

Masterarbeit – Lina Santa Maria

Die Anwendung natürlicher Tracer im Stadtgebiet zur Untersuchung der Beeinflussung des Grundwassers durch Regenwasser-Versickerungsanlagen

> Referent: Prof. Dr. Markus Weiler Korreferentin: Dr. Christine Stumpp Betreuung: Nicole Jackisch

> > Januar 2013

Institut für Hydrologie Fakultät für Umwelt und natürliche Ressourcen der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass alle unveränderten sowie alle abgeänderten Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht wurden.

Ort, Abgabedatum

Unterschrift des Verfassers

Danksagung

Für die Unterstützung bei der Erstellung dieser Masterarbeit möchte ich mich bei folgenden Personen und Institutionen bedanken:

Zunächst bei meinem Referenten Prof. Dr. Markus Weiler (Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.) und meiner Korreferentin Dr. Christine Stumpp (Institut für Grundwasserökologie am Helmholtz Zentrum München) für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik.

Bei Frau Nicole Jackisch für die sehr engagierte und angenehme Betreuung hinsichtlich der Feldversuche, Laboranalysen und letztendlich der Ausarbeitung dieser Arbeit.

Dem gesamten Institut für Hydrologie an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg für unterstützende Hilfe bei vielen Fragen bezüglich der Feldversuche und Laboranalysen. Insbesondere an Herrn Emil Blattmann, Herrn Lukas Neuhaus und Frau Barbara Herbstritt.

Regiowasser e.V. für die Hilfe bei den Feldarbeiten im Vauban

Mein ganz besonderer Dank gilt Daniel für die alltägliche verständnisvolle Unterstützung und ermutigende Worte in den weniger schönen Momenten dieser Abschlussarbeit.

Nicht zuletzt herzlichen Dank an meine Familie und speziell an meine Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche ErklärungI				
Danksagung III				
Abbildungsverzeichnis				
TabellenverzeichnisIX				
Verzeichnis der Abbildungen im Anhang X				
Verzeichnis der Tabellen im Anhang X				
ZusammenfassungX				
1 Einleitung 1				
1.1 Generelles Ziel der Masterarbeit und Hypothese				
2 Material und Methoden				
2.1 Untersuchungsgebiet				
2.1.1 Regenwasserbewirtschaftung im Vauban5				
2.1.2 Geologie				
2.1.3 Hydrogeologie				
2.1.4 Beschreibung der Versuchsstandorte				
2.2 Vorbereitung und Bohrung				
2.3 Versuchsaufbau				
2.3.1 Installation der Messgeräte				
2.3.2 Beprobungszeiten und -häufigkeiten				
2.4 Analyse				
2.4.1 Probenanalyse im Labor				
2.4.2 Analyse der Daten				
3 Ergebnisse				

	3.1 Ergebnisse der Wasseranalysen						
	3.2 Grundwasserverhältnisse						
3.3 Ergebnisse der Datenreihenanalyse							
	3.3	.1	Analyse der spezifischen Leitfähigkeit	31			
	3.3	.2	Analyse des Wasserstands	40			
	3.3	.3	Vergleich der unterschiedlichen Datenreihenanalysen	49			
4	Di	skus	sion	53			
	4.1	Dis	skussion der Ergebnisse aus den Wasseranalysen	53			
	4.2 Diskussion der Grundwasserverhältnisse						
	4.3	Dis	skussion der Ergebnisse aus den Datenreihenanalysen	56			
5	Scl	hluss	sfolgerung	59			
6	Lit	eratı	ır	60			
7	7 Anhang						

Abbildungsverzeichnis

Abb 2-1: Entwässerungsplan vom Stadtteil Vauban6
Abb 2-2: Baugrundkarte, mit Angabe der Lockergesteinsvorkommen
Abb 2-3: Darstellung der Grundwasseroberfläche im Vauban10
Abb 2-4: Querschnitt vom Graben Nord mit der darunter liegenden Rigole 12
Abb 2-5: Längsschnitte der untersuchten Mulden-Rigolen-Systeme
Abb 2-6: Bohrprofile der beiden angelegten Grundwassermessstellen
Abb 3-1: Darstellung der acht mit APEG`s beprobten Niederschlagsereignisse
Abb 3-2: Niederschlagsereignisse mit Isotopensignatur und Leitfähigkeitssignal23
Abb 3-3: Darstellung der Isotopenwerte aller Wasserproben aus den APEG`s
Abb 3-4: Darstellung der normierten Isotopendaten aus dem Grundwasser an Messstelle914/3 am Boulevardgraben25
Abb 3-5: Darstellung der normierten Isotopendaten aus dem Grundwasser an Messstelle
914/6 am Boulevardgraben
Abb 3-6: Darstellung der normierten Isotopendaten aus dem Grundwasser an Messstelle915/6 am Graben Nord27
Abb3-7: Darstellung der normierten Isotopendaten aus dem Grundwasser vonMessstelle 914/3 (links) und 915/6 (rechts)
Abb 3-8: Darstellung der Rigolenverhältnisse und Grundwasserstände
Abb 3-9: Abstand der Einstauhöhe zur Rigolen-Oberkante
Abb 3-10: Beispiel eines Datenausschnitts, welcher im Zuge der Analyse der spezifischen Leitfähigkeit untersucht wurde. Dargestellt ist das Niederschlagsereignis vom 21.09 an allen drei Messstandorten
Abb 3-11: Abbildungen der Kreuzkorrelationen zu dem in Abbildung 3-9 untersuchtem
Niederschlagsereignis (914/3 und 915/6)

Abb 3-12: Abbildungen der Kreuzkorrelationen zu dem in Abbildung 3-9 untersuchtem Niederschlagsereignis (914/6)
Abb 3-13: Vergleich der Messstandorte in Bezug auf die Verweilzeitberechnungen, von der Reaktion in der Mulde zur Reaktion in der Rigole, anhand der spezifischen Leitfähigkeit
Abb 3-14: Vergleich der Messstandorte in Bezug auf die Verweilzeitberechnungen, von der Reaktion in der Mulde zur Reaktion im Grundwasser, anhand der spezifischen Leitfähigkeit
Abb 3-15: Beispiel eines Datenausschnitts, welcher im Zuge der Analyse der Wasserstände untersucht wurde. Dargestellt ist das Niederschlagsereignis vom 23.08 an den Messstandorten 914/3 (oben) und 915/6 (unten)
Abb 3-16: Abbildungen der Kreuzkorrelationen zu dem in Abbildung 3-13 untersuchtem Niederschlagsereignis vom 23.08 an den Messstellen 914/3 (links) und 915/6 (rechts)
Abb 3-17: Abbildungen der Kreuzkorrelationen zu dem in Abbildung 3-17 untersuchtem Niederschlagsereignis vom 21.09 an den Messstellen 914/345
Abb 3-18: Beispiel eines Datenausschnitts, welcher im Zuge der Analyse der Wasserstände untersucht wurde. Dargestellt ist das Niederschlagsereignis vom 21.09 an allen drei Messstandorten
Abb 3-19: Vergleich der Messstandorte in Bezug auf die Verweilzeitberechnungen, von der Reaktion in der Mulde zur Reaktion in der Rigole, anhand des Wasserstands 47
Abb 3-20: Vergleich der Messstandorte in Bezug auf die Verweilzeitberechnungen, von der Reaktion in der Mulde zur Reaktion im Grundwasser, anhand des Wasserstands. Dargestellt sind beide Analysemethoden und alle untersuchten Ereignisse
Abb 3-21: Vergleich der unterschiedlichen Datenreihenanalysen von Wasserstand (WS) und spezifischer Leitfähigkeit (LF) in Bezug auf die Methode der Kreuzkorrelation 49
Abb 3-22: Vergleich der unterschiedlichen Datenreihenanalysen von Wasserstand (WS) und spezifischer Leitfähigkeit (LF) in Bezug auf die Maxima-Auswertung

Abb	3-23:	Korrelation	zwischen	den	Ergebnissen	aus	beiden	durchg	gefüh	rten
Analy	semeth	oden für die	Datenreih	e der	spezifischen	Leitfä	ihigkeit	(links)	und	des
Wass	erstands	s (rechts)		•••••					•••••	51
Abb	3-24:	Korrelation	zwischen	den	Ergebnissen	aus	beiden	durchg	gefüh	rten
Analy	semeth	oden für die	Datenreih	e der	spezifischen	Leitfä	ihigkeit	(links)	und	des
Wass	erstands	s (rechts). Mu	lde zu Grur	ndwas	sser	•••••			•••••	52

Tabellenverzeichnis

Tab 3-1:In	formationen zu den einzelnen beprobten Niederschlagsereignissen	. 21					
Tab 3-2:	Berechnung der Reaktionszeit (min) zwischen den Versickerungsstu	fen					
einzelner	Niederschlagsereignisse pro Messstandort. Ermittelt durch Daten	der					
spezifische	en Leitfähigkeit	.31					
Tab 3-3:	Berechnung der Reaktionszeit (min) zwischen den Versickerungsstu	fen					
einzelner	Niederschlagsereignisse pro Messstandort. Ermittelt du	rch					
Wasserstandsdaten40							

Verzeichnis der Abbildungen im Anhang

Abb 7-1: Darstellung der Einstauhöhe der Rigole (grün) und der Grundwasserstände
(blau) an Mulde 914/6
Abb 7-2: Darstellung das frei Rententionsvolumen der Rigole in m ³ (rot) und in %
(grün) an Mulde 914/6 63
Abb 7-3: Darstellung der Einstauhöhe der Rigole (grün) und der Grundwasserstände
(blau) an Mulde 915/6
Abb 7-4: Darstellung das frei Rententionsvolumen der Rigole in m ³ (rot) und in %
(grün) an Mulde 915/6

Verzeichnis der Tabellen im Anhang

Tab 7-1: Meteorologische Daten zu den jeweiligen Niederschlagsereignissen,	welche
bezüglich der spezifische Leitfähigkeit untersucht wurden	65
Tab 7-2: Meteorologische Daten zu den jeweiligen Niederschlagsereignissen,	welche
bezüglich der Wasserstände untersucht wurden (A und B)	66

Zusammenfassung

Die Interaktion von Oberflächenwasser und Grundwasser hat weitreichende Bedeutung für die Gewässerökologie, die Wasserqualität und wasserwirtschaftliche Themenfelder. Das Forschungsinteresse am Prozessverständnis dieser Interaktion ist in den vergangenen Jahren stark gestiegen. Die angewendeten Methoden und Techniken zur Untersuchung des Prozesses reichen von Markierungsversuchen über Methoden basierend auf dem Darcy-Gesetz, Berechnungen anhand der Wasserbilanz und direkten Messungen der Wasserflüsse bis zu der Verwendung von Temperatur oder anderen Datenreihen als Tracer. Im Zuge einer modernen Siedlungswasserbewirtschaftung beschäftigt man sich mit den Konsequenzen aufgrund steigender Urbanisierung und damit einhergehender Flächenversiegelung. Die Flächenversiegelung hat direkten Einfluss auf die Interaktion von Oberflächenwasser und Grundwasser, verringert Grundwasserneubildung in urbanen Regionen und begünstigt extreme Abflussspitzen nach großen Niederschlagsereignissen. Regenwasser-Versickerungsanlagen leisten einen Beitrag um genau diesen stadthydrologischen Entwicklungen entgegenzuwirken. Prozessverständnis und hochaufgelöste Messdaten bezüglich Ein detailliertes Regenwasser-Versickerungsanalagen sowie der Funktionstüchtigkeit von Mulden-Rigolen-Systemen sind demzufolge notwendig. Diese Arbeit untersuchte mittels Anwendung natürlicher Tracer die Beeinflussung des Grundwassers durch Regenwasser-Versickerungsanlagen im Stadtteil Vauban in Freiburg im Breisgau. Es wurden Verweilzeiten einzelnen der Versickerungsschritte mittels der Kreuzkorrelationsmethode und anhand von Maxmia-Auswertung berechnet. Die Verwendung von Datenreihen der spezifischen Leitfähigkeit erwies sich hierbei als sinnvoll. Auch kontinuierliche Zeitreihen des Wasserstands wurden untersucht und lieferten verwertbare Ergebnisse in Bezug auf Reaktionszeiten und Infiltrationsprozesse. Aufgrund nicht aussagekräftiger Reaktionssignale in der Isotopensignatur von Niederschlags- und Grundwasserproben, konnte mittels Wasserisotopen keine Verweilzeitenberechnung oder Ganglinienseperation durchgeführt werden. Die schwachen Reaktionssignale der Isotopenmessungen können auf außergewöhnlich hohe Grundwasserstände innerhalb des Untersuchungszeitraums zurückgeführt werden.

1 Einleitung

Oberflächenwasser und Grundwasser sind Teil eines zusammenhängenden Systems, wurden aber lange Zeit separat betrachtet, unabhängig voneinander untersucht und oftmals von unterschiedlichen Wissenschaftsperspektiven aus erforscht (Kalbus et al., 2006). In den vergangenen 15 Jahren hat das Forschungsintertresse stark zugenommen und anfänglich sehr einfache Systembeschreibungen werden immer komplexer (Fleckenstein et al., 2009). Die Bedeutung für die Gewässerökologie, die Wasserqualität und auch die Wasserwirtschaft, treibt die Entwicklung neuer Methoden zur Quantifizierung (siehe Lerner, 2002; Vogt et al., 2010; Engelhardt et al., 2011) und Simulation (siehe Ogunkoya und Jenkins, 1993; McGuire et al., 2007) der Austauschprozesse voran. Selbstverständlich sind die chemischen, biologischen und physikalischen Bedingungen von Oberflächenwasser und Grundwasser unterschiedlich (Kalbus et al., 2006). Eine zusammenhängende und möglichst genaue Betrachtung erfordert demnach weitgefächertes Grundwissen und die Anwendung unterschiedlichster Techniken und Methoden. Im Jahre 2002 hat Scanlon einen Überblick der Techniken zur Quantifizierung von Grundwasserneubildung auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen erarbeitet (Scanlon et al., 2002). Auch das Review von Kalbus et al. (2006) beschäftigt sich mit den unterschiedlichen Messverfahren zur Beschreibung von Interaktionen zwischen Grund- und Oberflächenwassern. Er erläutert die direkte Messung von Wasserflüssen, die Verwendung von Temperatur als Tracer, unterschiedliche Methoden basierend auf dem Gesetz von Darcy sowie Annäherungen mittels Berechnung der Wasserbilanz. Gerade die Betrachtung der Wasserbewegung in der ungesättigten Zone nimmt einen besonderen Stellenwert ein, da durch die Filtereigenschaft der Bodenschicht ein Schutz der Grundwasserressourcen vor Einträgen und Schadstoffen ermöglicht wird (Wenninger et al., 2005). Mit dem Thema einer Grundwasserkontamination durch Infiltration von Oberflächenwasser beschäftigen sich unteren anderem die Arbeiten von Sheets und Dagés (Sheets et al., 2002; Dagès et al., 2008).

Um einen weiteren Beitrag im Forschungsbereich der Interaktion zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser zu leisten, wurde in dieser Arbeit auf zwei verschiedene Messtechniken besonders eingegangen. Zum einen auf die Methode der Zeitreihenanalyse und zum anderen auf die Verwendung von Isotopendaten zur Bestimmung der Verweilzeiten und Mischungsverhältnisse zwischen infiltrierendem Niederschlagswasser und dem angrenzendem Grundwasser. Als Alternative zu Markierversuchen, sowohl mit natürlichen als auch künstlichen Tracern, stellt Vogt et al. (2009) eine Variante vor, um aus Zeitreihen der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur quantitative Aussagen zu Mischungsverhältnissen und Verweilzeiten ableiten zu können. Natürliche Schwankungen physikalischer Wassereigenschaften ermöglichen Rückschlüsse auf Infiltrationsprozesse von Flusswasser in angrenzendes Grundwasser (Silliman und Booth, 1993; Silliman et al., 1995; Constantz et al., 2003). Diese physikalischen Unterschiede können auch für die Untersuchung von Niederschlagsinfiltration in Grundwasserschichten herangezogen werden. Eine Arbeit an dem schweizerischem Fluss Thur betrachtet hoch aufgelöste vertikale Temperaturprofile um Infiltration von Oberflächenwasser zu belegen (Vogt et al., 2010). Sheets et al. (2002) verwendeten beispielsweise Piezometermessungen sowie Zeitreihen der Temperatur und der spezifische Leitfähigkeit unter der Verwendung der Kreuzkorrelationsmethode. Bei dieser Methode wird der Korrelationskoeffizient zweier Zeitreihen als Funktion der Verschiebung über die Zeit dieser Datensätze ermittelt. Vor der Berechnungen der Kreuzkorrelation, wird ein Datensatz oftmals geglättet (Hoehn und Cirpka, 2006; Vogt et al., 2009).

Die zweite, in dieser Arbeit, genutzte Messvariante der stabilen Isotope stellt eine sensitive Möglichkeit dar, Informationen über Herkunftsräume unterschiedlicher Wasservorkommen zu erhalten und aus diesen Fließbewegungen sowie Verweilzeiten abzuleiten (Wenninger et al., 2005). Für solche Untersuchungen sind die Messungen der Isotope des Wassers, Deuterium (²H), Sauerstoff-18 (¹⁸O) und Tritium (³H), besonders geeignet. Da diese selbst Teil des Wassermoleküls sind, können sie als ideale Tracer angesehen werden (McGuire und McDonnell, 2006) und unterscheiden sich trotzdem messbar zwischen Niederschlagswasser und Grundwasser (Leibundgut et al., 2009). Um die Bodenwasserbewegung in der ungesättigten Zone abzuschätzen, betrachtet man die saisonalen Schwankungen der Isotopensignatur und die Abschwächung des Signals von einer Ebene in die andere (Wenninger et al., 2005). Hierzu wird eine Sinuskurvenanpassung an die Kurvenverläufe der gemessenen Isotopenwerte

durchgeführt und die mittlere Verweilzeit kann berechnet werden (Maloszewski et al., 1983). Generell kann man sagen, dass mittels Isotopenauswertung die Quelle von Grundwasserneubildung nachgewiesen werden kann. Die exakten Neubildungsraten zu ermitteln, ist allerdings nicht immer möglich (Scanlon et al., 2002).

Eine Vielzahl der Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit natürlich vorkommenden Interaktionen von Grund- und Oberflächenwasser, wie sie z.B. an Seen und Flüssen auftreten. Die Randbedingungen von natürlich auftretenden Interaktionen zwischen Oberflächen- und Grundwasser sowie den Interaktionsverhältnissen an anthropogen erbauten Regenwasser-Versickerungsanlagen sind bedingt vergleichbar. Man kann also in der Stadthydrologie zum Teil auf Erkenntnisse und Methoden verwandter Forschungszweige zurückgreifen. Steigende Urbanisierung und damit einhergehende Flächenversiegelung beeinflusst immer stärker die natürliche Versickerung von Niederschlagswasser und somit den grundsätzlichen Wasserkreislauf. Schon heute lebt die Hälfte der Weltbevölkerung und 73% der Europäer in Städten (Schirmer et al., 2007). Viele hydrologische Studien haben sich mit dem Wandel von natürlichen zu urbanen Bedingungen beschäftigt, um die Auswirkungen und Prozesse abschätzen und beschreiben zu können (Larazo, 1979; McPherson und Zuidema, 1977). Ein Aspekt aus dem stadthydrologischen Management und der modernen Siedlungswasser-Bewirtschaftung ist die dezentrale Regenwasserversickerung. Diese führt zumindest ein Teil des auftretenden Niederschlagswassers direkt vor Ort wieder dem natürlichen Wasserkreislauf zu (Sieker, 2007). Regenwasser-Versickerungsanlagen ermöglichen somit zum einem eine, wenn auch nur lokal begrenzte, Grundwasserneubildung und zum anderen eine Verringerung und Verzögerung der Abflussspitzen. Andererseits wurde am Beispiel der Stadt Dresden festgestellt, dass sich, entgegen der Erwartungen, die Grundwasserstände durch die urbanen Einflüsse, einschließlich Grundwasserentnahmen für die Trinkwasserversorgung, kaum verändert haben (Grischek und Nestler, 1996). Auch Rieckermann et al. (2003) belegte eine Variante der urbanen Grundwasserneubildung durch Wasseraustritt aus der Kanalisation in den Untergrund. Urbane Simulationsmodelle ergänzen die Forschungsarbeiten. Ein zweidimensionaler Modellansatz aus dem Jahr 2012 versucht genau den speziellen Fall der Regenwasserversickerung in urbanen Gebieten besser zu beschreiben (Browne et al., 2012). Größtenteils wird bei der Modellierung von Niederschlagsversickerung aus Mulden-Rigolen-Systemen entweder eine vertikale oder eine horizontale Infiltration angenommen. In der Praxis handelt es sich jedoch in vielen Fällen um eine Kombination aus beiden.

1.1 Generelles Ziel der Masterarbeit und Hypothese

Im Laufe der Literaturrecherchen wird deutlich, dass sich der Großteil aller Prozessforschungen und tatsächlichen Messungen, in Bezug auf Interaktionsverhältnisse zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser, nicht speziell mit urbanen Begebenheiten auseinandersetzt. Viele Themenfelder in der Stadthydrologie sind demzufolge noch nicht ausreichend untersucht oder wurden so gut wie gar nicht betrachtet. Deshalb versucht man auf Methoden und Techniken anderer Forschungszweige zurückzugreifen. Detaillierte Forschungsarbeiten mit tatsächlichen Messungen und Feldversuchen sind notwendig um die vorhandenen Wissenslücken zu schließen und bestehende Vermutungen oder Abschätzungen belegen bzw. wiederlegen zu können.

Diese Arbeit ist eingegliedert in die Doktorarbeit "Urbane Hydrologie unter dem Einfluss des Grundwassers" von Nicole Jackisch (Institut für Hydrologie, Universität Freiburg), welche sich großräumig mit der Untersuchung des Vaubangelände auf stadthydrologischer Basis beschäftigt. Im Rahmen meiner Forschungsarbeit untersuche ich mittels Anwendung natürlicher Tracer die Beeinflussung des Grundwassers durch Regenwasser-Versickerungsanlagen und die Funktionstüchtigkeit von Mulden-Rigolen-Ergebnisse Systemen. Die dieser Arbeit tragen dazu bei. die Regenwasserbewirtschaftung auf dem Vaubangelände zu evaluieren. Anhand der erhobenen Daten, sollen Verweilzeiten und Infiltrationsraten sowie der Anteil neu infiltrierten Niederschlagswassers (Mixing Rations) nach einem Niederschlagsereignis bestimmt werden. Hierbei werden unterschiedliche natürliche Tracerstoffe miteinander verglichen und auf ihre Eignung und Aussagekraft überprüft. Ziel ist es somit, den in der Anwendung einfachsten und dennoch aussagekräftigen Tracer zu identifizieren und die Interaktion des Mulden-Rigolen-Systems mit dem Grundwasserleiter zu konkretisieren. Das Infiltrationsverhalten der Regenwasser-Versickerungsanlage sowie die Infiltrationsraten und -zeiten sollen besser verstanden und beschrieben werden.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im Modellstadtteil Vauban, Freiburg im Breisgau (47° 58' 33" N, 7° 49' 29" O).

2.1.1 Regenwasserbewirtschaftung im Vauban

Der Vauban liegt im Bereich der nördlichen Mündung des Hexentals in die Freiburger Bucht und wird im Osten vom Schlierberg sowie im Süden vom St. Georgener Dorfbach begrenzt. Vor dem 2. Weltkrieg wurde das Gelände größtenteils landwirtschaftlich genutzt und im Jahre 1937 entstand dort erstmals eine Kaserne (Lange, 2001). Zu Beginn der 90er Jahre zogen die letzten französischen Soldaten aus der ehemaligen Militärkaserne ab und die Stadt Freiburg erwarb das Gelände. Nachdem im Jahre 1995 ein städtebaulicher Ideenwettbewerb ausgerufen wurde, konnte man 1998 mit der Umgestaltung des Geländes in einen modernen und zentrumsnahen Stadtteil beginnen (Veith, 2005).

Die Böden sind zur Versickerung vergleichsweise schlecht geeigneter, da sie an vielen Stellen durch schollenartige Lehmschichten so gut wie undurchlässig sind (siehe 2.1.2, Beller Consult GmbH, 1996). Dennoch hat man sich entschieden, das Regenwasser, sofern möglich, ortsnah zu versickern und den Überschuss gedrosselt in den Dorfbach einzuleiten. Hierbei ist die Regenwasserbewirtschaftung im Vauban in zwei Bereiche unterteilt. Im nördlichen Gebiet wird klassisch im Mischsystem entwässert, wohingegen im südlichen Teil des Stadtviertels, ein Trennsystem verwirklicht wurde. Dieses Regenwasser-Versickerungssystem besteht aus zwei von Ost nach West verlaufenden Sammelgräben (Boulevardgraben und Graben Nord) in welchen das Regenwasser der Wohnanger zusammengeführt wird. Die Sammelgräben bestehen aus kaskadenartig angelegten, begrünten Mulden-Rigolen-Systemen und sind durch Überlaufschächte oder Dolen untergliedert (Jackisch und Weiler, 2009). In Abhängigkeit von der Platzverfügbarkeit und dem erforderlichen Volumen, sind die Rigolen mit einer Kiesfüllung oder einem künstlichem Hohlraumkörper aus Polypropylen (RigoFill) ausgestattet (Beller Consult GmbH, 2003, 2004). Das Polypropylen ermöglicht einen extrem hohes Porenvolumen von 96%, welches damit drei- bis vierfach höher ist als von herkömmlichem Kies und kann somit die maximale Menge an Regenwasser speichern (Lange, 2001). Um das Eindringen von Feinstoffen zu verhindern sind die Rigolen mit einem Geotextil ummantelt und geschützt (Jackisch et al., 2009). Wie in Abbildung 2-1 erkennbar, werden die beiden parallel verlaufenden Sammelgräben am Ende zusammengeführt und der Überlauf mündet in den St.Georgener Dorfbach.



Abbildung 2-1: Entwässerungsplan vom Stadtteil Vauban (verändert nach Jackisch und Weiler, 2009). Die orangenen Sterne markieren die Messstandorte dieser Forschungsarbeit.

Zusätzlich zum beschriebenen Versickerungssystem wurden im Vauban zahlreiche dezentrale Regenrückhaltemaßnahmen verwirklicht. So musste im Neubaugebiet jedes Flachdach, bis zu einer Neigung von 7 Grad, begrünt werden und kann somit zusätzlich Niederschlag speichern. Des Weiteren wird Dachabfluss in Zisternen gesammelt und dann zur Gartenbewässerung oder zum Betrieb der Waschmaschine verwendet. In der Grundschule des Stadtviertels wird Regenwasser in der Toilettenspülung eingesetzt (Veith, 2005). Alle diese Maßnahmen verringern die abflusswirksamen Flächen in den Wohnangern und reduzieren damit das Regenwasservolumen, welches in das Mulden-Rigolen-System eingespeist wird. Es wurde erreicht, dass die tatsächliche Menge an Wasser, welche in den St.Georgener Dorfbach überläuft, deutlich geringer ist, als nach der Dimensionierung und Simulierung in der Planungsphase zu erwarten war (Lange, 2001).

2.1.2 Geologie

Um die Möglichkeiten einer dezentralen Versickerung des Niederschlagswassers und die damit verbundenen Schwierigkeiten auf dem Vaubangelände einordnen zu können, folgt ein kurzer Überblick der geologischen Begebenheiten. Die in diesem und im nächsten Abschnitt (siehe 2.1.3) dargestellten Fakten beruhen größtenteils auf einer Diplomarbeit am Geotechnischen Institut der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, welche sich ausführlich mit den geotechnischen Verhältnissen des Stadtteils befasst (Wagenmann-Gaiser, 2004). Die unterschiedlichen Lockergesteinshorizonte stammen ausschließlich aus dem pleistozänen und holozänen Zeitalter und sind damit relativ jung. Betrachtet man die Lockergesteine, bis 2 m unter der Geländeoberkante (GOK), treten von Osten nach Westen zunächst Abschwemmassen und dann Hochflutsedimente auf. Bei Ersterem handelt es sich um ein feinkörniges, oftmals kalkhaltiges Sediment von gelbbrauner bis grüngrauer marmorierter Farbe. Die Hochflutsedimente variieren farblich von hellbraun bis graubraun sowie von hellgrau bis graublau. Sie setzten sich aus tonig-sandigen Schluffen und einer unterlagernden schluffigen Sandschicht zusammen. Beide Sedimentvariationen können einen geringen Kiesanteil aufweisen. Aufgrund anthropogener Aufschüttungen, während und nach der militärischen Nutzung, sind die Mächtigkeiten der oberen Sedimentschichten heutzutage nicht mehr erkennbar. In nahezu allen Bereichen des Vaubangeländes lassen sich diese künstlichen Verfüllungen feststellen (Scherzinger, 2002). Sie können örtlich aber auch fehlen. Inhomogene Zusammensetzungen (Beller Consult GmbH, 1996) und teilweise sehr tiefreichend Mächtigkeiten, lassen Informationen über natürlich Schichten verbergen. Doch repräsentative entstandene Bestandteile, wie Ziegelbruchstücke, Betonbrocken und sonstige Bauschuttreste, ermöglichen eine klare Abgrenzung von anthropogen aufgeschütteten Bereichen und natürlichen Bodenzusammensetzungen. Parallel zum St. Georgener Dorfbach verläuft außerdem oberflächlich (bis 2 m unter GOK) noch ein Streifen Lockergesteinsmaterial, welches den Auensedimenten zugeordnet werden kann.



Abbildung 2-2: Baugrundkarte, mit Angabe der Lockergesteinsvorkommen, des ehemaligen Militärgeländes "Vauban" in Freiburg im Breisgau (Wagenmann-Gaiser, 2004).

Berücksichtigt man allerdings die unterlagernden Lockergesteine zwischen 2m und 5m unter der GOK, kann man sowohl Tone, zersetzte Kiese als auch durch den Schwemmfächer verbreitete Dreisamkiese vorfinden. Die Tone befinden sich nur im äußersten Osten an der Stelle einer alten Tongrube (Blauer Letter) und weisen einen mehr oder weniger hohen Sandgehalt auf. Allgemein nimmt die Mächtigkeit der Dreisamkiese von nordwestliche in südöstliche Richtung ab und am südöstlichen Rande des Vaubangebiets sind diese gar nicht mehr anzutreffen. Die Sedimente setzten sich hauptsächlich aus Fein- bis Grobkies mit überwiegend sandigen und nur teilweise schluffigen Anteilen zusammen. Häufig sind Steine und Grundgebirgsgeröllteile beigemischt. Im Vergleich zu den Dreisamkiesen sind die zersetzten Kiese feinkörniger und die Gerölle stärker verwittert. Diese Kiesvarianten sind eher im mittleren und südlichen Vaubangebiet verbreitet und bestehen größtenteils aus Kiesen und Sanden. Der Schluffgehalt dieser Schicht nimmt mit größerer Tiefe zu.

2.1.3 Hydrogeologie

Aus unterschiedlichen Untersuchungsergebnissen und Gutachten (Beller Consult GmbH, 1996; Scherzinger, 2002; Wagenmann-Gaiser, 2004) lassen sich Rückschlüsse auf die Grundwasserverhältnisse im Vaubangebiet ziehen. Da die, in dieser Arbeit, beprobten Pegelrohre nur einige Meter tief sind, beschränkt sich die Betrachtung des Grundwassers auf Vorkommen in den quartären Lockersedimenten. Es werden keine tiefer liegenden Kluftgrundwasserleiter berücksichtigt.

Im Vaubangebiet stellen Dreisamkiese und zersetzte Kiese einen gut durchlässigen Grundwasserleiter dar. Es kann ein zusammenhängender Grundwasserspiegel ausgebildet werden. Wie in Abbildung 2-2 erkennbar, werden diese Kiese von Hochflutlehme und Abschwemmmassen überlagert, welche sehr gering-durchlässige Schichten darstellen und teilweise auch als Stauschicht fungieren. Steigt das Grundwasser also in den grobkörnigen Kiesschichten bis zu der Basis dieser stauenden Sedimente an, kommt es zu einem gespannten Grundwasserverhältnis (Beller Consult GmbH, 1996).

Das Grundwasser im Vauban stammt aus dem Einzugsgebiet des Hexentals und fließt Richtung Norden (Abbildung 2-3) zu einem Tiefbrunnen der Freiburger Stadtwerke in Merzhausen. Quer durch den Stadtteil verläuft die Grenze der Dreisamkiese. Bei Eintritt in diesen Schwemmfächer verlagert sich die Fließrichtung des Grundwassers nach Nordwesten (ca. 335°-350°). Einem Planungsbericht (Beller Consult GmbH, 1996) ist zu entnehmen, dass sich die Grundwasserverhältnisse 1996 wie folgt verhielten: Der Flurabstand des mittleren Hochwassers lag zwischen 1,40 m im westlichen und 4,40 m im östlichen Bereich und der mittlere Grundwasserabstand betrug im Durchschnitt zwischen 2,40 m (westlich) und 5,40 m (östlich). Die Arbeit von Wagenmann-Gaiser (2004) beschreibt einen saisonal bedingten Schwankungsbereich der Grundwasserspiegelhöhen von mehr als 1,5 m in dem Untersuchungsgebiet. Außerdem zeichne sich, von 2004 an, eine Tendenz zu großflächig ansteigenden Grundwasserspiegeln ab. Der Flurabstand betrug demnach im Jahre 2004, bezogen auf relatives Hochwasser, durchschnittlich 2,5 m bis 3,5 m. Er kann aber bei extremen Hochwasserständen auf bis zu 0,2 m bis 0,5 m sinken. Dieselbe Arbeit gibt eine Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers von 0,8 m pro Tag an und berücksichtigt bei dieser, das

Grundwassergefälle, einen geschätzten Durchlässigkeitsbeiwert und eine ebenfalls geschätzte effektive Porosität.



Abbildung 2-3: Darstellung der Grundwasseroberfläche im Vauban. Der Abstand der Teilstriche entspricht 100m (erstellt mit Surfer 7.0, Gridding-Methode: Kriging über Datenpunkte, EW-Achse: Rechtswerte, NS-Achse: Hochwerte; Anlage 5 aus Wagenmann-Gaiser, 2004).

Die Gewässersohle des Dorfbaches liegt im Bereich der schwach durchlässigen bindigen Deckschichten. Daher scheint ein möglicher Einfluss des Dorfbachs auf das Grundwasser, trotz der teilweise hohen Grundwasserspiegel, nicht vorzuliegen. Auch dem Verlauf der Grundwassergleichen (siehe Abbildung 2-3) ist eine aus Uferinfiltration nicht abzuleiten und es ist davon auszugehen, dass die Infiltrationsrate sehr gering ist (Wagenmann-Gaiser, 2004). Da der relativ neue Stadtteil Vauban auf dem Gelände einer alten Militärkaserne liegt, ist das Grundwasser an manchen Standorten erwartungsgemäß vorbelastet. Aus hydrogeologischen Gutachten geht hervor, dass halogenierte Kohlenwasserstoffe (HKW) festgestellt wurden. Diese Belastungen gehen von zwei Schadensherden in den Bereichen der Grundwasserpegel BK14 und BK6 aus (Abbildung 2-3). Um die, durch die Grundwasserstromrichtung bedingten, kontaminierten Abstromfahnen in nord-nordwestliche bis nord-westliche wurden bereits Sanierungsmaßnahmen vorgenommen Richtung zu stoppen, (Wagenmann-Gaiser, 2004). Diese sind inzwischen abgeschlossen.

2.1.4 Beschreibung der Versuchsstandorte

Im südlichen Vaubangebiet wurden an drei Grundwassermessstellen Daten erhoben. Zwei Pegel befanden sich am Boulevardgraben, an den Mulden 914/3 (R: 3412320,15; H: 5315861,29) und 914/6 (R: 3412250,92; H: 5315888,53) und ein Pegel am Graben Nord, an der Mulde 915/6 (R: 3412275,70; H: 5315986,28). Die beiden Grundwasserpegel am Boulevardgraben wurden extra für dieses Forschungsprojekt gesetzt, wohingegen der Pegel BK7 (siehe Abbildung 2-3) am Graben Norden bereits bestand. Alle drei liegen einen knappen Meter nördlich der jeweiligen Mulden-Rigolen-Systeme und damit in Richtung des Grundwasserstroms von der Rigole aus gesehen (siehe Abbildung 2-3 und Abbildung 2-4). Die Mulden am Boulevardgraben (914/3 und 914/6) haben steile Hänge, sind vollkommen mit Gräsern und anderen Pflanzen bewachsen und kaum beschattet. An der nördlichen Seite befindet sich eine durchgehende Reihe alter Linden und an beiden Seiten ist der Graben von Gras umrandet. Es handelt sich um einen Trapezgraben mit unterschiedlich breiten Sohlabschnitten und einer Gesamtlänge von ca. 825 m bis zur Einleitstelle in den St. Georgener Dorfbach (Beller Consult GmbH, 1996). Die Mulde am Graben Nord (915/6) ist wesentlich flacher, fast durchgehend von den direkt anstehenden Bäumen beschattet und die Hänge sind nicht so steil abfallend wie am Boulevardgraben. Zudem ist sie weniger stark bewachsen. Auch dieser Graben ist von einem Grünstreifen umrandet, der aber schmaler ausfällt. Auf der nördlichen Seite befinden sich direkt die Gärten der Anwohner und auf der Südseite ein Radweg. Als Beispiel ist in der Abbildung 2-4 der Querschnitt des Graben Nord dargestellt. Wie schon zuvor beschrieben, strömt das Grundwasser aus südlicher Richtung an das Mulde-Rigolen-System und die Messstellen liegen nördlich davon. Somit wird gewährleistet, dass durch die Rigole in das Grundwasser infiltrierendes Wasser die Pegelrohre durchfließt und registriert werden kann. Am Boulevardgraben gelangt das gesamte dort Niederschlagswasser, wie in der Abbildung angedeutet, ebenfalls aus nördlicher Richtung in die Mulde. Am Graben Nord strömen ca. die Hälfte des Wasservolumens nördlich und die andere Hälfte südlich zu.



Abbildung 2-4: Querschnitt vom Graben Nord mit der darunter liegenden Rigole und schematischer Darstellung des Messkonzepts an beiden Muldensträngen (verändert nach Beller Consult GmbH, 1996, 71-2-330).

Nicht nur das Aussehen der Mulden sondern auch die im Untergrund liegenden Rigolen sind an den verschiedenen Versuchsstandorten unterschiedlich beschaffen (siehe Abbildung 2-5). Alle Mulden haben zunächst eine 0,5 m tiefe Schicht an Mutterboden und dann eine Sandschicht von 0,2 m, bevor die eigentliche Rigole beginnt (siehe Abbildung 2-4 und 2-5). Die Rigole der Mulde 914/3 ist unterhalb des Mutterbodens und der Sandschicht komplett mit Kies gefüllt, wohingegen die Mulde 914/6 im Untergrund eine Polypropylenfüllung (RigoFill, siehe Abschnitt 1) hat. Die Rigole an der Mulde 915/6 ist sowohl mit Polypropylen als auch mit Kies verfüllt. Durch diese drei Arten von Rigolenfüllung sind alle im Vauban verwirklichten Füllvarianten abgedeckt und die Versuchsstandorte können als repräsentativ für den Stadtteil angesehen werden.



Abbildung 2-5: Längsschnitte der untersuchten Mulden-Rigolen-Systeme am Boulevardgraben. Rechts ist die Mulde 914/3 abgebildet und die linke Graphik zeigt die Mulde 914/6 (Beller Consult GmbH, 2003).

Die Versuchsstandorte unterscheiden sich auch großräumig. Zwar liegen die drei Messpunkte, in Bezug auf die oberen Lockergesteine, alle im Bereich der Hochflutsedimente, berücksichtigt man allerdings die unterlagernden Lockergesteine (2 m und 5 m unter GOK), unterscheiden sich die gewählten Standorte am Boulevardgraben und am Graben Nord. Im Untergrund von den Mulden 914/3 und 914/6 liegen zersetzte Kiese, wohingegen man an der Messstelle 915/6 sowohl zersetzte Kiese als auch durch den Schwemmfächer verbreitete Dreisamkiese vorfindet (siehe 2.1.2). Der in Abbildung 2-2 erkennbare Übergang von stark verwittertem und feinerem Material zu eher groben Kiesschichten wird also durch die gewählten Versuchsstandorte berücksichtigt.

2.2 Vorbereitung und Bohrung

Wie beschrieben, mussten noch zwei Grundwasser-Messstellen gesetzt werden. Der Pegel BK7 (Abbildung 2-3) stand bereits ausgebaut und funktionsfähig zur Verfügung. Mithilfe einer Rahmkernsondierung (Cobra Standard) wurden die zusätzlichen Pegel am Boulevardgraben am 15.07.12 (914/6) und am 18.07.12 (914/3) gesetzt. In beiden Fällen wurde eine Bohrkernansprache (siehe Abbildung 2-6) aufgenommen und für jede erkennbare Schicht eine Bodenprobe genommen. An der ersten Messstelle (914/6) wurde mit einem Durchmesser von 6 cm gebohrt, das eingesetzte Pegelrohr ist 4,15 m lang (von der GOK 4,18 m tief) und in den unteren 3,74 m verfiltert. An der anderen Stelle (914/3) wurde die Bohrung mit einem Durchmesser von 8 cm durchgeführt. Das Pegelrohr ist 4,06 m lang (von der GOK 4,13 m tief) und in den unteren 3,72 m verfiltert. Beide Bohrlöcher wurden mit Filterkies (2-3 mm Durchmesser) aufgefüllt und in den oberen Abschnitten (ca. 30 cm) mit Quellton abgedichtet. Damit kein Kies oder anderes Feinmaterial in das Pegelrohr gelangen kann, wurden die Rohre mit einem Geotextil umwickelt. Anschließend sicherte man die Pegel noch mit eingegrabenen Straßenkappen vor Fremdeinwirkungen. Kurz nach den Bohrarbeiten wurden beide Pegel einmal klar gepumpt und dann für einige Wochen nicht weiter beprobt oder verändert.



Abbildung 2-6: Bohrprofile der beiden angelegten Grundwassermessstellen an den Mulden 914/3 und 914/6 am Boulevardgraben. Die Hochflutsedimente fungieren als Stauschicht und in der Kiesschicht befindet sich der Aquifer.

2.3 Versuchsaufbau

2.3.1 Installation der Messgeräte

Das komplette Messnetz war im Zeitraum vom 17.07.2012 bis zum 12.10.2012 im Vauban installiert. An allen drei Grundwassermessstellen wurden in zwei unterschiedlichen Höhen automatische Probeentnahmegeräte (APEG`s) und CTD-Diver installiert. Die APEG's wurden nur gestartet, wenn ein Niederschlagsereignis bevorstand (siehe dazu Abschnitt 2.3.2). Die Diver (CTD - Schlumberger Water Services) haben durchgehend in einem festgelegten Intervall von 10 min die Leitfähigkeit [mS/cm], die Temperatur [°C] und den Druck [cm H₂O] gemessen. Die oberen Diver waren, bei allen Standorten, auf Höhe der Unterkante der Rigole angebracht und die unteren Messgeräte befanden sich jeweils 0,8 m darunter. Alle Geräte hingen dauerhaft im Grundwasser. Des Weiteren war ein APEG mit Interface an der Mulde 914/3 angeschlossen, um Niederschlagwasser zu beproben. Dieser APEG wurde nur dann gestartet, wenn der Wasserstand in der Mulde über 47 mm anstieg. In den anderen beiden Mulden waren Sonden installiert, welche die Leitfähigkeit [mS/cm], die Temperatur [°C] und den Druck [cm H₂O] gemessen haben. An der Mulde 914/6 war dies ein weiterer CTD-Diver und in der Mulde am Graben Nord eine OTT-CTD-Sonde (OTT Messtechnik GmbH & Co. KG). In den Mulden 914/3 und 915/6, also einmal am Boulevardgraben und einmal am Graben Nord, wurden Bodenfeuchtesonden schon im Jahre 2009 installiert. Dabei handelt es sich jeweils um Sonden zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit (EC-5 Soil Moisture Sensor, Decagon) die in zwei unterschiedlichen Tiefen unter der Muldenoberfläche eingegraben wurden. Ebenso existierte, an diesen beiden Mulden bereits (seit 2009) ein Messaufbau, mit dem der Wasserstand in den Überlaufschächten und die Parameter (Leitfähigkeit, Temperatur und Wasserstand) im inneren der Rigolen verfolgt werden konnten. Um, bei den Diver-Sonden ohne automatischen Druckausgleich, den Wasserstand bzw. den Abstich ermitteln zu können, wurden die Daten eines bereits im Vauban installiertem Baro-Divers verwendet.

Zusätzlich war in unmittelbarer Nähe zu den drei Messstandorten ein Klimaturm aufgestellt, sodass Daten zum Niederschlag (R.M.Young Kippwaagenregenmesser, beheizt 0,1 mm Auflösung), der Lufttemperatur und der relativen Feuchte (Campbell Scientific CS215, Feuchte-Temperatursensor), der Windrichtung und -geschwindigkeit (WindSonic 2-D Ultraschall-Anemometer und Windrichtungsgeber) und der Globalstrahlung (CS300 Apogee SI-Fotodioden Pyranometer) zur Verfügung standen.

2.3.2 Beprobungszeiten und -häufigkeiten

Alle Geräte waren über den kompletten Versuchszeitraum an den Standorten installiert. Von den automatischen Probeentnahmegeräte (APEG`s) wurden nur Proben entnommen, wenn ein abflussbildendes Niederschlagsereignis stattfand. Die Geräte wurden jeweils manuell einige Stunden vor einem Ereignis eingeschaltet und anschließend wieder manuell ausgeschaltet. Das Beprobungsintervall betrug anfangs eine Stunde und wurde dann im Verlauf der Forschungsarbeit auf zwei Stunden erhöht. Aufgrund einer Probeflaschenanzahl von 42 Flaschen konnten die APEG's somit 42 h bzw. 84 h durchgehend beproben. Die Diver-Sonden und alle weiteren Messinstallationen liefen kontinuierlich über den gesamten Zeitraum. Einige Geräte liefern Daten in einem 10-minütigem Intervall, andere minütige Werte. Die Wahl der Zeitintervalle begründete sich durch möglichst detailgenaue sowie exakte Daten und durch einen praktikablen Messaufwand und das jeweilige Speichervolumen der Messgeräte.

Um die automatischen Probeentnahmegeräte zum richtigen Zeitpunkt aktivieren zu können wurden die Wetterprognosen mehrmals täglich abgefragt. Vorrangig über die Internetseiten www.meteomedia.de und www.meteoblue.com. Für detaillierte Vorhersagen über die Anfangszeiten der Niederschlagsereignisse wurde auch die Seite www.niederschlagsradar.de verfolgt. Wurde ein Niederschlagsereignis mit in der Summe mindestens 5 mm Niederschlag vorausgesagt, wurden alle APEG's eingeschaltet. Dies sollte möglichst zeitnah hintereinander geschehen, um die unterschiedlichen Standorte bestmöglich miteinander vergleichen zu können. Der Beprobungszeitraum sollte ca. zwei Stunden vor dem vorhergesagten Niederschlagsereignis beginnen. Die APEG's können auch schon vor Ablauf ihrer Maximallaufzeit ausgeschaltet werden, allerdings ist darauf zu achten, dass das Ereignis auch im Grundwasser schon beendet ist. Teilweise kann der Moment des Abschaltens der automatischen Probeentnahmegeräte mit Hilfe der Leitfähigkeitssonden überprüft werden (siehe Abschnitt 2.4.1).

2.4 Analyse

2.4.1 Probenanalyse im Labor

Die entnommenen Wasserproben wurden gut verschlossen und möglichst dunkel und kühl im Labor gelagert, bis mit den Analysen begonnen werden konnte. Ließen sich mit bloßem Auge Feststoffe in den Probeflaschen erkennen, wurden diese gefiltert (0,45 µm). Die aufbereiteten Proben wurden auf stabile Isotope (Laserabsorptions – Spektrometrie / PICARRO) getestet. Es wurden zunächst die Leitfähigkeitssonden ausgewertet und dann nur die Beprobungszeiträume untersucht, welche bei den Signalen der Leitfähigkeit ein erkennbares Niederschlagsereignis anzeigten. Des Weiteren, wurde zunächst nur jede vierte Probe analysiert. Vorausgegangene Untersuchungen am Institut für Hydrologie (Nicole Jackisch) aus dem Jahre 2011 hatten gezeigt, dass schon mit einem Zeitintervall von vier Stunden der Ereignispeak ausreichend erkennbar ist.

Die Vorbereitung der Wasserproben, sowie das Abfüllen in die geeigneten Analysegefäße, wurde von mir persönlich durchgeführt. Die letztendliche Bedienung der technischen Analysegeräte, vor allem des Laserabsorptions-Spektromographen (PICARRO), wurde dann allerdings von Frau Barbara Herbstritt, als wissenschaftliche Mitarbeiterin des Instituts für Hydrologie und Spezialistin für die benötigten Analyseverfahren, übernommen.

2.4.2 Analyse der Daten

Durch die Feldmessungen erhielt man kontinuierliche Zeitreihen der Diver-Sonden in den Grundwasserpegeln, der OTT-CTD-Sonden in den Überlaufschächten und der Bodenfeuchtemessungen in den Mulden in einem 10-mintütigem Intervall. Die Messungen der Verhältnisse an der Muldensohle sowie alle verfügbaren Klimadaten (siehe 2.3.1) standen im 1 minütigem Intervall zu Verfügung. Die Laboranalysen lieferten außerdem Punktmessungen von δ 180- und δ 2H-Werten.

Um die unterschiedlichen Datensätzen auswerten zu können, wurden diese mithilfe des Statistikprogramms "R" (RStudio/R-2.15.1) aufbereitet und in einer Tabelle pro Messstandort zusammengefügt. Für alle unterschiedlichen Zeitreihen wurde ein einheitliches Datumsformat erstellt, welches vom 18.07.2012 00:00 Uhr bis zum

12.10.2012 10:00 Uhr reicht und ein 1-minütiges Intervall aufweist. Bei den Daten der Diver-Sonden wurden Ausreißer und Fehlwerte, die z.B. beim Auslesen und Warten der Sonden entstehen, herausgelöscht und die Datenlücken dann mittels linearer Interpolation geschlossen. Leitfähigkeitsmessungen der Diver kompensierte man entsprechend der Luftdruckveränderungen, welche mittels eines nahegelegen Barodivers aufgezeichnet wurden (siehe 2.3.1). Bei den OTT-CTD-Sonden mussten zunächst die separaten Zeitreihen (je ca. 2 Wochen) aneinandergehängt werden. Dann wurden auch hier Ausreißer, vor allem bei der empfindlichen Leitfähigkeitsmessung, entfernt und die Datensätze anschließend interpoliert. Dasselbe Verfahren wurde bei den Daten der Bodenfeuchtesonden bzw. den Messungen an der Muldensohle angewendet.

Alle Niederschlags- und Klimadaten wurden von Frau Jackisch zur Verfügung gestellt. Für die späteren Berechnungen mussten dann lediglich noch 15-Minuten-Summen aus den 1-minütigen Zeitreihen errechnet werden. Abschließend mussten alle Wasserstandsmessungen auf die Höhenangabe der betreffenden Sonde bezogen und in mNN umgerechnet werden, um die Verhältnisse an den drei Standorten vergleiche zu können. Die aus Laboranalysen erhaltenen Isotopenwerte wurden, für die betreffenden Standorte, an die Tabelle angefügt.

Im Laufe der nachfolgenden Berechnungen und Darstellungen, erwies es sich als notwendig, mit Hilfe der Wasserstandsmessungen an den Mulden 914/3 und 915/6 die Einstauhöhen und freien Porenvolumen (m³ und %) der Rigolen auszurechnen. Des Weiteren, wurden die Wasserstandsdaten aller unterschiedlichen Messgeräte für die Daten der Mulden und des Grundwassers von 10-minütigen auf 1-minütige Zeitreihen interpoliert und dann mittels gleitendem Mittel geglättet. Für die Muldendaten reichte eine Glättung über 5 min und für die Daten des Grundwassers wurde ein Glättungsintervall von 50 min verwendet. Die Wasserstandsmessungen in den Rigolen reagierten unempfindlicher und mussten daher nicht geglättet werden. Auch die unterschiedlichen Datenreihen der Leitfähigkeit wurden auf 1-minütige Werte interpoliert. In diesem Fall musste bei allen Varianten eine Glättung vorgenommen werden. In der Mulde mit einem gleitendem Mittel von 5 min, in den Rigolen von 50 min und in den Grundwasserpegeln sogar mit einem Glättungsintervall von 180 min. Bei der Betrachtung einzelner kurzer Niederschlagsereignisse und besonders zur Berechnung dieser mit dem Verfahren der Kreuzkorrelation, wurden dann einzelne Ausschnitte noch zusätzlich geglättet.

Auswertung mittels Kreuzkorrelation

Die Korrelation zweier unterschiedlicher Zeitreihen ist ein Maß für den linearen Zusammenhang zwischen diesen. Sie berechnet, inwieweit die Varianz einer Zeitreihe auf die Varianz einer anderen zurückgeführt werden kann (Vogt et al., 2009; Vogt et al., 2010). Es werden die beiden unterschiedlichen Zeitreihen gegeneinander verschoben und der Zeitversatz ermittelt. In dieser Arbeit soll mittels der Kreuzkorrelationsmethode die zeitliche Verschiebung, bzw. die Verweilzeit, des Niederschlagssignals von der Mulde ins Grundwasser errechnet werden. An den Mulden 914/3 und 915/6 kann, dank der Informationen zur Rigolenfüllung, auch noch die Verweilzeit zwischen Mulde und Rigole sowie zwischen Rigole und Grundwasser genau betrachtet werden. In dem Fachbeitrag von Vogt et al. (2009) wird empfohlen die Kreuzkorrelationsanalyse nach Entfernung des saisonales Signals durchzuführen. Da in dieser Arbeit nur sehr kurze Zeitausschnitte untersucht werden, welche weder Jahresgänge noch deutliche Tagesgänge aufzeigen, ist dieser Schritt hinfällig.

Die Kreuzkorrelation wurde sowohl für die Zeitreihen der Wasserstände als auch für die Daten der Leitfähigkeiten angewendet. Bei den Wasserständen wurden die jeweiligen Maximalwerte analysiert und mit diesen die maximale Korrelation berechnet. Aufgrund der zeitlichen Verschiebung des Reaktionssignals sind die Zeitversätze negativ. Untersucht man die Signale der Leitfähigkeit, äußern sich Niederschlagsreaktionen durch Minima. Im Niederschlagswasser aus der Mulde kann kein Minimum der spezifischen Leitfähigkeit ausgebildet werden, denn es befindet sich nur bei Niederschlagsereignissen überhaupt Wasser in der Mulde und die Leitfähigkeit wird demzufolge auch nur zu diesen Zeitpunkten gemessen. Zur Betrachtung der Reaktion in demnach bei Leitfähigkeitsauswertung der Mulde wurden auch der die Wasserstandsdaten herangezogen. In der Mulde wird ein Maximum ausgebildet und in der Rigole sowie im Grundwasser ein Minimum. Somit muss man bei der Kreuzkorrelation die minimale Übereinstimmung berechnen, die Zeitversätze bleiben auch bei dieser Variante im negativen Bereich.

Je Datensatz und Messstandort wurden alle, sowohl in der Mulde, als auch in der Rigole und im Grundwasser, erkennbaren Niederschlagsereignisse betrachtet und analysiert. Um möglichst exakte Ergebnisse zu erhalten, wurden die Zeitausschnitte für jedes Ereignis und jeden Standort individuell gewählt, die Zeitreihen wurden teilweise erneut mittels gleitendem Mittel geglättet und einzelne Zeitreihen gekürzt. Ein klares Maximum mit identischen Anfangs- und Endwert ist ideal für die Anwendung der Kreuzkorrelationsmethode.

Auswertung durch Ermittlung der Maximalwerte

Eine weitere Methode, um die Zeitdifferenz zwischen den Reaktionssignalen im Oberflächenwasser und Grundwasser bestimmen zu können, ist die Auswertung der Zeitversätze zwischen den Maximalwerten der Zeitreichen. Als Grundlage dienen auch in diesem Fall die Datenreihen der Wasserstände und der spezifische Leitfähigkeit in Mulde, Rigole (an den Stellen 914/3 und 915/6) und Grundwasser. Die, bereits für die Kreuzkorrelation ausgewählten, Zeitausschnitte werden auch hier verwendet. Allerdings ist in diesem Fall keine erneute Glättung oder Kürzung der Daten notwendig. Die Maximalwerte können auch innerhalb zackiger Datenreihen ermittelt werden. Hat man die genauen Zeitangaben an denen Maxima auftreten ermittelt, kann man die Zeitversätze zwischen den Maxima errechnen und erhält die Verweilzeiten von Oberflächenwasser zu Grundwasser, bzw. zu dem Zwischenspeicher in der Rigole.

Die ausgewählten und analysierten Zeitausschnitte wurden anschließend graphisch dargestellt und der hydraulische Gradient zwischen dem Verlauf des Wasserstands in der Rigole und im Grundwasser berechnet. Mittels hydraulischem Gradient, welcher sich vom Gesetz von Darcy ableitet, lässt sich die Richtung eines lokalen Grundwasserstroms feststellen (Kalbus et al., 2006). Der hydraulische Gradient ergibt sich aus der Differenz des Wasserstands im Grundwasser [mNN] und des Wasserstands in der Rigole [mNN] dividiert durch den Abstand von dem Punkt der Grundwassermessung bis zur Außenkante der Rigole [m].

3 Ergebnisse

In dem untersuchten Zeitraum vom 17.07.12 bis zum 12.10.12 erfolgten alle unter 2.3.1 beschrieben Messungen kontinuierlich. Zusätzlich zu den Messreihen der unterschiedlicher Sonden, konnten bei acht Niederschlagsereignissen die APEG`s eingeschaltet und Wasserproben entnommen werden (siehe Tabelle 3-1). Eine Kombination aus den gemessenen Datenreihen und den analysierten Wasserproben wurde verwendet um die Fragestellung und Hypothese auszuwerten.

3.1 Ergebnisse der Wasseranalysen

Die Wasserproben wurden, wie in 2.4.1 erläutert, im Labor auf die Isotopensignatur untersucht. Eine zunächst angedachte Analyse auf Hauptionen des Wassers konnte aufgrund defekter Geräte nicht angeschlossen werden.

Tabelle 3-1:Informationen zu den einzelnen beprobten Niederschlagsereignissen. Die Anfangs- und Endzeiten beziehen sich auch den Beprobungszeitraum der APEG`s und nicht auf die tatsächlichen Niederschlagsvorkommnisse. Flaschen-G sind die Proben, welche im Grundwasser gezogen wurden und Flaschen-M solche, welche an der Mulde 914/3 das Niederschlagswasser direkt beproben.

NE	Anfang		Ende		Flaschen –G	Flaschen -M
	Datum	Zeit	Datum	Zeit		
1	28.07.12	16°°	30.07.12	10°°	(1 bis 42)	-
2	04.08.12	18°°	06.08.12	12°°	(1 bis 42)	-
3	15.08.12	20°°	17.08.12	1400	(1 bis 42)	-
4	23.08.12	17°°	25.08.12	1100	1 bis 42	4 bis 33
5	29.08.12	16°°	02.09.12	ca. 06°°	43 bis 126	34 bis 51
6	18.09.12	16°°	20.09.12	10°°	127 bis 168	77 bis 102
7	21.09.12	1400	25.09.12	02°°	169 bis 210	103 bis 139
8	08.10.12	16°°	12.10.12	0400	211 bis 252	183 bis 225

Bei den ersten drei beprobten Ereignissen konnte, nach einer Kontrolle der Leitfähigkeitsdaten, keine Reaktion des Grundwassers auf das sich zuvor ereignete Niederschlagsereignis festgestellt werden. Des Weiteren entnahm APEG 8 (an Mulde 914/6) im ersten Ereignis nur 20 von 42 Wasserproben. Um die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Messstandorte und die Aussagekraft der Daten sicherzustellen, musste also in den Analysen auf diese Ereignisse verzichtet werden. Es wurde entschieden, die Probeflaschen zu spülen, gut zu trocknen und wieder für das nächste Ereignis bereitzustellen. Wie man in Tabelle 3-1 erkennen kann, hat der APEG an Mulde 914/3 in den ersten drei Ereignissen außerdem keine Wasserproben vom Niederschlag gezogen. Auch in Abbildung 3-1 fällt auf, dass bei den ersten drei beprobten Ereignissen die Reaktionen des Wasserstands von Grundwasser und Mulde vergleichsweise gering sind. Somit beziehen sich die folgenden Analysen der Wasserproben ausschließlich auf die Niederschlagsereignisse von 4, 5, 6 und 7.



Abbildung 3-1: Darstellung der acht mit APEG's beprobten Niederschlagsereignisse (rote Kreise). Beispielhaft wurde hier der Verlauf des Wasserstands im Grundwasser und in der Mulde von einem der drei Messstandorte dargestellt. Die blauen Balken signalisieren die Niederschlagsverhältnisse im Messzeitraum. Dargestellt ist der komplette Messzeitraum vom 17.07.2012 bis zum 12.10.2012.

Um über weitere Analyseverfahren entscheiden zu können, wurden die einzelnen Ereignisse pro Standort zunächst graphisch dargestellt. In Abbildung 3-2 sind zwei Niederschlagsereignisse mit Isotopensignatur und Zeitreihe der Leitfähigkeit im oberen sowie unteren Grundwasser abgebildet. Die linke Graphik zeigt das siebte Niederschlagsereignis an der Messstelle 914/3, bei welchem über 48 h beprobt wurde. Im Signal der oberen Leitfähigkeit erkennt man einen leichten Abfall der spezifische

Leitfähigkeit mit Eintritt des Niederschlagereignisses. Die Leitfähigkeitssonde im unteren Bereich des Grundwassers zeigt allerdings nur eine sehr schwache Reaktion. Im Hinblick auf die Isotopensignatur verhalten sich die Signale im oberen und unteren Grundwasser relativ ähnlich. Zwar liegen die Isotopenwerte der unteren Beprobungsstelle fast durchgehend höher als die der unteren Beprobungsstelle, aber ein Anstieg der Isotopensignatur mit eintreten des Niederschlagsereignis lässt sich an beiden Graphen ablesen. Die rechte Graphik zeigt das fünfte Niederschlagsereignis, welches an der Mulde 914/6 beprobt wurde. Auch diesmal handelt es sich um ein Ereignis, welches über 48 h kontinuierlich aufgezeichnet und beprobt wurde. Sowohl das Leitfähigkeitssignal im oberen als auch im unteren Grundwasser zeigt eine deutliche Reaktion auf das Niederschlagsereignis. Die spezifische Leitfähigkeit sinkt. Da am Ende die Leitfähigkeiten wieder leicht ansteigen, scheint das komplette Reaktionssignal im Grundwasser durch den Beprobungszeitraum abgedeckt zu sein. Auch in diesem Beispiel verhalten sich die Isotopensignaturen relativ ähnlich. Es ist nicht zu erkennen, dass sich die Isotopenwerte im oberen oder unteren Grundwasserbereich tendenziell in Niveau unterscheiden. Beide Kurven fallen mit Eintritt ihrem des Niederschlagsereignisses ab. Die Isotopensignatur ist also entgegengesetzt dem in Graphik a beschriebenen Verlauf. Der zu erwartende Verlauf der Isotopensignatur gleicht Graphik a. Hingegen zeigt Graphik b, trotz stärkerem Leitfähigkeitssignal, eine untypischen Verlauf der Isotopensignatur.



Abbildung 3-2: Niederschlagsereignisse mit Isotopensignatur und Leitfähigkeitssignal. a) Ereignis vom 21.09 bis 25.09 an der Messstelle 914/3 b) Ereignis vom 29.08 bis 02.09 an der Messstelle 914/6

Da von den insgesamt 15 Graphikvarianten (je fünf pro Standort) nur die wenigsten den zu erwartenden Verlauf der Isotopenwerte zeigen, wurde entschieden, die Ereignisse nicht einzeln auszuwerten. Die geplante Mischungsrechnung und Ganglinienseperation zur Komponententrennung und Bestimmung des Ereigniswassers anhand der Isotopensignale wurde nicht durchgeführt. Um die Daten der Wasserproben dennoch weiter auswerten zu können, wurden zunächst die gemessenen Isotopenwerte im Grundwasser und im Niederschlagswasser gegenübergestellt (Abbildung 3-3). Die Grundwasserisotope (δ 2H: -40 bis -70, δ 18O: -6 bis -9) liegen allgemein negativer und näher beieinander als die Niederschlagswerte (δ 2H: -10 bis -70, δ 18O: -2 bis -10).



Abbildung 3-3: Darstellung der Isotopenwerte aller Wasserproben aus den APEG's. Die Grundwasserwerte beziehen sich auf den jeweiligen Standort und die entsprechende Grundwassertiefe und die Niederschlagswerte stammen alle aus der einen Oberflächenwasserbeprobung an Mulde 914/3. In rot ist die Global Meteoric Water Line (GMWL) dargestellt.

Der Unterschied von Niederschlagwasser und Grundwasser in der Isotopensignatur ermöglicht die Identifizierung von Herkunftsorten. Betrachtet man die in Abbildung 3-3 dargestellten Werte, fällt auf, dass die Grundwasserisotope am Graben Nord weiter streuen als es die Daten am Boulevardgraben tuen. Außerdem liegen die Daten am Graben Nord tendenziell in einem leichteren Isotopenbereich. Die Isotopenwerte im Grundwasser aller gezeigten Standorte deuten nicht auf einen Verdunstungseffekt hin.

Zur weiteren Betrachtung der Isotopenwerte wurden die Daten über die Zeit geplottet und Deuterium- sowie Sauerstoffwerte normiert (Abbildungen 3-4, 3-5 und 3-6). Bei dieser Art der Darstellung lässt sich eine mögliche Fraktionierung erkennen und man kann, falls vorhanden, einen leichten Jahresgang im Isotopensignal ableiten. Am Boulevardgraben (Abbildung 3-6) liegen die Isotopenwerte der Grundwasserproben sehr eng beieinander. Dies konnte man schon anhand Abbildung 3-3 sehen. Es ist erkennbar, dass sie allerdings an Mulde 914/6 (Abbildung 3-5) noch enger liegen als an Mulde 914/3 (Abbildung 3-4). Besonders bei den beiden späteren Niederschlagsereignissen im September ist an Messstelle 914/3 eine leichte Streuung abzulesen. Bei diesen Ereignissen hat sich demzufolge eine Fraktionierung des Grundwassers ereignet, denn die Symbole der Deuterium- und Sauerstoffdaten liegen nicht aufeinander. Diese Tendenz ist bei allen Grundwasserproben am Boulevardgraben erkennbar, sie ist jedoch unterschiedlich stark ausgebildet.



Abbildung 3-4: Darstellung der normierten Isotopendaten aus dem Grundwasser an Messstelle 914/3 am Boulevardgraben. Die Niederschlagsdaten aus der Mulde (gelb) stammen ebenfalls vom Standort 914/3. Alle Sauerstoffdaten wurden mit 8 multipliziert und mit 10 addiert. Abgebildet sind die Niederschlagsereignisse 4,5,6 und 7.


Abbildung 3-5: Darstellung der normierten Isotopendaten aus dem Grundwasser an Messstelle 914/6 am Boulevardgraben. Die Niederschlagsdaten aus der Mulde (gelb) stammen vom Standort 914/3. Alle Sauerstoffdaten wurden mit 8 multipliziert und mit 10 addiert. Abgebildet sind die Niederschlagsereignisse 4,5,6 und 7.

Im Niederschlagswasser hat weniger Fraktionierung stattgefunden. Die Unterschiede unter den vier beprobten Niederschlagsereignissen sind allerdings stärker ausgeprägt. So findet am siebten Ereignis überhaupt keine erkennbare Fraktionierung der Wasserisotope statt. Auch die Ereignisse 4 und 6 zeigen nur eine schwache Streuung der Datenpunkte. Beim fünften Niederschlagsereignis streuen die Isotopenwerte um einiges stärker als bei den anderen drei Ereignissen. Es lässt sich an manchen Werten eine klare Fraktionierung ablesen. Diese Streuung tritt aber auch beim fünften Ereignis nur innerhalb einiger Isotopenmessungen auf. Aufgrund des kurzen Zeitraums, in dem die Messungen erfolgten, ist es nicht möglich einen Jahresgang abzulesen.

Am Graben Nord (Abbildung 3-6) streuen die Isotopenwerte der Grundwasserproben stark. Bei allen vier Niederschlagsereignissen lässt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den Daten des oberen und des unteren Grundwassers erkennen. Zusätzlich streuen noch die einzelnen Ereignisse in Bezug auf Deuterium- und Sauerstoffdaten. Betrachtet man die Differenz zwischen den Daten der oberen Grundwasserproben und der unteren Grundwasserproben, unterscheiden sich die einzelnen Niederschlagsereignisse voneinander. Bei den Ereignissen 6 und 7 liegen die Werte des oberen Grundwassers fast um 10 Enheiten höher. Von den Ereignissen 6 zu 7 und auch innerhalb des Ereignisses 7 lässt sich ein leicht steigender Trend erkennen. Ansatzweise parallel zueinander steigen die Werte der oberen und der unteren Wasserproben an. Berücksichtigt man die verschiedenen Positionen der Messstellen an den beiden Regenwasserversickerungsgräben, fällt ein Unterschied zwischen dem Boulevardgraben und dem Graben Nord auf. Wie auch schon in Abbildung 3-3 zu erkennen war, liegt am Graben Nord tendenziell eine größere Streuung und eine leichtere Isotopensignatur vor.



Abbildung 3-6: Darstellung der normierten Isotopendaten aus dem Grundwasser an Messstelle 915/6 am Graben Nord. Die Niederschlagsdaten aus der Mulde (gelb) stammen vom Standort 914/3. Alle Sauerstoffdaten wurden mit 8 multipliziert und mit 10 addiert. Abgebildet sind die Niederschlagsereignisse 4,5,6 und 7.

Analyse der Isotopensignatur mit Stichtagsmessungen

Im Rahmen der Doktorarbeit "Urbane Hydrologie unter dem Einfluss des Grundwassers" wurden im Vaubangebiet, in vergangen den drei Jahren, den Isotopensignaturen des Grundwassers Stichtagsmessungen zu und Oberflächenwassers gemacht. Um die eigens erhobenen Daten der Grundwasserisotope

in einen jahreszeitlichen Verlauf einordnen zu können, sind in Abbildung 3-7 die Stichtagsmessungen der betreffenden Messstandorte und die eigenen Daten graphisch dargestellt. Es wurden nur Grundwasserproben abgebildet. Die Stichtagsmessungen am Graben Nord beziehen sich auf genau dieselbe Grundwassermessstelle, welche auch im Rahmen dieser Forschungsarbeit beprobt wurde. Die beprobte Grundwassermessstelle am Boulevardgraben 914/3 wurde extra für diese Arbeit gesetzt, konnte also nicht schon im Vorfeld beprobt werden, aber BK23 befindet sich in unmittelbarer Nähe und grenzt an die gleiche Mulde.



Abbildung 3-7: Darstellung der normierten Isotopendaten aus dem Grundwasser von Messstelle 914/3 (links) und 915/6 (rechts). In beiden Fällen sind außerdem noch Stichtagsmessungen aus den vergangenen drei Jahren derselben Messstandorte abgebildet. Alle Sauerstoffdaten wurden mit 8 multipliziert und mit 10 addiert. Abgebildet sind die Isotopenwerte der Niederschlagsereignisse 4,5,6 und 7.

Die wenigen und unregelmäßig verteilten Daten lassen keine umfangreichen Aussagen zu. Dennoch kann man einen klaren Unterschied zwischen den Datenreihen am Boulevardgraben und am Graben Nord festmachen. An 914/3 liegen alle Messungen in einem Bereich von -52 bis -62. Die Daten an 915/6 schwanken allerdings zwischen -40 und -65. Die Messstelle am Graben Nord weist demnach größere Varianzen auf und es lässt sich die Tendenz eines leichten jahreszeitlichen Verlaufs vermuten.

3.2 Grundwasserverhältnisse

Der Grundwasserstand lag über den gesamten Messzeitraum hindurch ungewöhnlich hoch. Da in Hinblick auf die Funktion einer Regenwasserversickerungsanlage, besonders die Verhältnisse in den jeweiligen Rigolen von Bedeutung sind, wurde die Einstauhöhen dieser berechnet und graphisch dargestellt (Abbildungen 3-8 und 7-1 bis 7-4). Die unten stehende Abbildung zeigt die Bedingungen an der Mulde 914/3 am Boulevardgraben. Anhand der linken Graphik sieht man, dass die Rigole über den gesamten Zeitraum der Datenerhebung nie ganz leer war. Ab September haben die Niederschlagsereignisse den Wasserstand in der Rigole so stark ansteigen lassen, dass die Rigolen-Oberkante erreicht wurde. Zudem lag der Grundwasserspiegel durchgehend auf Höhe der Rigole. Anhand der rechten Graphik wird außerdem deutlich, dass ab September über mehrere Tage 0 % freies Retentionsvolumen zur Verfügung stand und maximal ein freies Retentionsvolumen von 70 % erreicht wurde. Die Verhältnisse an den beiden anderen Mulden sind im Anhang dargestellt.



Abbildung 3-8: Darstellung der Rigolenverhältnisse und Grundwasserstände. Die linke Abbildung zeigt die Einstauhöhe der Rigole und den Grundwasserstand an Mulde 914/3. Die gestrichelte violette Linie zeigt die Rigolen-Unterkante und die gestrichelte orange Linie die Rigolen-Oberkante. Die rechte Abbildung zeigt das freie Retentionsvolumen in der Rigole an Mulde 914/3. Dargestellt ist jeweils der komplette Messzeitraum vom 17.07.2012 bis zum 12.10.2012.

Zum Vergleich der einzelnen Standorte, bezogen auf die jeweiligen Grundwasserstände und Einstauhöhen der Rigolen, dient Abbildung 3-9. Sie visualisiert den Abstand der Einstauhöhe zur Rigolenoberkante in % und in m. Die Rigole am Graben Nord (915/6, blau) ist bei jedem der beprobten Ereignisse fast vollständig eingestaut und an den Ereignissen fünf, sieben und acht sogar überfüllt. Auch wenn die beiden anderen Rigolen mehr potentiell freies Retentionsvolumen vorweisen, entleeren sie sich vor keinem der beprobten Niederschlagsereignisse. Grundsätzlich zeigt die Rigole an Mulde 914/6 (grün) am meisten potentiell freies Porenvolumen. Außerdem sind die Rigolen am Boulevardgraben (rot und grün) nicht so stark gefüllt wie die Rigole am Graben Nord.



Abbildung 3-9: Abstand der Einstauhöhe zur Rigolen-Oberkante in % (linke Abb.) und in m (rechte Abb.). Dargestellt sind die Vorbedingungen der Niederschlagsereignisse 4 bis 8. Ein Ausschlag nach oben signalisiert freies Porenvolumen in der Rigole und ein Ausschlag nach unten, eine Überschreitung des maximal verfügbaren Retentionsvolumens der Rigole.

3.3 Ergebnisse der Datenreihenanalyse

Die Analyse der Messzeitreihen bezieht sich auf den gesamten Abschnitt der Datenerhebung vom 17.07.12 bis zum 12.10.12 und berücksichtigt nicht ausschließlich die durch APEG's beprobten Niederschlagsereignisse. Es wurden pro Standort alle erfassten Ereignisse analysiert. Hauptsächlich wurden die Datenreihen der spezifischen Leitfähigkeit und die Wasserstandszeitreihen untersucht. Eine Analyse der Temperaturmessungen erwies sich als nicht geeignet, da auch große Niederschlagsereignisse keine erkennbare Reaktion in der Temperaturganglinie von Grundwasser oder Rigolenfüllung hervorgerufen hat. Die Datenreihenanalyse wurde mittels der Kreuzkorrelationsmethode und mittels Auswertung der Maxima durchgeführt.

3.3.1 Analyse der spezifischen Leitfähigkeit

Für alle drei Messstandorte wurde die Zeitreihe der spezifischen Leitfähigkeit gesondert betrachtet und pro Standort die verwertbaren Niederschlagsereignisse analysiert. Jeder Ausschnitt wurde mittels beider Methoden untersucht um die Verweilzeiten zwischen einzelnen Versickerungsebenen zu bestimmen. An den Mulden 914/3 und 915/6 wurde die spezifische Leitfähigkeit auch direkt in der Rigole gemessen. Somit konnte an diesen Standorten die Reaktionszeit von der Mulde in die Rigole, von der Rigole ins obere Grundwasser sowie ins untere Grundwasser und von der Mulde ins obere bzw. untere Grundwasser errechnet werden. An Mulde 914/6 war nur die Berechnung des Reaktionssignals von der Mulde ins obere und untere Grundwasser möglich. Tabelle 3-2 zeigt alle Reaktionszeiten die aufgrund der Leitfähigkeitssignale berechnet werden konnten. Ein kleines (a) hinter einer Zahl bedeutet, dass die Berechnung der Verweilzeit eine negative Reaktionszeit ermittelt hat. Diese Werte wurden für alle weiteren Analysen und Darstellungen nicht berücksichtigt. Eine Tabelle mit meteorologischen Daten zu den jeweiligen Niederschlagsereignissen und den Bedingungen der Bodenfeuchte findet sich im Anhang (Tabelle 7-1).

Tabelle 3-2: Berechnung der Reaktionszeit (min) zwischen den Versickerungsstufen einzelner Niederschlagsereignisse pro Messstandort. Ermittelt durch Daten der spezifischen Leitfähigkeit. Die Versickerungsstufen sind folgende: von der Mulde in die Rigole (M > R), von der Rigole in den oberen Bereich des Grundwassers (R > oGW) und in den unteren Bereich des Grundwassers (R > uGW) sowie von der Mulde ins obere Grundwasser (M > oGW) und von der Mulde ins untere Grundwasser (M > oGW). Abgebildet sind jeweils die Methoden der Kreuzkorrelation (CCR) und der Maxima-Auswertung (MAX). Ein (a) kennzeichnet eine negative Verweilzeit.

		914/3 CCR	914/3 MAX	914/6 CCR	914/6 MAX	915/6 CCR	915/6 MAX
2012-07-28	M > R						
	R > o GW						
	$R > u \; GW$						
	$M > o \ GW$			1153	129		
	$M > u \ GW$			173	1196		
2012-08-22	M > R					2545	258
	$R > o \ GW$					1	42
	$R > u \; GW$					1 (a)	515
	$M > o \ GW$			1795 (a)	2636	2832	255
	$M > u \ GW$			291	277	2864	323
2012-08-24	M > R	2	32			2513	252
	R > o GW	16 (a)	491				42
	$R > u \; GW$	68 (a)	378			1	2515
	$M > o \ GW$	49	523			267	2544
	M > u GW	372	41			4856	517

Masterarbeit Lina Santa Maria

		914/3 CCR	914/3 MAX	914/6 CCR	914/6 MAX	915/6 CCR	915/6 MAX
2012-08-31	M > R	68	185			123	1193
	$R > o \ GW$	347	31				24
	$R > u \; GW$	339	95				228
	$M > o \ GW$	157	216			1424	1433
	$M > u \; GW$	15	28			1412	1421
2012-09-12	M > R					979	984
	$R > o \ GW$					1	395
	$R > u \; GW$					1 (a)	14 (a)
	$M > o \ GW$					1397	1379
	$M > u \; GW$					1 (a)	2 (a)
2012-09-18	M > R	386	4344			2964	283
	$R > o \ GW$	3593					235
	$R > u \; GW$	1125	2116 (a)				57
	$M > o \ GW$	3911	4344	795	783	3251	365
	M > u GW	147	2228	1786 (a)	2377	3293	34
2012-09-21	M > R	2426	2977			1448	1447
	R > o GW	2828 (a)	1375 (a)			1	1115
	$R > u \; GW$	2656 (a)	186 (a)			1	1195
	$M > o \ GW$	1269	162	243 (a)	2684	2593	2562
	M > u GW	253 (a)	1117	66	799	2595	2642
2012-09-26	M > R					56	419
	R > o GW					1	19
	$R > u \; GW$					1	8
	$M > o \ GW$					532	528
	M > u GW					5	499
2012-09-27	M > R					1461	1477
	R > o GW					1	135
	$R > u \; GW$					1	135
	$M > o \ GW$			38	541	24	2512
	M > u GW			195	868	2365	2512
2012-01-09	M > R	663	815			27	286
	R > o GW		86 (a)			1	1 (a)
	R > u GW	678 (a)	69			1 (a)	18 (a)
	$M > o \ GW$	18 (a)	45 (a)			35	276
	$M > u \; GW$	722 (a)	884			87	16

Es konnten anhand der Leitfähigkeitsdaten je fünf Ereignisse für die Mulden 914/3 und 914/6 ausgewertet werden. An Messstelle 915/6 wurden neun Ereignisse untersucht. An der Mulde 914/3 kommt es bei den Ereignissen vom 31.08, 18.09, 21.09 und 09.10 zu einer kompletten Füllung der Rigole. Der Wasserstand in der Rigole kann nicht weiter ansteigen und der Grundwasserstand steigt somit leicht über den Wasserstand in der Rigole. In einem solchen Fall kann weder die Kreuzkorrelation noch die Maxima-

Auswertung eine richtige Verweilzeit berechnen. Abgesehen von den Ereignissen am 21.09 und am 10.09, liefern die Versickerungsschritte von der Mulde in die Rigole und von der Mulde in die unterschiedlichen Grundwasserebenen an Messstelle 914/3 durchweg plausible Verweilzeiten. Im Gegensatz dazu, kann an Messstelle 914/6 in drei Fällen das Signal von der Mulde ins Grundwasser nicht richtig ausgewertet werden. Mulde 915/6 weist am wenigsten Fehlwerte auf. Allerdings beträgt die errechnete Verweilzeit (Kreuzkorrelationsmethode) von der Rigole ins Grundwasser durchweg 0 min oder 1 min. Dies stellt zwar keinen direkten Fehlerwert dar, aber spiegelt sicherlich nicht die realen Verhältnisse der Oberflächen-Grundwasser-Interaktion wieder. Betrachtet man die berechneten Verweilzeiten aller Standorte und Niederschlagsereignisse lässt sich zusammenfassen, dass kein Standort einheitlich zuverlässige Ergebnisse zur Verfügung stellt. Selbstverständlich müssen jeweils die meteorologischen Verhältnisse berücksichtigt werden. In Hinblick darauf, zeigt sich an Mulde 914/6 z.B. ein besseres Ergebnis der Verweilzeitberechnung bei kleiner Niederschlagssumme (28.07 und 27.09, Tabelle 7-1).

Abbildung 3-10 zeigt exemplarisch die Vorgehensweise zur Berechnung der Verweilzeiten in Bezug auf Leitfähigkeitszeitreihen. Abgebildet ist das Ereignis vom 21.09 an allen drei Messstandorten. Zunächst wurde die Zeitreihe der Muldendaten betrachtet, um ein Maximum kurz nach oder während eines Niederschlagsereignis zu erfassen. Die Wasserstandsmaxima in der Mulde bilden das Inputsignal für den betrachteten Ausschnitt und die weiteren Berechnungen. Wie bereits oben beschrieben, können die Datenreihen der spezifischen Leitfähigkeit in der Mulde dafür nicht verwendet werden (2.4.2). In dem Fall vom dargestellten Niederschlagsereignis wurde das Muldensignal an der Messstelle 914/3 mit einem gleitenden Mittel von 60 min geglättet. An den anderen beiden Messstellen war dies nicht notwendig. Kurz nach der Reaktion in der Mulde kann man an Messstelle 914/3 und 915/6 einen Abfall der spezifischen Leitfähigkeit in der Rigole feststellen. Die Zeitreihe der Leitfähigkeit im Grundwasser verhält sich sehr unterschiedlich innerhalb der Messstandorte. An Standort 914/3 reagiert fast nur das obere Grundwasser, an Standort 914/6 fast nur das untere Grundwasser und schließlich am Boulevardgraben (915/6) scheint keine der Grundwasserdatenreihen auf das Niederschlagsereignis zu reagieren.



Abbildung 3-10: Beispiel eines Datenausschnitts, welcher im Zuge der Analyse der spezifischen Leitfähigkeit untersucht wurde. Dargestellt ist das Niederschlagsereignis vom 21.09 an allen drei Messstandorten. Die blauen Balken signalisieren den Niederschlag.

Auf den oben beschriebenen Ausschnitt der Leitfähigkeitsdaten wurden beide Analysemethoden angewendet. Die Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12 zeigen die Methode der Kreuzkorrelation. Bei der ersten Darstellung befindet sich auf der linken Seite die Korrelationen der unterschiedlichen Wasserschichten an Mulde 914/3 und auf der rechten Seite die Korrelationsverhältnisse an Mulde 915/6. Darstellung zwei zeigt die Anwendung der Kreuzkorrelation für diesen Zeitausschnitt an Messstelle 914/6. Nur die Korrelation der Datenreihen aus der Mulde und des Grundwassers konnten berechnet werden. Bezogen auf das Signal von der Mulde in die Rigole und von der Mulde ins Grundwasser, ergibt die höchste negative Korrelation zwischen zwei Datenreihen den Zeitversatz (Lag) von einer Versickerungsebene in die nächste. Bezogen auf den Zeitversatz zwischen Rigole und Grundwasser, muss die höchste positive Korrelation ausgewertet werden.

In Abbildung 3-11 fällt auf, dass an Messstelle 915/6 keine Korrelationen zwischen den Datenreihen der Rigole und des Grundwassers dargestellt werden. Die Methode errechnete eine Verweilzeit von 1 min (Tabelle 3-2). Wie zuvor bereits beschrieben, ist im Grundwasser kaum eine Reaktion auf das Niederschlagsereignis ersichtlich. Da die Methode der Kreuzkorrelation Maximalwerte miteinander vergleicht, kommt es hier anscheinend zu keinem aussagekräftigen Ergebnis. Dennoch wird von der Mulde ins Grundwasser eine Verweilzeit berechnet. Diese ist sogar der ermittelten Zeit aus der Methode der Maxima-Auswertung sehr ähnlich (CCR: 2593 und 2593, MAX: 2562 und 2642, Tabelle 3-2). Betrachtet man die Korrelationsdarstellung der Mulde 914/3, ergibt nur die erste und vierte Abbildung einen negativen Zeitversatz (Lag) und damit eine auswertbare Verweilzeit. In Bezug auf die Korrelation von Mulde und Grundwasser, ist der Unterschied zwischen oberem Grundwasser (negativer Zeitversatz und damit auswertbare Verweilzeit) und unterem Grundwasser (positiver Zeitversatz und damit nicht auswertbare Verweilzeit) sehr gering. Dennoch ermittelt die Methode komplett gegensätzliche Ergebnisse.



Abbildung 3-11: Abbildungen der Kreuzkorrelationen zu dem in Abbildung 3-9 untersuchtem Niederschlagsereignis vom 21.09 an den Messstellen 914/3 (links) und 915/6 (rechts).

Ein ähnlicher Fall wie oben beschrieben, tritt auch an Messstelle 914/6 auf (Abbildung 3-12), ist dort allerdings weniger deutlich. Grob betrachtet sind sich die Korrelationsdarstellungen relativ ähnlich. Für das obere Grundwasser wird keine aussagekräftige Verweilzeit berechnet und für das untere Grundwasser ermittelt die Methode hingegen eine Verweilzeit von 606 min. Diese Verweilzeit gleicht der Berechnung mittels Methode der Maxima-Auswertung (799 min, Tabelle 3-2).



Abbildung 3-12: Abbildungen der Kreuzkorrelationen zu dem in Abbildung 3-9 untersuchtem Niederschlagsereignis vom 21.09 an der Messstellen 914/6.

Die unterschiedlichen Berechnungen der Verweilzeiten an den drei Messstandorten sind in Abbildung 3-13 und Abbildung 3-14 nochmal graphisch einander gegenübergestellt. Die erste Abbildung vergleicht die verschieden Verweilzeiten von der Mulde in die Rigole. An der Mulde 914/6 liegen keine Messungen der Rigolenbedingungen vor, daher ist diese Messstelle nicht enthalten. Die zweite Abbildung zeigt den Vergleich der unterschiedlichen Verweilzeiten von der Mulde ins obere und untere Grundwasser. Bei allen Messstandorten waren die Verweilzeitberechnungen von der Mulde in die Rigole sehr variabel und es traten extrem häufig Fehlwerte auf (siehe Tabelle 3-2). Diese Daten wurden aus diesem Grund nicht weiter ausgewertet.

Abbildung 3-13 zeigt, dass am Graben Nord (lila, 915/6) mehr Ereignisse ausgewertet werden konnten als am anderen Messstandort. Die beiden unterschiedlichen Methoden liefern außerdem größtenteils sehr vergleichbare Ergebnisse. An der Mulde 914/3 (blau, Boulevardgraben) konnten nur fünf Ereignisse überhaupt untersucht werden. Von diesen fünf zeigt kein einziges eine einheitliche Verweilzeit bezüglich der beiden angewendeten Analysemethoden. Außerdem schwanken die Ereignisse untereinander sehr stark. Bei dem Ereignis vom 24.08 wird beispielsweise eine Verweilzeit von der Mulde in die Rigole von 20 min (CCR) und 32 min (MAX) berechnet. An derselben Stelle und über den gleichen Weg, soll aber am 18.09 die Verweilzeit 3860 min (CCR) bzw. 4344 min (MAX) betragen, obwohl die Niederschlagssumme beim zweiten Ereignis um ein vielfaches höher ist (Tabelle 7-1).



Abbildung 3-13: Vergleich der Messstandorte in Bezug auf die Verweilzeitberechnungen, von der Reaktion in der Mulde zur Reaktion in der Rigole, anhand der spezifischen Leitfähigkeit. Dargestellt sind beide Analysemethoden und alle untersuchten Ereignisse. Die blauen Balken zeigen die Niederschlagssummen der Ereignisse und die graue Linie stellt exemplarisch anhand einer Messstelle (914/3) die Verhältnisse der Bodenfeuchte dar.

Abbildung 3-14 vergleicht sowohl die Reaktionszeiten von der Mulde in den oberen Bereich des Grundwassers (obere Abbildung) als auch die Reaktionszeiten von der Mulde in den unteren Bereich des Grundwassers (untere Abbildung). Teilweise lieferte nur eine der angewendeten Methoden verwertbare Verweilzeiten. An der Messstelle 914/6 (grün) ist daher zweimal, in Bezug auf das obere Grundwasser, und einmal, in Bezug auf das untere Grundwasser, nur ein Balken dargestellt. Negative Verweilzeitberechnung tritt auch an Mulde 914/3 (blau) in zwei Fällen auf. Bei der der Betrachtung Verweilzeiten von Mulde zum Grundwasser, liefern die unterschiedlichen Methoden am Graben Nord (lila, 915/6) die einheitlichsten Ergebnisse. An der Mulde 914/3 (blau) liegt fast immer die Verweilzeit berechnet durch Maxima-Auswertung leicht höher als bei der Berechnung durch die Kreuzkorrelation. Die Ereignisse an denen beide Methoden an der Messstelle 914/6 (grün) funktioniert haben, sind so gering, dass eine allgemeine Aussage oder eine Tendenz nicht festzustellen ist.

Zusammenfassend kann man erkennen, dass Niederschlagsereignisse mit hohen Niederschlagssummen und -intensitäten (Tabelle 7-1) an allen drei Messstandorten sowohl bei der Kreuzkorrelationsmethode als auch bei der Methode der Maxima-Auswertung, ein auswertbares Ergebnis ermöglichen. Dies ist z.B. bei den Ereignissen 18.09 21.09 der Fall. Niederschlagsereignisse am und mit niedrigeren Niederschlagssummen und -intensitäten liefern nur an manchen Messstandorten sinnvolle Daten. Zudem lässt sich eine weitgehend einheitliche Reaktionszeitberechnungen der unterschiedlichen Methoden am Graben Nord erkennen.



Abbildung 3-14: Vergleich der Messstandorte in Bezug auf die Verweilzeitberechnungen, von der Reaktion in der Mulde zur Reaktion im Grundwasser, anhand der spezifischen Leitfähigkeit. Dargestellt sind beide Analysemethoden und alle untersuchten Ereignisse. Die blauen Balken zeigen die Niederschlagssummen der Ereignisse und die grauen Linien stellen exemplarisch anhand einer Messstelle (914/3) die Verhältnisse der Bodenfeuchte dar.

3.3.2 Analyse des Wasserstands

Für alle drei Messstandorte wurde auch die Zeitreihe des Wasserstands gesondert betrachtet und pro Standort die verwertbaren Niederschlagsereignisse analysiert. Beide Analysemethoden wurden bei den jeweiligen Niederschlagsereignissen angewendet. An Mulde 914/6 war nur die Berechnung des Reaktionssignals von der Mulde ins Grundwasser möglich. Tabelle 3-3 zeigt alle Reaktionszeiten die auf Grundlage des Wasserstands berechnet werden konnten. Ein kleines (a) bedeutet, dass die Berechnung der Verweilzeit eine negative Reaktionszeit ergab. Ein (b) signalisiert eine negative Reaktionszeit. In diesem Fall allerdings eindeutig aufgrund der Tatsache, dass die Rigole bis zur Rigolen-Oberkante mit Wasser gefüllt war und der Grundwasserspiegel höher anstieg als der Wasserspiegel in der Rigole (Abbildung 3-18). Diese Beobachtung wurde nur an Messstelle 914/3 gemacht (30.08, 18.09, 21.09, 27.09 und 10.09). Alle mit (a) oder (b) gekennzeichneten Werte wurden für weitere Analysen und Darstellungen nicht berücksichtigt. Eine Tabelle mit meteorologischen Daten zu den jeweiligen Niederschlagsereignissen und den Vorbedingungen der Bodenfeuchte findet sich im Anhang (Tabelle 7-2).

Tabelle 3-3: Berechnung der Reaktionszeit (min) zwischen den Versickerungsstufen einzelner Niederschlagsereignisse pro Messstandort. Ermittelt durch Wasserstandsdaten. Die Versickerungsstufen sind folgende: von der Mulde in die Rigole (M > R), von der Rigole in das Grundwassers (R > GW) und von der Mulde ins Grundwasser (M > GW). Abgebildet sind jeweils die Methoden der Kreuzkorrelation (CCR) und der Maxima-Auswertung (MAX). Ein (a) kennzeichnet eine negative Verweilzeit. Diese Werte wurden bei der weitern Analysen und in allen Darstellungen nicht berücksichtigt.

		914/3	914/3	914/6	914/6	915/6	915/6
		CCR	MAX	CCR	MAX	CCR	MAX
2012-07-21	M > R					143	120
	R > GW					19	94
	M > GW					201	196
2012-07-28	M > R						
	R > GW						
	M > GW			67	74		
2012-08-05	M > R						
	R > GW						
	M > GW			278 (a)	140		
2012-08-15	M > R	78	93				
	R > GW	0	2 (a)				
	M > GW	78	91				
2012-08-16	M > R					204	207
	R > GW					0	234
	M > GW					436	441

		914/3 CCR	914/3 MAX	914/6 CCR	914/6 MAX	915/6 CCR	915/6 MAX
2012-08-23	M > R	332	338			492	252
	R > GW	0	9			0	299
	M > GW	332	347			479	551
2012-08-24	M > R	182	196			191	198
	R > GW	0	9			30	324
	M > GW	412 (a)	205			382	522
2012-08-30	M > R	38	462			56	40
	R > GW	0	274 (b)			0	659
	M > GW	72	188			664	700
2012-09-12	M > R	343	196			333	180
	R > GW	5	91			0	189
	M > GW	344	287	232	148	341	369
2012-09-18	M > R	131	755			130	131
	R > GW	0	370 (b)			2123 (a)	891
	M > GW	176	385	107	148	1016	1022
2012-09-21	M > R	76	1040			143	135
	R > GW	0	820 (b)			61	2849
	M > GW	149	220	72	145	2812	2984
2012-09-26	M > R	217	236			210	250
	R > GW	0	49			49	268
	M > GW	228	285	72	109	600	518
2012-09-27	M > R	487	446			44	53
	R > GW	0	355 (b)			469 (a)	292
	M > GW	451	91	42	63	448	345
2012-10-09	M > R	1574	2501			67	106
	R > GW	650 (b)	2254 (b)			565 (a)	549
	M > GW	77	247	65	97	537	655

An Messstelle 914/6 können 8 Ereignisse ausgewertet werden, an 914/3 nur 10 Ereignisse und am Graben Nord an Messstelle 915/6 sogar 11 Ereignisse. Die Mulde 914/3 zeigt große Differenzen zwischen den berechneten Verweilzeiten im Versickerungsschritt von der Rigole in das Grundwasser. Oftmals ergibt die Methode der Kreuzkorrelation keine Verweilzeit (0 min) wobei die Maxima-Auswertung eine Verweilzeit berechnet (9 min bis 91 min). Prozentual sind die Variationen zwischen den angewendeten Methoden bei den Versickerungsschritten von der Mulde in die Rigole und von der Mulde ins Grundwasser geringer. Anhand der Ergebnisse an Mulde 915/6, lässt sich eine ähnliche Tendenz erkennen. In diesem Fall sind die Variationen zwischen den Analysemethoden allerdings weniger deutlich (Abbildung 3-20). Auch an dieser Messstelle setzt sich die Verweilzeitberechnung von der Rigole ins Grundwasser

im Vergleich zu den beiden anderen Versickerungsschritten ab. An zumindest vier Ereignissen (12.09, 18.09, 27.09 und 09.10) kann eine große Varianz der angewendeten Analysemethoden und das Auftreten von Fehlwerte durch ein extrem schwaches Reaktionssignal im Grundwasser erklärt werden.

Abbildung 3-15 zeigt exemplarisch am Niederschlagsereignis vom 23.08 die Vorgehensweise bei der Analyse der Wasserstände. Dargestellt sind die Niederschlagssummen je 15 min, der Verlauf des Wasserstands in der Mulde, der Rigole und im Grundwasser sowie an den Mulden 914/3 und 915/6 der hydraulische Gradient zwischen dem Wasserstand der Rigole und der des Grundwassers. Der gewählte Ausschnitt beginnt kurz vor dem auftretenden Niederschlagsereignis und bildet nur genau die Durchgangskurve dieses bestimmten Ereignisses ab.

Die Muldendaten wurden an beiden Messstandorten mittels gleitendem Mittel geglättet (50 min). Sowohl in der oberen als auch in der unteren Abbildung ist ein klares Maximum im Wasserstand der Mulde zu erkennen. Dieser Ausschlag dient als Inputsignal. Unterschiedlich stark ausgeprägt erkennt man dann den zeitversetzten Anstieg des Wasserstands in der Rigole und im Grundwasserspiegel. Die Darstellung des hydraulischen Gradienten dient dazu, ein mögliches Gefälle vom Grundwasser zur Rigole herauszustellen. Erreicht der hydraulische Gradient einen Wert von Null sind die Wasserstände von Rigole und Grundwasser auf einer Linie. In diesem Fall kann theoretisch kein Wasser mehr von der Rigole ins Grundwasser versickern und es besteht die Gefahr, dass Grundwasser in die Rigole einströmt. Bei dem dargestelltem Ereignis liegt der hydraulische Gradient an beiden Messstellen zwischen 0,05 und 0,08. Das Gefälle von der Rigole ins Grundwasser ist demnach nicht sehr hoch, aber definitiv vorhanden. Der Wasserfluss findet von der Rigole ins angrenzende Grundwasser statt.



Abbildung 3-15: Beispiel eines Datenausschnitts, welcher im Zuge der Analyse der Wasserstände untersucht wurde. Dargestellt ist das Niederschlagsereignis vom 23.08 an den Messstandorten 914/3 (oben) und 915/6 (unten). Die blauen Balken signalisieren den Niederschlag.

Auf den oben beschriebenen Ausschnitt der Wasserstandsdaten wurden beide Analysemethoden angewendet. Die Abbildung 3-16 zeigt die Methode der Kreuzkorrelation. Auf der linken Seite befinden sich die Korrelationen der unterschiedlichen Wasserschichten an Mulde 914/3 und auf der rechten Seite die Korrelationsverhältnisse an Mulde 915/6. Über die höchste positive Korrelation zwischen zwei Datenreihen ergibt sich die Verweilzeit von einer Versickerungsebene in die Nächste. Betrachtet man die obersten Abbildungen mit den Korrelationen von der Mulde in die Rigole, ergibt sich an Messstelle 914/3 ein Zeitversatz (Lag) von ca. 350 (322, Tabelle 3-3) und an Messstelle 915/6 ein Zeitversatz von ca. 450 (492, Tabelle 3-3). Auf diese Art und Weise wurden die Zeitversätze der Kreuzkorrelationen aller Datenausschnitte analysiert.



Abbildung 3-16: Abbildungen der Kreuzkorrelationen zu dem in Abbildung 3-14 untersuchtem Niederschlagsereignis vom 23.08 an den Messstellen 914/3 (links) und 915/6 (rechts).

Ein zweites Beispiel für die Analysemethode des Wasserstands zeigt Abbildung 3-18 Es ist das Niederschlagsereignis vom 21.09 abgebildet und diesmal ließen sich für alle drei Messstandorte die Wasserstandsdaten auswerten. An der Mulde 914/3 wurde die Datenreihe für das Inputsignal (Muldenwasserstand) mit einem gleitenden Mittel von 50 min geglättet. An dieser Messstelle ist das Inputsignal dennoch stärker ausgebildet als an den anderen beiden Standorten. Auffällig ist der Verlauf des Wasserstands in der Rigole (914/3), denn er scheint ein Plateau zu erreichen. Betrachtet man den hydraulischen Gradient fällt dieser kurz darauf bis auf einen Wert von Null ab. Der Wasserstand des Grundwassers steigt gleichzeitig über den Wasserstand in der Rigole. In diesem Fall ist die Rigole bis zu Rigolen-Oberkante gefüllt und kann kein weiteres versickerndes Niederschlagswasser aus der Mulde aufnehmen. Die Methode der Kreuzkorrelation errechnet in diesem Fall eine Verweilzeit von 0 min (Abbildung 3-17).





Abbildung 3-17: Abbildungen der Kreuzkorrelationen zu dem in Abbildung 3-17 untersuchtem Niederschlagsereignis vom 21.09 an den Messstellen 914/3 (untere Abbildung).



Abbildung 3-18: Beispiel eines Datenausschnitts, welcher im Zuge der Analyse der Wasserstände untersucht wurde. Dargestellt ist das Niederschlagsereignis vom 21.09 an allen drei Messstandorten. Die blauen Balken signalisieren den Niederschlag.

Die unterschiedlichen Berechnungen der Verweilzeiten an den drei Messstandorten sind in den Abbildung 3-19 und Abbildung 3-20 graphisch dargestellt. Die erste Abbildung vergleicht die verschieden Verweilzeiten von der Mulde in die Rigole. An der Mulde 914/6 liegen keine Messungen der Rigolenbedingungen vor, daher ist diese Messstelle nicht enthalten. Die zweite Abbildung zeigt den Vergleich der unterschiedlichen Verweilzeiten von der Mulde ins Grundwasser. Da bei allen Messstandorten die Verweilzeitberechnungen von der Mulde in die Rigole sehr variabel waren und dort extrem häufig Fehlwerte auftraten (siehe Tabelle 3-3) wurden diese Daten nicht weiter ausgewertet.



Abbildung 3-19: Vergleich der Messstandorte in Bezug auf die Verweilzeitberechnungen, von der Reaktion in der Mulde zur Reaktion in der Rigole, anhand des Wasserstands. Dargestellt sind beide Analysemethoden und alle untersuchten Ereignisse. Die blauen Balken zeigen die Niederschlagssummen der Ereignisse und die graue Linie stellt exemplarisch anhand einer Messstelle (914/3) die Verhältnisse der Bodenfeuchte dar.

Für den Reaktionsweg von der Mulde ins Grundwasser konnten an dem Messstellen 914/3 und 915/6 fast gleichviele Niederschlagsereignisse ausgewertet werden. Die Ereignisse am Standort 914/3 (blau) variieren innerhalb der verschieden Ereignisse sehr stark. Auch der Unterschied zwischen den angewendeten Methoden ist bei den meisten Ereignissen sehr groß. Am 30.08 entsteht z.B. eine Differenz von 424 min von der Methode der Kreuzkorrelation (38 min, Tabelle 7-2) zur Methode der Maxima-Auswertung (462 min, Tabelle 7-2). Der andere abgebildete Messstandort (915/6) weist keine so großen Schwankungen innerhalb der angewendeten Methoden auf und die

Differenzen zwischen den unterschiedlichen Niederschlagsereignissen sind schwächer ausgebildet.



Abbildung 3-20: Vergleich der Messstandorte in Bezug auf die Verweilzeitberechnungen, von der Reaktion in der Mulde zur Reaktion im Grundwasser, anhand des Wasserstands. Dargestellt sind beide Analysemethoden und alle untersuchten Ereignisse. Die blauen Balken zeigen die Niederschlagssummen der Ereignisse und die graue Linie stellt exemplarisch anhand einer Messstelle (914/3) die Verhältnisse der Bodenfeuchte dar

Betrachtet man die Verweilzeiten von der Mulde in das Grundwasser (Abbildung 3-20) lassen sich die zuvor beschriebenen Beobachtungen nicht wiederfinden. Die Verweilzeitberechnungen vom Messstandort 915/6 schwanken extrem zwischen den unterschiedlichen analysierten Niederschlagsereignissen. Allerdings ist auch diesmal die Variation innerhalb der Methoden an der Mulde 915/6 gering. Diese Abbildung enthält auch die Berechnungen der unterschiedlichen Verweilzeiten an der Mulde 914/6. Es wurden wenige Niederschlagsereignisse analysiert, aber die dargestellten Ergebnisse liefern sowohl innerhalb der Methoden als auch innerhalb der verschieden Ereignisse homogene Aussagen. Der Standort 914/3 zeigt auch diesmal eine, jedoch weniger stark ausgebildete, Varianz zwischen den verwendeten Methoden. Die Unterschiede innerhalb der unterschiedlichen analysierten Ereignisse sind vergleichsweise gering. Es lässt sich innerhalb der Betrachtung von Abbildung 3-19 und Abbildung 3-20 keine allgemeingültige Tendenz erkennen.

3.3.3 Vergleich der unterschiedlichen Datenreihenanalysen

Im Laufe der weiteren Analysen, wurden die Verweilzeitberechnungen anhand von Datenreihen der spezifischen Leitfähigkeit und Wasserstanddatenreihen verglichen. Abbildung 3-21 zeigt die Gegenüberstellung der mittels Kreuzkorrelationsmethode ermittelten Verweilzeiten und Abbildung 3-22 solche, welche mit der Methode der Maxima-Auswertung berechnet wurden. Anhand Abbildung 3-21 fällt auf, dass mit den Datenreihen des Wassstands grundsätzlich mehr einzelne Niederschlagsereignisse untersucht werden konnten. Bei alle Messstellen ist dies der Fall. Des Weiteren fallen die berechneten Verweilzeiten anhand Wasserstandsdaten länger aus. Besonders bei den ersten sechs dargestellten Niederschlagsereignissen zeigt sich, an Messstelle 914/3 und 915/6, eine große Differenz zwischen den Verweilzeiten der beiden Datenreihen. Nur wenige Niederschlagsereignisse weise identische bzw. ansatzweise identische Verweilzeitberechnungen mittels beiden Datenreihen auf. Wie schon in einigen Abschnitten zuvor, liefert die Messstelle 914/6 so wenige Ergebnisse, dass keine Tendenz erkannt oder allgemeingültige Aussage gemacht werden kann.



Abbildung 3-21: Vergleich der unterschiedlichen Datenreihenanalysen von Wasserstand (WS) und spezifischer Leitfähigkeit (LF) in Bezug auf die Methode der Kreuzkorrelation. Dargestellt sind die drei Messstandorte über den kompletten Messzeitraum vom 17.07.2012 bis zum 12.10.2012.

Anhand der Darstellung der verschieden Verweilzeiten, welche mittels Auswertung der Maxima berechnet wurden, fällt sofort eine große Varianz zwischen den drei Messstellen auf (Abbildung 3-22). Während an den Mulden 914/3 und 914/6, beide am Boulevardgraben, nur sehr wenige Niederschlagsereignisse ausgewertet werden konnten, wurde an Mulde 915/6 ganze 45 Niederschlagsereignisse untersucht. Nicht immer konnten diese Ereignisse sowohl mittels Wasserstandsdaten als auch mittels Datenreihe der spezifischen Leitfähigkeit betrachte werden. Dennoch sind es mehr als an den beiden anderen Messstellen. Wie bereits beim Vergleich der Datenreihen oben, ist auch hier der Unterschied zwischen Ergebnissen aus Wasserstandsdaten und Leitfähigkeitsdaten auffällig. Tendenziell wurden anhand der Wasserstände längere Verweilzeiten ermittelt. Große Differenzen treten an Mulde 914/3 bei sieben Ereignissen, an Mulde 914/ 6 an acht Ereignissen und an Mulde 915/6 an 14 Ereignissen auf. Die Ergebnisse von Mulde 914/6 sind allerdings nicht sehr zahlreich und daher eine Auswertung auch nicht unbedingt sinnvoll.



Abbildung 3-22: Vergleich der unterschiedlichen Datenreihenanalysen von Wasserstand (WS) und spezifischer Leitfähigkeit (LF) in Bezug auf die Methode der Maxima-Auswertung. Dargestellt sind die drei Messstandorte über den kompletten Messzeitraum vom 17.07.2012 bis zum 12.10.2012.

Zur weiteren Betrachtung der Differenzen zwischen Ergebnissen aus Wasserstanddaten und aus Datenreihen der spezifischen Leitfähigkeit, dienen die folgenden Korrelationsdarstellungen (Abbildung 3-23 Abbildung 3-24). Die oberen Graphiken enthalten die berechneten Versickerungsstufen von der Mulde in die Rigole und von der Mulde ins Grundwasser. In den unteren Graphiken ist nur der Versickerungsschritt von der Mulde ins Grundwasser dargestellt.



Abbildung 3-23: Korrelation zwischen den Ergebnissen aus beiden durchgeführten Analysemethoden für die Datenreihe der spezifischen Leitfähigkeit (links) und des Wasserstands (rechts). Dargestellt sind die Messdaten vom Versickerungsschritt aus der Mulde in die Rigole und ins Grundwasser sowie die jeweiligen Regressionsgraden. Aufgrund zu weniger Daten für die Messstelle 914/6 wurde in der rechten Graphik auf eine Regressionsgerade verzichtet.

Vergleicht man die Auswertung mittels Leitfähigkeitsdaten und Wasserstandsdaten, korrelieren die Analysemethoden bei der Leitfähigkeit etwas besser miteinander. Bei den Ergebnissen des Wasserstands liegen die Punkte, abgesehen von ein paar Ausreißern, innerhalb eines kleineren Bereichs als bei den Leitfähigkeitsergebnissen. Diese Beobachtung lässt sich auch anhand Abbildung 3-24 erkennen. Dort ist gerade in Bezug auf Messstelle 915/6 ein großer Unterschied zwischen den Leitfähigkeitsdaten und den Datenreihen des Wasserstands erkennbar. Zudem belegt auch diese Abbildung eine eindeutigere Korrelation zwischen den Analysemethoden bei Verwendung der Datenreihen mit spezifischer Leitfähigkeit.



Abbildung 3-24: Korrelation zwischen den Ergebnissen aus beiden durchgeführten Analysemethoden für die Datenreihe der spezifischen Leitfähigkeit (links) und des Wasserstands (rechts). Dargestellt sind nur die Messdaten vom Versickerungsschritt aus der Mulde ins Grundwasser und die jeweiligen Regressionsgraden.

4 Diskussion

Diese Arbeit hat zum Ziel, die Regenwasserbewirtschaftung auf dem Vaubangelände zu die Beeinflussung des Grundwassers evaluieren und durch Regenwasser-Versickerungsanlagen detailliert beschreiben. Unterschiedliche natürliche zu Tracerstoffe wurden betrachtet und auf ihre Eignung und Aussagekraft hin überprüft. Als Tracerstoffe dienten die Wasserisotope sowie die Zeitreihen der spezifischen Leitfähigkeit und der Temperatur. Da mittels Temperaturdaten keine Aussagen gemacht werden konnten, wurde zusätzlich der Wasserstand analysiert. Der Wasserstand ist kein Tracerstoff, gibt aber Hinweise auf Verweilzeiten und Infiltrationsprozesse.

4.1 Diskussion der Ergebnisse aus den Wasseranalysen

Die Auswertung einzelner Niederschlagsereignisse bezüglich des Verlaufs der Isotopensignatur im Oberflächenwasser sowie im Grundwasser konnte nicht die erwarteten Ergebnisse liefern. Obwohl einige Ereignisse mit hohen Niederschlagssummen und -intensitäten beprobt wurden, ließen diese kein auswertbaren Reaktionen in den Isotopenwerten erkennen. Isotope dienen als natürlicher Tracer für Versickerungsprozesse, da sich theoretisch ein signifikanter Unterschied zwischen den Werten im Niederschlag und im Grundwasser abzeichnet. Wie Abschnitt 3.1 gezeigt hat, bestand auch bei den Ergebnissen dieser Arbeit eine unterschiedliche Isotopensignatur zwischen Niederschlag- und Grundwasserproben. Diese Differenz war allerdings nicht sehr groß. Eine klare Abtrennung von Niederschlagswasser und Grundwasser war, allein anhand der Isotopensignatur, nicht möglich. Einen möglichen Grund für die geringen Unterschiede der Isotopensignaturen aus Niederschlagswasser- und Grundwasserproben stellt der außergewöhnlich hohe Grundwasserspiegel im Beprobungszeitraum dar. Anhand Abschnitts 3.2 konnte gezeigt werden, wie die Rigolen von dem hohen Grundwasserspiegel beeinflusst wurden. Über den gesamten Beprobungszeitraum und an allen Messstandorten befand sich durchgehend Wasser im Rigoleninneren. Trat ein Niederschlagsereignis auf, versickerte neues Niederschlagswasser aus der Mulde in die Rigole und vermischte sich dort mit dem bereits vorhandenen älteren Niederschlagswasser. Eine Mischung aus altem und

neuem Wasser versickert dann weiter ins angrenzende Grundwasser. Die leichte Isotopensignatur des neu auftretenden Niederschlagswassers wurde also mit Wasser einer schwereren Isotopensignatur in der Rigole vermischt. In das schwere Grundwasser versickerte demzufolge kein leichtes Niederschlagswasser, sondern eine Mischung aus leichtem und schwerem Wasser. Dadurch wurde das Reaktionssignal, hervorgerufen durch ein neues Niederschlagsereignis, im Grundwasser abgeschwächt. Die Abgrenzung von Vorereigniswasser und Ereigniswasser war in fast allen Fällen unmöglich. Selbstverständlich kann genügend bei neu hinzukommendem Niederschlagswasser dennoch ein Reaktionssignal im Grundwasser ausgebildet werden. Wie die untersuchten Ausschnitte der Niederschlagsereignisse gezeigt haben, war dies allerdings kaum der Fall. Ohne signifikante Isotopensignaturen konnten die geplanten Analysen der Mischungsrechnung und Ganglinienseperation nicht durchgeführt werden.

Anhand der weiteren Betrachtungen der ermittelten Isotopensignaturen lassen sich dennoch Schlüsse für die Prozessbeschreibung und das Verständnis der Begebenheiten im Vaubangebiet ableiten. Es zeigt sich ein Unterschied zwischen den Isotopenwerten des Grundwassers, welche am Boulevardgraben genommen wurden und solchen welche am Graben Nord genommen wurden. Der Grundwasserstrom des Untersuchungsgebiets fließt von südöstliche in nordwestliche Richtung und erreicht somit erst den Boulevardgraben und dann den parallel verlaufenden Graben Nord. Da die Isotopensignaturen am Graben Nord innerhalb der normierten Sauerstoff- und Wasserstoffdaten stärker schwankt und eine leichte jahreszeitliche Variation zu erkennen ist, könnte man folgenden Schluss ziehen. Das Untersuchungsgebiet liegt im städtischen Raum, wo die Versickerung von Niederschlagswasser grundsätzlich durch Flächenversiegelung verringert oder unterbunden wird. Es findet wenig Grundwasserneubildung statt. Durch das im Vauban verwirklichte Regenwasser-Versickerungssystem wird eine örtlich begrenzte Grundwasserneubildung im Bereich der Versickerungsgräben ermöglicht. Der Jahresgang in der Isotopensignatur wird nur durch Niederschlagswasser verursacht. Grundwasser unterliegt nicht diesen zeitlichen Schwankungen. Die Schwankungen innerhalb der Wasserproben am Graben Nord können demnach nur durch die Versickerung von Niederschlagswasser verursacht werden. Es ist denkbar, dass Niederschlagswasser am Boulevardgraben aufgrund der

Versickerungsanlage ins Grundwasser infiltriert und dann am Graben Nord registriert wird. Schließlich fließt das Grundwasser vom Boulevardgraben zum Graben Nord. Diese Annahme würde belegen, dass durch die Regenwasserversickerungsanlage im Vauban Grundwasserneubildung stattfindet.

In Hinblick auf die Niederschlagsisotope in den Darstellungen 3-4 bis 3-6, lässt sich eine Vermutung darüber anstellen, zu welcher Jahreszeit Isotopenmessungen bei der von Oberflächen-Grundwasser-Interaktionen sinnvoll Betrachtung sind. Das Grundwasser weist über das gesamte Jahr eine schwere Isotopensignatur auf. Das Niederschlagswasser schwankt allerdings zwischen leichten Winterniederschlägen und schweren Sommerniederschlägen. Für die Messung der Interaktion zwischen Grundwasser und neu infiltrierendem Niederschlagswasser ist demnach der Winter besser geeignet. Diese Tendenz zu günstigeren Versuchsbedingungen in den Wintermonaten lässt sich anhand der entnommenen Wasserproben ansatzweise erkennen. Zudem streuen die gemessenen Isotopenwerte im August stärker als die Daten aus dem September. Ein klares Inputsignal ist für Auswertungen der Verweilzeiten und für eine Ganglinienseperation von Bedeutung. Auch in dieser Hinsicht, scheinen die Isotopenmessungen im September günstiger als diese aus dem August. Weichen die normierten Daten der Wasserstoff- und Sauerstoffisotope voneinander ab, hat eine Fraktionierung stattgefunden. Diesen Fraktionierungseffekt erkennt man an den Isotopenwerten des Niederschlags im August. Im September scheint dieser Effekt geringer. Hohe Lufttemperaturen begünstigen die Fraktionierung der Wasserstoffisotope, weshalb erneut eine Versuchsdurchführung in den Wintermonaten zu bevorzugen ist.

Selbstverständlich unterscheiden sich die Isotope in Niederschlägen auch zu einem geringen Anteil in Bezug auf Niederschlagsintensität und Niederschlagsdauer. Möchte man diese Schwankungen innerhalb des Inputsignals vom Niederschlag berücksichtigen, benötigt man ein wesentlich höher ausgelöstes Beprobungsintervall des Niederschlags. Den Oberflächenabfluss aus der Mulde zu beproben reicht in diesem Fall nicht aus.

4.2 Diskussion der Grundwasserverhältnisse

Anhand unterschiedlicher Abschnitte und Betrachtungsweisen dieser Arbeit wurde ersichtlich, inwieweit sich die hohen Grundwasserstände im Untersuchungszeitraum auf die Interaktion von Niederschlagswasser und Grundwasser ausgewirkt haben. Vergleichsweise Grundbedingungen für die Versickerung schlechte von Niederschlagswasser im Vaubangebiet wurden auch schon in der Literatur angesprochen. Hinsichtlich eines Schadstoffeintrags ins Grundwasser durch Verunreinigungen im Oberflächenwasser sollte die Regenwasser-Versickerungsanlage im Vauban betrachtet werden. Die in dieser Arbeit erhobenen Messungen liefern keine Information über mögliche Grundwasserkontaminationen. Aufgrund der gezeigten außergewöhnlich hohen Grundwasserstände wird der Reinigungsprozess von Oberflächenwasser innerhalb der Versickerungsschritte sicherlich beeinträchtigt. Da die ihrem extrem hohen Porenvolumen vermutlich keine große Rigolen mit Filtereigenschaft aufweisen, muss der Reinigungsprozess in den Schichten von Mutterboden und Sand bzw. zwischen der Rigolen-Unterkante und dem anstehendem Grundwasser erfolgen. Liegt der Grundwasserspiegel allerdings so hoch, dass die Rigole vollständig eingestaut ist und das Grundwasser schon von unten gegen die Sandschicht drückt, ist nicht anzunehmen, dass der Großteil der Schadstoffe im Oberflächenwasser herausgefiltert wird.

4.3 Diskussion der Ergebnisse aus den Datenreihenanalysen

Die Datenreihenanalyse stellt eine leicht anwendbare Methode dar, um innerhalb der Interaktion Oberflächenwasser und Grundwasser Rückschlüsse auf von Infiltrationsprozesse, Verweilzeiten und Herkunftsorte von Wasservorkommen machen zu können. Die Berechnung von Verweilzeiten erwies sich in dieser Arbeit als schwierig, da die bereits geschilderten hohen Grundwasserstände alle Reaktionssignale abschwächten und damit nur eine geringe Anzahl an Niederschlagsereignissen analysiert werden konnte. Konnten aus diesem Grund mittels Isotopensignatur allerdings gar keine Verweilzeitberechnungen durchgeführt werden, so war dies mittels Datenreihenanalyse durchaus machbar. Man kann mit Hilfe von Interpolation, Glättung und Kürzung von Datenreihen auch bei kleinen Niederschlagsereignissen die Messungen so modifizieren, dass die Ereignisse ausgewertet werden können und man dadurch Verweilzeiten erhält. Zudem ist die Messung von Datenreihen der spezifischen Leitfähigkeit, der Temperatur oder auch des Wasserstands vergleichsweise einfach durchzuführen, da man kein Wasserproben entnehmen muss und demnach auch eine Laboranalyse ausbleibt.

Die ermittelten Ergebnisse wurden hinsichtlich des Messstandorts, der angewendeten Analysemethode und der verwendeten Datenreihe verglichen. Bei den Datenreihen zeichnet sich eine leichte Tendenz zu besseren Ergebnissen anhand von Messreihen der spezifischen Leitfähigkeit ab. Durch die spezifische Leitfähigkeit kann der tatsächliche Moment ermittelt werden, an dem neues Niederschlagswasser, mit einer geringeren Leitfähigkeit, an dem Messstandpunkt ankommt. Mit der Verwendung der Temperatur als Tracer verhält es sich ähnlich. Betracht man allerdings nur die Änderungen im Wasserstand, kann es durch Erhöhung des Wasserstands zu einem scheinbaren Eintritt von neuem Niederschlagswasser kommen. Es ist dabei nicht möglich zu unterscheiden, ob tatsächlich neues Niederschlagswasser an dem Messpunkt ankommt oder nur altes Vorereigniswasser aus einer anderen Versickerungsebene herausgedrückt wird. Gerade im Fall eines Mulden-Rigolen-Systems ist es denkbar, dass sich Vorereigniswasser in der Rigole speichert und bei der Versickerung eines neuen Niederschlagsereignisses ins Grundwasser heruntergedruckt wird. Eine Wasserstands-Messung im Grundwasser würde demnach schon das herausdrücken von Vorereigniswasser als Reaktionssignal des Niederschlagsereignisses betrachten. Auch wenn dies sicherlich eine Reaktion auf den neuen Niederschlag darstellt, ist es nicht der Reaktionspeak, den man für eine Verweilzeitanalyse untersuchen möchte.

Der Vergleich von den angewendeten Analysemethoden der Kreuzkorrelation und der Maxima-Auswertung ergab, dass bei den meisten Niederschlagsereignissen und sowohl bei Auswertung der spezifischen Leitfähigkeit als auch bei Auswertung des Wasserstands sehr unterschiedliche Ergebnisse durch die beiden Methoden ermittelt wurden. Insbesondere an dem Versickerungsschritt von der Rigole ins Grundwasser ergaben die Methoden große Differenzen bezüglich der Verweilzeitberechnungen. Gerade die Kombination aus beiden Methoden scheint sinnvoll um die Prozesse bei der Regenwasserversickerung zu analysieren. Würde man schließlich nur eine Methode anwenden ließen sich die kritischen Berechnungen der Verweilzeit schlecht hinterfragen. Durch die doppelte Analyse kann bei ähnlichen Ergebnissen von einer ausreichenden Abbildung der vorherrschenden Bedingungen ausgegangen werden. Sehr unterschiedliche Ergebnisse der Verweilzeitberechnungen ermöglichen hingegen eine genauer Betrachtung der errechneten Zeiten und anschließende Korrektur. Da beide Methoden zudem sehr sensitiv auf Schwankungen in der Datenreihe und langgestreckte Ereignismaxima reagieren, ist es immer anzuraten die errechneten Verweilzeiten zu hinterfragen und mittels graphischer Darstellung des Niederschlagsauschnitts zu vergleichen. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass z.B. eine Komplettfüllung der Rigole erst durch graphische Auswertung eindeutig festgestellt werden kann. Hinsichtlich der Auswertung des Wasserstands ist hierbei die Betrachtung des hydraulischen Gradienten zu empfehlen.

5 Schlussfolgerung

Die Regenwasser-Versickerungsanlage im Stadtteil Vauban in Freiburg i. Br. begünstigt die Grundwasserneubildung und verringert damit das Abwasservolumen des Stadtteils. Abflussspitzen im Vorfluter, hervorgerufen durch Niederschlagsereignisse mit hohen Summen und Intensitäten, können dadurch verhindert werden. Die geologisch ungünstigen Bedingungen zur Regenwasserversickerung im Vaubangebiet wirken sich allerdings auf die Infiltrationsprozesse aus. Es ist zu vermuten, dass dadurch ein erhöhter Schadstoffeintrag ins Grundwasser gegeben ist.

Zur Betrachtung der Interaktion von Niederschlagswasser und Grundwasser können natürlich Tracer untersucht werden. Messungen der Isotopensignatur benötigen große Niederschlagsereignisse, vergleichsweise geringe Grundwasserstände und sollten idealerweise in den Wintermonaten durchgeführt werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu liefern. Durch Datenreihenanalyse kann auch bei weniger guten Bedingungen der Niederschlagsereignisse und Grundwasserstände eine Aussage über Verweilzeiten und Infiltrationszeiten erfolgen. Hierbei liefern die Messungen der spezifischen Leitfähigkeit eindeutigere Ergebnisse als Zeitreihen des Wasserstands. Grundsätzlich stellt auch die Temperatur einen geeigneten natürlichen Tracer dar. Bei Messzeitreihen ermöglicht eine der Analyse der Kombination aus der Kreuzkorrelationsmethode und der Methode der Maxima-Auswertung eine sinnvolle Berechnung von Verweilzeiten und Infiltrationsprozessen. Bei Anwendung von nur einer der beiden Analysemethoden ist ein umfangreiches Prozessverständnis nicht möglich.

6 Literatur

Literaturverzeichnis

- Browne, D., Deletic, A., Mudd, G., Fletcher, T., 2012. A twodimensional model of hydraulic performance of stormwater infiltration systems. Hydrological Processes (online version).
- Constantz, J., Cox, M.H., Su, G.W., 2003. Comparison of Heat and Bromide as Ground Water Tracers Near Streams. Ground Water (41), 647–656.
- Dagès, C., Voltz, M., Lacas, J., Huttel, O., Negro, S., Louchart, X., 2008. An experimental study of water table recharge by seepage losses from a ditch with intermittent flow. Hydrological Processes (22), 3555–3563.
- Engelhardt, I., Piepenbrink, M., Trauth, N., Stadler, S., Kludt, C., Schulz, C., Ternes, T., 2011. Comparison of tracer methods to quantify hydrodynamic exchange within the hyporheic zone. Journal of Hydrology (400), 255–266.
- Fleckenstein, Jan H., Schmidt, C., 2009. Themenheft: Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktionen. Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (14), 161–162.
- Flury, M., Wai, N.N., 2003. Dyes as tracers for vadose zone hydrology. Reviews of Geophysics (41).
- Grischek, T., Nestler, W., 1996. Urban groundwater in Dresden, Germany. Hydrogeology Journal (4), 48–63.
- Hoehn, E., Cirpka, O.A., 2006. Assessing hyporheic zone dynamics in two alluvial flood plains of the Southern Alps using water temperature and tracers. Hydrology and Earth System Sciences (10), 553–563.
- Hunt, R.J., Coplen, T.B., Haas, N.L., Saad, D.A., Borchardt, M.A., 2005. Investigating surface water–well interaction estigating surface water–well intera using stable isotope ratios of water. Journal of Hydrology (302), 154–172.
- International, C.A., Schmalz, B, Springer, P, Fohrer, N, Abesser, C, Wagener, T, Nuetzmann, G. Interactions between near-surface groundwater and surface water in a drained riparian wetland. - CAB Direct. Accessed January 2, 2013.
- Kalbus, E., Reinstorf, F., Schirmer, M., 2006. Measuring methods for groundwater surface water interactions: a review. Hydrology and Earth System Sciences (10), 873–887.
- Lerner, D., 2002. Identifying and quantifying urban recharge: a review. Hydrogeology Journal (10), 143–152.
- Maloszewski, P., Rauert, W., Stichler, W., Herrmann, A., 1983. Application of flow models in an alpine catchment area using tritium and deuterium data. Journal of Hydrology (66), 319–330.

- McGuire, K., Weiler, M., McDonnell, J., 2007. Integrating tracer experiments with modeling to assess runoff processes and water transit times. Advances in Water Resources (30), 824–837.
- McGuire, K.J., McDonnell, J.J., 2006. A review and evaluation of catchment transit time modeling. Journal of Hydrology (330), 543–563.
- Ogunkoya, O., Jenkins, A., 1993. Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model. Journal of Hydrology (142), 71–88.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal (10(1)), 18–39.
- Schirmer, M., Strauch, G., Reinstorf, F., Schirmer, K., 2007. Urbane Hydrogeologie Herausforderungen f
 ür Forschung und Praxis. Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (12 (3)), 178–188.
- Sheets, R., Darner, R.A., Whitteberry, B., 2002. Lag times of bank filtration at a well field, Cincinnati, Ohio, USA. Journal of Hydrology (266), 162–174.
- Silliman, S.E., Booth, D.F., 1993. Analysis of time-series measurements of sediment temperature for identification of gaining vs. losing portions of Juday Creek, Indianaportions of Juday Creek, Indiana. Journal of Hydrology (146), 131–148.
- Silliman, S.E., Ramirez, J., McCabe, R.L., 1995. Quantifying downflow through creek sediments using temperature time series: one-dimensional solution incorporating measured surface temperature. Journal of Hydrology (167), 99–119.
- Vogt, T., Hoehn, E., Schneider, P., Cripka, O.A., 2009. Untersuchung der Flusswasserinfiltration in voralpinen Schottern mittels Zeitreihenanalyse. Grundwasser -Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie (14), 179–194.
- Vogt, T., Hoehn, E., Schneider, P., Freund, A., Schirmer, M., Cirpka, O.A., 2010. Fluctuations of electrical conductivity as a natural tracer for bank filtration in a losing stream. Advances in Water Resources (33), 1296–1308.
- Vogt, T., Schneider, P., Hahn-Woernle, L., Cirpka, O.A., 2010. Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiber-optic high-resolution vertical temperature profiling. Journal of Hydrology (380), 154–164.
- Weiler, M., McGlynn, B.L., McGuire, K.J., McDonnell, J.J., 2003. How does rainfall become runoff? A combined tracer and runoff transfer function approach. Water Resources Research (39 (11), 1315), doi:10.1029/2003WR00233.
- Wenninger, J., Königer, P., Leibundgut, C.S.D., Mayer, H., 2005. Untersuchung der Bodenwasserbewegungen mit stabilen Isotopen in Hinblick auf die Grundwasserneubildung. Zbl. Geol Paläont (1), 123–139.

Weitere Literatur zum Thema

Beller Consult GmbH, 1996. Entwässerungstechnische Erschließung des ehemaligen Kasernengeländes Vauban. Entwurfs- und Genehmigungsplanung, Teil 2: Oberflächenentwässerung. Stadt Freiburg, Eigenbetrieb Stadtentwässerung.
- Beller Consult GmbH, 2003. Entwässerungstechnische Erschließung Vauban. Endausbau Boulevardgraben 2. BA, Ausführungsplanung, Längsschnitt, Plan Nr. 3.1.
- Etcheverry, D., Vennemann, T., 2009. Isotope im Grundwasser. Methoden zur Anwendung in der hydrogeologischen Praxis. Umwelt-Wissen Nr. 0930. Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- Grimmi, T., 2004. Verlagerung gelöster Stoffe durch den Boden ins Grundwasser. Schriftenreihe Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern (349).
- Jackisch, N., Weiler, M., 2009. Projektbeschreibung: Evaluierung der Regenwasserbewirtschaftung im Vaubangelände unter besonderer Berücksichtigung der Vegetation auf Abfluss und Versickerung. Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Königer, P., 2003. Tracerhydrologische Ansätze zur Bestimmung der Grundwasserneubildung. Freiburger Schriften zur Hydrologie (16).
- Kracht, O., 2007. Tracer-based hydrograph separation methods for sewer systems. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology Zürich.
- Lange, J., 2001. Erschließung des Freiburg Vauban-Quartiers. Neue Wege in der Siedlungsentwässerung. Siedlungswasserwirtschaftliches Seminar WS 2000/2001, Karlsruhe.
- Larazo, T., 1979. Urban Hydrology: A Multidisciplinary Perspective. Ann Arbor Science Publishers.
- Leibundgut, C., Maloszewski, P., Külls, C., 2009. Tracers in Hydrology. Wiley-Blackwell, Chichester UK ;Hoboken NJ.
- McPherson, G., Zuidema, F., 1977. Urban hydrological modelling and catchment research in U.S.A.: International Summary. UNESCO Technical paper in hydrology No.15, Paris.
- Rieckermann, J., Kracht, O., Gujer, W., 2003. Wie dicht ist unser Kanalnetz? EAWAG news Nr. 57.
- Scherzinger, T., 2002. Geotechnisches Gutachten im Zusammenhang mit dem Neubau der Stadtbahn in Freiburg-Vauban. Ingenieurgruppe Geotechnik GbR, Kirchzarten.
- Sieker, H., 2007. Neue Entwicklungen in der Regenwasserbewirtschaftung Die Wasserbilanz als Planungskriterium. DWA Landesverband Baden-Württemberg.
- Veith, R., 2005. Nachhaltige Quartiersentwicklung in Freiburg-Vauban. Fachtagung "Ökologische Siedlungsentwässerung im Spiegel aktueller Trends und Praxiserfahrungen", Osnabrück.
- Wagenmann-Gaiser, K., 2004. Geotechnische Untersuchungen im Bereich des ehemaligen Militärgeländes "Vauban", Stadt Freiburg i. Br. Diplomarbeit am Geotechnischen Institut der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

7 Anhang



Abbildung 7-1: Darstellung der Einstauhöhe der Rigole (grün) und der Grundwasserstände (blau) an Mulde 914/6. Die gestrichelte violette Linie zeigt die Rigolen-Unterkante und die gestrichelte orange Linie die Rigolen-Oberkante. Dargestellt ist der komplette Messzeitraum vom 17.07.2012 bis zum 12.10.2012.



Abbildung 7-2: Darstellung des freien Rententionsvolumen der Rigole in m³ (rot) und in % (grün) an Mulde 914/6. Dargestellt ist der komplette Messzeitraum vom 17.07.2012 bis zum 12.10.2012.



Abbildung 7-3: Darstellung der Einstauhöhe der Rigole (grün) und der Grundwasserstände (blau) an Mulde 915/6. Die gestrichelte violette Linie zeigt die Rigolen-Unterkante und die gestrichelte orange Linie die Rigolen-Oberkante. Dargestellt ist der komplette Messzeitraum vom 17.07.2012 bis zum 12.10.2012.



Abbildung 7-4: Darstellung des freien Rententionsvolumen der Rigole in m³ (rot) und in % (grün) an Mulde 915/6. Dargestellt ist der komplette Messzeitraum vom 17.07.2012 bis zum 12.10.2012.

		08-22	08-24	08-31	09-12	09-18	09-21	09-26	09-27	10-09
914/3	Niederschlagssumme [mm/15min]		7,30	14,10		30,80	21,80			17,20
	max. Niederschlagsintensität		1,20	5,00		4,80	4,60			6,00
	Niederschlagsdauer [Minuten]		71	53		197	140			74
	mittlere Lufttemperatur [°C]		19,27	14,47		13,34	15,20			12,72
	max. Lufttemperatur [°C]		21,45	16,88		24,89	24,89			16,81
	min. Lufttemperatur [°C]		18,11	12,02		4,72	9,76			9,88
	Bodenfeuchte Sonde 1 [%]		0,00	0,00		21,32	0,00			28,80
	Bodenfeuchte Sonde 2 [%]		33,41	28,01		26,00	27,19			33,28
914/6	Niederschlagssumme [mm/15min]	30,10				16,80	21,80		5,00	
	max. Niederschlagsintensität	4,10				4,80	4,60		2,20	
	Niederschlagsdauer [Minuten]	241				111	140		17	
	mittlere Lufttemperatur [°C]	21,40				12,00	15,20		12,83	
	max. Lufttemperatur [°C]	28,05				17,73	24,89		20,83	
	min. Lufttemperatur [°C]	16,34				4,72	9,76		7,25	
915/6	Niederschlagssumme [mm/15min]	9,20	8,00	1,50	2,10	16,80	1,60	0,90	5,00	1,40
	max. Niederschlagsintensität	1,20	1,20	0,30	1,70	4,80	0,70	0,20	2,20	0,70
	Niederschlagsdauer [Minuten]	91	78	15	15	111	16	9	17	14
	mittlere Lufttemperatur [°C]	18,90	18,15	13,53	11,04	11,60	14,07	12,99	12,83	10,50
	max. Lufttemperatur [°C]	25,36	25,36	15,30	17,96	18,68	21,34	10,04	20,83	11,16
	min. Lufttemperatur [°C]	15,55	11,15	10,69	6,54	4,72	9,76	15,69	7,25	10,03
	Bodenfeuchte Sonde 1 [%]	33,74	33,21	36,85	33,75	32,19	30,80	32,03	30,70	36.87
	Bodenfeuchte Sonde 2 [%]	26,30	33,00	27,50	31,40	67,30	25,30	25,30	30,20	21,60

Tabelle 7-1: Meteorologische Daten zu den jeweiligen Niederschlagsereignissen, welche bezüglich der spezifische Leitfähigkeit untersucht wurden. Bei den Niederschlagsintensitäten handelt es sich um die maximalen Intensitäten, welche innerhalb 15 min erreicht wurden. Die Angaben der Bodenfeuchtesonden beziehen sich auf den Zeitpunkt direkt vor Eintritt des Ereignisses.

Tabelle 7-2: Meteorologische Daten zu den jeweiligen Niederschlagsereignissen, welche bezüglich der Wasserstände untersucht wurden (A und B). Bei den Niederschlagsintensitäten handelt es sich um die maximalen Intensitäten, welche innerhalb 15 min erreicht wurden. Die Angaben der Bodenfeuchtesonden beziehen sich auf den Zeitpunkt direkt vor Eintritt des Ereignisses.

Α		07-21	07-28	08-05	08-15	08-16	08-23	08-24
914/3	Niederschlagssumme [mm/15min]				4,10		11,30	7,30
	Max. Niederschlagsintensität				2,30		4,10	1,20
	Niederschlagsdauer [min]				28		55	71
	mittlere Lufttemperatur [°C]				20,69		19,63	19,27
	max. Lufttemperatur [°C]				25,67		22,18	21,45
	min. Lufttemperatur [°C]				18,72		17,98	18,11
	Bodenfeuchte Sonde 1 [%]				0,00		0,00	0,00
	Bodenfeuchte Sonde 2 [%]				23,88		22,77	33,41
914/6	Niederschlagssumme [mm/15min]		7,30	7,30				
	Max. Niederschlagsintensität		3,30	1,90				
	Niederschlagsdauer [min]		34	59				
	mittlere Lufttemperatur [°C]		19,54	17,28				
	max. Lufttemperatur [°C]		23,34	19,98				
	min. Lufttemperatur [°C]		18,44	16,33				
915/6	Niederschlagssumme [mm/15min]	3,90				2,60	12,20	7,30
	Max. Niederschlagsintensität	1,90				1,00	4,10	1,20
	Niederschlagsdauer [min]	18				26	64	71
	mittlere Lufttemperatur [°C]	16,24				19,21	20,42	19,27
	max. Lufttemperatur [°C]	20,30				24,11	25,67	21,45
	min. Lufttemperatur [°C]	11,23				16,31	17,98	18,11
	Bodenfeuchte Sonde 1 [%]	52,70				36,32	28,91	33,22
	Bodenfeuchte Sonde 2 [%]	27,50				26,70	28,80	33,00

В		08-30	09-12	09-18	09-21	09-25	09-27	10-09
914/3	Niederschlagssumme [mm/15min]	17,40	2,10	29,10	21,80	8,00	5,00	21,60
	Max. Niederschlagsintensität	5,00	1,70	4,80	4,60	1,20	2,20	6,00
	Niederschlagsdauer [min]	76	15	180	140	69	17	118
	mittlere Lufttemperatur [°C]	14,82	11,16	12,70	15,20	13,51	14,12	11,57
	max. Lufttemperatur [°C]	16,88	12,13	22,64	24,89	21,94	18,51	17,71
	min. Lufttemperatur [°C]	12,02	10,14	4,72	9,76	11,40	12,41	9,22
	Bodenfeuchte Sonde 1 [%]	0,00	14,13	21,32	0,00	22,65	28,08	28,80
	Bodenfeuchte Sonde 2 [%]	28,21	32,91	26,00	27,19	27,85	32,64	33,28
914/6	Niederschlagssumme [mm/15min]		2,10	16,80	21,80	8,00	5,00	17,20
	Max. Niederschlagsintensität		1,70	4,80	4,60	1,20	2,20	6,00
	Niederschlagsdauer [min]		15	111	140	69	17	74
	mittlere Lufttemperatur [°C]		11,16	11,67	15,20	13,51	14,12	12,72
	max. Lufttemperatur [°C]		12,13	17,73	24,89	21,94	18,51	16,81
	min. Lufttemperatur [°C]		10,14	4,72	9,76	11,40	12,41	9,88
915/6	Niederschlagssumme [mm/15min]	17,40	2,10	16,80	21,80	8,00	5,00	17,20
	Max. Niederschlagsintensität	5,00	1,70	4,80	4,60	1,20	2,20	6,00
	Niederschlagsdauer [min]	76	15	111	140	69	17	14
	mittlere Lufttemperatur [°C]	14,82	11,16	12,01	15,20	13,51	14,12	10,50
	max. Lufttemperatur [°C]	16,88	12,13	17,73	24,89	21,94	18,51	11,16
	min. Lufttemperatur [°C]	12,02	10,14	4,72	9,76	11,40	12,41	10,03
	Bodenfeuchte Sonde 1 [%]	36,85	33,75	32,19	30,80	32,03	30,70	36,87
	Bodenfeuchte Sonde 2 [%]	27,50	31,40	67,30	25,30	25,30	30,20	21,60