschen von Boden durch das Abrutschen von Geräten als aufwändig.

Durch die morphologische Vertiefung agieren die Mulden unfreiwillig als Sammelbecken für Müll und Laub, welche durch Wind oder Zuläufe eingetragen werden. Einerseits positiv, stellt die Reinigung andererseits einen zusätzlichen betrieblichen Aufwand dar.

Beim Betrieb des Mulden-Rigolen-Systems mit oberflächiger Zuleitung zeigte sich, dass das Anlegen und die Ableitung über oberflächige Pflasterrinnen keinerlei Probleme mit sich bringen. Auch im Winter bei Frost wurden keine Probleme berichtet. Andererseits ist durch deren Einmündung in Einlaufschächte und die unterirdische Weiterleitung zum Muldensystem für Laien oft nicht ersichtlich, dass ein Anschluss an die Versickerungsmulden besteht. Bei Unkenntnis können so unter Umständen ungeeignete Stoffe wie Reinigungswasser o.ä. über die Gullyöffnungen entsorgt werden, in der Annahme es handle sich um ein Mischsystem. Auch die Versickerungsmulden sind nicht über Hinweistafeln o.ä. als Versickerungsanlagen erkenntlich, sodass sich für Anwohner deren Funktion oft nicht erschließt, sodass die entsprechenden Verhaltensregeln nicht vorausgesetzt werden können.

Als quasi-natürliches System unterliegt das Muldensystem im Laufe der Zeit Veränderungen, wodurch sich z.B. das Rückhaltevolumen oder auch die Sickerate ändern können. Daran können künstliche Prozesse wie Auffüllung, Bodenaustausch, Verdichtung aber auch natürliche Prozesse wie Sedimentation, Erosion und Bodenbildung beteiligt sein. Die Untersuchungen zeigten, dass sich zwar die Infiltrationskapazität einiger Teilmulden außerhalb des optimalen Bereiches befindet, die Gesamtsickerleistung des Systems jedoch auch nach ca. 8-12 Jahren Betriebszeit noch innerhalb der Erwartungen liegt. Durch ein im Vergleich zur Planung stark verringertes Muldenvolumen ist allerdings davon auszugehen, dass tatsächlich weniger Volumen über die Mulden versickert als ursprünglich geplant.

Zukünftige Evaluierungen

Der Vergleich von Messergebnissen mit Annahmen aus der Planung kann als direkte Erfolgskontrolle der Umsetzung von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen dienen. Mögliche Abweichungen von den Zielgrößen können Schwachstellen im Bau und Betrieb des Systems oder auch den zu Grunde liegenden Annahmen aufzeigen und somit nach der Fertigstellung weitere Optimierungsansätze bieten. Die vorliegende Studie liefert Ansätze für zukünftige Evaluierungen von Entwässerungskonzepten.

Aufgrund der bereits erwähnten Variabilität und Komplexität der Niederschlags-Abfluss-Reaktion von naturnahen RWB-Maßnahmen sind ereignisbezogene Zielgrößen prinzipiell aussagekräftiger.

Um eine Erfolgskontrolle durchführen zu können, ist es notwendig, dass während der Planung und/oder durch Regelwerke konkrete Zielgrößen definiert und ausreichend genau dokumentiert sind. Weiterhin sollten diese auch messtechnisch erfassbar sein, wofür hier einige Möglichkeiten aufgezeigt wurden. So ermöglicht z.B. der Bezug aller Wasserhaushaltsgrößen auf den gesamten Niederschlag (anstatt des effektiven Niederschlages) eine direkte

Vergleichbarkeit von Messungen mit Simulationsergebnissen und Planungsannahmen unabhängig von der Parametrisierung der Flächen. Insbesondere bei dezentralen Maßnahmen oder mehreren Zuflüssen sind genaue Zu- und Abflüsse einzelner Maßnahmen meist nicht messbar, sodass letztendlich nur die Gesamtwirkung aller Maßnahmen in Kombination erfassbar ist. Die Installation und der Betrieb dafür notwendiger Messgeräte erwiesen sich als sehr gut realisierbar.

Bei der Aufzeichnung von Datenreihen ist es wichtig, dass dies kontinuierlich, mit ausreichend hoher Auflösung von im Idealfall 1 min und über einen möglichst langen Zeitraum von mindestens mehreren Jahren erfolgt. Letzteres ist notwendig, um ein ausreichendes Spektrum an Niederschlägen und Randbedingungen aufzuzeichnen und somit die höhere Variabilität naturnaher RWB-Konzepte zu erfassen. Der große Vorteil kontinuierlicher Messreihen liegt dabei darin, dass der Systemzustand zu jedem beliebigen Zeitpunkt abrufbar ist. Weiterhin empfehlenswert ist der Beginn einer Messkampagne direkt nach Inbetriebnahme eines Entwässerungssystems oder eine zeitliche Staffelung, sodass auch Aussagen zum Langzeitverhalten des Systems nach mehreren Jahren Betriebszeit möglich werden.

Wünschenswert wäre es in Zukunft, größere Entwässerungsprojekte mit einem effizient gestalteten Monitoring messtechnisch zu begleiten und planerischen Spielraum zu lassen. Mit den gewonnenen Daten könnten dann die aus der Planung stammenden Modelle kalibriert werden, um wiederum das System nachträglich noch zu optimieren.

5.3 Ausblick

Einige der während des Projektes angelegten Messstellen sind momentan noch in Betrieb und es ist angestrebt diese, in Zusammenarbeit mit der badenova AG und der Stadt Freiburg längerfristig weiterzuführen um, eine Langzeitmessreihe des Niederschlags-Überlauf-Verhaltens aufnehmen zu können. Die Meteorologische Messstation ist online unter:

<http://www.hydrology.uni-freiburg.de/vauban/wetterstation.html>

Die Daten und Ergebnisse werden für weitere Auswertungen und Veröffentlichungen verwendet. Einige der Ergebnisse liefern erste Hinweise auf wichtige Fragen z.B. zur Wasserbilanz, was in Form weiterer Forschungsprojekte weiter verfolgt werden soll. Weiterhin werden die Ergebnisse in ihrer lokalen Bedeutung in einer Expertenrunde mit lokalen Vertretern aus Stadt- und Entwässerungsplanung, Behörden, Betreibern und Planungsbüros diskutiert werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse sind direkt in die neu entwickelte Webanwendung FReWaB eingeflossen, welche bereits online und kostenfrei nutzbar ist. Diese ist erweiterbar und kann so kontinuierlich ausgebaut werden. Die Einbindung auf öffentlichen Internetseiten zum Zwecke der Information der Öffentlichkeit und die Verbreitung unter Umwelt- und Fachverbänden und Bildungsanstalten ist angestrebt.



1

EINFÜHRUNG & FRAGESTELLUNG

2

UNTERSUCHUNGSGEBIET

3

METHODEN

4

ERGEBNISSE

5

ZUSAMMENFASSUNG, EMPFEHLUNGEN & AUSBLICK

6

ÖFFENTLICHKEITSARBEIT & VERÖFFENTLICHUNGEN

7

QUELLEN

Öffentlichkeitsarbeit & Veröffentlichungen

Um das Projekt national und international bekannt zu machen und die Forschungsergebnisse einem Fachpublikum aber auch der breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurden folgende Beiträge erstellt:

- Jackisch, N., Badillo, D. & Lange, J.: „Ergebnisbericht der Infiltrationsversuche in den Versickerungsgräben im Stadtteil Vauban, Freiburg“, November 2009,
http://www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/regenwasservauban/Bericht_Infiltr_Vauban_2009_11.pdf
- „Vauban: Evaluation einer beispielhaften Siedlungsentwässerung“, Jackisch, N., Weiler, M., Lange, J., Brendt, Th.; Vortrag Weltwassertag 2010, Regierungspräsidium Freiburg LGRB, 22.3. 2010
- „Rainwater infiltration in urban areas and implications for groundwater quality“, Jackisch, N., Weiler, M.; Posterpräsentation GQ10 Groundwater Quality 2010, Zürich, 13.-18.6. 2010
- „Der Einfluss von Grundwasser bei der Regenwasserversickerung in der Siedlungsentwässerung“, Jackisch, N., Weiler, M.; Posterpräsentation Tag der Hydrologie, Wien, 24.-25.3. 2011
- „Comparing design assumptions with actual observations for a rain water infiltration system in a residential neighbourhood“, Jackisch, N., Weiler, M.; Posterpräsentation EGU 2011, Wien, 3.-8.4. 2011
- „Vauban - Evaluation einer beispielhaften Siedlungsentwässerung“, Jackisch, N., Vortrag zur BWK-Landesverbandsexkursion 7.10.2011, Ing.-Büro Unger Freiburg
- Jackisch, N., Brendt, Th., Henkel, E., Lange, J., Funktioniert die Regenwasserversickerung so wie geplant? – Evaluierung anhand von Messungen, Manuskript und Vortrag DWA-Regenwassertage Berlin, 2012
- „Evaluierung der Regenwasserbewirtschaftung auf dem Vaubangelände - Ergebnisse von Messungen und Modellierung“, Jackisch, N., Vortrag AK Regiowasser 26.7.2012, Freiburg
- „Assessing the hydrologic performance of an urban catchment that combines Stormwater Best Management Practices (BMPs) and Low Impact Development (LID)“, Jackisch, N., Weiler, M.; oral presentation Ninth International Conference on Urban Drainage Modelling, Belgrade, Serbia, 4-6 September 2012 In: Prodanovic, Dusan; Plavsic, Jasna: Urban Drainage Modelling. Proceedings of the Ninth International Conference on Urban Drainage Modelling (full paper), Belgrade, Serbia, 4-6 September 2012. Belgrad: Univerzitet u Beogradu / Universität Belgrad, ISBN 978-86-7518-156-9
- Jackisch, N. „Was können wir aus der Evaluierung der Regenwasserbewirtschaftung auf dem Vaubangelände für die zukünftige Zusammenarbeit in der Siedlungsentwässerung lernen?“ – Vortrag anlässlich des Weltwassertages 2013, 22. März 2013, im Historischen Kaufhaus, Münsterplatz 24, Freiburg
- Jackisch, N. und Brendt, Th. „Der Einfluss von Bäumen und Gründächern auf die Abflussbildung im Stadtteil Vauban, Freiburg – Siedlungswasserwirtschaftlich relevant oder vernachlässigbar?, Manuskript und Vortrag DWA-Regenwassertage Freiburg, 10.-11.6. 2013

Es wurden Fachexkursionen in das Untersuchungsgebiet mit Studenten (Umweltnaturwissenschaften) und Schülern aber auch Fachleuten aus dem In- und Ausland durchgeführt, um das Entwässerungskonzept vorzustellen aber auch für das Thema Flächenversiegelung zu sensibilisieren und den Austausch zum Thema nachhaltige Siedlungsentwässerung zu fördern:

- 28.6. / 4.7. / 5.7.2011 und 2012 Exkursion „Nachhaltige Siedlungsentwässerung im Stadtteil Vauban“ im Rahmen der Vorlesungsreihe „Wasserwirtschaft“ des Bachelor-Studiengangs Umweltnaturwissenschaften
- 17.10.2011 Exkursion „Regenwasserversickerungsanlagen und Entwässerungskonzept im Stadtteil Vauban“ als englisch-französische Führung für Ingenieure von SAFEGE aus Frankreich im Zuge internationaler benchmark-Projekte zu green districts (N. Jackisch, E. Henkel)
- 7.10.2011 Exkursion „Umsetzung Entwässerungskonzept im Stadtteil Vauban“ für Mitglieder des BWK-Landesverbandes Baden-Württemberg (N. Jackisch, F. Lorkowski, Th. Zimmermann)
- 10.1.2013 Führung mit Prof. Sanghong Lee und Studenten der School of Architecture, Kyungpook National University, Korea (Jackisch)
- 10.6.2013 Fachexkursion im Rahmen der DWA-Regenwassertage 2013 (Jackisch, N., Brendt, Th., Henkel E., Lorkowski F.)
- 28.6.2013 Führung mit Schülern der Sek II, Vertiefungsrichtung Geographie zum Thema Messtechnik und Flächenversiegelung (Jackisch)



**12. DWA-Regenwassertage
10./11. Juni 2013 Freiburg Munzingen**



Abb. 49 (Links) Fachexkursion im Rahmen der Konferenz „DWA-Regenwassertage 2013“ (Foto: S. Heimann, DWA e.V.)
(Rechts) Führung mit Architekturstudenten aus Korea (Foto: Prof. Sanghong Lee).

- 
- 1 EINFÜHRUNG & FRAGESTELLUNG
 - 2 UNTERSUCHUNGSGEBIET
 - 3 METHODEN
 - 4 ERGEBNISSE
 - 5 ZUSAMMENFASSUNG, EMPFEHLUNGEN & AUSBLICK
 - 6 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT & VERÖFFENTLICHUNGEN
 - 7 QUELLEN

- ATV A-138: siehe DWA A-138
- BBODSCHV (1999): „Bundesbodenschutzgesetz- und Altlastenverordnung“, BGBl I
- Beller Consult GmbH (1996): „Entwässerungstechnische Erschließung des ehemaligen Kasernengeländes Vauban“ Entwurfs- und Genehmigungsplanung, Teil2: Oberflächenentwässerung, Erläuterungsbericht, Lagepläne, Anlagen, 71-2-330, November 1996
- Beller Consult GmbH (1997): Ergebnisse der Langzeitsimulation und extremwertstatistische Auswertung der Regenreihe FR-Mitte 1951-80, Anlage A 9 zum Erläuterungsbericht Beller Consult GmbH (1996)
- Beller Consult GmbH (1999): „Oberflächenentwässerung Paula-Modersohn-Platz – Hydraulische Berechnung Grabensystem Boulevard und Nord“, Erläuterungsbericht Juni 1999
- Beller Consult GmbH (2002): „Entwässerungstechnische Erschließung Vauban“ Endausbau Boulevardgraben 1. BA, Ausführungsplanung August 2002
- Beller Consult GmbH (2003): „Oberflächenentwässerung Vauban“ Aktualisierung der Entwurfsplanung Boulevardgraben, Erläuterungsbericht April 2003
- Beller Consult GmbH (2003): „Entwässerungstechnische Erschließung Vauban“ Endausbau Boulevardgraben 2. BA, Ausführungsplanung, Längsschnitt, Plan Nr. 3.1, Juni 2003
- Beller Consult GmbH (2003): „Oberflächenentwässerung BG Vauban Boulevardgraben“ 09/03 – 12/03, Projektschlussrechnungsordner 4/5
- Beller Consult GmbH (2003): „Oberflächenentwässerung BG Vauban Boulevardgraben“ 09/03 – 12/03, Projektschlussrechnungsordner 5/5
- Beller Consult GmbH (2004): „Entwässerungstechnische Erschließung Vauban“ Entwurfsplanung Graben Nord“, Erläuterungsbericht Mai 2004
- Beller Consult GmbH (2004): „Entwässerungstechnische Erschließung Vauban“ Endausbau Graben Nord 2.BA“, Ausführungsplanung, Längsschnitt, Plan Nr. 3, Juni 2004
- Beller Consult GmbH (2005): „Oberflächenentwässerung BG Vauban Graben Nord“ 02/05 – 07/05, Projektschlussrechnungsordner 3/3
- BWK - Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V. (2004): „Ableitung von immissionsorientierten Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse“ - Merkblatt M-3
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2005): „Regelwerk zur Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser“, Arbeitsblatt DWA-A 138, früher: ATV A-138
- DWA - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2007): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser - Merkblatt M-153
- Durner, W. (2003): „Bodenhydrologische Versuche im Praktikum Hydrologie I. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik“, TU Braunschweig
- Førland, E. J., Allerup, P., Dahlström, B., Elomaa, E., Jonsson, T., Madsen, H., Perälä, J. Rissanen, P., Vedin, H., Vejen, F. (1996): „Manual for operational

correction of Nordic precipitation data", Report Nr. 24/96, DNMI, P.O. Box 43, Blindern, Oslo, Norway, 66 S.

Jackisch, N., Badillo, D. & Lange, J.: „Ergebnisbericht der Infiltrationsversuche in den Versickerungsgräben im Stadtteil Vauban, Freiburg“, November 2009, http://www.hydrology.uni-freiburg.de/forsch/regenwasservauban/Bericht_Infiltr_Vauban_2009_11.pdf

IGG – Ingenieurgruppe Geotechnik GbR (2002): Geotechnisches Gutachten im Zusammenhang mit dem neubau der Stadtbahn in Freiburg-Vauban,

LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Niederschlagsmessdaten, Station Freiburg-Mitte, Niederschlagsmessnetz Messstelle 61596, Tageswerte, 1960-2001

LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2007a): synthetische Niederschlagsreihen Freiburg, 1974 – 2003, 5-min-Raster, MD-Format

LUBW – Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2007b): „Abfluss-Kennwerte in Baden-Württemberg - Hochwasserabfluss“, Datenstand 1.3.2007, abrufbar unter: <http://www.bw-abfluss.de/>

Ludwig, Christina: „Entwicklung einer webbasierten Informationsplattform zur Abflussberechnung in urbanen Einzugsgebieten“, Bachelorarbeit, Dezember 2012, Universität Freiburg - Professur für Hydrologie

Michelson, D. B. (2004): "Systematic correction of precipitation gauge observations using analyzed meteorological variables", Journal of Hydrology 290: 161–177

Opferkuch, Franziska: „Untersuchungen zur Beeinträchtigung der Sickerfähigkeit von Böden“, Bachelorarbeit, Juli 2012, Universität Freiburg - Professur für Hydrologie

Sartor, J. (2002): Ist die Regenwasserversickerung von bebauten Flächen wirklich naturnah? - Wasser und Abwasser, 7-8

Seibert, J., Moren, A. S. (1999): Reducing systematic errors in rainfall measurements using a new type of gauge. Agricultural and Forest Meteorology 98: 341-348

WHG (2009): Wasserhaushaltsgesetz, Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts vom 31. Juli 2009, gültig ab 1.03.2010

WLP – Wibel, Leinenkugel und Partner (1994): „Hydrogeologische und geotechnische Untersuchungen auf dem „Vauban“-Gelände in Freiburg-Merzhausen“,

Wagenmann-Gaiser, K. (2004): „Geotechnische Untersuchungen im Bereich des ehemaligen Militärgeländes „Vauban“ Stadt Freiburg i. Br.“, Diplomarbeit am Geologischen Institut der Universität Freiburg

URL 1: Stadt Freiburg, Luftbilder Vauban:

http://www.freiburg.de/servlet/PB/menu/1236743_11/index.html
(10.5.2012)

zusätzliche Quellen:

LfU - Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2006): Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser - Regenrückhaltung -, Juni 2006

LfU - Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2005): Arbeitshilfen für den Umgang mit Regenwasser in Siedlungsgebieten, Mai 2005

