### Institut für Hydrologie

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Katharina Rucki

# Zum Gefährdungspotential von Städten in Karstgebieten des Nahen Ostens



Masterarbeit unter Leitung von Dr. Jens Lange Freiburg i. Br., November 2011

### Institut für Hydrologie

der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Katharina Rucki

# Zum Gefährdungspotential von Städten in Karstgebieten des Nahen Ostens

Referent: Dr. Jens Lange

Koreferent: Prof. Dr. Markus Weiler

Masterarbeit unter Leitung von Dr. Jens Lange Freiburg i. Br., November 2011

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, Katharina Rucki, dass ich diese Abschlussarbeit selbstständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen bzw. Hilfsmittel verwendet habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche Kenntlich gemacht habe. Darüber hinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, bereits für eine andere Prüfung angefertigt wurde.

\_\_\_\_\_ \_\_\_ Ort, Datum

Unterschrift

## Danksagung

Für die Betreuung und Unterstützung der vorliegenden Arbeit möchte ich mich ganz herzlich bei Dr. J. Lange vom Institut für Hydrologie bedanken.

Herrn Prof. Dr. M. Weiler danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens dieser Arbeit.

Weiter geht mein Dank an Dr. T. Grodek von der Hebräischen Universität in Jerusalem für die Hilfe bei Fragestellungen bezüglich der Qualitätsdaten.

Mein herzlicher Dank geht auch an meine Familie und meinen Freund Aaron für ihre emotionale Unterstützung.

## I. Inhaltsverzeichnis

# Erklärung

Danksagung

| II. Verzeichnis der Abbildungen im Text                               | III  |
|---|------|
| III. Verzeichnis der Tabellen im Text                                 | VIII |
| IV. Verzeichnis der Tabellen im Anhang                                | Χ    |
| V. Abkürzungen  | XII  |
| VI. Zusammenfassung   | XIV  |
| 1. Einleitung   | 1    |
| 1.1. First Flush-Phänomen   | 4    |
| 2. Problemstellung und Zielsetzung                                    | 7    |
| 3. Charakteristika des Untersuchungsgebiets                           | 8    |
| 3.1. Der Standort und seine Eigenschaften                             | 8    |
| 3.2. Geologie und Pedologie   | 9    |
| 3.3. Klima  | 10   |
| 3.3.1. Staubstürme  | 12   |
| 4. Bisher durchgeführten hydrologischen Untersuchungen                | 15   |
| 4.1. Abflussbildung in ländlicher Umgebung                            | 15   |
| 4.2. Abflussbildung in der Stadt Modi'in                              | 16   |
| 4.3. Bisherige Untersuchungen zur Wasserqualität in der Stadt Modi'in | 19   |
| 5. Probenahme und Datenerhebung                                       | 22   |
| 5.1. Hauptionen   | 22   |
| 5.2. Spurenelemente   | 23   |
| 5.2.1. Straßenexperimente   | 26   |
| 5.3. Klimadaten   | 26   |
| 6. Methoden   | 27   |
| 6.1. Klassifizierung von Staubstürmen                                 | 27   |
| 6.2. Berechnungen mit Hauptionen                                      | 28   |
| 6.2.1. Herkunft der Hauptionen im Niederschlagswasser                 | 29   |
| 6.3. Berechnungen mit Spurenelementen                                 | 30   |
| 7. Resultate  | 33   |
| 7.1. Klima  | 33   |
| 7.1.1. Staubstürme  | 36   |
| 7.2. Hauptionen und Spurenelemente im Niederschlag                    | 39   |

| 7.2.1. Qualitätskontrolle  | 39       |
|--|----------|
| 7.2.2. Herkunft der Hauptionen und Spurenelemente im                   |          |
| Niederschlagswasser  | 40       |
| 7.2.3. Vergleich der Hauptionen in Bezug auf verschiedene              |          |
| Klimaparameter   | 43       |
| 7.2.4. Spurenelemente im Niederschlagswasser: Ein Vergleich            |          |
| zwischen Stadt und Land  | 46       |
| 7.2.5. Vergleich der Spurenelemente im Niederschlagswasser mit         |          |
| denen aus Staubstürmen   | 48       |
| 7.3. Verhalten der Hauptionen im Regenwasserabfluss im naturbelassenen |          |
| Wadi   | 50       |
| 7.4. Vergleich der Spurenelemente in Wässern aus der Stadt             | 56       |
| 7.4.1. Vergleich der Spurenelemente in Regenwasserabflüssen zu         |          |
| den Trinkwasserstandards   | 59       |
| 7.4.2. Vergleich der Spurenelemente in Regenwasserabflüssen zur        |          |
| Niederschlagsmenge sowie dem Vorregenindex                             | 63       |
| 7.4.2.1. Niederschlagsmenge  | 63       |
| 7.4.2.2. Vorregenindex   | 66       |
| 7.5. Vergleich der Spurenelemente auf dem Land                         | 72       |
| 7.6. Straßenexperimente  | 75       |
| 8 Diskussion   | 78       |
| 8.1 Qualität der Niederschläge in und um Modi'in                       | 78       |
| 8.2. Qualität der Begenwasserabflüsse in Modi'in                       | 70<br>80 |
| 8.3. Qualität der Regenwasserabflüsse um Modi'in                       | 83       |
| 8.5. Quantat del Regenwasseraonusse uni Modi in                        | 83       |
| 9. Schlussfolgerung  | 85       |
| 10. Referenzen   | 86       |

| 11. | Anhang |
|-----|--------|
|-----|--------|

93

# II. Verzeichnis der Abbildungen im Text

| <b>Abbildung 1.1</b> : Herkunft von Stoffen im Regenwasserabfluss auf befestigten Flächen. Aus DIERKES ET AL. (2005)  | 2  |
|---|----|
| <b>Abbildung 1.2</b> : Hypothetische Pollutographen dreier Schadstofftypen, die einen First-Flush-Effekt noch vor dem Erreichen des Hydrographen-Peaks zeigen. Aus CHIEW ET AL. (2001)  | 6  |
| <b>Abbildung 2.1:</b> Lage der Stadt Modi'in in Israel. Blaue Linien deuten auf die jährliche, mittlere Niederschlagsmenge hin. Entnommen aus HASSAN ET AL. (2010) und durch Modi'in ergänzt  | 8  |
| Abbildung 2.2: Jahresverlauf der drei klimatischen Variablen mit zusätzlicher Trennung der Jahreszeiten nach JAFFE (1977)   | 11 |
| <b>Abbildung 2.3</b> : (a) Ausdehnung eines Staubsturmes des Typs A, welcher im Zeitraum von 20 bis 22. März 1984 stattfand. (b) Staubsturm des Typs B, beobachtet am 7. Mai 1973. Aus GANOR ET AL. (1991)  | 13 |
| <b>Abbildung 3.1:</b> (a) Lage der Abfluss- (Dreiecke) und der Niederschlagsmessstationen (Punkte) in Modi'in. (b) Blaue Linien zeigen die Richtung des Abflusses innerhalb der Stadt. Aus Grodek et al. (2011)   | 17 |
| <b>Abbildung 3.2:</b> Gemessener Niederschlag und Abfluss an den Stationen I und M am 5.11.2002. Aus LEIBUNDGUT ET AL. (2004)   | 18 |
| Abbildung 3.3: Konzeptuelles Model für die fortlaufende Abflussbildung innerhalb der beiden Städte Ramallah und Modi'in. Aus GRODEK ET AL. (2011)   | 19 |
| Abbildung 3.4: Wasserstand und elektrische Leitfähigkeit, gemessen zu Beginn der Regensaison an der Station M. Aus GRODEK ET AL. (2011)   | 20 |
| Abbildung 4.1: Lage der Messstationen und Probenahmen. Gelbe Sterne stehen<br>für Niederschlags- bzw. Klimamessstationen. Blaue Sterne zeigen jene Orte, an<br>denen der Abfluss gemessen wurde. Der rote Kasten markiert das Gebiet, in dem<br>Wasserproben von Dächern, Straßen usw. gesammelt wurde. | 22 |
| Abbildung 4.2: Vergrößerung des roten Kastens aus Abbildung 4.1. Standorte der Probenahme auf den verschiedenen urbanen Flächen.  | 24 |

| Abbildung 5.1: Niederschlagsmengen der einzelnen Stationen, die pro Ereignis während der gesamten Saison gemessen wurden.  | 33 |
|--|----|
| Abbildung 5.2: Monatliche, über die Stationen gemittelte Niederschlagsmengenverteilung   | 34 |
| Abbildung 5.3: Monatliche Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten während der Wintersaison 2002/2003   | 35 |
| Abbildung 5.4: Monatliche Häufigkeitsverteilung der Windrichtung während der Wintersaison 2002/2003  | 36 |
| <b>Abbildung 5.5:</b> Monatliche Häufigkeitsverteilung der Staubkonzentrationen während der Wintersaison 2002/2003.  | 37 |
| Abbildung 6.1: Linearer Zusammenhang zwischen der Summe von Kationen und der Summe von Anionen   | 40 |
| Abbildung 6.2: Abhängigkeit der vier Hauptionen von der Niederschlagsmenge,<br>die an den entsprechenden Niederschlagsereignissen gefallen ist, ohne dass dabei<br>die Staubstürme berücksichtigt wurden   | 44 |
| <b>Abbildung 6.3</b> : Anhängigkeit der Hauptionen Ca <sup>2+</sup> und HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> von der maximalen Niederschlagsintensität, ohne Berücksichtigung der Einflüsse von zwei Staubstürmen | 45 |
| <b>Abbildung 6.4:</b> Vergleich der Hauptionen $Mg^{2+}$ , $K^+$ und $SO_4^{2-}$ zu der Anzahl der trockenen Tage vor Niederschlagsbeginn, jedoch ohne Einfluss von Staubereignissen                       | 46 |
| Abbildung 6.5: Schoeller-Diagramm des Niederschlagswassers   | 47 |
| Abbildung 6.6: Vergleich der Spurenelemente im ländlichen und urbanen Niederschlagswasser  | 48 |
| Abbildung 6.7: Vergleich der Spurenelemente im Niederschlagswasser und in den Staubstürmen, die von GANOR ET AL. (1991) analysiert wurden  | 49 |
| Abbildung 7.1: Piper-Diagramm vom 20.12.2002   | 51 |
| Abbildung 7.2: Piper-Diagramm vom 2021.01.2003   | 52 |
| Abbildung 7.3: Piper-Diagramm vom 1415.02.2003   | 53 |

| <b>Abbildung 7.4</b> : Schoeller-Diagramm für die Wasserproben vom 20.12.2002, die im Untersuchungsgebiet von STEINMANN (2010) gesammelt wurden | 54 |
|---|----|
| Abbildung 7.5: Schoeller-Diagramm für die Wasserproben vom 2021.01.2003, die im Untersuchungsgebiet von STEINMANN (2010) gesammelt wurden       | 55 |
| Abbildung 7.6: Schoeller-Diagramm für die Wasserproben vom 1415.02.2003, die im Untersuchungsgebiet von STEINMANN (2010) gesammelt wurden       | 55 |
| Abbildung 8.1: Anreicherungsfaktoren in Regenwasserabflüssen urbaner Flächen zu Beginn des Niederschlagsereignisses am 24.03.2003               | 57 |
| Abbildung 8.2: Anreicherungsfaktoren in Regenwasserabflüssen urbaner Abflüsse während des Niederschlagsereignisses am 17.12.2002                | 57 |
| Abbildung 8.3: Anreicherungsfaktoren in Regenwasserabflüssen urbaner Abflüsse während des Niederschlagsereignisses am 13.02.2003                | 58 |
| Abbildung 8.4: Zeitlicher Vergleich der Spurenelemente, die im urbanen Abfluss an der Station M am 5.11.2002 gemessen wurden                    | 59 |
| Abbildung 9.1: Schoeller-Diagramm: Vergleich der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus Dächern mit den Trinkwasserstandards                  | 60 |
| Abbildung 9.2: Schoeller-Diagramm: Vergleich der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus Straße (Z) mit den Trinkwasserstandards               | 61 |
| Abbildung 9.3: Schoeller-Diagramm: Vergleich der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus Straße (A) mit den Trinkwasserstandards               | 61 |
| Abbildung 9.4: Schoeller-Diagramm: Vergleich der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus Parkplatz mit den Trinkwasserstandards                | 62 |
| Abbildung 9.5: Schoeller-Diagramm: Vergleich der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus Station M mit den Trinkwasserstandards                | 62 |
| Abbildung 9.6: Zusammenhang zwischen dem Spurenelementen B und der Niederschlagsmenge, die während der entsprechenden Ereignisse gefallen ist   | 63 |
| Abbildung 9.7: Zusammenhang zwischen der Cr-Konzentration im Regenwasserabfluss der Straße (A) und der Niederschlagsmenge                       | 64 |
| Abbildung 9.8: Zusammenhang zwischen der Co-Konzentration im Regenwasserabfluss der Straße (A) und der Niederschlagsmenge                       | 65 |

| Abbildung 9.9: Zusammenhang zwischen der S-Konzentration im urbanen Abfluss an der Station M und der Niederschlagsmenge        | 65 |
|--|----|
| Abbildung 9.10: Zusammenhang zwischen der S-Konzentration im urbanen Abfluss an der Station M und der Niederschlagsmenge       | 66 |
| Abbildung 10.1: Ganglinie des Vorregenindexes  | 67 |
| Abbildung 10.2: Abhängigkeit der Al-Konzentration im Regenwasserabfluss aus der Straße (A) vom Vorregenindex                   | 68 |
| <b>Abbildung 10.3:</b> Abhängigkeit der Al-Konzentration im urbanen Abfluss an der Station M vom Vorregenindex                 | 69 |
| Abbildung 10.4: Al- und Fe-Konzentrationsganglinien, sowie der Verlauf des Vorregenindexes an der Station M                    | 69 |
| Abbildung 10.5: Abnehmende Ca-Konzentration in Regenwasserabfluss mit zunehmenden Vorregenindex auf der Straße (A)             | 70 |
| Abbildung 10.6: Abnehmende Ca-Konzentration im urbanen Abfluss mit zunehmenden Vorregenindex an der Station M                  | 70 |
| Abbildung 10.7: Konzentrationsganglinie von Ca im urbanen Abfluss, sowie der Verlauf des Vorregenindexes an der Station M      | 71 |
| Abbildung 11.1: Schoeller-Diagramm mit Spurenelementen vom Abfluss an der Station I, sowie Trinkwasserstandards                | 73 |
| Abbildung 11.2: Schoeller-Diagramm mit Spurenelementen vom Abfluss an der Station J, sowie Trinkwasserstandards                | 74 |
| Abbildung 11.3: Schoeller-Diagramm mit Spurenelementen vom Oberflächenabfluss vom natürlichen Hang, sowie Trinkwasserstandards | 74 |
| Abbildung 11.4: Schoeller-Diagramm mit Spurenelementen aus dem Karstbrunnen, sowie Trinkwasserstandards                        | 75 |
| Abbildung 12.1: Anreicherungsfaktoren aller drei Versuche aus dem ersten Experiment vom 2. Oktober 2002                        | 76 |
| Abbildung 12.2: Anreicherungsfaktoren aller drei Versuche aus dem zweiten Experiment vom 13. Januar 2003                       | 76 |

Abbildung 12.3: Anreicherungsfaktoren aller drei Versuche aus dem dritten Experiment vom 30. September 2003

## III. Verzeichnis der Tabellen im Text

| Tabelle 1.1: Bezug zwischen den vier verschiedenen Dachmaterialien (Holz,         Schindel, Aluminium, Verzinkt) und dem Anteil an Wasserproben, die die US-  |    |
|---|----|
| EPA Trinkwasserstandards von 1999 überschreiten. Aus CHANG ET AL. (2004)  | 2  |
| <b>Tabelle1.2</b> : VerkehrsbedingteEmissionsquellenundInhaltsstoffeimRegenwasserabflussvonVerkehrsflächen.AusHÜTTER & REMMLER (1997; inGenter2002  | 2  |
| Gantner, 2002)  | 3  |
| <b>Tabelle 2</b> : Vergleich zweier Klimaklassifikationen in Israel. Ergänzt durch einen roten Kasten, der die Eigenschaften des Klimas im Untersuchungsgebiet widerspiegelt. Aus GOLDREICH (2003)  | 11 |
| Tabelle 3: Eigenschaften der hydrometrischen Stationen in Modi'in aus         LEIBUNDGUT ET AL. (2010)  | 17 |
| <b>Tabelle 4.1</b> : Datum der Probenahme und deren Anzahl je nach Standort. Hang 1<br>ist felsig und Hang 2 vegetationsbedeckt. Die Abflussstation befindet sich auf<br>dem felsigen Hang 1. Das Wadi enthält Proben aus beiden Hängen und dem   | 22 |
| wadiausiass   | 23 |
| <b>Tabelle 4.2</b> : Anzahl der Proben, die während sowie am Ende einiger<br>Niederschlagsereignisse auf den verschiedenen Flächen in der Stadt und deren<br>Umgebung gesammelt wurden. Die Zahl in der Klammer gibt die gemessene<br>Anzahl an Proben mit gelösten Metallen an; Zahlen ohne Klammern zeigen die<br>gemessene Anzahl an Proben mit dem Gesamtgehalt an Metallen (gelöst und |    |
| ungelöst)   | 25 |
| Tabelle 5: Hauptionen-Zusammensetzung des östlichen Mittelmeers   | 29 |
| Tabelle 6.1: Monatliche Häufigkeitsverteilung [%] der Niederschlagsintensitäten         an Beispiel der Station A   | 34 |
| <b>Tabelle 6.2</b> : Ereignisse, deren Staubkonzentrationen höher als 300 $\mu$ g/m <sup>3</sup> lagen.<br>Neben der gesamten Betrachtung der Ereignisse, sind auch deren maximal erreichte Staubkonzentrationen und die dazugehörigen Parameter aufgelistet.   | 38 |
| <b>Tabelle 6.3</b> : Einteilung der Staubereignisse in Staubdunst und Staubsturmentsprechend der quantitativen Klassifikation nach OFFER & GOOSSENS (2001)  | 39 |
|   |    |

| Tabelle 7.1: Vergleich der Ionenverhältnisse zwischen dem Meer und dem             |    |
|--|----|
| Niederschlag, Anreicherungsfaktoren in Bezug auf das Meer, Meeresbeitrag und       |    |
| Nicht-Meeresbeitrag. Vergleiche beziehen sich auf die gesamte Wintersaison und     |    |
| die unterschiedlichen Monate   | 41 |
|  |    |
| Tabelle 7.2: Matrix der linearen Regression. Ist das Bestimmtheitsmaß zwischen     |    |
| zwei Ionen größer als 0,5, so haben beide Ionen dieselbe Herkunft                  | 42 |
|  |    |
| Tabelle 7.3:       Vergleich der Abhängigkeit von Ca und Na in Bezug auf die       |    |
| Spurenelemente im Niederschlagswasser.   | 42 |
| T-L-D-74. Anni-1. man f-latence des Commende die in Demos - des                    |    |
| <b>Tabelle 7.4</b> : Anreicherungsfaktoren der Spurenelemente, die in Bezug zu dem | 10 |
| jeweingen Landnutzungstypen berechnet wurde  | 48 |
| <b>Tabelle 8.</b> Gleichungen mit denen die Konzentration der entsprechenden       |    |
| Elemente mithilfe des VRI berechnet werden kann                                    | 72 |
|  | 12 |
| <b>Tabelle 9:</b> Anreicherungsfaktoren von Al in allen drei Experimenten          | 77 |
|  |    |

# IV. Verzeichnis der Tabellen im Anhang

| Tabelle10:StatistischeZusammenfassungderHauptionenausNiederschlagswasser im naturbelassenenWadi   | 93  |
|---|-----|
| Tabelle11:StatistischeZusammenfassungderHauptionenausdemOberflächenabflussderHängeimnaturbelassenenWadi   | 94  |
| Tabelle12:StatistischeZusammenfassungderHauptionenausdemOberflächenabflussdesWadisim naturbelassenenWadi  | 95  |
| Tabelle13:StatistischeZusammenfassungderSpurenelementeimNiederschlagswasser für die gesamteWintersaison 2002/2003;Proben von Stadtund Land zusammen                               | 96  |
| <b>Tabelle</b> 14:StatistischeZusammenfassungderSpurenelementeimRegenwasserabfluss aus Dächernfür die gesamte Wintersaison 2002/2003  | 97  |
| <b>Tabelle</b> 15: StatistischeZusammenfassungderSpurenelementeimRegenwasserabfluss aus dem Parkplatzfür die gesamte Wintersaison 2002/2003                                       | 98  |
| Tabelle16:StatistischeZusammenfassungderSpurenelementeimRegenwasserabflussausderStraße (Ziegel)fürdiegesamteWintersaison2002/2003   | 99  |
| Tabelle17:StatistischeZusammenfassungderSpurenelementeimRegenwasserabflussausderStraße(Asphalt)fürdiegesamteWintersaison2002/2003   | 100 |
| <b>Tabelle 18:</b> Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Abfluss derStation M für die gesamte Wintersaison 2002/2003   | 101 |
| <b>Tabelle 19:</b> Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Abfluss derStation I für die gesamte Wintersaison 2002/2003   | 102 |
| <b>Tabelle 20:</b> Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Abfluss derStation J für die gesamte Wintersaison 2002/2003   | 103 |
| <b>Tabelle 21:</b> Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente imOberflächenabfluss am Hang im Untersuchungsgebiet von Steinmann (2010) fürdie gesamte Wintersaison 2002/2003 | 104 |
| Tabelle 22: Mittlere Ereigniskonzentration (EMC) der Spurenelemente an der           Station M  | 105 |

 Tabelle 23: Mittlere Ereigniskonzentration (EMC) der Spurenelemente an der Station I

106

# V. Abkürzungen

| AF               | Anreicherungsfaktor   |
|------------------|---|
| Gl.              | Gleichung   |
| ICP-AES          | Atomemissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas |
| KMB              | Kein Meeresbeitrag  |
| MB               | Meeresbeitrag   |
| VK               | Variationskoeffizient, [%]                                      |
| VRI              | Vorregenindex, [mm/Tag]   |
| EC               | European Commission Drinking Water Directive (98/83/EEC)        |
| WHO              | World Health Organization                                       |
| US-EPA           | US Environmental Protection Agency                              |
| EMC              | mittlere Ereigniskonzentration, [mg/L]                          |
|                  |   |
| Ag               | Silber  |
| Al               | Aluminium   |
| As               | Arsen   |
| В                | Bor   |
| Ba               | Barium  |
| Ca               | Calcium   |
| Cd               | Cadmium   |
| Cl               | Chlor   |
| Co               | Cobalt  |
| Cr               | Chrom   |
| Cu               | Kupfer  |
| Fe               | Eisen   |
| Hg               | Quecksilber   |
| HCO <sub>3</sub> | Hydrogenkarbonat  |
| Κ                | Kalium  |
| Li               | Lithium   |
| Mg               | Magnesium   |
| Mn               | Mangan  |
| Mo               | Molybdän  |
| Na               | Natrium   |
| Ni               | Nickel  |
| NO <sub>3</sub>  | Nitrat  |
| Р                | Phosphor  |
| Pb               | Blei  |
| S                | Schwefel  |
| Sb               | Antimon   |
| Se               | Selen   |
| Si               | Silicium  |
| Sn               | Zinn  |
| $SO_4$           | Sulfat  |

| Sr | Strontium   |
|----|---|
| Ti | Titan   |
| Tl | Thallium  |
| V  | Vanadium  |
| Zn | Zink  |
| EC | spezifische, elektrische Leitfähigkeit, engl. electrical conductivity, $[\mu S/cm]$ |
| TS | Gesamtfeststoffgehalt, engl. Total Solids, [g/L]                                    |
|    |   |

### VI. Zusammenfassung

Im Rahmen eines trilateralen Forschungsprojekts, das insgesamt von 1999 bis 2004 dauerte, sollte untersucht werden, welche Auswirkungen die Urbanisierung auf die natürlichen, hydrologischen Prozesse und das Wasservorkommen hat. Im Fokus der Forschung standen damals zwei mediterrane Städte: die israelische, moderne Stadt Modi'in und die palästinensische, traditionell-arabische, alte Stadt Ramallah. Die Abflussbildung innerhalb und außerhalb beider Städte wurde intensiv erforscht und geklärt. Eine umfassende Untersuchung zur Qualität der Regenwasserabflüsse wurde jedoch bisher nicht durchgeführt, obwohl andere Forscher immer wieder nachgewiesen haben, dass Abflüsse aus Städten generell mit Schadstoffen kontaminiert sind. Zu dieser Problematik existierte für die Stadt Modi'in im Gegensatz zu Ramallah bislang kein systematisches Wissen. Beide Städte liegen über einem wichtigen Aquifer, der bisher hoch-qualitatives Trinkwasser für die Bevölkerung lieferte. Aufgrund der karstigen Landschaft besteht für den Aquifer eine besondere Gefahr der Kontamination, da verschmutzte, städtische Regenwasserabflüsse über bestimmte lokale Zonen wie Dolinen und kleine Hohlräume in sehr kurzen Zeiträumen den Karstgrundwasserkörper erreichen können. Ziel dieser Arbeit war es. die Verschmutzungstendenz verschiedener Elemente im Niederschlag und in den Regenwasserabflüssen sowohl auf urbanen Flächen in Modi'in als auch auf natürlichen, außerstädtischen Flächen zu bewerten. Des Weiteren sollte die Größe des Inputs aus nasser und trockener Deposition festgestellt werden. Dazu wurden zwischen November 2003 und April 2004 in und um Modi'in kontinuierliche Klimadaten erfasst und zahlreiche Wasserproben gesammelt, die auf Hauptionen und 31 Spurenelemente analysiert wurden. Die Datensammlung wurde für die vorliegende Arbeit zur Verfügung gestellt. Zur Interpretation der Verschmutzungstendenz wurden unter anderem statistische Analysen, Schoeller-Anreicherungsfaktoren, Regressionsanalysen Untersuchung Diagramme, zur der Abhängigkeit physikalischer Parameter wie der Niederschlagsmenge, der maximalen Niederschlagsintensität, der vorherigen trockenen Tage, sowie dem Vorregenindex, und Meers- sowie Nichtmeeresbeiträge zum Niederschlagswasser herangezogen.

Die Herkunft der Hauptionen im Niederschlagswasser ist auf das Meer (Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>), die Erdkruste (Ca<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) sowie anthropogene Aktivitäten (Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, zurückzuführen. Die Herkunft gemessenen Spurenelemente  $NO_3^{-}$ der im Niederschlagswasser konnte jedoch nicht eindeutig zugeordnet werden, da diesbezüglich zu wenige Niederschlagswässer analysiert wurden. In der Stadt scheinen im Niederschlagswasser besonders vermehrt Al, Cu, Fe, Mn, Si, Ti und Zn vorzukommen, während auf dem Land vermehrt Ba, Ca, K, Mg, Na, P, S und Sr im Niederschlag zu finden sind. Diese Aufteilung der Spurenelemente zwischen Stadt und Land muss durch weitere Messungen bestätigt werden, da diese Verteilung nur während eines Niederschlagsereignisses beobachtet wurde. Des Weiteren überschritten Konzentrationen von Al und teilweise auch von Fe und Pb die vorgegebenen Trinkwasserstandards. Ein Grund zur Besorgnis liegt nur bei Pb vor, da die Grenzwerte für Al und Fe im Trinkwasser auf ästhetischen Gründen festgelegt wurden. Die Größe des Inputs aus trockener Deposition konnte nicht ermittelt werden, da es dazu keine entsprechenden Messungen gab. Allerdings konnte festgestellt werden, dass die Regenwasserabflüsse auf urbanen Flächen bei größeren Staubereignissen, die vor oder während der Niederschlagsereignisse stattfanden, deutlich höhere Al-, Fe-, Pb-, Cr- und Mn-Konzentrationen aufwiesen und die Trinkwasserstandards überschritten haben. Gesundheitliche Schäden am Menschen kann neben Pb auch Cr verursachen.

In der Stadt scheinen Regenwasserabflüsse von Dächern im Gegensatz zu denen auf Straßen und zum Niederschlagswasser an K, Li, Na, S, Sr und Zn angereichert zu sein. Wird das Wasser statt auf die Straße in den angrenzenden Garten abgeleitet, so bestünde bei einer Infiltration des Wassers in den Untergrund keine Gefahr einer Aquiferkontamination, da es für die Gesamtgehalte an K, Li, S und Sr keine Trinkwasserstandards gibt und Na sowie Zn bisher unter den Grenzwerten lagen.

Für Regenwasserabflüsse auf einer Straße im Wohngebiet der Stadt Modi'in können mithilfe entsprechender mathematischer Gleichungen die Konzentrationen von Al, Ba, Ca, Co, Cr, Fe, Li, Mg, Mn, Na, Ni, S, Ti, sowie V in Bezug auf den Vorregenindex vorhergesagt werden. Der Vorregenindex wurde als Schätzwert für die Größe der Abflussbildung herangezogen. An der Station M, an der nahezu der gesamte urbane Abfluss zusammen mit dem Abfluss eines außerstädtischen, ländlichen Gebiets gemessen wurde, konnte für einige der genannten Spurenelemente ebenfalls ein Zusammenhang mit dem Vorregenindex festgestellt werden. Ob damit Vorhersagen gemacht werden können, ist fraglich, da diese Spurenelemente mit der gefallenen Niederschlagsmenge nicht im Zusammenhang stehen. Schadstoffbeobachtungen in Regenwasserabflüssen an der Station M sind besonders wichtig, da diese ohne vorherige Aufbereitung in den Vorfluter eingeleitet werden. Während der Niederschlagssaison von November 2002 bis April 2003 haben in den urbanen Abflüssen folgende Spurenelementen die Trinkwasserstandards überschritten: Al, Cr, Fe, Mn, Pb und Se. Allerdings würden nur Cr, Pb und Se eine Gefahr für den Aquifer darstellen.

Alle Spurenelemente in Regenwasserabflüssen zeigen eine starke zeitliche und räumliche Variabilität. Da während eines Niederschlagsereignisses die Regenwasserabflüsse auf den verschiedenen urbanen und ländlichen Flächen hauptsächlich nur ein- bis dreimal beprobt wurden, sind Vergleiche zwischen den jeweiligen Spurenelement-Gehalten nicht möglich.

Auf den ländlichen Gebieten außerhalb der Stadt wurden neben Al, Fe und Pb auch teilweise erhöhte Cr-, Mn- und Ni-Konzentrationen gemessen, die die Trinkwasserstandards überschritten haben. Im Hinblick auf gesundheitliche Schäden würde eine Gefahr nur von Cr, Ni und Pb ausgehen.

An einer Straße in Modi'in wurden drei Straßenexperimente durchgeführt, um festzustellen, ob so genannte First-Flush-Phänomene zu beobachten sind. Von einem First-Flush wird generell ausgegangen, wenn zu Beginn eines Abflusses die höchste Schadstofffracht abtransportiert wird. Zwei Straßenexperimente wurden vor Beginn der Niederschlagssaison durchgeführt. Dabei konnten First-Flush-Phänomene mit überschrittenen Trinkwasserstandards vor allem bei Fe, Pb, B, Hg, Mn, Ni und Tl beobachtet werden. Die meisten dieser Elemente gelten als gesundheitsschädlich. Es wird davon ausgegangen, dass die erhöhten Konzentrationen in natürlichen Fließgewässern stark verdünnt werden, so dass die Kontaminationsgefahr möglicherweise vernachlässigbar klein wird.

Generell kann gesagt werden, dass eine Gefahr der Aquiferkontamination in Bezug auf gesundheitliche Schäden bisher nur von Pb, Cr und Se ausgeht.

<u>Keywords:</u> Staubereignisse, verschmutzte urbane Regenwasserabflüsse, First-Flush, Gefahr durch Überschreitung der Trinkwasserstandards

## 1. Einleitung

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist die treibende Kraft der Urbanisierung der permanente Anstieg der Weltbevölkerung (Bähr, 2008). Aus einem UN-Bericht (2009) geht hervor, dass die Weltbevölkerung von 2,53 Milliarden Menschen im Jahr 1950 auf 6,83 Milliarden im Jahr 2009 angestiegen ist. Zeitgleich hat sich auch der Anteil der Land- und Stadtbevölkerung verändert. Lebten 1950 nur 28,8 % der Weltbevölkerung in Städten, sind es gegenwärtig schon mehr als 50,5 %, Tendenz weiter steigend.

Eins der bedeutendsten Auswirkungen der Urbanisierung ist bezüglich des Wasserhaushalts die Veränderung des Abflussregimes (Marsalek et al., 2006). Generell unterscheidet sich der Oberflächenabfluss in Städten von dem in der ländlichen Umgebung in drei Punkten:

- 1. Durch erhöhtes Abflussvolumen, das aufgrund reduzierter Niederschlagsinfiltration und Evaporation verursacht wird,
- 2. Durch erhöhte Abflussgeschwindigkeit, die aufgrund hydraulischer Verbesserung der Gerinnen-Transportkapazität entsteht, und
- 3. Durch eine kürzere Reaktionszeit, die zwischen dem eintreffenden Niederschlag und der Abflussbildung entsteht.
- 4.

Die Größe des direkten Regenwasserabflussvolumens hängt von der Häufigkeit der Niederschläge, dem lokalen Klima und der physiographischen Eigenschaften des Einzugsgebiets (Böden, Grad der Versiegelung, usw.) ab (Marsalek et al., 2006). Große und vor allem schnelle Abflüsse haben einen besonderen Nachteil: Sie verhindern eine natürliche Grundwasserneubildung (Karmon & Shamir, 1997; in Asaf et al., 2004). Dies kann sich vor Allem in jenen Gebieten nachteilig auswirken, in denen permanente Wasserknappheit herrscht, wie dies in semi-ariden und ariden Klimazonen der Fall ist.

Die Urbanisierung hat aber nicht nur einen entscheidenden Einfluss auf die Quantität der Oberflächenabflüsse, sondern wirkt sich auch nachteilig auf deren Qualität aus. Zu den wichtigsten Schadstoffen zählen Sedimente, organische Stoffe, Bakterien, Schwermetalle wie Kupfer, Zink, Mangan, Eisen und Blei, Kohlenwasserstoffe, giftige Substanzen wie Pestizide, und Luftschadstoffe. Gelangen große Mengen an Schwermetallen und giftigen Substanzen in den Vorfluter, können diese chronische bis akute Schäden an Tieren, Pflanzen und Menschen verursachen (Porto, 2001; Chiew et al., 2001). Die meisten Schadstoffe, die in den urbanen Abfluss gelangen, haben einen diffusen Ursprung. Dies wird mithilfe der Abbildung 1.1 etwas näher erklärt: In der Atmosphäre sind bereits große Mengen an Stoffen enthalten, die über anthropogene Emissionen eingetragen werden. natürliche und Während der niederschlagsfreien Perioden lagern sich vor Allem die gröberen Partikel auf den urbanen Flächen ab. Fängt es an zu Regen, werden die abgelagerten Schadstoffe mehr oder weniger durch den Regenwasserabfluss mobilisiert. Der Regen selbst ist auch mit Schadstoffen belastet, weil er diese aus der Atmosphäre ausgewaschen hat. Zur Gesamtkonzentration des Regenwasserabflusses kommen noch Stoffe hinzu, die von den urbanen Flächen selbst ausgeschieden werden. Dazu zählen vor allem Materialien aus Dach- und Verkehrsflächen (Dierkes et al., 2005).



Abbildung 1.1: Herkunft von Stoffen im Regenwasserabfluss auf befestigten Flächen. Aus DIERKES ET AL. (2005)

Seit Anfang der 1970er Jahre (Lye, 2009; Chebbo & Gromaire, 2004) wurden viele Untersuchungen durchgeführt, die sich mit den Prozessen der Schadstoffbelastung im Regenwasserabfluss beschäftigten. Zahlreiche Forscher wie DIERKES ET AL. (2005), CHANG ET AL. (2004) und FÖRSTER (1996; in Lye, 2009) konnten nachweisen, dass Regenwasserabflüsse von Dächern (je nach Materialbeschaffenheit) sehr hohe Schadstoffkonzentrationen aufweisen können. Dass dabei sogar Trinkwasserstandards überschritten werden können, zeigt die Untersuchung von CHANG ET AL. (2004), deren Ergebnisse in Tabelle 1.1 zusammenfassend dargestellt sind.

> **Tabelle 1.1**: Bezug zwischen den vier verschiedenen Dachmaterialien (Holz, Schindel, Aluminium, Verzinkt) und dem Anteil an Wasserproben, die die US-EPA Trinkwasserstandards von 1999 überschreiten. Aus CHANG ET AL. (2004)

| Variable         | Roof typ | Rainwater only |          |            |      |
|------------------|----------|----------------|----------|------------|------|
|                  | Wood     | Composition    | Aluminum | Galvanized |      |
| Al <sup>3+</sup> | 13.6     | 17.7           | 12,3     | 15.9       | 8,0  |
| Mn <sup>2</sup>  | 27.7     | 14.7           | 4.9      | 6,4        | 8.0  |
| Cu <sup>2+</sup> | 76.2     | 59.6           | 77.9     | 77.7       | 72.0 |
| Pb2+             | 15.1     | 10.8           | 12.8     | 20.3       | 8.0  |
| Zn <sup>2+</sup> | 99.5     | 99.5           | 100.0    | 100.0      | 68.0 |

Prozesse, die die Ausspülung von Schadstoffen beeinflussen, wurden besonders intensiv von FÖRSTER (1996, 1998, 1999; in Lye, 2009) in Bayreuth erforscht. Er konnte beobachten, dass Regenwasserabflüsse zu Beginn der Regenereignisse sehr hohe Schadstoffkonzentrationen erreichen, aber mit nachfolgendem Abfluss schnell wieder abnehmen. Dieses Phänomen ist in der Hydrologie als "First-Flush" bekannt. Er wird im nachfolgenden Abschnitt 1.1. etwas genauer beschrieben. FÖRSTER (1996; in Lye, 2009) konnte zudem mit seinen Untersuchungen Parameter identifizieren, die die Wasserqualität der Dachabflüsse beeinflussen:

- Dachmaterial: Chemische Eigenschaften, Rauigkeit, Oberflächenbeschichtung (Farbe & Lacke), Alter
- Einzugsgebietsparameter: Größe, Inklination, Exposition
- Niederschlagsereignisse: Intensität, Dauer, Wind
- Lokales Wetter: Saison, vorherige Trockenperioden
- Chemische Eigenschaften der Schadstoffe

Dass nicht nur Dächer, sondern auch Straßen die Qualität des Regenwasserabflusses beeinträchtigen können, zeigt sich vor allem in der Bandbreite der emittierten Stoffen, die auf den Verkehr zurückzuführen sind (Siehe untere Tabelle 1.2):

**Tabelle 1.2:** Verkehrsbedingte Emissionsquellen und Inhaltsstoffe im Regenwasserabfluss von Verkehrsflächen. Aus HÜTTER & REMMLER (1997; in Gantner, 2002)

| Emissionsquelle                   | Stoffspektrum (davon partikulär gebunden)   |  |  |
|-----------------------------------|---|--|--|
| Kraftstoffverbrennung             | Ruß, Öle, PAK, Schwermetalle (Pb), aromatische Kohlenwasserstoffe                                 |  |  |
|                                   | (Phenole, Benzol)   |  |  |
| Tropfverluste                     | Benzin, Diesel, Öle, Fette, Unterbodenschutz, Bremsflüssigkeit, Frost-                            |  |  |
|                                   | schutzmittel, Wasch- und Konservierungsmittel   |  |  |
| Reifenabrieb                      | Kautschuk, Ruß, Schwermetalloxide   |  |  |
| Katalysatoren                     | Platin  |  |  |
| Abrieb von Bremsbelägen und       | Schwermetalle, (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe)   |  |  |
| Bremsteilen                       |   |  |  |
| Fahrbahnabrieb und Auswaschun-    | mineralische Partikel, Si, Ca, <u>Schwermetalle</u> (Ti, Ni, Mn, <u>Pb</u> , Cr, Cu, <u>Zn</u> ), |  |  |
| gen                               | organische Stoffe und u.a. <u>PAK</u> (Bitumen, Asphalt)  |  |  |
| Streugut (Winterdienst) und Stra- | mineralische Stoffe, na, Cl, SO <sub>4</sub> , Ca, K, Mg, Tenside, Phthalate, Herbizi-            |  |  |
| ßenunterhaltung                   | de (PSM)  |  |  |

Zu den verkehrsbedingten Emissionen kommen noch weitere Verschmutzungen hinzu: Haushaltsabfälle, Tierkot, Vegetationsbestandteile, Stoffe aus Bautätigkeiten und der Landwirtschaft (Dünger, Herbizide, Pestizide) (Porto, 2001).

Aufgrund der zahlreichen, diffusen Schadstoffe kann die Größe der Konzentration innerhalb eines urbanen Einzugsgebiets, zwischen den unterschiedlichen Niederschlagsereignissen und sogar innerhalb eines einzelnen Ereignisses stark schwanken. Des Weiteren ist es auch schwierig, Unterschiede zwischen den Wohn-, Industrie- und Gewerbegebieten zu finden, um beurteilen zu können, wo die meisten Schadstoffe herkommen (Porto, 2001). Generell wird davon ausgegangen, dass leichtindustrielle Gebiete eine ähnliche Abflussqualität aufweisen wie jene der Gewerbegebiete. Daher sind sie nur leicht verschmutzt. Anders sieht es dagegen in starken Industriezonen aus. Es kann damit gerechnet werden, dass deren Abflüsse sehr hohe Gehalte an Schwermetallen und organischen Stoffen transportieren (Mikkelsen et al., 1994; in Asaf et al., 2004). Nach HÜTTER & REMMLER (1997) kommen in Wohngebieten generell hoch-qualitative Regenwässer vor. Allerdings muss in Gebieten, in deren Nähe sich wichtige und viel befahrene Straßen befinden, mit erhöhten Schadstoffkonzentrationen gerechnet werden (Polkowska et al., 2001).

Da Regenwasserabflüsse von Straßen in der Regel direkt in den Vorfluter eingeleitet werden, kann dies eine Minderung der Wasserqualität von Flüssen und Grundwässern zur Folge haben. Besonders gefährdet sind Gewässer in Karstgebieten, da die eintretenden verschmutzten Oberflächenwässer in bestimmten lokalen Zonen, wie Dolinen und kleinen Hohlräumen, den Karstgrundwasserkörper in sehr kurzen Zeiträumen erreichen können (Stephenson et al., 1999).

#### 1.1. First Flush-Phänomen

Das First-Flush-Phänomen in Regenwasserabflüssen ist ein viel diskutiertes Thema, die sich schon über Jahre hinzieht. Denn trotz zahlreicher und sogar sehr umfangreicher Untersuchung gibt es bis heute keine Definition, die den Begriff "First-Flush" eindeutig beschreibt. Dies liegt vor allem daran, dass das Phänomen von den Wissenschaftlern auf unterschiedliche Weise definiert wurde.

Generell wird angenommen, dass der erste Teil eines Regenwasserabflusses am meisten Schadstoffe mit sich transportiert (Deletic, 1998). Andere Autoren wie PORTO (2001) und CHIEW ET AL. (2001) den First Flush als einen Prozess, in dem der Peak (=Spitzenwert) der Schadstofffracht noch vor dem Peak des Regenwasserabflusses erreicht wird. Des Weiteren ist durch Untersuchungen gesichert, dass ein First-Flush im Abfluss nicht immer entsteht.

Um den First-Flush beurteilen zu können, wurden in vielen Studien sogenannte M(V)-Diagramme erzeugt, in denen der kumulierte Anteil der gesamten Schadstoffmasse gegen den kumulierten Anteil des gesamten Abflussvolumens eines Regenereignisses aufgetragen wurde. Geht es jedoch um die Einordnung des Graphen, so liegen die Meinungen der Forscher weit auseinander. GEIGER (1987) beispielsweise beschreibt das Phänomen folgendermaßen: Ein First-Flush wird beobachtet, wenn die Kurven oberhalb einer definierten 45°-Steigung liegen. Die 45°-Steigung entspricht dabei einer währen des gesamten Regenabflusses konstanten Schadstoffkonzentration. Der Abstand zwischen der Kurve und der 45°-Steigung wurde als Maß für die Stärke des First-Flushs herangezogen. Eine ähnliche Definition wurde auch von GUPTA & SAUL (1996) postuliert. SAGET ET AL. (1995) dagegen empfehlen eine sehr genaue Definition dieses Phänomens: Ein First-Flush entsteht, wenn mindestens 80% der Schadstofffracht in den ersten 30% des Abflussvolumens transportiert wird. Diese Auffassung ist jedoch nach LEE ET AL. (2002) zu restriktiv, da solche Phänomene in ihren Untersuchungen sehr selten vorkommen und nur 1% der gesamten Regenereignisse ausmachen. SANSALONE & BUCHBERGER (1997) haben für ihre Definition ein uneingeschränktes Kriterium gewählt: Ein First-Flush wird daran erkannt, dass die kumulierte Kurve der Schadstoffe über der kumulierten Kurve des Abflussvolumens liegt.

Angesichts der diversen Definitionen in Zusammenhang mit unterschiedlichen Messstrategien (Probenahmeorten) und Methoden der Datensammlung ist es schwierig, die Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Verschärft wird das Problem zusätzlich dadurch, dass viele Studien verschiedene Ergebnisse präsentieren (Deletic, 1998). Beispielsweise gibt es Unstimmigkeiten, was den Charakter des First-Flush-Phänomens angeht. Es wurden verschiedene Hypothesen getestet, um zu schätzen, welche Parameter des Niederschlags, Abflusses, Einzugsgebiets, usw. den Prozess beeinflussen. GUPTA & SAUL (1996) haben gezeigt, dass der First-Flush der gesamten suspendierten Feststofffracht (*engl.* Total Suspended Solids; TSS) im Mischsystem sehr gut mit der maximalen Niederschlagsintensität, der Niederschlagsdauer und der vorherigen, trockenen Wetterperiode korreliert. In ihrer

Arbeit analysierten sie 109 aufgezeichnete Regenereignisse in zwei urbanen Einzugsgebieten. Ihre Ergebnisse wurden mithilfe einer multiplen Regressionsmethode berechnet. Im Gegensatz dazu konnten SAGET ET AL. (1995) keine Korrelation zwischen der kumulierten Schadstofffracht und den Eigenschaften der Einzugsgebiete (Größe, Fließzeit und mittlere Steigung) oder den Eigenschaften des Niederschlags (Höhe, maximale Intensität und vorherige Trockenperiode) finden. Für Ihre Untersuchung haben sie 80 Regenereignisse in sieben unterschiedlichen Regenwasserkanalisationen verwendet und diese mithilfe einer einfachen statistischen Analyse ausgewertet. Die unterschiedlichen Ergebnisse beider Untersuchungen sind möglicherweise auch auf die geringe Anzahl an Proben, die während eines Ereignisses gesammelt wurden, zurückzuführen. Beispielsweise untersuchten GUPTA & SAUL (1996) nur diejenigen Regenereignisse, die innerhalb der ersten Stunde mindestens vier Wasserproben liefern konnten. SAGET ET AL. (1995) haben dagegen mindestens fünf Proben während eines gesamten Ereignisses gesammelt. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass möglicherweise nicht die gesamte Schadstofffracht erfasst wurde.

Um den Sachverhalt präziser zu untersuchen, wurden von DELETIC (1998) sehr genaue Messungen durchgeführt. Sie untersuchte den Regenwasserabfluss in zwei urbanen Einzugsgebieten (asphaltbedeckte Straßen), die in unterschiedlichen Klimazonen (Belgrad in Serbien und Lund in Schweden) lagen, aber ähnliche Größen (211m<sup>2</sup> sowie 270m<sup>2</sup>) und Landnutzung besaßen. Untersucht wurden dabei suspendierte Feststoffe, die spezifische elektrische Leitfähigkeit, pH-Wert und Temperatur. Die Messungen wurden aufgezeichnet, sobald die Waage des Niederschlagsmessgeräts durch Regen gekippt wurde. Die Probeentnahmen erfolgten während der gesamten Niederschlagsdauer in 10-Sekunden-Intervallen, so dass für alle aufgenommen Ereignisse eine vollständige Datensammlung zur Verfügung stand. Mit diesen Daten wollte DELETIC (1998) zwei Fragen beantworten: 1. Gibt es ein First-Flush-Phänomen im Regenwasserabfluss? und 2. Welche Niederschlags- und Abflusseigenschaften beeinflussen den First-Flush-Effekt? In der Untersuchung wurde der First-Flush als jener Anteil der gesamten Schadstofffracht eines Ereignisses definiert, der in den ersten 20% des Regenwasserabflussvolumens transportiert wurde. Zur Analyse wurden kumulierte Kurven, statistische Analysen und multiple Korrelationskoeffizienten herangezogen. Die Auswertung erbrachte folgendes Ergebnis: Parameter, die das First-Flush-Phänomen beeinflussen, sind trotz ähnlicher Einzugsgebietseigenschaften ortsspezifisch. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass ein starker First-Flush am Ende des Kanalisationssystems sehr unwahrscheinlich durch den First-Flush-Eintrag ins System (wenn beobachtet!) verursacht wird. Das bedeutet, dass der First-Flush am Kanalisationsende durch Schadstoffumwandlungs- und Transportprozesse innerhalb des Systems selbst verursacht wird. Zudem hat ihre Untersuchung deutlich gezeigt, dass die Entstehung eines First-Flushs mit großer Wahrscheinlichkeit durch große und intensive Regenereignisse beschrieben werden kann. DELETIC (1998) ist auch der Meinung, dass das Phänomen dermaßen Komplex ist, dass die von ihr verwendeten Berechnungen mitsamt der allgemeinen Klima-, Niederschlags- und Abflusseigenschaften nicht ausreichen, um den First-Flush genau definieren zu können.

Zum Schluss soll noch darauf hingewiesen werden, dass sich der zeitliche Verlauf der Schadstoffkonzentration (Pollutograph) zwischen den einzelnen Schadstofftypen unterscheiden kann. Dies geht aus der Abbildung 1.2 von CHIEW ET AL. (2001) hervor. Demnach entstehen Peaks von Mikroorganismen und gelösten Schadstoffen vor jenem der partikulär gebundenen Schadstoffe. Erklärt wird diese Beobachtung dadurch, dass für die erst genannten Schadstoffe weniger Energie benötigt wird, um diese von der Oberfläche loszulösen und in Suspension zu halten. SANSALONE & GLENN (2000) berichten aber, dass gelöste Schadstoffe eher ein First-Flush-Veralten zeigen, als partikulär gebundene.



Abbildung 1.2: Hypothetische Pollutographen dreier Schadstofftypen, die einen First-Flush-Effekt noch vor dem Erreichen des Hydrographen-Peaks zeigen. Aus CHIEWETAL. (2001).

## 2. Problemstellung und Zielsetzung

Von 1999 bis 2004 wurde ein trilaterales Forschungsprojekt, welches von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziell unterstützt wurde, durchgeführt, mit dem Ziel, die Auswirkungen der Urbanisierung auf die natürlichen, hydrologischen Prozesse und das Wasservorkommen zu untersuchen und zu verstehen. Im Fokus der Forschung stand damals neben der israelischen, modernen Stadt Modi'in auch die palästinensische, traditionellarabische, alte Stadt Ramallah, die etwa 15 km nordöstlich von der erstgenannten liegt. Überwiegend haben sich die Forscher mit dem Verhalten der Abflussbildung beschäftigt. Zwar wurden im Rahmen der DFG-Forschung auch zahlreiche Wasserproben zur Qualitätsanalyse gesammelt, jedoch blieb eine umfassende Untersuchung des verschmutzen, städtischen Regenabflusses aufgrund der Gefahr der Karstaquiferkontamination aus. In Ramallah wurde die Problematik bereits von HASSAN ET AL. (2010) und MIMI (2009) untersucht, für die Stadt Modi'in existierte bislang kein systematisches Wissen dazu, was sich mit der vorliegenden Arbeit ändern soll.

Ziel dieser Arbeit ist es:

- Die Verschmutzungstendenz verschiedener Elemente im Niederschlag, Karstquelle und Regenwasserabflüssen sowohl auf urbanen Flächen (Straßen, Dächer, Parkplätze,...) als auch auf natürlichen, außerstädtischen Flächen zu bewerten und miteinander zu vergleichen.
- Die Größe des Inputs aus nasser und trockener Deposition festzustellen.

Für die Arbeit war es auch vorgesehen, dass die Ergebnisse mit denen von anderen Städten in humiden und ariden Klimazonen verglichen werden. Im Hinblick auf die Datenmenge, die zur Verfügung gestellt wurde und aufgrund der komplexen und ortsspezifischen Schadstoffeigenschaften in Regenwasserabflüssen, wird ein Vergleich jedoch kaum möglich sein. Bisher gilt lediglich als gesichert, dass es im Regenwasserabfluss semi-arider und arider Gebiete größere Schadstofffrachten geben soll, die aufgrund sehr intensiver Niederschlagsereignisse und den längeren Trockenperioden zwischen ihnen verursacht werden. Dies wird vor allem in Hinblick auf den First-Flush durch Autoren wie BREZONIC & STADELMANN (2002), VAZE & CHIEW (2002) sowie ASAF ET AL. (2004) bestätigt. In humiden Gebieten wurde diese Art des Phänomens bisher nicht beobachtet, wie aus der Arbeit von DELETIC (1998) hervorgeht.

### 3. Charakteristika des Untersuchungsgebiets

#### 3.1. Der Standort und seine Eigenschaften

Die israelische Stadt Modi'in liegt auf dem halben Weg zwischen Tel-Aviv und Jerusalem, fast an der Grenze zur Westbank (Abb. 2.1). Der Grundstein für den Bau der Stadt wurde im Jahre 1993 gelegt, um für die stetig wachsende Bevölkerung Israels neuen Wohnraum zu schaffen. Bereits Ende Juni 2010 zählte Modi'in zusammen mit den angrenzenden Gemeinden Maccabim und Re'ut über 74.000 Einwohner (Israel Central Bureau of Statistics, 2010). Noch ist der Stadtbau nicht abgeschlossen, denn der Plan sieht vor. dass hier nahezu eine Viertelmillion Einwohner leben werden sollen (Bibas, vermutl. 2010). Da sich Modi'in in der westlichen Vorbergzone der Judäischen Berge befindet, ist die natürliche Landschaft durch zahlreiche Hügel und Wadis geprägt. Somit ist die Topographie relativ flach. Die Stadt befindet sich im Anaba Einzugsgebiet, welches als Nebenfluss zum Ayalon Becken gehört. Gelegen auf einer Höhe von

Stadt selbst aus einer Reihe von deren gerundeten Hügeln, Höhen zwischen 30 und 70 m schwanken und



300 m über NN, besteht das Relief der Abbildung 2.1: Lage der Stadt Modi'in in Israel. Blaue Linien deuten auf die jährliche, mittlere Niederschlagsmenge hin. Entnommen aus HASSAN ET AL. (2010) und durch Modi'in ergänzt

dabei Steigungen bis zu 10% erreichen können. Die Landschaftsform veranlasste damals die Stadtplaner dazu, die natürliche Topographie zu ändern, so dass zahlreiche, parallele Straßen und Terrassen angelegt werden konnten. In den eingeebneten Tälern befinden sich heute neben den mit Grün umsäumten Hauptverkehrsadern auch zahlreiche öffentliche Parkanlagen, Schulen und Einkaufszentren. An den Hängen wurden zur Wohnzwecken Terrassen gebaut. Die meisten dieser Häuser haben einen angrenzenden Garten, der gewöhnlich durch eine Betonwand abgegrenzt ist. Als Folge der Terrassenbildung hat man die Straßen im Kreis entlang der Höhenlinien gebaut, mit deutlich größerem Gefälle der Verbindungsstraßen (Leibundgut et al., 2004). In der Stadt fungieren diese Straßen als ein einziges Abflusssystem, da sich hier das gesamte Regenwasser von undurchlässigen Flächen (z.B. Dächer, Parkplätze, weiteren Straßen) sowie offenen Geländen sammelt. Der Straßenabfluss fließt über die Straßenrinne in das unterirdische Kanalisationssystem, welches gewöhnlich dem gesamten Straßennetz folgt. Der Kanalisationsauslass befindet sich außerhalb der Stadt, so dass der urbane Abfluss in den Fluss von Nahal Anabe eingeleitet wird und zwar ohne jegliche vorherige Aufbereitung (Grodek et al., 2011). Vollständig aufbereitet wird in Modi'in lediglich das Schmutzwasser, das getrennt vom Regenwasser abgeleitet wird (Klassisches Trennsystem).

#### 3.2. Geologie und Pedologie

Geologisch betrachtet besteht das gesamte Gebiet in und um Modi'in in erster Linie aus harten Kalk- und Dolomitgesteinen sowie dünnen Mergellagen, die allesamt aus der Epoche des Cenoman und Turon stammen. Stellenweise wechseln sich diese Karbonate mit weniger durchlässigen Schichten aus Kreide und Mergel ab (Grodek et al., 2011). Sie stammen aus der darüber liegenden Epoche Senon, welcher die mittlere bis obere Oberkreide umfasst. Diese Schichten sind wiederum teilweise durch sogenannte Calcret-Schichten aus der Nari-Formation des Oligozäns bedeckt. Sie entstehen besonders in ariden und semi-ariden Regionen, wenn Kalzit (Hauptbestandteil der Kalksteine) durch kohlensäurehaltigen Niederschlag gelöst und an der Erdoberfläche wieder ausgefällt wird. Die Ausfällung des Minerals geschieht solange, bis eine Sättigung durch die permanente Wasserverdunstung erreicht wird und die dabei entstandenen Kristalle zu einer dicken Kruste zementieren (Hintermaier-Erhard & Zech, 1997; in Steinmann, 2010). Die im Gebiet dominierenden Kalksteine und Dolomite sind für ihre relativ schnelle Lösungsverwitterung bekannt. In Niederschlagswasser oder anderem kohlendioxidhaltigem Wasser wird der Kalzit vollständig gelöst und in ionarer Form abgeführt. Der Lösungsprozess verläuft dabei wie folgt:

| Kalzit            | + | Kohlensäure                    | $\rightarrow$ | Calciumion | + | Hydrogencarbonat    |
|-------------------|---|--------------------------------|---------------|------------|---|---------------------|
| CaCO <sub>3</sub> |   | H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> |               | $Ca^{2+}$  |   | $2 \text{ HCO}_3^-$ |

In ähnlicher Weise geht auch der Dolomit in Lösung. Da die Lösung der Gesteine bevorzugt entlang von Klüften und Spalten erfolgt, werden diese allmählich erweitert. Dabei entsteht ein Netzwerk aus Hohlräumen und engen Verbindungswegen (Press & Siever, 2003). Für das Wasserleitvermögen bedeutet das, dass das Wasser durch diese Gesteine recht gut und schnell fließen kann. Dadurch sind Karstwässer einem permanenten Verschmutzungsrisiko ausgesetzt, weil das Oberflächenwasser somit direkt in den Untergrund gelangen kann und durch geringmächtige Böden kaum gefiltert wird. Bisher aber lieferte das mächtige Yarkon-Taninim Aquifer, das sich unterhalb von Modi'in und zahlreicher anderer Städte befindet, Süßwasser von außerordentlich guter Qualität (Leibundgut et al. 2004). Jährlich werden aus diesem Aquifer etwa 350 Mio. m<sup>3</sup> Wasser gefördert, was wiederum etwa 25% des Bedarfs entspricht (Weinberger et al., 1994, in Grodek et al. 2011). Böden, die vorwiegend an der westlichen Vorbergzone der Judäischen Berge zu finden sind, bestehen in erster Linie aus Terra Rossa und braunem Rendzina. Erstere entstehen auf Kalksteinen und Dolomiten, erreichen eine Mächtigkeit selten größer als 50 cm, haben eine tonig-schluffige Textur und eine rötlich-braune Färbung. Rendzinas entstehen dagegen meist auf Kreide oder Mergeln. Sie besitzen ebenfalls eine geringe Mächtigkeit; ihre Farbe ist jedoch grau-bräunlich und die Textur tonig-lehmig. Zusätzlich zeichnet sich dieser Bodentyp durch seine Reichhaltigkeit an Kalk (30 - 80%) aus (Survey of Israel, 1970; in Schütz, 2006). Beide Böden enthalten zudem einen hohen Anteil an organischem Material (2 - 8%) und sind aufgrund ihrer relativ groben Bodentextur erosionsanfällig (Grodek et al., 2011).

### 3.3. Klima

Da sich Israel zwischen den Breitengraden 29,5° und 33,5° N erstreckt und somit zur südöstlichen, mediterranen Küstenebene gehört, enthält es drei unterschiedliche Klimaregionen: ein mediterranes Klima, ein heißes Wüstenklima und ein schmales semiarides Übergangsklima (Goldreich, 2003). Die Grenzen der Klimaregionen können aber je nach Art der Klimaklassifikation leicht variieren (siehe Tabelle 2). Der Bereich, der sich zwischen der Mittelmeerküste und den Judäischen Bergen befindet, zählt nach der Klassifikation von Köppen, die durch POTCHTER & SA'ARONI (1998) modifiziert wurde, zum mediterranen Klima. Köppens Klassifikation basiert auf klimatischen Eigenschaften, die in Zusammenhang mit bestimmten Vegetationsformen auftreten. Das mediterrane Klima, das nach Köppen unter der Abkürzung Csa zusammenfasst, lässt sich wie folgt beschreiben: In der Region herrschen milde Temperaturen, die während der kältesten Monate im Mittel zwischen +18 und -3°C schwanken und während der wärmsten im Mittel mehr als 22°C erreichen. Niederschläge treten meistens in der kältesten Jahreshälfte auf.

Anders als bei Köppen basiert die Klimaklassifikation nach Thornthwaite auf zwei Faktoren: dem PE-Index (*engl. precipitation index*) und dem TE-Index (*engl. thermal efficiency*). Der erste Index wurde auf Basis des Niederschlags und der Evapotranspiration berechnet, während bei der Berechnung des TE-Indexes Temperaturen herangezogen wurden. Beide Indizes integrierte Thornthwaite in die Berechnung eines monatlichen Feuchteindexes, dessen mittlere Jahreswerte zur Klassifizierung herangezogen wurden (Goldreich, 2003). Demnach liegt das Untersuchungsgebiet in einem semi-aridem Klima, das Thornthwaite mit der Kategorie D kennzeichnet hat. In der Tabelle 2 sind für Israel nochmal die Klimaklassifikationen nach Köppen und Thornthwaite zusammenfassend aufgelistet, inklusive der mittleren Jahresniederschläge und der dazugehörenden Vegetationstypen. Der rote Kasten markiert jene klimatischen Eigenschaften, die zum Untersuchungsgebiet gehören.

Tabelle 2: Vergleich zweier Klimaklassifikationen in Israel. Ergänzt durch einen roten Kasten, der die Eigenschaften des Klimas im Untersuchungsgebiet widerspiegelt. Aus GOLDREICH (2003)

| Thornthwaite<br>(1955)  | Köppen | Annual precipitation<br>(mm) | Vegetation        |
|-------------------------|--------|------------------------------|-------------------|
|                         | BWhs   | <200                         | desert            |
| arid E                  |        | 200-300                      | semi-desert       |
|                         | BShs   | 300-400                      | sub-humid         |
| semi-arid               | Csa    | 400-600                      |                   |
| D                       |        |                              | humid savannah    |
| sub-humid<br>C<br>humid | Csb    | 600-1200                     | forest-sub-tropic |
|                         | Cfa    |                              | wet forest        |
|                         | Cfb    |                              |                   |

Anders als in humiden Klimaregionen besteht das mediterrane Klima im Allgemeinen aus zwei Jahreszeiten: einen warmen, niederschlagsreichen Winter und einem heißen, trockenen

08

Sommer. Beide werden jedoch nach JAFFE (1977; aus Goldreich, 2003) durch Übergangsjahreszeiten abgegrenzt. Eine Übersicht über den mittleren Jahresverlauf der Niederschlagsmenge, der maximalen Temperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit liefert die Abbildung 2.2 (Hinweis: Die Zahlen auf der linken Seite der Abbildung werden von rechts nach links gelesen). Der fünf Monate andauernde Winter (November bis März) ist durch sehr große Mengen Niederschlag an gekennzeichnet. Die maximalen, mittleren Temperaturen schwanken zwischen 34 und 25°C und sind für diese Saison im Vergleich zu den übrigen Monaten besonders niedrig. Fast entgegengesetzt zum Temperaturverlauf erreicht die relative Luftfeuchtigkeit Werte zwischen und 63 71%.



Abbildung 2.2: Jahresverlauf der drei klimatischen Verantwortlich für mehr als 90% des Variablen mit zusätzlicher Trennung der Jahreszeiten nach JAFFE (1977) gesamten Niederschlags Israels sind

die Zypern-Tiefdrucksysteme, die sich von Westen nach Osten bewegen. Eine zweite, wichtige Niederschlagsquelle bildet der Trog des Roten Meeres (Goldreich, 2003). Nach SHARON & KUTIEL (1986; in Grodek et al. 2011) fallen 80% aller Niederschläge in einem niedrigen Intensitätsbereich (unter 6 mm/h), lediglich 1% erreichen Intensitäten über 50 mm/h. Der Frühling, der nach JAFFE (1977) von April bis Juni dauert, ist durch Höchstwerte in der maximalen, über mehrere Jahre gemittelten Lufttemperatur gekennzeichnet; gleichzeitig erreicht hier die relative Luftfeuchtigkeit die niedrigsten Werte. Der Sommer dagegen dauert nur zwei Monate, von Juli bis August. Er macht sich durch einen Niederschlagsmangel bemerkbar, der durch die nördliche Bewegung eines Azoren-Hochdruckgebiets verursacht wird (Goldreich, 2003). Ebenfalls zwei Monate währt der Herbst, der ähnliche klimatische Verläufe wie der Frühling aufweist. Obwohl eine Aufteilung in vier Jahreszeiten, wie sie durch JAFFE (1977) definiert wurden, möglich ist, ist meistens nur von zwei Jahreszeiten die Rede (Goldreich, 2003). Der Jahresverlauf wird dabei wie folgt unterteilt: Der Winter dauert von November bis März, der Sommer von Mai bis September.

Aufgrund seiner geographischen Lage treten in Israel häufig äolische Staubstürme auf. Sie verändern nicht nur die Eigenschaften der Atmosphäre, sondern beeinflussen und haben damit einen großen Einfluss auf das Klima.

In ariden und semi-ariden Regionen spielen Staubstürme eine außerordentliche Rolle eine die die Eigenschaften der Atmosphäre verändert und damit auch einen Einfluss auf das Klima hat

### 3.3.1. Staubstürme

In ariden und semi-ariden Regionen, wie sie auch südlich und östlich des mediterranen Küstenraums vorkommen, gibt es Wüsten, deren Oberflächenmaterial äolisch in Form von unregelmäßigen Staubstürmen in die Atmosphäre transportiert wird. Der Materialeintrag verändert die atmosphärischen Eigenschaften und hat somit auch einen großen Einfluss auf das Klima. Beispielsweise kann das transportierte Material Veränderungen im Strahlungshaushalt bewirken und die Bildung von Wolken begünstigen, da die mitgeführten Partikel die Möglichkeit haben, als Kondensationskeime zu agieren (Guerzoni & Chester, 1996). Zusätzlich verändert der Eintrag die Qualität des Niederschlags. Wie viel Staub der Wind transportieren kann, hängt von der Korngröße, der Windstärke und dem Oberflächenmaterial des Gebiets ab, über das der Wind weht. Ein mäßiger Wind (5,5 bis 7,9 m/s) genügt bereits, um große Mengen an Staub in der Luft aufnehmen zu können (Press & Siever, 2003). Einmal in die Atmosphäre gelangt, kann sich der Staub über Hunderte von Quadratkilometern weit ausdehnen und dabei die Sichtweite im Extremfall auf weniger als einen Kilometer reduzieren (Goldreich, 2003). Es gibt zwei Möglichkeiten, wie sich das Material an der Meeres- und Erdoberfläche ablagern kann: Indem es vom Regen aus der Atmosphäre ausgewaschen wird (nasse Deposition) oder indem es sich aufgrund nachlassender Windstärke von selbst wieder ablagert (trockene Deposition). Jenes Material, das sich auf der Erdoberfläche ablagert, kann z.B. Böden düngen (Yaalon & Ganor, 1979; in Ganor et al., 1991) und die chemische Zusammensetzung der Grund- und Oberflächenwässer nachhaltig verändern (Ganor et al., 1991). Eine Ablagerung auf dem Meer bewirkt einen Einschritt in die marine Sedimentation und den biochemischen Kreislauf (Guerzoni & Chester, 1996). Für den Menschen können Staubstürme vor allem in Hinblick auf die Gesundheit negative Folgen haben (Goudie, 2008).

Israel gehört zu jenem Gebieten, in denen Staubstürme häufig auftreten. Der Ursprung dieser Stürme liegt meist in den Wüsten außerhalb Israels, wobei einige Stürme auch innerhalb des Landes entstehen können (Goldreich, 2003; Offer & Goossens, 2001). GANOR ET AL. (1991) sowie GANOR & FONER (1996) haben sich in langjährigen Studien mit der Entstehung der Staubstürme außerhalb Israels beschäftigt. Sie haben herausgefunden, dass es zwei Typen von Bahnlinien gibt, auf denen sich die Staubstürme generell bewegen. Typ A-Stürme ereignen sich in einem west- bis südwestlichen Sektor, der seinen Anfang in den Wüsten und Küstenebenen Nordafrikas nimmt und sich dann in nördlicher Richtung über Israel bis in die Türkei ausbreitet. Diese Stürme werden gewöhnlich durch Tiefdrucksysteme erzeugt und mit dem Jetstream in den östlichen Mittelmeerraum transportiert. Deshalb treten sie auch öfters in Verbindung mit Niederschlägen auf (Alpert & Ganor, 1993; in Ganor & Foner, 1996). Da sich die Stürme über dem Mittelmeer bewegen, werden die transportierten Mineralkörner mit Meersalz und anthropogenen Sulfaten überzogen (Levin et al. 1996; in Ganor & Foner, 1996). Typ B-Stürme dagegen bilden sich in einem südlich bis südöstlich gelegenem Sektor, dessen Staub aus dem Golf von Suez und der Arabischen Wüste stammt und über Israel bis ins Mittelmeer transportiert wird. Diese Stürme entstehen, wenn sich ein Hochdruckgebiet über Russland oder ein Trog über dem Roten Meer gebildet hat. In Israel werden diese heißen und trockenen Staubstürme als "Sharav" bezeichnet.

Ein typischer Staubsturm des Typs A ist in der Abbildung 2.3 (a) zu sehen. Es zeigt die Bahnlinie eines Sturms vom 22. März 1984, der in Algerien startete und zwei Tage später Israel erreichte. Das Gebiet der Staubverteilung wurde anhand von Sichtbarkeitsmessungen und einem Satellitenfoto erstellt. Abbildung 2.3 (b) zeigt eine Staubausbreitung des Typs B, die am 7. März 1973 synoptisch erfasst wurde.



Abbildung 2.3: (a) Ausdehnung eines Staubsturmes des Typs A, welcher im Zeitraum von 20.- bis 22. März 1984 stattfand. (b) Staubsturm des Typs B, beobachtet am 7. Mai 1973. Aus GANOR ET AL. (1991)

Von den 23 großen Staubstürmen, die GANOR ET AL. (1991) zwischen 1968 und 1987 maßen, waren alle bis auf einen vom Typ A. Laut GANOR & FONER (1996) liegt in Israel die jährliche Anzahl an Staubstürmen zwischen 5 und 35, Tendenz steigend. Die Stürme können jederzeit

zwischen Oktober und Mai entstehen; hauptsächlich treten sie jedoch zwischen Dezember und April auf (Ganor & Manane, 1982).

In Israel haben beide Staubsturm-Typen eine ähnliche mineralogische Zusammensetzung: 35 bis 45% Quarz, 30 bis 40% Kalzit, 10 bis 20% Dolomit, 5 bis 10% Feldspat, 2% Halit und <1% Gips. Unterschiede treten jedoch in der Existenz von Tonmineralen auf. Staubstürme des Typs A enthalten hauptsächlich Illit (70-95 Gew.-%), etwas Kaolinit (6-20 Gew.-%) und nur sehr kleine Mengen an Montmorillonit (0-5 Gew.-%). Staubstürme des Typs B bestehen dagegen aus 1 bis 10 Gew.-% Illit, 15 bis 50 Gew.-% Kaolinit, 20 bis 60 Gew.-% Montmorillonit und 10 bis 30 Gew.-% Palygorskit (Ganor & Foner, 1996). Eine umfassende Untersuchung zum chemischen Gehalt der Staubstürme wurde von GANOR ET AL. (1991) durchgeführt. Die meisten gemessenen Elemente haben keine signifikante Variabilität gezeigt, so dass diese auch nicht nach ihrer Herkunft klassifiziert werden konnten. Mit Hilfe von Anreicherungsfaktoren, wie sie nach RAHN ET AL. (1979) berechnet wurden, konnte jedoch festgestellt werden, dass die Staubstürme generell mit Calcium (vermutlich aufgrund der lokalen geologischen Gegebenheiten) und mit Chlor (das wahrscheinlich aus dem Mittelmeer stamm) angereichert sind. Einige Anreicherungsfaktoren von Elementen wie Pb, S und Br sind auf anthropogene Aktivitäten zurückzuführen. Für alle anderen Elemente konnte die Herkunft nicht erklärt werden.

Die jährliche Menge an Staub, das sich in Israel ablagert, nimmt von Süden (200 Tonnen/km<sup>2</sup>) nach Norden (30 Tonnen/km<sup>2</sup>) ab (Ganor et al., 1991). Für das Untersuchungsgebiet wird eine jährliche Ablagerung von ca. 90 Tonnen/km<sup>2</sup> geschätzt.

## 4. Bisher durchgeführten hydrologischen Untersuchungen

Dass Urbanisierung Veränderungen im hydrologischen Wasserhaushalt nach sich zieht, ist bekannt (Siehe Einleitung). In den Judäischen Gebirgen waren jedoch Prozesse, die sich hinter jenen Veränderungen verbargen, weitgehend unbekannt (Leibundgut et al., 2004). Aus diesem Grund wurden umfangreiche Felduntersuchungen durchgeführt, zu denen hydrometrische Messungen, tracerhydrologische Untersuchungen sowie die Probenahme zu wasserqualitativen Erforschung gehörten. Um die Prozesse nachvollziehen zu können, wurden die Ergebnisse anschließend in verschiedene hydrologische Modelle integriert. Die Untersuchungen wurden sowohl innerhalb als auch in der unmittelbaren Umgebung der Städte durchgeführt, um Vergleiche zwischen der Pre- und Posturbanisierung feststellen zu können (Leibundgut et al., 2004).

### 4.1. Abflussbildung in ländlicher Umgebung

Bei der Forschung galt das Interesse in erster Linie der Abflussbildung. Grund dafür waren die zahlreichen, flutartigen Überschwemmungen, die in den Judäischen Gebirgen auftraten (Khavich & Ben-Zvi, 1995). Kenntnisse über Bildungsprozesse, die zu Überschwemmungen führen, waren auf diesem Gebiet kaum vorhanden (Lange et al., 2003a), obwohl diese entscheidend für die Beurteilung möglicher Auswirkungen auf die sich rapide ausweitenden Städte waren und immer noch sind. Daher wurden Messungen auf unterschiedlichen Skalen durchgeführt. LANGE ET AL. (2003a) konnten durch Beregnungsversuche an einem Hang (Plot-Skala), 10 km westlich von Ramallah entfernt, nachweisen, dass der Oberflächenabfluss durch eine gleichzeitige Interaktion aus Sättigungsüberschuss und Infiltrationsüberschuss entsteht. Das Zusammenspiel beider hydrologischer Prozesse wurde auch in spanischen, mediterranen Einzugsgebieten dokumentiert (Martinez-Mena et al., 1998; Puigdefabregas et al., 1998; Ceballos & Schnabel, 1998; in Leibundgut et al., 2004). Der Oberflächenabfluss aus Infiltrationsüberschuss entsteht auf geringmächtigen, kahlen Bodentaschen, da eine allmähliche Bodensättigung durch die Gegenwart einer Oberflächenkruste verhindert wird. Anders dagegen verhalten sich bewachsene Böden, auf denen der Oberflächenabfluss erst durch Sättigungsüberschuss entsteht. Die Sättigung dieser Böden wird durch den lateralen Abfluss aus benachbarten, kahlen Gebieten beschleunigt. Sobald die Fläche der Plot-Skala gesättigt war, wurden 80-90% des künstlichen Regens in direkten Oberflächenabfluss überführt. Diese Untersuchung hat gezeigt, dass der dominierende Prozess zur Entstehung von Überschwemmungen die Sättigung unterschiedlicher Bodenbedeckungen ist.

Um die Bildung von Überschwemmungen auch in ephemeren Fließgewässern ergründen zu können, mussten Untersuchungen in der Größenordnung einer Hang-Skala durchgeführt werden. Dazu wurden in der Nähe von Modi'in zwei unterschiedliche Hänge ausgesucht, die charakteristisch für das Anaba Einzugsgebiet sind. Es umfasst felsige Hänge mit unregelmäßiger Bodenbedeckung und terrassierte Hänge mit reichhaltiger Vegetation, die jedoch stellenweise auch fehlt (Steinmann, 2010). Mithilfe hydrometrischer Messungen und der Verwendung künstlicher Tracerversuche gelang es STEINMANN (2010) ein detailliertes Bild der Abflussbildung zu konstruieren. Sie führte ihre Untersuchungen während natürlicher

Niederschlagsereignisse durch. Ihre Ergebnisse zeigen, dass auch hier die Sättigung eine wichtige Voraussetzung für die Bildung des Oberflächenabflusses darstellt. D.h. der Abfluss entsteht in erster Linie auf felsigen Hängen, während auf den terrassierten kein Oberflächenabfluss weder beobachtet, noch gemessen wurde. Der Niederschlag, der auf die Terrassen fiel, infiltrierte in tiefer gelegene Bodenschichten und speiste vermutlich den Aquifer.

Bei der Beurteilung der Abflussbildung auf der Ebene eines großen Einzugsgebiets (2,6 km<sup>2</sup>) ist die Verwendung von (Umwelt-)Tracern besonders hilfreich, da diese einen Einblick in das hydrologische System gewähren. Aus diesem Grund wurden zahlreiche Wasserproben gesammelt und auf ihre Qualität überprüft. LANGE ET AL. (2003b; in Leibundgut et al., 2004) konnten anhand der Variabilität der Mg- und Cl-Konzentrationen feststellen, dass einige Quellen, die sich nahe der Stadt Ramallah befinden, Wasser unterschiedlicher Herkunft beinhalten. Eine deutlich geringere Mischung zeigt jedoch eine Quelle, die einen lokalen Aquifer unterhalb der Stadt entwässert. Diese Quelle reagiert mehr oder weniger auf direktem Wege mit dem Oberflächenabfluss, der wiederum die allgemeine Chemie des Niederschlags komplett wiederspiegelt. Zur weiteren Beurteilung wurde von LANGE ET AL. (2003b) ein Deuterium-Sauerstoff-18-Diagramm herangezogen, in dem die Wasserproben auf einer östlich-mediterranen Wasserlinie dargestellt wurden. Hier hat sich nochmal das Bild bestätigt, dass sowohl der Oberflächenabfluss vom natürlichen Hang, als auch der Stadtabfluss eng mit dem Niederschlag zusammenhängen. Auch Signale des Wadi-Abflusses, welcher nur auf größere Niederschlagsereignisse begrenzt ist, deuten auf eine direkte Abflusskomponente hin. Somit konnte gezeigt werden, dass der schnelle und direkte Oberflächenabfluss eine wichtige Komponente der Einzugsgebietsskala darstellt und an den untersuchten Quellen eine effektive Grundwassermischung stattfindet.

### 4.2. Abflussbildung in der Stadt Modi'in

In Modi'in wurden umfangreiche, hydrometrische und meteorlogische Messungen erstmals von GRODEK ET AL. (2011) durchgeführt, die ihre Ergebnisse zum Teil auch im Paper von LEIBUNDGUT ET AL. (2004) veröffentlichten.

Der Abfluss wurde an drei Standorten gemessen. An Station I wurde jenes Fließgewässer erfasst, dass zu einem 5,5 km<sup>2</sup> großem, ländlichem Gebiet flussaufwärts der Stadt gehörte. Auf diesem Gebiet befanden sich kleine Dörfer, landwirtschaftliche Felder, natürliche Gegenden und eine angrenzende Straße. Die Messstation wurde am Eintritt des Abflusswassers in einen Düker angebracht, an dessen Auslass, 2,2 km weiter flussabwärts, sich die nächste Station befand. An dieser Station M wurde somit der Abfluss zweier Gebiete gleichzeitig gemessen: Der ländliche Abfluss aus Station I und jener Abfluss, der innerhalb der Stadt entstanden ist. Die Differenz beider Stationen lieferte damit die Abflussmenge aus dem Stadtkern (2,8 km<sup>2</sup>) selbst. Einen Überblick über die Eigenschaften beider Stationen, die mithilfe einer GIS-Analyse ermittelt wurden, gibt die Tabelle 3. In der Abbildung 3.1 (a) ist die Lage der Stationen dargestellt. Es zeigt die zugehörigen Gebiete, deren Abfluss an den entsprechenden Stationen gemessen wurde. Des Weiteren sind hier auch die Standorte zweier wichtiger Niederschlagsmessstationen abgebildet. Abbildung 3.1 (b) zeigt anhand der blauen Linien die Richtung des Stadtabflusses, der sowohl oberflächlich auf den Straßen als auch
untergründig durch den Düker floss. Eine weitere Abflussmessstation, Station J, befand sich in einem natürlichen Gerinne westlich der Stadt, das zu einem 1,1 km<sup>2</sup> großem Teileinzugsgebiet gehörte.

**Tabelle 3:** Eigenschaften der hydrometrischen Stationen in Modi'in aus LEIBUNDGUT ET AL. (2010)

| Station                      | Total<br>area | Houses<br>(roofs only) | Gardens &<br>Parking<br>(private) | Public areas<br>(commerce,<br>schools etc.) | Roads         | Open<br>areas,<br>parks | Natural<br>area |
|------------------------------|---------------|------------------------|-----------------------------------|---|---------------|-------------------------|-----------------|
| [km <sup>2</sup> ]           | 5.5           | 0.15                   | 0.4                               | 0.15  | 0.05          | 2.95                    | 1.8             |
| [%]                          |               | 2.7                    | 7.2                               | 2.7   | 0.9           | 53.5*                   | 33              |
| M <sup>**</sup> [km²]<br>[%] | 2.8           | 0.304<br>10.3          | 0.482<br>16.3                     | 0.492<br>16.6                               | 0.607<br>20.5 | 0.531<br>17.9           | 0.542<br>18.3   |

\* agricultural fields;

\*\* St. M area excludes St. I area



Abbildung 3.1: (a) Lage der Abfluss- (Dreiecke) und der Niederschlagsmessstationen (Punkte) in Modi'in. (b) Blaue Linien zeigen die Richtung des Abflusses innerhalb der Stadt. Aus Grodek et al. (2011)

Die Messungen an den entsprechenden Stationen wurden von Anfang Oktober 2002 bis Ende April 2003 durchgeführt, also während der niederschlagsreichen Wintersaison. Direkt am ersten Regenereignis, das am 5.11.2002 stattfand, konnte von GRODEK ET AL. (2011) Folgendes beobachtet werden: An beiden Stationen I und M wurde bereits nach 1 mm Regen ein Abfluss gemessen. Die Abflüsse zeigen eine kurze Reaktionszeit von 5 bis 11 Minuten nach Regeneintritt und sind gekennzeichnet durch einen steilen Anstieg des Hydrographen (Abbildung 3.2). Die einzige Grundlage für die Abflussbildung an der Station I stellt somit die angrenzende Straße dar, da die ländlichen Gebiete bei kleinen Regenereignissen keinen Beitrag zum Abfluss leisten. Dies lässt sich auch an der Form des Hydrographen erkennen. Anders als an der Station I ist der Hydrograph von Station M durch eine Reihe von Multi-Peaks und einer längeren Abflussdauer gekennzeichnet. Erwartungsgemäß hätte man hier aufgrund der bebauten, undurchlässigen Flächen mit einem deutlichen Anstieg des Peaks gerechnet. Jedoch verhinderen der Aufbau des Straßennetzes und die zahlreichen Terrassen einen Anstieg des Peaks. Stattdessen entstehen zahlreiche Multi-Peaks, die aufgrund des fortdauernden Regens durch nachfolgende Abflussbeiträge aus weiter entfernten, undurchlässigen Flächen verursacht werden. In der Stadt gehören zu diesen unduchlässigen Flächen in erster Linie Staßen. Zudem haben berechnete Abflussbeiwerte von GRODEK ET AL. (2011) gezeigt, dass während kleiner Niederschlagsereignisse und mit Ausnahme der Straßen sowie Kanalisationssystemen, beträchtliche Wassermengen verloren gehen. An der Station J wurde aufgrund der geringen Niederschlagsmenge (5,2 mm) kein Abfluss gemessen.



Abbildung 3.2: Gemessener Niederschlag und Abfluss an den Stationen I und M am 5.11.2002. Aus LEIBUNDGUT ET AL. (2004).

Ein anderes Bild des Abflussbeitrags zeigte sich jedoch während eines größeren Regenereignisses (146 mm), dass von 24. bis 26.2.2003 stattfand. Diesem Ereignis ging ein großes Niederschlagsereignis (52 mm) voraus, das nur einen Tag zurücklag (19.-23.2.2003). Während des ersten Ereignisses erreichten die städtischen Abflussbeiwerte nahezu 10,1 % und stiegen während des zweiten Ereignisses zuletzt auf 30,3 % an. Diese Werte deuten darauf hin, dass immer mehr Gebiete innerhalb des Einzugsgebiets, sowohl ländliche als auch städtische, zur Abflussbildung beitragen. Bestätigt hat sich diese Vermutung auch durch Beobachtungen im Gelände, als sogar öffentliche Gärten gesättigt waren und ihren Beitrag zum städtischen Abfluss lieferten. Dieser sukzessive Abflussbeitrag beschränkt sich während großer Niederschlagsereignisse jedoch nur auf natürliche Einzugsgebiete. Das heißt, dass zwar Straßen, öffentliche Gärten und natürliche Gegenden zum Abfluss beitragen, jedoch bleiben die geschlossenen, terrassierten Wohneinheiten der Stadt permanent von der Abflussbildung getrennt. Dies erklärt auch, warum an der Station J ein nahezu identischer Abflussbeiwert (29,9 %) wie jener der Stadt erfasst wurde. Es wird geschätzt, dass 20 % des gesamten städtischen Einzugsgebiets aus Terrassen bestehen. Dazu gehören auch jene 50 % aller Dächer, deren Niederschlagswasser in die angrenzenden Gärten abgeleitet wird und somit eine lokale Grundwasserneubildung begünstigen.

Welcher Abflussbeiwert und welche Niederschlagsmenge benötigt werden, damit die entsprechenden städtischen Einheiten ihren Beitrag zur Abflussbildung liefern, zeigt die Abbildung 3.3. Die Daten des konzeptionellen Models basieren auf durchschnittlichen Abflussbeiwerten, gemessen an jeder Station (Grodek et al., 2011). Aus dem Model geht hervor, dass der Abfluss bis ca. 15 mm Regen nur von den Straßen kommt. Zunehmender Niederschlag aktiviert dann nacheinander die anderen Stadteinheiten, bis zuletzt öffentliche Gärten und natürliche Gegenden ihren Beitrag liefern. Größere Abflussbeiwerte werden möglicherweise nicht erreicht, da die terrassierten Wohneinheiten dies verhindern.



Abbildung 3.3: Konzeptuelles Model für die fortlaufende Abflussbildung innerhalb der beiden Städte Ramallah und Modi'in. Aus GRODEK ET AL. (2011)

Letztendlich konnte mit der Erforschung der Abflussbildung nachgewiesen werden, dass die Urbanisierung mit zunehmenden Niederschlagsereignissen an Bedeutung verliert.

### 4.3. Bisherige Untersuchungen zur Wasserqualität in der Stadt Modi'in

Zwar wurden im Rahmen der DFG-Forschung neben der Untersuchung der Abflussbildung auch zahlreiche Wasserproben gesammelt, jedoch blieb eine umfassende Untersuchung des verschmutzen, städtischen Regenabflusses aufgrund der Gefahr der Aquiferkontamination aus. Dies liegt vor allem daran, dass bestehende Studien dem Stadtabfluss Trinkwasserqualität nachweisen. So zeigen Mediane [mg/L] aller untersuchten Spurenelemente, dass einige die Trinkwasserstandards überschreiten. Einen wirklichen Grund zur Sorge bietet lediglich der gemessene Bleianteil (Leibundgut et al., 2004).

Dass der Stadtabfluss in der Tat schmutzig ist, zeigt eine minutiöse Aufnahme der elektrischen Leitfähigkeit, die zusammen mit dem Stand des Wasserspiegels an der Station M aufgenommen wurde. Die Aufnahmen stammen vom 4. bis 5.11.2002, also in der Zeit kurz bevor das erste Regenereignis der Saison stattfand. Aus der Abbildung 3.4 kann somit Folgendes entnommen werden: Zu Beginn der Aufnahmen wurde ein schlagartiger Anstieg beider Parameter gemessen. Da aber kein Niederschlag fiel, deutet dies auf eine anthropogene Wasserentsorgung hin. Die Leitfähigkeit erreichte dabei kurzzeitig einen Wert über 2 mS/cm,

was auf eine hohe Schadstofffracht schließen lässt. Einige Stunden später folgte dann der nächste anthropogene Abfluss. Dabei wurden bis zu 3 mS/cm erreicht. Anders als bei der ersten Wasserentsorgung nahm diesmal die Leitfähigkeit schrittweise ab, bis eine kleine Regenmenge (1,2 mm) einen first flush-Effekt erzeugte. Ein klares Signal der Abflussbildung wurde dabei nicht gemessen, obwohl die Niederschlagsmenge genau jenem Grenzwert entspricht, bei der ein Abfluss auf Straßen gebildet wird. Etwa eine Stunde später fiel wieder Regen (3,2 mm), der diesmal einen typischen Hydrographen erzeugte. Gleichzeitig fiel die elektrische Leitfähigkeit abrupt, darauf hindeutend, dass die Schadstoffe mit dem urbanen Niederschlagswasser verdünnt wurden.



Abbildung 3.4: Wasserstand und elektrische Leitfähigkeit, gemessen zu Beginn der Regensaison an der Station M. Aus GRODEK ET AL. (2011)

Die Aufnahmen der elektrischen Leitfähigkeit haben belegt, dass nicht nur die auf Straßen "natürlich" abgelagerten Schadstoffe zu den Verschmutzungen im Abfluss führten, sondern auch eine Vielzahl an anthropogenen Einträgen, beispielweise Wasser von der Autowäsche oder der Hofreinigung. Hinzu kamen noch Siedlungsabfälle, die im Regenwasserkanal landeten und unbehandelt in den natürlichen Fluss eingeleitet wurden. Dabei ist zu erwähnen, dass aufgrund der Verdünnung die Verschmutzungsmenge im Vergleich zum natürlichen Fließgewässer vernachlässigbar klein ist, dennoch dürfte sein Einfluss auf die lokale Umwelt recht groß sein (Grodek et al., 2011).

In Ramallah versuchten HASSAN ET AL. (2010) die Problematik mit der Wasserqualität etwas genauer zu untersuchen. Sie sammelten Wasserproben von Abflüssen unterschiedlicher Landschaftstypen (Dächer, Wohn- und Industriegebiete) und analysierten diese auf Hauptionen und Spurenmetalle. Die Probenahme fand während der Regenereignisse nur drei Mal statt, also zu Beginn, in der Mitte und am Ende des Ereignisses. Aufgrund des first flush-Effektes wurde erwartet, dass die Abflusswässer vom Ereignisbeginn relativ höhere Konzentration (Hauptionen) aufweisen als jene der mittleren oder endenden Ereignisse. Für die Proben aus Dächern und der Industriegebiete konnte über die Niederschlagsdauer zwar eine Abnahme beobachtet werden, für die Wohngebiete bestätigte sich jedoch diese Erwartung nicht. Auch bei den Konzentrationen der Spurenmetalle (Cr, Se, B, Cu, Pb, Ba und Cd) konnte bis auf Cr und Al kein ereignisabhängiger Trend beobachtet werden, was auf die Fahrzeugbenutzung in der Umgebung zurückgeführt wird. HASSAN ET AL. (2010) weisen aber darauf hin, dass aufgrund der geringen Probenmengen (drei während eines Ereignisses) kein repräsentatives Bild erzeugt werden konnte, welches das Verhalten und die Eigenschaften eines andauernden Ereignisses wiedergibt. Allerdings belegen physikalische Parameter (Gesamtlösungsinhalt und spezifische, elektrische Leitfähigkeit) der Regenwasserproben, dass die unterschiedlichen Landschaftstypen einen Einfluss auf den chemischen Gehalt des Abflusses haben. Dies konnte auch durch die Untersuchungen von MIMI (2009) bestätigt werden, indem er die Mittelwerte signifikanter Parameter und einiger Elemente miteinander verglich und so Unterschiede zwischen den Landschaftstypen feststellen konnte. Letzten Endes haben die von HASSAN ET AL. (2010) gemessenen Konzentrationsgehalte gezeigt, dass die Wasserqualität der urbanen Abflüsse recht gut abschnitt, da die Werte unter den Israelischen Trinkwasserstandards lagen.

## 5. Probenahme und Datenerhebung

In und um Modi'in wurden zwischen November 2003 und April 2004 kontinuierliche Klimadaten erfasst und zahlreiche Wasserproben gesammelt. Die Datensammlung zur Wasserqualität wurde von Dr. Grodek und seinem Team von der Hebräischen Universität in Jerusalem (von ihnen stammen die verwendeten Daten zu den Spurenelementen) sowie von ASTRID STEINMANN (2010) (von ihr stammen die verwendeten Daten der Hauptionen) durchgeführt. Für die vorliegende Arbeit wurden beide Datensammlungen zur Verfügung gestellt. Einen Überblick über die Lage aller Messstationen gibt die Abbildung 4.1.



Abbildung 4.1: Lage der Messstationen und Probenahmen. Gelbe Sterne stehen für Niederschlags- bzw. Klimamessstationen. Blaue Sterne zeigen jene Orte, an denen der Abfluss gemessen wurde. Der rote Kasten markiert das Gebiet, in dem Wasserproben von Dächern, Straßen usw. gesammelt wurde.

## 5.1. Hauptionen

Der gestrichelte, schwarze Kasten in der Abbildung 4.1 zeigt das ungefähre Gebiet (ein naturbelassener Wadi), in dem STEINMANN (2010) Untersuchungen zu hydrologischen Prozessen durchgeführt hat. Da sich die Niederschlagsmessstation B mehr als 1 km von ihrem Untersuchungsgebiet befand, stellte STEINMANN (2010) innerhalb des naturbelassenen Wadis auf einem felsigen und auf einem mit Vegetation bedeckten Hang 20 Totalisatoren auf. Nach jedem Niederschlagsereignis wurden die gefallenen Niederschlagsmengen abgelesen und die Wasserproben ins Labor gebracht. Zusätzlich sammelte sie während und nach den Niederschlagsereignissen Wasserproben von Oberflächenabflüssen. Die Proben wurden an beiden Hängen gesammelt, aber jedes Mal an unterschiedlichen Stellen. Am felsigen Hang befand sich außerdem eine selbstgebaute Abflussstation, die den Abfluss eines 7229 m<sup>2</sup> großen Gebiets erfasste. Auch hier wurden Wasserproben entnommen. Im ephemeren Fließgewässer (Wadi) befanden sich zwei Karsthöhlen, die jeweils in der Nähe von beiden Hängen lagen und zu Beprobungszwecken genutzt wurden, da kein signifikanter Oberflächenabfluss beobachtet wurde. Nur während eines großen Niederschlagsereignisses,

das vom 14. bis 15. Februar 2003 stattfand, konnten an den Hängen bis hin zum Wadiauslass sehr viele Wasserproben gesammelt werden. In der Tabelle 4.1 ist die Anzahl der Wasserproben, die während der Niederschlagsereignisse an den vier verschiedenen Standorten gesammelt wurden, zusammenfassend aufgelistet. Es ist darauf hinzuweisen, dass die in der Tabelle 4.1 angegebene Datenanzahl nicht mit der von STEINMANN übereinstimmt. Sie berichtet, dass einige Proben der Hebräischen Universität übergeben wurden.

**Tabelle 4.1**: Datum der Probenahme und deren Anzahl je nach Standort. Hang 1 ist felsig und Hang 2 vegetationsbedeckt. Die Abflussstation befindet sich auf dem felsigen Hang 1. Das Wadi enthält Proben aus beiden Hängen und dem Wadiauslass.

| Datum      | Probenmenge | Totalisator | Abfluss Hang 1 | Abfluss Hang 2 | Abflussstation | Wadi |
|------------|-------------|-------------|----------------|----------------|----------------|------|
| 24.11.2002 | 12          | 12          | -              | -              | -              | -    |
| 25.11.2002 | 11          | 11          | -              | -              | -              | -    |
| 29.11.2002 | 3           | 1           | 1              | -              | -              | 1    |
| 30.11.2002 | 5           | 5           | -              | -              | -              | -    |
| 10.12.2002 | 7           | 7           | -              | -              | -              | -    |
| 13.12.2002 | 10          | 10          | -              | -              | -              | -    |
| 18.12.2002 | 7           | 7           | -              | -              | -              | -    |
| 20.12.2002 | 11          | 2           | 4              | -              | 2              | 3    |
| 05.01.2003 | 3           | -           | -              | -              | 3              | -    |
| 17.01.2003 | 9           | 8           | -              | -              | 1              | -    |
| 20.01.2003 | 5           | -           | 2              | 1              | 1              | 1    |
| 21.01.2003 | 9           | -           | 1              | 1              | 1              | 6    |
| 22.01.2003 | 7           | 7           | -              | -              | -              | -    |
| 05.02.2003 | 13          | 11          | -              | -              | 2              | -    |
| 09.02.2003 | 3           | -           | -              | -              | -              | 3    |
| 11.02.2003 | 2           | -           | -              | -              | 2              | -    |
| 14.02.2003 | 22          | -           | 1              | -              | 2              | 19   |
| 15.02.2003 | 12          | -           | -              | -              | 1              | 11   |
| 16.02.2003 | 5           | 5           | -              | -              | -              | -    |

Alle Wasserproben, die von STEINMANN gesammelt wurden, wurden im Labor der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg mit Hilfe eines Ionenchromatographen auf Hauptionen wie Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> analysiert.

## 5.2. Spurenelemente

Der rote Kasten in der Abbildung 4.1 zeigt jenes Stadtgebiet (vermutlich ein Wohngebiet), in dem Proben von Regenwasserabflüssen aus unterschiedlichen Flächen wie Straßen, Dächern usw. gesammelt wurden. In der Abbildung 4.2 ist eine Vergrößerung dieser Fläche zu sehen und somit auch die Standorte, an denen die Wasserproben genommen wurden. Beim Dach (w) und (e) handelt es sich wahrscheinlich um eine Dachfläche, an der die Wasserproben an zwei unterschiedlichen Stellen entnommen wurden. Laut Dr. Grodek bestand das Material, mit dem die Dächer bedeckt waren, aus Asphalt, das auch für den Straßenbau verwendet wird. Die Klammern hinter den beiden Straßen stehen für die jeweilige Materialbeschaffenheit. Wie stark die Straßen vom Verkehr befahren wurden, ist nicht bekannt.



Abbildung 4.2: Vergrößerung des roten Kastens aus Abbildung 4.1. Standorte der Probenahme auf den verschiedenen urbanen Flächen.

Um Vergleiche der Schadstoffmengen in der Stadt mit jenen auf dem Land anstellen zu können, wurden auch Proben von den Abflüssen an den Stationen I, M und J genommen. Des Weiteren wurden einige Wasserproben, die von STEINMANN (2010) an den Hängen gesammelt wurden, auf weitere Elemente analysiert, so dass auch hier ein Vergleich möglich ist. Zusätzlich wurden einige, wenn auch wenige Proben aus einem Karstbrunnen entnommen, der sich in der Nähe einer Autobahn, ca. 10 km östlich von Modi'in befinden soll.

Um eventuelle Veränderungen der Schadstoffkonzentrationen vom Regen über die Oberflächenabflüsse beobachten zu können, wurden drei Niederschlagsproben aus den Totalisatoren von STEINMANN (2010) ebenfalls erweitert analysiert. Zudem stehen noch zwei Proben aus der Stadt zur Verfügung.

Es wird darauf hingewiesen, dass innerhalb von Modi'in auch an anderen Orten Wasserproben gesammelt wurden, diese aber nicht in die Arbeit mit einbezogen werden, da die Probensammlung während der gesamten Niederschlagssaison meistens nur einmal an den entsprechenden Orten durchgeführt wurde. Deshalb wären diese Proben nicht mit denen im rot markierten Gebiet vergleichbar, da bekannt und auch sichtbar ist (siehe Resultate), dass Schadstoffkonzentrationen während des gesamten Abflusses zeitlich sehr variabel sind.

Einen Überblick über die Anzahl der Wasserproben, die auf den verschiedenen Flächen gesammelt wurden, gibt die Tabelle 4.2. Dabei ist zu beachten, dass Zahlen ohne Klammern für die Anzahl der Proben stehen, in denen der Gesamtgehalt an Metallen (gelöst und partikulär gebunden; *engl.* total recoverable metals) gemessen wurde. Zahlen, die in den Klammern stehen, zeigen die gemessene Anzahl an Proben, in denen sich ausschließlich gelöste Metalle (*engl.* dissolved metals) befanden. Die Messungen beider Gehalte stammen aus derselben Wasserprobe. Der einzige Unterschied der Datenerhebung liegt darin, dass für die Messung der gelösten Metalle ein Teil der Wasserprobe durch einen 40-Mikron-Filter gespritzt wurde und so Partikel größer als 0,04 mm herausgefiltert wurden. Zur Stabilisierung

beider Wasserprobenteile wurde HNO<sub>3</sub> (65%) verwendet. Die Messungen wurden nach einer Phase der Aufbereitung mit zwei ICP-AES-Geräten von SPECTRO nach EPA 6010B im Labor der Fakultät für Agrar-, Lebensmittel- und Umweltwissenschaften der Hebräischen Universität in Jerusalem durchgeführt. Die Angaben zu den Laboruntersuchungen stammen aus der Korrespondenz mit Dr. Grodek.

Es wurden folgende Spurenmetalle [mg/L] auf ihren gesamten und gelösten Gehalt analysiert: Ag, Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, Tl, V und Zn. Unklar ist jedoch, warum für jedes gemessene Element bis zu vier Nachweisgrenzen angegeben wurden.

Zusätzlich zu den Spurenmetallen wurden stellenweise auch die spezifische, elektrische Leitfähigkeit  $[\mu S/cm]$  und der Gesamtfeststoffgehalt [g/L] (TS, *engl.* Total Solids) gemessen. Letzterer wurde gravimetrisch ermittelt, nachdem die Probenaliquoten bei 180°C in einem Backofen getrocknet wurden.

**Tabelle 4.2**: Anzahl der Proben, die während sowie am Ende einiger Niederschlagsereignisse auf den verschiedenen Flächen in der Stadt und deren Umgebung gesammelt wurden. Die Zahl in der Klammer gibt die gemessene Anzahl an Proben mit gelösten Metallen an; Zahlen ohne Klammern zeigen die gemessene Anzahl an Proben mit dem Gesamtgehalt an Metallen (gelöst und ungelöst).

|            | U     | Imgeb | ung   |       |       |       |        | Sta     | adt       |           |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|---------|-----------|-----------|-------|
|            | *KBr. | Hang  | St. J | St. I | Regen | Dach  | Garten | Parkpl. | Str. (Z.) | Str. (A.) | St. M |
| 05.11.2002 | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -       | -         | -         | 9     |
| 29.11.2002 | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -       | -         | -         | 7     |
| 10.12.2002 | -     | -     | -     | -     | 3     | -     | -      | -       | -         | -         | -     |
| 11.12.2002 | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -       | -         | -         | 6     |
| 17.12.2002 | -     | -     | -     | -     | -     | 2 (2) | 1 (1)  | 1 (1)   | 1 (1)     | 2 (2)     | 3 (3) |
| 18.12.2002 | 1 (1) | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -       | -         | -         | -     |
| 20.12.2002 | -     | 3     | -     | -     | 1     | -     | -      | -       | -         | -         | -     |
| 21.01.2003 | -     | -     | 2     | -     | -     | -     | -      | -       | -         | -         | -     |
| 05.02.2003 | -     | 1     | -     | -     | -     | -     | -      | -       | -         | -         | -     |
| 13.02.2003 | -     | -     | -     | -     | -     | 2     | -      | 1       | 1         | 2         | 1     |
| 14.02.2002 | -     | 1     | 1     | -     | -     | -     | -      | -       | -         | -         | -     |
| 15.02.2003 | -     | 1     | 3     | -     | -     | -     | -      | -       | -         | -         | -     |
| 21.02.2002 | -     | -     | -     | 1     | -     | -     | -      | -       | -         | -         | 1     |
| 25.02.2002 | -     | -     | -     | 2     | -     | 2     | -      | 1       | 1         | 2         | 2     |
| 18.03.2003 | -     | -     | -     |       | -     | 2     | -      | 1       | 1         | 1         | 1     |
| 24.03.2003 | -     | -     | -     | 1     | 1     | 2     | -      | 1       | 1         | 1         | 1     |
| 25.03.2003 | -     | -     | -     | 1     | -     | 3     | -      | 1       | 1         | 1         | 1     |
| 01.10.2003 | 1 (1) | -     | -     | -     | -     | -     | -      | -       | -         | -         | -     |
| 29.10.2003 | -     | -     | -     | -     | -     | 1 (1) | -      | -       | -         | 1         | -     |
| 09.11.2003 | -     | -     | -     | -     | -     | 1 (1) | -      | -       | 1         | 1         | -     |

\* Abkürzungen: K.-Br. für Karstbrunnen; St. für Station, Parkpl. für Parkplatz, Str. für Straße, Z. für Ziegel, A. für Asphalt.

Die Probensammlung fand hauptsächlich während und am Ende einiger Niederschlagsereignisse statt.

## 5.2.1. Straßenexperimente

Um den First-Flush in der Stadt untersuchen zu können, wurden drei Straßenexperimente durchgeführt. Dabei wurde destilliertes Wasser über eine asphalthaltige Straße gespült und 10 m flussabwärts wieder eingesammelt. Eine halbe Stunde später wurde dieser Vorgang an der gleichen Stelle ein zweites, und nach weiteren 30 Minuten ein drittes Mal wiederholt. Insgesamt liegen also pro Experiment drei Messdaten vor. Untersucht wurden die Wässer vor allem auf Spurenmetalle, wie sie auch bei den Oberflächenwässern analysiert wurden. Das erste Straßenexperiment fand am 2. Oktober 2002 statt, also vor dem Beginn der Niederschlagssaison. Das zweite Experiment wurde während der Niederschlagssaison am 13. Januar 2003 durchgeführt und das letzte am 30. September 2003 wieder kurz vor Beginn der Niederschlagssaison. Alle Experimente wurden erst am Abend nach 22 Uhr durchgeführt, um eine hohe Evaporation und Verkehrsdichte zu umgehen.

## 5.3. Klimadaten

Um die zeitliche und räumliche Variabilität der Niederschläge zu untersuchen, wurden insgesamt drei Niederschlagsmessstationen installiert, von denen zwei in der Stadt lagen und eine weit außerhalb (Siehe Abbildung 4.1). An den Stationen A und B wurde das Wetter von Oktober 2002 bis Ende April 2003 kontinuierlich in 1-Minuten-Intervallen erfasst. Für die vorliegende Arbeit stehen alle minutiösen Aufnahmen der Niederschlagsereignisse von Station A zur Verfügung. Von Station B gibt es nur Daten zu Niederschlagsmengen, die sich pro Tag angesammelt haben. Die Station Mo wurde vom Umweltministerium betrieben. Neben dem Niederschlag [Inches] wurden auch die Luftqualität (SO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>X</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO), Staub [µg/m<sup>3</sup>], Windstärke [m/s], Windrichtung [°], Lufttemperatur [°C], relative Luftfeuchtigkeit [%] und die Globalstrahlung [W/m<sup>2</sup>] gemessen. Die Aufnahmen fanden alle fünf Minuten statt. Da sich die Geräte der Messstation Mo 2 m über der Straße befanden, maß das Staub-Messgerät nicht nur den Staub aus den Wüsten, sondern auch die lokalen "Verschmutzungen" durch den Verkehr und andere Tätigkeiten. Gemessen wurden alle Partikel größer als 0,01 µm. Genauere Daten zur Geräteausstattung liegen nicht vor.

Es wird darauf hingewiesen, dass der Niederschlag an der Station Mo im Gegensatz zu den anderen Stationen in der Einheit [Inches] gemessen wurde. Deshalb ist eine Umrechnung in [mm] unumgänglich.

## 6. Methoden

## 6.1. Klassifizierung von Staubstürmen

Wie aus den Messdaten von Oktober 2002 bis April 2003 hervorgeht, waren äolische Stäube über die ganze Wintersaison in der Atmosphäre vorhanden. Daraus konnte abgeleitet werden, ab welcher Staubkonzentration von einem "großen" Staubsturmereignis gesprochen werden kann. Als Staubereignis wird jenes Ereignis beschrieben, bei dem anormal hohe Staubkonzentrationen beobachtet werden. OFFER & GOOSSENS (2001) legten ihren Grenzwert bei einer Staubkonzentration von 200 µg/m<sup>3</sup> fest, bei dem sie von einem Ereignis in der Stadt Sede Boger in der Negev Wüste ausgegangen waren. Um jedoch "große" Staubstürme von den "normalen" unterschieden zu können, legten sie eine kritischen Grenze von 400 µg/m<sup>3</sup> fest. Große Staubsturmereignisse unterscheiden sich von den normalen in der deutlich höheren Staubkonzentration, die nur wenige Stunden bis maximal ein bis zwei Tage anhalten kann. Die Daten von Modi'in betrachtend, wurde für die großen Staubstürme ein kritischer Grenzwert von 300 µg/m<sup>3</sup> festgelegt. Diese Entscheidung wurde aus zwei Gründen getroffen: 1.) Die meisten Staubkonzentrationen lagen während er gesamten Saison bei etwa 100 µg/m<sup>3</sup>, 2.) Die Stadt liegt weiter nördlich von Sede Boger, d.h. die Staubstürme, die aus der afrikanischen Wüste kommen, erreichen Modi'in mit deutlich niedrigeren Staubkonzentration als Sede Boger. OFFER & GOOSSENS (2001) unterteilen die großen Staubstürme weiter in zwei Staubsturm und Staubdunst. Während der Staubstürme herrschen hohe Typen: Windgeschwindigkeiten, die die lokalen Oberflächenböden erodieren, so dass sich in der Luft neben den aus der Wüste transportierten Partikeln auch viele aus der lokalen Region befinden. Anders dagegen herrschen beim Staubdunst niedrigere Windgeschwindigkeiten, so dass es keine lokale Erosion gibt. Die in der Luft schwebenden Partikel stammen aus etwas weiter entfernten Quellen und wurden zuvor in einiger Entfernung durch einen Staubsturm hochgewirbelt. Normalerweise werden die Ereignisse über die Reduktion der Visibilität beschrieben und nicht über die Staubkonzentrationen. Da aber nur Daten zu Staubkonzentrationen vorliegen, wird die quantitative Klassifikation von OFFER & GOOSSENS (2001) herangezogen. Sie haben ein ganz einfaches Kriterium gewählt: Zuerst haben sie das Verhältnis (Q) zwischen der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit eines großen Staubereignisses und der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit während des gesamten Monats, in der der Sturm auftrat, berechnet. War das Verhältnis (Q) kleiner als 1,3, gingen OFFER & GOOSSENS (2001) von einem Staubdunst aus; ein größerer Q-Wert deutete auf einen Staubsturm hin. Diese Berechnung und Klassifikation wurden auch in dieser Arbeit verwendet.

#### 6.2. Berechnungen mit Hauptionen

Da nur Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> gemessen wurden, fehlt zur vollständigen Bewertung die Konzentration des Anions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Dieses kann aber aus der Ionenbilanz nach dem Prinzip der Elektroneutralität (E.N.) berechnet werden. Die Definition lautet:

$$E.N. = \frac{\sum Kationen - \sum Anionen}{\sum Kationen + \sum Anionen}$$
Gl. 1

Die Ionenbilanz wird normalerweise zur Überprüfung der Genauigkeit von Analyseergebnissen verwendet. Summe der Demnach muss die Kationenund Anionenäquivalente in einer vollständigen Analyse gleich sein. Um die Berechnung durchführen zu können, müssen die vorhandenen Kationen und Anionen in die gewichtete Äquivalentkonzentration mmol(eq)/L umgewandelt werden. Erst dann kann die Konzentration des Anions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> berechnet werden. Viel präziser wäre es gewesen, die HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> -Konzentration über den pH-Wert zu berechnen, um durch die Ionenbilanz Wasserproben ausschließen zu können, deren Analyseergebnisse ungenau waren. Da aber keine pH-Werte gemessen wurden, ist die erste Rechnung unumgänglich.

Mit den Hauptionen, die im Niederschlag, auf den Hängen und im Wadi gemessen wurden, wurde eine statistische Analyse durchgeführt, um zu analysieren, welche saisonalen und monatlichen Unterschiede oder Gemeinsamkeiten auftreten. Dazu wurden der Median, der arithmetische Mittelwert, die Standardabweichung, der Variationskoeffizient, der Minimalwert und der Maximalwert berechnet. Beim Variationskoeffizient (kurz: VK) handelt es sich um das Verhältnis [%] zwischen der Standardabweichung und dem Mittelwert. Als Faustregel gilt: Ist VK > 50%, dann ist der arithmetische Mittelwert kein guter Repräsentant der Einzelwerte.

Mit Hilfe von Piper-Diagrammen können die Ionenbeziehungen zwischen den Kationen und Anionen sowie die der Kationen bzw. Anionen jeweils untereinander verglichen werden. Im Piper-Diagramm werden die Anionen- und Kationendreiecke mit einem Vierstoffdiagramm kombiniert. Dabei werden alle für die Beschaffenheit der Wässer wichtigen Ionen Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> berücksichtigt. Die Konzentrationen der Ionen werden in mmoleq% angegeben. Namensgebend sind solche Ionen, die mindestens 20 mmoleq% der Kationen- oder Anionensumme (je 100%) ausmachen.

Um die Parameter einzelner Wasserproben in einem graphischen Zusammenhang darstellen zu können, werden Vertikaldiagramme verwendet, von denen das Schoeller-Diagramm die gängigste Form ist. Auf der X-Achse werden die Konzentrationen der Ionen in mmol(eq)/L in der Reihenfolge  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  +  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$  und  $SO_4^{2-}$  aufgetragen, während auf der Y-Achse die zugehörigen Konzentrationen im logarithmischen Maßstab angegeben werden. Werden die einzelnen Punkte einer Wasserprobe miteinander verbunden,

entsteht eine Kurve. Parallel verlaufende Verbindungslinien entsprechen dabei gleichen Ionenverhältnissen bei verschiedener Konzentration (Matthess, 1994).

Mit Hilfe der Regressionsanalyse soll die Art der Abhängigkeit einer Variablen von einer definierten Größe durch eine mathematische Funktion erfasst werden. Wie stark die Abhängigkeit zwischen der Variablen und der definierten Größe ist, wird durch das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> beschrieben, welches zwischen Null (keine Abhängigkeit) und Eins (sehr starke Abhängigkeit) liegen kann. Im vorliegenden Fall sind die Variablen die Hauptionen und die definierten Größen jeweils die Niederschlagsmenge, die maximale Intensität, sowie die Anzahl der vorherigen, trockenen Tage. Für die Arbeit wurde ein Bestimmtheitsmaß > 0,5 festgelegt, d.h., dass der gewählte Regressionstyp die Abhängigkeit zwischen der Variablen und er definierten Größe hinreichend gut beschreibt.

## 6.2.1. Herkunft der Hauptionen im Niederschlagswasser

Alle im Niederschlag vorhanden Hauptionen haben eine unterschiedliche Herkunft. Die bedeutendsten natürlichen Quellen sind jedoch das Meer und die Erdkruste. Um den marinen Beitrag einzelner Kationen und Anionen zum Ionenhaushalt der Niederschläge berechnen zu können, wird die folgende Gleichung herangezogen (Xu et al., 2011; Özsoy et al., 2008):

$$MB_{X} [\%] = \frac{100 \times [Na_{Niederschlag}] \times [X/Na]_{Meer}}{X_{Niederschlag}}$$
Gl. 2

Wobei X die Konzentration des entsprechenden Kations oder Anions ist. Die Gehalte der Hauptionen im östlichen Mittelmeer wurden aus LENNTECH (2005) übernommen. Sie sind in der Tabelle 5 zusammenfassend dargestellt.

|            | 1          |                 | - 0       |          |          |
|------------|------------|-----------------|-----------|----------|----------|
| CI         | Na         | SO <sub>4</sub> | Mg        | Ca       | К        |
| 21200 mg/L | 11800 mg/L | 2950 mg/L       | 1403 mg/L | 423 mg/L | 463 mg/L |

 Tabelle 5: Hauptionen-Zusammensetzung des östlichen Mittelmeers

Der Anteil der Hauptionen, der nicht aus dem Meer stammt, errechnet sich durch:

$$KMB_X [\%] = 100\% - MB_X$$
 Gl. 3

In den Berechnungen wird Natrium als das Referenzelement herangezogen, weil die Konzentration von Chlor etwas höher liegt als die von Natrium. Obwohl Autoren wie TUNCEL & UNGÖR (1996) darauf hinweisen, dass Natrium ca. 10 bis 35% des mediterranen Erdkrustenmaterials ausmacht, gibt es wiederum andere Autoren wie WALL ET AL. (1988), die dem Chlor nicht-konservative Eigenschaften als Folge der Reaktionen mit sauren Spezies nachweisen. In der vorliegenden Arbeit wurde der Argumentation der erstgenannten Autoren gefolgt und Natrium als Referenzelement verwendet.

Zusätzlich zu den oben genannten Berechnungen kann mit Hilfe eines Anreicherungsfaktors die Zugehörigkeit der Hauptionen zum Meer bestätigt oder widerlegt werden. Der Anreicherungsfaktor (AF) ist in diesem Zusammenhang wie folgt definiert:

$$AF = \frac{(X/[Na])_{Niederschlag}}{(X/[Na])_{Meer}}$$
Gl. 4

X ist hierbei die Konzentration des entsprechenden Kations oder Anions im Niederschlag bzw. im Meer. Erreicht der Anreicherungsfaktor einen Wert um 1, bedeutet das, dass die Ionen im Niederschlagswasser eindeutig aus dem Mittelmeer stammen. Werte größer als 1,5 deuten dagegen auf einen anderen Ursprung hin; entweder auf die Erdkruste oder auf anthropogene Aktivitäten.

Wenn die Hauptionen einer der beiden Quellen (marin oder nicht) zugeordnet wurden, kann mit einer linearen Regressionsanalyse herausgefunden werden, ob die entsprechenden Ionen die gleiche Herkunft haben. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang: Ist die Güte der linearen Regression zwischen Natrium und einem anderen Ion größer als 0,5, dann stammte auch dieses Ion aus dem Meer. Da die geologische Beschaffenheit in und um Modi'in durch Kalksteine und Dolomiten geprägt ist, wird erwartet, dass die Ionen  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  und  $HCO_3^-$  die gleiche Herkunft haben. Eine anthropogene Herkunft wird dagegen den beiden Anionen  $SO_4^{2-}$  und  $NO_3^-$  zugeschrieben.

### 6.3. Berechnungen mit Spurenelementen

Um eine grobe Übersicht über die Spurenelemente im Regenwasserabfluss auf dem Land und in der Stadt zu bekommen, wurde auch hier eine statistische Analyse durchgeführt. Dazu wurden der Median, der arithmetische Mittelwert, die Standardabweichung, der Variationskoeffizient, der Minimal- und der Maximalwert herangezogen. Aufgrund der geringen monatlichen Probenmengen ist nur eine saisonale Überprüfung möglich. Die Saison bezieht sich auf den Winter, weil die Proben von November 2002 bis März 2003 gesammelt wurden. Die wenigen Proben, die von Oktober 2003 und November 2003 stammen, gingen nicht in die statistische Analyse ein. Auch alle gemessenen, gelösten Metalle wurden von der Analyse ausgeschlossen. Das heißt, es wurden nur die Gesamtgehalte der Elemente berücksichtigt.

Auch in diesem Fall wurde ein Schoeller-Diagramm herangezogen, dessen X-Achse alphabetisch durch die Abkürzungen der entsprechenden Elemente eingeteilt wurde. Die Konzentrationen wurden in µmoleq/L umgerechnet. Zusätzlich wurden die maximal erlaubten Grenzwerte, ab denen das Wasser nicht mehr als Trinkwasser verwendet werden darf, in die Diagramme mit einbezogen. Als Trinkwassergrenzwerte wurden die israelischen Standards (MH, 2000) herangezogen, die vom israelischen Gesundheitsministerium veröffentlicht wurden. Da aber vom Gesundheitsministerium nicht für jedes Element ein Grenzwert festgelegt wurde, wurden fehlende Grenzwerte, soweit diese vorhanden waren, durch die Trinkwasserstandards von WHO (2008), US-EPA (2006) und EC (98/83/EEC) ergänzt (alle

drei aus Gray (2008) entnommen). Welche Standards nun für welche Elemente eingesetzt wurden, zeigt die folgende Zusammenfassung:

- Israelische Trinkwasserstandards: Ag, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Ni, Pb, Se, Zn, TS
- WHO: B, Mo, Sb
- US-EPA: Al, Tl
- EC: Na
- Keine Grenzwerte: Ca, Co, K, Li, P, S, Si, Sn, Sr, Ti, V, EC

Um beurteilen zu können, wie sich die einzelnen Spurenelemente in den Regenwasserabflüssen auf den verschiedenen Flächen verhalten. wurde ein Anreicherungsfaktor verwendet. Anders als bei der Beurteilung der Herkunft im letzten Abschnitt, ist dieser Anreicherungsfaktor als das Verhältnis der elementaren Konzentration nach der Anreicherung zu der entsprechenden Konzentration vor der Anreicherung definiert. Beispielsweise kann mit diesem Faktor gefolgert werden, ob eine Anreicherung oder Verdünnung eines Elements im Regenwasserabfluss gegenüber dem gleichen Element aus dem Niederschlag stattfindet. Ist der Anreicherungsfaktor kleiner als Eins, dann wurde das Element im Regenwasserabfluss verdünnt. Werte größer als Eins zeigen, dass eine Anreicherung stattgefunden hat.

Mit Hilfe der Regressionsanalyse wurde die Abhängigkeit einzelner Elemente von der Niederschlagsmenge und dem Vorregenindex getestet. Da auf den Straßen kein Abfluss des Regenwassers gemessen wurde, wurde ein so genannter Vorregenindex herangezogen, mit dem die Abflussbildung abgeschätzt werden konnte. Der Vorregenindex (VRI) geht von der Annahme aus, dass der Einfluss eines Niederschlagsereignisses auf die Abflussbildung und Bodenfeuchte geringer ausfällt, je länger er zurückliegt. Die jüngeren Niederschläge beeinflussen diese hingegen stärker (Fedora & Beschta, 1989; Ali et al., 2010). Nach MANIAK (2010) kann folgender Regressionsansatz als Vorregenindex verwendet werden:

$$VRI_n = k^1 \times N_1 + \dots + k^n \times N_n$$
 Gl. 5

Dabei ist  $N_n$  die tägliche Niederschlagshöhe in mm, die n Tage vor dem gemessenen Niederschlagsereignis existierte, z.B. n = 5, 15, 30 Tage. k<sup>n</sup> ist eine Zerfallskonstante, deren Wert zwischen 0,85 und 0,9 liegt. Für die vorliegende Arbeit wurde n = 5 Tage gewählt und eine Zerfallskonstante von 0.9 herangezogen.

Zur Beurteilung der Auswirkungen des Regenwasserabflusses auf den Vorfluter wird häufig eine so genannte mittlere Ereigniskonzentration (*engl.* event mean concentration; EMC) berechnet. Sie ist folgendermaßen definiert (Porto, 2001):

$$EMC = \frac{L}{RO} \quad mit \ L = \sum_{i=1}^{n} Q_i \times C_i \quad sowie \ RO = \sum_{i=1}^{n} Q_i \qquad Gl. 6$$

Q ist der Abfluss [m<sup>3</sup>/s] zum Zeitpunkt i eines Ereignisses und C die entsprechende gemessene Schadstoffkonzentration [mg/L]. Da EMC abhängig von vielen physikalischen und klimatischen Faktoren des Einzugsgebiets ist, kann es zwischen einzelnen Einzugsgebieten zu Unterschieden um mehrere Größenordnungen kommen. Deshalb ist ein präzises Überwachen Voraussetzung. Da aber an der Station M und I, für die Abflussdaten zur Verfügung stehen, zu wenige Proben genommen wurden, können die EMC-Werte als repräsentative Größen nicht herangezogen werden. In dieser Arbeit wurden die mittleren Ereigniskonzentrationen zwar berechnet, jedoch werden sie nicht weiter interpretiert. Die Ergebnisse sind im Anhang (Tabellen 22 und 23) aufgeführt.

## 7. Resultate

## 7.1. Klima

Während der Wintersaison von Oktober 2002 bis April 2003 wurden an der Niederschlagsmessstation B, die sich im Gegensatz zu den anderen beiden Stationen außerhalb der Stadt Modi'in befand, insgesamt 717,9 mm Regen gemessen. Im gleichen Zeitraum wurden an der Station A und Mo jeweils 819,7 mm sowie 773,3 mm gemessen. Die letzten beiden Niederschlagsmengen zeigen, dass in der Stadt deutlich mehr Regen gefallen ist, als auf dem Land. Vergleicht man die Niederschlagsmengen mit dem jährlichen Durchschnitt von 400 bis 600 mm nach GOLDREICH (2003), so war diese Wintersaison außerordentlich nass. In der Abbildung 5.1 sind die Niederschlagsmengen pro Ereignis, die an allen drei Stationen gemessen wurden, dargestellt. Am meisten Niederschlag fiel vom 24. bis 26. Februar 2003.



Abbildung 5.1: Niederschlagsmengen der einzelnen Stationen, die pro Ereignis während der gesamten Saison gemessen wurden.

Insgesamt kann beobachtet werden, dass je kleiner die Niederschlagsereignisse waren, desto geringer fiel der Unterschied zwischen den Stationen aus. Der größte Unterschied, der gemessen wurde, fand während des Ereignisses vom 18. bis 21. März 2003 statt. Hier kann eine sehr große Differenz von 38,5 mm zwischen den Station Mo und B beobachtet werden. Für alle anderen Ereignisse liegen die Unterschiede unter 20 mm, was für weitere Berechnungen eine vernachlässigbare Schwankung darstellt. Aus diesem Grund wurde auf eine Kalibrierung der wahren Niederschlagsverteilung verzichtet, stattdessen wurden für weitere Untersuchungen die Mengen aller Stationen gemittelt. In der nachfolgenden Abbildung 5.2 ist die Verteilung der monatlichen Niederschlagsmengen zu sehen. Die größten Mengen wurden im Februar 2003 (305,6 mm) gemessen, gefolgt von März 2003 (157,5 mm), Dezember 2002 (155,4 mm) und Januar 2003 (92,6 mm).



Abbildung 5.2: Monatliche, über die Stationen gemittelte Niederschlagsmengenverteilung

Die gemessenen Niederschläge unterscheiden sich einerseits durch sehr intensive, kurze Ereignisse und andererseits durch länger anhaltende, aber weniger intensive Perioden. Die Zeitspanne, die zwischen zwei Niederschlagsereignissen lag, betrug wenige zehn Minuten bis zu einigen Stunden. In der Tabelle 6 ist die monatliche Häufigkeitsverteilung [%] der Niederschlagsintensitäten [mm/h], sowie deren Gesamtdauer am Beispiel der Station A dargestellt. Wie aus dieser Tabelle hervorgeht, lagen die meisten Niederschlagsintensitäten größer als 48 mm/h kamen vor allem im November, Dezember, Januar und April vor.

**Tabelle 6.1**: Monatliche Häufigkeitsverteilung [%] der Niederschlagsintensitäten an Beispielder Station A.

| Monat             | <6 | 6 - 12 | 12 - 24 | 24 - 48 | > 48 |
|-------------------|----|--------|---------|---------|------|
| November          | -  | 78     | 18      | 4       | 1    |
| Dezember          | -  | 76     | 17      | 5       | 1    |
| Januar            | -  | 82     | 15      | 2       | 1    |
| Februar           | 1  | 79     | 17      | 2       | -    |
| März              | -  | 81     | 17      | 2       | -    |
| April             | -  | 68     | 26      | 5       | 2    |
| Gesamtdauer (min) | 20 | 4329   | 933     | 158     | 31   |

Die Lufttemperaturen lagen während der Wintersaison im Mittel zwischen 22,8 °C im Oktober und 11,2 °C im Februar. Die relative Luftfeuchtigkeit erreichte mittlere Werte zwischen 75,3 % im März und 50,8 % im November.

In der Abbildung 5.3 ist die monatliche Häufigkeitsverteilung [%] der Windgeschwindigkeiten dargestellt. Diese zeigt, dass während der gesamten Wintersaison die meisten Windgeschwindigkeiten zwischen 1,6 und 3,4 m/s lagen, was einer leichten Brise entspricht. Staub kann erst bei Geschwindigkeiten ab 5,5 m/s in die Luft gehoben werden. Im November wurden die höchsten Windgeschwindigkeiten gemessen.



**Abbildung 5.3:** Monatliche Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten während der Wintersaison 2002/2003.

Die nachfolgende Abbildung 5.4 gewährt einen Einblick in die monatliche Häufigkeitsverteilung [%] der Windrichtung. Die meisten Winde kamen aus östlichsüdöstlichen Richtung, aber auch aus nördlichem Nordwesten (NNW). BIBAS (vermutl. 2010) hat in seinem Bericht bereits darauf hingewiesen, dass die Stadt Modi'in für leichte nordwestliche Winde zugänglich ist. Winde aus dem Südwesten kamen allgemein nur vereinzelt vor und traten nur von Dezember bis Februar etwas häufiger auf.



*Abbildung* 5.4: *Monatliche Häufigkeitsverteilung der Windrichtung während der Wintersaison* 2002/2003.

## 7.1.1. Staubstürme

Um einen ersten Überblick über die Staubkonzentrationen während der Wintersaison 2002/2003 zu bekommen, wurde deren monatliche Häufigkeitsverteilung berechnet (siehe Abbildung 5.5). Die meisten Staubkonzentrationen aller gemessenen Monate lagen unter 100  $\mu$ g/m<sup>3</sup>. Bei 300  $\mu$ g/m<sup>3</sup> wurde in dieser Arbeit die kritische Grenze festgesetzt, ab der von großen Sturmereignissen ausgegangen werden kann. Es fällt auf, dass diese Grenzkonzentration besonders im April und Februar, aber vereinzelt auch in den anderen Monaten überschritten wurde.



Abbildung 5.5: Monatliche Häufigkeitsverteilung der Staubkonzentrationen während der Wintersaison 2002/2003.

Im nächsten Schritt wurde überprüft, wann und wie lange die kritische Grenze überschritten wurde. Zusätzlich wurden die dazugehörigen minimalen und maximalen Windgeschwindigkeiten sowie die hauptsächliche Windrichtung ermittelt. In der Tabelle 6.2 sind alle Ereignisse zusammengefasst, deren Staubkonzentrationen Werte größer als 300  $\mu g/m^3$  erreichten. In der rechten Spaltenhälfte sind die maximal gemessenen Staubkonzentrationen der entsprechenden Ereignisse zu sehen, einschließlich der dazugehörigen Dauer, der Windgeschwindigkeit, sowie der hauptsächlichen Windrichtung. Zum größten Teil kamen die Stäube aus westlicher Richtung. Die höchste Staubkonzentration (2293 µg/m<sup>3</sup>) wurde während des Ereignisses vom 2. bis 4. Februar 2003 gemessen. Die höchsten Windgeschwindigkeiten wurden jedoch am 29. bis 30. November 2002 aus südöstlicher Richtung gemessen. Insgesamt fanden 16 Staubereignisse statt.

Werden die Niederschlagsereignisse mit den Staubereignissen verglichen, treten beide häufig nicht gleichzeitig auf. Die Niederschlagsereignisse können als Folge von Staubereignissen entstehen, wenn die Staubpartikel als Kondensationskeime fungieren.

| Stationoniz,entra | nonien und |           |     |             |          | _         |     |
|-------------------|------------|-----------|-----|-------------|----------|-----------|-----|
|                   |            | Insgesamt |     |             | Maxin    | nal       |     |
| Zeitraum          | *D [min]   | *WG [m/s] | *WR | *SK [µg/m³] | *D [min] | *WG [m/s] | *WR |
| 1920.10.2002      | 1800       | 0,3-5,7   | NW  | 494         | 180      | 0,3 - 3   | NNW |
| 12.11.2002        | 655        | 2,7-4,9   | SSW | 354         | 175      | 3,3-4,9   | SSW |
| 2930.11.2002      | 1015       | 4,8-16,5  | OSO | 1277        | 175      | 7,8-11,1  | OSO |
| 0304.12.2002      | 895        | 0,3-3,8   | 0   | 425         | 175      | 1,2-1,7   | OSO |
| 13.01.2003        | 175        | 0,5-1,9   | SSW | 306         | 175      | 0,5-1,9   | SSW |
| 2829.01.2003      | 895        | 3,3-6,2   | SSW | 640         | 175      | 3,6-5,7   | SSW |
| 0204.02.2003      | 1075       | 1,2-8,2   | SW  | 2293        | 175      | 1,9-3,6   | SW  |
| 08.02.2003        | 720        | 2,2 - 7,5 | SW  | 1650        | 175      | 2,2-5,9   | SSW |
| 1213.02.2003      | 715        | 0,3-6,1   | WSW | 949         | 175      | 0,4-3,5   | SO  |
| 1820.02.2003      | 895        | 1,9-9,8   | WNW | 1084        | 180      | 2,3-8,2   | WNW |
| 03.03.2003        | 350        | 1,6-5,7   | NNW | 327         | 175      | 1,6-3,7   | NNW |
| 18.03.2003        | 1080       | 1,5-9,3   | SW  | 1840        | 180      | 3,8-6,9   | WSW |
| 0304.04.2003      | 1075       | 0,3-5,4   | Ν   | 1171        | 175      | 1,3-3,5   | Ν   |
| 0508.04.2003      | 3420       | 0,3-6,3   | NW  | 1066        | 175      | 0,9-2,4   | Ν   |
| 1819.04.2003      | 1080       | 0,3-6,8   | WNW | 564         | 180      | 1,8-6,8   | SO  |
| 25.04.2003        | 360        | 3,3-9,4   | NW  | 1512        | 175      | 4,7-9,4   | NW  |

**Tabelle 6.2**: Ereignisse, deren Staubkonzentrationen höher als 300  $\mu$ g/m<sup>3</sup> lagen. Neben der gesamten Betrachtung der Ereignisse, sind auch deren maximal erreichte Staubkonzentrationen und die dazugehörigen Parameter aufgelistet.

\* Abkürzung: D: Dauer, WG: Windgeschwindigkeit; WR: Windrichtung; SK: Staubkonzentration

Mit Hilfe der quantitativen Klassifikation von OFFER & GOOSSENS (2001) wurden die 16 Staubereignisse in die beiden Kategorien Staubdunst und Staubsturm unterteilt. Die Unterteilung erfolgte, nachdem das Verhältnis zwischen der mittleren  $(\mathbf{0})$ Windgeschwindigkeit während des Staubereignisses (X) und der mittleren Windgeschwindigkeit während des gesamten Monats (Y), in dem das Staubereignis stattfand, gebildet wurde. War das Verhältnis Q kleiner als 1,3, so wurde das entsprechende Ereignis als ein Staubdunst klassifiziert. Im Gegensatz dazu wurde bei größeren Q-Werten von einem Staubsturm ausgegangen. In der Tabelle 6.3 sind die entsprechenden Staubereignisse in Staubdunst und Staubsturm unterteilt. Insgesamt gab es in Modi'in 10 Staubdünste und 6 Staubstürme.

|              | mittlere Wind   | lgeschwindigkeit     |         |              |              |
|--------------|-----------------|----------------------|---------|--------------|--------------|
|              | Staubereignis X | monatliches Mittel Y | Q= X/Y  | Dunst        | Sturm        |
| 1920.10.2002 | 1,81            | 2,04                 | 0,89    | $\checkmark$ |              |
| 12.11.2002   | 3,95            | 3,52                 | 1,12    | $\checkmark$ |              |
| 2930.11.2002 | 10,88           | 3,52                 | 3,09    |              | $\checkmark$ |
| 0304.12.2002 | 1,81            | 2,92                 | 0,62    | $\checkmark$ |              |
| 13.01.2003   | 1,33            | 2,76                 | 0,48    | $\checkmark$ |              |
| 2829.01.2003 | 4,62            | 2,76                 | 1,68    |              | $\checkmark$ |
| 0204.02.2003 | 4,35            | 3,32                 | 1,31    |              | $\checkmark$ |
| 08.02.2003   | 4,20            | 3,32                 | 1,27    | $\checkmark$ |              |
| 1213.02.2003 | 3,23            | 3,32                 | 0,97    | $\checkmark$ |              |
| 1820.02.2003 | 4,96            | 3,32                 | 1,49    |              | $\checkmark$ |
| 03.03.2003   | 3,42            | 2,86                 | 1,19    | $\checkmark$ |              |
| 18.03.2003   | 4,97            | 2,86                 | 1,74    |              | $\checkmark$ |
| 0304.04.2003 | 2,32            | 2,68                 | 0,86    | $\checkmark$ |              |
| 0508.04.2003 | 2,34            | 2,68                 | 0,87    | $\checkmark$ |              |
| 1819.04.2003 | 2,76            | 2,68                 | 1,03    | $\checkmark$ |              |
| 25.04.2003   | 6,37            | 2,68                 | 2,38    |              | $\checkmark$ |
|              |                 |                      | Anzahl: | 10           | 6            |

**Tabelle 6.3**: Einteilung der Staubereignisse in Staubdunst und Staubsturm entsprechend der quantitativen Klassifikation nach OFFER & GOOSSENS (2001)

## 7.2. Hauptionen und Spurenelemente im Niederschlag

## 7.2.1. Qualitätskontrolle

Da die Ionenbilanz zur Berechnung des Anions  $HCO_3^-$  herangezogen wurde, wurde mit Hilfe einer linearen Regressionsanalyse überprüft, wie gut die Summen der gemessenen Kationen  $(Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+})$  und Anionen  $(C\Gamma, NO_3^-, SO_4^{-2-})$  miteinander in Zusammenhang stehen. In Abbildung 6.1 ist dieser Zusammenhang dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß hat einen Wert von R<sup>2</sup> = 0,4668. Es deutet darauf hin, dass die erhobenen Messwerte nicht sehr genau sind. Nichtsdestotrotz werden die vorhandenen Daten zur weiteren Interpretation herangezogen.



Abbildung 6.1: Linearer Zusammenhang zwischen der Summe von Kationen und der Summe von Anionen.

#### 7.2.2. Herkunft der Hauptionen und Spurenelemente im Niederschlagswasser

Die Herkunft einzelner Hauptionen lässt sich aus dem Meeresbeitrag, dem Nicht-Meeresbeitrag und den Anreicherungsfaktoren beurteilen. Als Referenzelement für das Mittelmeer gilt Natrium. In der Tabelle 7.1 sind die gewichteten Ionenverhältnisse des Meerwassers, des Niederschlagswassers, die Anreicherungsfaktoren, der Meeresbeitrag, sowie der Nicht-Meeresbeitrag zusammenfassend aufgelistet. Der Vergleich wird auf die gesamte Wintersaison und auf die verschiedenen Monate bezogen. Hierfür wurden Medianwerte der einzelnen Hauptionen herangezogen, da die Variationskoeffizienten über 50% lagen, so dass die Mittelwerte nicht als repräsentative Größen verwendet werden konnten. Diese Entscheidung wurde aber auch getroffen, weil der Mittelwert Extremwerte berücksichtigt, was beim Median nicht der Fall ist.

Unterschiede zwischen dem Meerwasser und dem Niederschlagswasser zeigen sich vor allem bei  $SO_4^{2-}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  und  $K^+$ , wobei  $Ca^{2+}$  am stärksten vom Verhältnis zum Meer abweicht. Auch der Anreicherungsfaktor, sowie der Nicht-Meeresbeitrag zeigen, dass  $Ca^{2+}$  nicht aus dem Meer stammt. Es wird davon ausgegangen, dass  $Ca^{2+}$  aus der Erdkruste der Umgebung stammt. Cl<sup>-</sup> dagegen kam eindeutig aus dem Meer. Das zeigen die identischen Verhältnisse zwischen dem Meer und dem Niederschlag, aber vor allem der Meeresbeitrag und der Nicht-Meeresbeitrag mit seinen negativen Werten.  $SO_4^{2-}$  und K<sup>+</sup> stammen ebenfalls nicht aus dem Meer.  $SO_4^{2-}$  ist sogar dafür bekannt, aus anthropogenen Quellen zu stammen.  $Mg^{2+}$  scheint vor allem im Dezember, Januar und Februar zum großen Teil aus dem Meer herzukommen. Bis auf  $Mg^{2+}$  können keine weiteren Unterschiede zwischen den Monaten und der Saison festgestellt werden.

|               |                  | CI <sup>-</sup> /Na⁺ | SO₄ <sup>2-</sup> /Na <sup>+</sup> | Mg <sup>2+</sup> /Na⁺ | Ca <sup>2+</sup> / Na <sup>+</sup> | K⁺ /Na⁺ |
|---------------|------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|---------|
| Meerwasser    |                  | 1,1656               | 0,1197                             | 0,2251                | 0,0411                             | 0,0231  |
|               |                  |                      |                                    |                       |                                    |         |
|               | Saison 2002/2003 | 1,1106               | 0,4104                             | 0,4146                | 3,0331                             | 0,0720  |
| Niederschlags | Nov 02           | 1,1141               | 0,4855                             | 0,4092                | 3,7257                             | 0,1018  |
| wasser        | Dez 02           | 1,1532               | 0,3337                             | 0,3101                | 2,4698                             | 0,0555  |
|               | Jan 03           | 1,2301               | 0,4484                             | 0,3290                | 1,9693                             | 0,0461  |
|               | Feb 03           | 0,9081               | 0,4004                             | 0,3032                | 2,6952                             | 0,0524  |
|               | Saison 2002/2003 | 0.95                 | 3 /3                               | 1.8/                  | 73 76                              | 3 1 2   |
|               | Nov 02           | 0,96                 | 4 06                               | 1,04                  | 90,60                              | 4 41    |
| *AF           | Dez 02           | 0,00                 | 2 79                               | 1 38                  | 60,06                              | 2 40    |
|               | Jan 03           | 1.06                 | 3 75                               | 1,00                  | 47 89                              | 2,40    |
|               | Feb 03           | 0,78                 | 3,35                               | 1,35                  | 65,54                              | 2,00    |
|               |                  |                      |                                    |                       |                                    |         |
|               | Saison 2002/2003 | 105,0                | 29,2                               | 54,3                  | 1,4                                | 32,0    |
|               | Nov 02           | 104,6                | 24,7                               | 55,0                  | 1,1                                | 22,7    |
| *MB [%]       | Dez 02           | 101,1                | 35,9                               | 72,6                  | 1,7                                | 41,6    |
|               | Jan 03           | 94,8                 | 26,7                               | 68,4                  | 2,1                                | 50,1    |
|               | Feb 03           | 128,4                | 29,9                               | 74,2                  | 1,5                                | 44,1    |
|               | Saison 2002/2003 | -5.0                 | 70.8                               | 45 7                  | 98.6                               | 68.0    |
|               | Nov 02           | -4.6                 | 75.3                               | 45.0                  | 98.9                               | 77.3    |
| *NMB [%]      | Dez 02           | -1.1                 | 64.1                               | 27.4                  | 98.3                               | 58.4    |
|               | Jan 03           | 5.2                  | 73.3                               | 31.6                  | 97.9                               | 49.9    |
|               | Feb 03           | -28,4                | 70,1                               | 25,8                  | 98,5                               | 55,9    |

**Tabelle 7.1**: Vergleich der Ionenverhältnisse zwischen dem Meer und dem Niederschlag, Anreicherungsfaktoren in Bezug auf das Meer, Meeresbeitrag und Nicht-Meeresbeitrag. Vergleiche beziehen sich auf die gesamte Wintersaison und die unterschiedlichen Monate

\* Abkürzung: AF: Anreicherungsfaktor; MB: Meeresbeitrag; NMB: Nicht-Meeresbeitrag

Um zu beurteilen, welche Ionen eine gemeinsame Herkunft haben, wurde eine Matrix der linearen Regression erstellt. Ist das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> größer als 0,5, so haben die entsprechenden Ionen die gleiche Herkunft. Einen Überblick liefert die Tabelle 7.2. Demnach hängen  $Ca^{2+}$  und  $HCO_3^-$  sehr stark voneinander ab. Das heißt, dass sie definitiv die gleiche Quelle haben und zwar die Erdkruste (Kalksteine). Auch  $Mg^{2+}$ , K<sup>+</sup> und  $SO_4^{2-}$  zeigen eine mäßige Abhängigkeit von  $Ca^{2+}$ , wobei  $SO_4^{2-}$  auch dafür bekannt ist, unter anthropogenen Einflüssen freigesetzt zu werden. Eine gemeinsame Quelle haben auch  $Na^+$  und  $Cl^-$ . Nur  $NO_3^-$  kann keiner bekannten Herkunft zugeordnet werden. Vermutlich stamm es aus der Energieproduktion, Industrie oder Landwirtschaft.

|                               | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na⁺    | K⁺     | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl     | <b>SO</b> <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|-------------------------------|------------------|------------------|--------|--------|-------------------------------|--------|--------------------------------------|------------------------------|
| Ca <sup>2+</sup>              | 1                |                  |        |        |                               |        |                                      |                              |
| Mg <sup>2+</sup>              | 0,5777           | 1                |        |        |                               |        |                                      |                              |
| Na⁺                           | 0,191            | 0,4376           | 1      |        |                               |        |                                      |                              |
| K <sup>+</sup>                | 0,5649           | 0,421            | 0,1026 | 1      |                               |        |                                      |                              |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 0,9398           | 0,5603           | 0,1554 | 0,5939 | 1                             |        |                                      |                              |
| Cl                            | 0,1658           | 0,3462           | 0,6269 | 0,0721 | 0,0645                        | 1      |                                      |                              |
| SO4 <sup>2-</sup>             | 0,6237           | 0,5946           | 0,4378 | 0,3571 | 0,4676                        | 0,4205 | 1                                    |                              |
| NO <sub>3</sub>               | 0,095            | 0,0694           | 0,0961 | 0,0273 | 0,029                         | 0,0855 | 0,2341                               | 1                            |

Tabelle 7.2: Matrix der linearen Regression. Ist das Bestimmtheitsmaß zwischen zwei Ionen größer als 0,5, so haben beide Ionen dieselbe Herkunft

Trotz der wenigen Niederschlagswasserproben (insgesamt 5) wurde auch hier versucht, eine Abhängigkeit zwischen Ca und den Spurenelementen, sowie Na und den Spurenelementen festzustellen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Berechnung der linearen Regression in diesem Zusammenhang mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet ist. In der Tabelle 7.3 sind die Werte der Bestimmtheitsmaße R<sup>2</sup> dargestellt, die die Abhängigkeit erklären sollen. Als erstes fällt die starke Abhängigkeit zwischen Na und Ca auf. Auch Mg, S und Sr stammen aus der gleichen Quelle wie Ca und Na. Des Weiteren zeigen Al, Fe, Mn, Si und Ti einen Zusammenhang mit Na. Dass Ca und Na in diesem Fall auf eine gemeinsame Herkunft hindeuten, liegt vor allem daran, dass zum Zeitpunkt der Probenahme die Winde hauptsächlich aus südwestlicher Richtung kamen.

Hinweis: Bei den Spurenelementen handelt es sich um Gesamtgehalte (gelöst und partikulär gebunden), weshalb die Wertigkeit hinter dem Element nicht mehr angegeben wird.

| Iabelle    | 7 <b>.3</b> : Vergl | eich der   |
|------------|---------------------|------------|
| Abhängigk  | eit von Ca          | und Na in  |
| Bezug auf  | die Spurene         | lemente im |
| Niederschl | agswasser.          |            |
|            | Са                  | Na         |
| AI         | 0,2978              | 0,5778     |
| В          | -                   | -          |
| Ba         | 0,1517              | 0,2882     |
| Ca         | 1                   | 0,9147     |
| Cr         | -                   | -          |
| Cu         | 0,00002             | 0,0192     |
| Fe         | 0,3283              | 0,6064     |
| K          | 0,4025              | 0,2479     |
| Li         | -                   | -          |
| Mg         | 0,9331              | 0,7664     |
| Mn         | 0,2475              | 0,5058     |
| Na         | 0,9147              | 1          |
| Р          | 0,3676              | 0,1317     |
| Pb         | -                   | -          |
| S          | 0,8656              | 0,8791     |
| Si         | 0,3276              | 0,6057     |
| Sn         | -                   | -          |
| Sr         | 0,939               | 0,9172     |
| Ti         | 0,3627              | 0,6173     |
| V          | -                   | -          |
| Zn         | 0,1484              | 0,2758     |

| Tabelle   | 7 <b>.</b> 3: | V    | 'erg | leich | (   | der |
|-----------|---------------|------|------|-------|-----|-----|
| Abhängig  | keit v        | on   | Са   | und   | Na  | in  |
| Bezug au  | ıf die        | Spu  | rene | eleme | nte | im  |
| Niedersch | laosw         | asse | r    |       |     |     |

#### 7.2.3. Vergleich der Hauptionen in Bezug auf verschiedene Klimaparameter

Um zu untersuchen, wie sich die Konzentrationen einzelner Hauptionen zur bisher gefallenen Niederschlagmenge, zur maximalen Niederschlagsintensität und zu den vorherigen trockenen Tagen verhalten, wurden diese mithilfe einer Regressionsanalyse überprüft. Dabei wurde untersucht, welcher Analysentyp die Abhängigkeit am besten beschreibt. Wasserproben, die während der Staubereignisse gesammelt wurden, wurden aus der Analyse vorerst ausgeschlossen, um später zu vergleichen, wie stark die Staubstürme auf die einzelnen Klimaparameter Einfluss nehmen. Insgesamt wurden 17 Proben ausgeschlossen: 6 vom 29.-30.11.2002 und 11 vom 5.02.2003. Eine Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge, die bis zum Zeitpunkt der Wasserbeprobung gefallen ist, konnte nur bei Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> festgestellt werden. In Abbildung 6.2 sind die Ergebnisse ohne die Beteiligung der Staubstürme dargestellt. Ca<sup>2+</sup> zeigt mit steigender Niederschlagsmenge eine exponentielle Abnahme. Bei K<sup>+</sup> erfolgt die Abnahme ebenfalls exponentiell. Beide Hauptionen werden also mit zunehmender Niederschlagsmenge im Wasser verdünnt. Interessant ist dagegen das Verhalten von  $Mg^{2+}$  und  $SO_4^{2-}$ . Bis ca. 40 mm nehmen die Konzentrationen kontinuierlich ab. dann nimmt deren Gehalt mit zunehmender Niederschlagsmenge wieder zu. Dazu muss erwähnt werden, dass die Proben, in denen die Niederschlagsmenge größer als 40 mm war, einen Tag nach Ereignisende genommen wurden. Für alle anderen Hauptionen konnte kein Zusammenhang festgestellt werden. Werden Wasserproben, die durch Staubereignisse beeinflusst wurden, mit in die Abhängigkeitsberechnung der Hauptionen von der Niederschlagsmenge einbezogen, so wurde kein Unterschied festgestellt. Das Bestimmtheitsmaß nahm bei gleichbleibenden Regressionstypen für Ca um 6,14%, für Mg um 6,66% und für K um 6,86% ab. Für  $SO_4^{2-}$  hat sich das Bestimmtheitsmaß sogar um 0,83% verbessert. Allgemein kann also gesagt werden, dass die Abhängigkeit der entsprechenden Hauptionen von der Niederschlagsmenge trotz der deutlich stärkeren Staubeinträge nahezu unverändert bleibt.



Abbildung 6.2: Abhängigkeit der vier Hauptionen von der Niederschlagsmenge, die an den entsprechenden Niederschlagsereignissen gefallen ist, ohne dass dabei die Staubstürme berücksichtigt wurden

Im nächsten Schritt wurde untersucht, wie sich die einzelnen Hauptionen zur maximalen Niederschlagintensität verhalten. Auch diesmal wurden die Wasserproben, die den deutlich stärkeren Staubeinflüssen unterlagen, von den Berechnungen vorerst ausgeschlossen. Die Daten zu den maximalen Intensitäten stammen von den Aufzeichnungen der Station A. Nur  $Ca^{2+}$ und HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> zeigen eine gute Übereinstimmung mit der maximalen Niederschlagsintensität (siehe Abbildung 6.3). Beide zeigen eine exponentielle Abnahme mit zunehmender Intensität. Für alle anderen Hauptionen konnte kein Zusammenhang festgestellt werden. Werden die Wasserproben mit verstärktem Staubeinfluss in die Berechnungen einbezogen, so führt dies auch zu keinen weiteren Veränderungen. Das Bestimmtheitsmaß nahm bei gleichbleibenden Regressionstypen für  $Ca^{2+}$  von 0,5861 auf 0,5497 und für  $HCO_3^{-1}$ von 0,5904 auf 0,5368 ab. Für alle anderen Hauptionen konnte weiterhin kein Zusammenhang festgestellt werden.



**Abbildung 6.3**: Anhängigkeit der Hauptionen  $Ca^{2+}$  und  $HCO_3^{-}$  von der maximalen Niederschlagsintensität, ohne Berücksichtigung der Einflüsse von zwei Staubstürmen

Da alle Totalisatoren auch zwischen den Niederschlagsereignissen offen standen und das Niederschlagswasser nur während oder nach den Ereignissen beprobt wurde, konnten sich in den Totalisatoren auch Schadstoffe aus der trockenen Deposition ansammelt haben. Um das zu überprüfen, wurden die Hauptionen in Bezug zu der Anzahl der vorherigen, trockenen Tage gesetzt, die vor dem gemessenen Niederschlagsereignis zurücklagen. Wie aus der Abbildung 6.4 hervorgeht, zeigen die Hauptionen Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> eine exponentielle Zunahme, je länger die trockene Zeitphase zwischen zwei Ereignissen war. Diese Abhängigkeit stimmt allerdings nur, wenn vorher keine Staubereignisse stattfanden. Unter deutlich stärkeren Staubeinflüssen, kann jedoch kein Zusammenhang zwischen den einzelnen Hauptionen und der vorherigen trockenen Tagen festgestellt werden, da für alle Regressionstypen das Bestimmtheitsmaß unter 0,5 lag.



**Abbildung 6.4:** Vergleich der Hauptionen  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  und  $SO_4^{2-}$  zu der Anzahl der trockenen Tage vor Niederschlagsbeginn, jedoch ohne Einfluss von Staubereignissen

## 7.2.4. Spurenelemente im Niederschlagswasser: Ein Vergleich zwischen Stadt und Land

Insgesamt wurden nur fünf Proben des Niederschlagswassers auf 21 Spurenelemente analysiert. Vom 10.12.2002 gibt es Qualitätsdaten zu drei Proben, wobei zwei aus dem naturbelassenen Wadi stammen und eine aus der Stadt. Die anderen beiden Proben wurden am 20.12.2002 und 24.3.2003 jeweils auf dem Land bzw. in der Stadt gesammelt. Um zu überprüfen, ob einige Elemente die Trinkwasserstandards bereits im Niederschlagswasser überschreiten, wurden deren Konzentrationen in ein Schoeller-Diagramm überführt. In Abbildung 6.5 sind die Qualitätsdaten aller fünf Proben inklusive der Trinkwasserstandards dargestellt. Normalerweise werden alle Konzentrationen einer Probe durch einen Graphen dargestellt. Da aber für einige Spurenelemente keine Konzentration nachgewiesen werden konnte, wären sie stellenweise unterbrochen gewesen, was zu einer unübersichtlichen Darstellung geführt hätte. Um die Lücken zu füllen, hätte man verständlicherweise die Nachweisgrenzen einsetzten können, was aber im vorliegendem Fall nicht möglich war. In den zur Verfügung gestellten Qualitätsdaten, sind für viele Spurenelemente mehr als nur eine Nachweisgrenze angeführt. Beispielsweise hat Sn drei Nachweisgrenzen ( $\leq 0,01$ ; < 0,004 und <0,005). Vermutlich entstanden sie durch die Verwendung unterschiedlicher Messgeräte.

Im Schoeller-Diagramm ist zu erkennen, dass vor allem Al, aber auch teilweise Fe und Pb die Trinkwasserstandards überschritten haben.



Abbildung 6.5: Schoeller-Diagramm des Niederschlagswassers

Um zu überprüfen, ob es im Niederschlagswasser Unterschiede bei den Spurenelementen zwischen Stadt und Land gibt, wurden als einzige Möglichkeit die Daten vom 10.12.2003 herangezogen. Die elementaren Konzentrationen der beiden Proben aus dem Land wurden gemittelt. In der nachfolgenden Abbildung 6.6 sind die Konzentrationsunterschiede des Niederschlagswassers vom Land und von der Stadt zusammenfassend dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in der Stadt die Konzentrationen der Elemente Al, Fe, Mn, Si und Ti im Gegensatz zu denen auf dem Land deutlich höher liegen. Auf dem Land hingegen sind die Elemente Ba, Ca, K, Mg, Na, P, S und Sr höher konzentriert. In der Tabelle 7.4 sind die Anreicherungsfaktoren für beide Landnutzungstypen zusammengefasst worden. Sie zeigen die jeweilige Anreicherung gegenüber dem anderen Typen. Cu- und Zn-Konzentrationen sind sowohl in der Stadt als auch auf dem Land identisch.



Abbildung 6.6: Vergleich der Spurenelemente im ländlichen und urbanen Niederschlagswasser

**Tabelle 7.4**: Anreicherungsfaktoren der Spurenelemente, die in Bezug zu dem jeweiligenLandnutzungstypen berechnet wurde

|       | - 0  | 1    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ort   | AI   | Ва   | Ca  | Cu  | Fe  | Κ   | Mg  | Mn  | Na  | Ρ   | S   | Si  | Sr  | Ti  | Zn  |
| Stadt | 2,48 |      |     | 1,1 | 2,8 |     |     | 1,6 |     |     |     | 2,4 |     | 2,9 | 1,0 |
| Land  |      | 19,8 | 4,7 |     |     | 2,8 | 2,7 |     | 3,2 | 1,7 | 2,5 |     | 3,3 |     |     |

## 7.2.5. Vergleich der Spurenelemente im Niederschlagswasser mit denen aus Staubstürmen

GANOR ET AL. (1991) haben zwischen 1968 und 1987 23 starke Staubstürme auf Spurenelemente untersucht. Sie haben festgestellt, dass die Zusammensetzung der Staubstürme recht monoton ist. Das heißt, die meisten Elemente haben keine signifikante Variabilität gezeigt. In ihrer Arbeit haben GANOR ET AL. (1991) jedoch nicht erwähnt, was sie unter starken Staubstürmen verstehen. Es ist nicht klar, ab welcher Staubkonzentration sie ihre Proben gesammelt haben. Jedenfalls wurden die Werte der gemessenen Spurenelemente im Staub mit den gemessenen Gehalten im Niederschlagswasser verglichen, um festzustellen, ob einige Spurenelemente auf Staubstürme zurückzuführen sind. In der Abbildung 6.7 sind die Spurenelemente im Niederschlagswasser und die gemessenen Spurenelemente in Staubstürmen zusammenfassend dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind die Konzentrationen der Staubstürme deutlich größer, als diejenigen, die sich im Niederschlagswasser befinden. Als die Niederschlagsproben gesammelt wurden, fanden vor und während der Beprobung keine Staubstürme statt. Das erklärt die auffällig niedrige Konzentration in den Niederschlagswässern. Es konnte also nicht festgestellt werden, ob einige Spurenelemente ausschließlich durch Stürme transportiert werden. Die gemessenen Gehalte von GANOR ET AL. (1991) zeigen jedoch, dass während eines Staubsturmereignisses sehr große Mengen an Schadstoffen transportiert werden.



Abbildung 6.7: Vergleich der Spurenelemente im Niederschlagswasser und in den Staubstürmen, die von GANOR ET AL. (1991) analysiert wurden

# 7.3. Verhalten der Hauptionen im Regenwasserabfluss im naturbelassenen Wadi

Während der Wintersaison 2002/2003 sammelte STEINMANN (2010) in einem naturbelassenem Wadi zahlreiche Wasserproben. Zum einen bestanden die Proben aus Niederschlagswässern zahlreicher Ereignisse, zum anderen waren es Wässer aus Oberflächenabflüssen, die an felsigen sowie vegetationsbedeckten Hängen und im Wadi gesammelt wurden. Das fehlende Anion HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> wurde mit Hilfe der Ionenbilanz berechnet. Von der weiteren Berechnung wurden insgesamt fünf Proben ausgeschlossen. Dies lag daran, weil eine negative HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentration berechnet wurde oder weil die NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentration gefehlt hat, um die HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentration berechnen zu können. Aus der Niederschlagsdatei wurden daher drei Proben entfernt, aus der Hang- und Wadidatei jeweils eine. Des Weiteren konnte ein Konzentrationsunterschied zwischen den Wasserproben aus dem felsigen Hang und den Wasserproben von dem vegetationsbedeckten Hang nicht festgestellt werden. Deshalb wurden diese Qualitätsdaten unter dem Begriff "Hang" zusammengefasst. Das gleiche gilt auch für das Wadi.

Einen groben monatlichen und saisonalen Überblick über den Qualitätsverlauf der Hauptionen vom Niederschlag über die Hänge bis zum Wadi geben die statistischen Parameter in den Tabellen 10, 11 und 12 (siehe Anhang). Beim Wadi und Hang wurde im November jeweils nur eine Probe genommen, so dass für diesen Monat keine statistischen Werte berechnet werden konnten. Es fällt auf, dass vor allem Anionen eine große Variabilität aufweisen. Betrachtet man die saisonalen Mittelwerte, so kann eine Zunahme der Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> und HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentrationen vom Niederschlag über die Hänge bis zum Wadi festgestellt werden. Cl<sup>-</sup> und NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nehmen in der gleichen Reihenfolge jedoch ab. Bei SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ist die Konzentration im Niederschlag sowie im Oberflächenwasser der Hänge gleich, nimmt jedoch im Wadi ab. Diese Beschreibung des Konzentrationsverlaufs kann auch in den Monaten Januar und Februar beobachtet werden. Nur Dezember wurden auf den Hängen höhere Hauptionenkonzentrationen gemessen als im Niederschlag und im Wadi. Möglicherweise ist dies Muster auf die wenigen Wasserproben des Wadis zurückzuführen.

Mit Hilfe von Piper-Diagrammen ist ein Vergleich zwischen den einzelnen Probenwässern möglich. Es wurden nur diejenigen Ereignisse betrachtet, an denen eine vollständige Probensammlung durchgeführt wurde. Die erste vollständige Probensammlung fand am 20.12.2002 statt. Alle Wasserproben, die in diesem Zeitraum gesammelt wurden, wurden in ein Piper-Diagramm übertragen, das in Abbildung 7.1 zu sehen ist. Insgesamt kann beobachtet werden, wie das Niederschlagswasser über den Oberflächenabfluss an Hängen bis zum Wadi an Cl<sup>-</sup>,  $SO_4^{2-}$  und  $NO_3^{-}$  abnahm und dafür immer mehr mit  $HCO_3^{-}$  angereichert wurde. Auch bei der Ca<sup>2+</sup> - Konzentration kann im Gegensatz zu den andern Kationen eine Zunahme beobachtet werden.



Abbildung 7.1: Piper-Diagramm vom 20.12.2002

Ein weiteres Piper-Diagramm ist in der Abbildung 7.2 zu sehen. Es beinhaltet alle Proben, die vom 20. bis 21.01.2002 gesammelt wurden. Auch hier ist der gleiche Konzentrationsverlauf zu sehen. Allerdings hatten die Niederschlagswässer deutlich höhere Konzentrationen an  $SO_4^{2-}$  und  $NO_3^{-}$  sowie  $Mg^{2+}$ . Dies lag vermutlich daran, dass die Niederschlagswässer erst einen Tag nach Ereignisende beprobt wurden. Wie bereits aus der Regressionsanalyse bekannt ist, nimmt die  $SO_4^{2-}$  und  $Mg^{2+}$ –Konzentration in offenen Wässern exponentiell zu, je länger das letzte Niederschlagsereignis zurücklag.



Abbildung 7.2: Piper-Diagramm vom 20.-21.01.2003

Laut STEINMANN (2010) konnte am 14.02.2003 das erste Mal ein Zusammenhang zwischen dem Einzugsgebiet und dem angrenzenden Wadi Anabe nachgewiesen werden. So wurden vom 14. bis 15.02.2003 zahlreiche Wasserproben gesammelt, unter anderem am letzten Tag auch am Wadiauslass. Der Konzentrationsverlauf ist im Piper-Diagramm in der Abbildung 7.3 dargestellt. Es zeigt grundsätzlich eine ähnliche Konzentrationsänderung wie sie zuvor auch in den letzten beiden Piper-Diagrammen beobachtet werden konnte. Zusammenfassend lässt sich folgendes ableiten: Das Niederschlagswasser wurde über den Oberflächenabfluss auf Hängen bis hin zum Wadiauslass immer  $HCO_3^-$ -reichhaltiger (fast bis zur Sättigung). Dabei nahmen gleichzeitig die  $SO_4^{2^-}$ ,  $NO_3^-$  und Cl<sup>-</sup> Konzentrationen ab. Die Kationen-Konzentrationen blieben nahezu konstant.


Abbildung 7.3: Piper-Diagramm vom 14.-15.02.2003

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass es sich bei den Niederschlagswässern um Ca-(Na)-HCO<sub>3</sub>-(Cl)-Wässer handelt, während die Oberflächenwässer eindeutig zu den Ca-HCO<sub>3</sub>-Wässern gezählt werden können. Dies geht aus den Berechnungen der Kationen- und Anionensummen hervor, wonach solche Ionen namensgebend sind, die mindestens 20 meq% dieser Summen ausmachen.

Mit Hilfe von Schoeller-Diagrammen können die Parameter einzelner Wasserproben in einem graphischen Zusammenhang dargestellt werden. Betrachtet werden die geleichen Wasserproben, die bereits in den Piper-Diagrammen verwendet wurden. In der Abbildung 7.4 sind alle Wasserproben dargestellt, die am 20.12.2002 gesammelt wurden. Alle Ionenkonzentrationen nehmen vom Niederschlag bis zum Oberflächenabfluss auf den Hängen leicht zu, wobei am deutlichsten die  $HCO_3^-$ -Konzentration angestiegen ist. Der Oberflächenabfluss von den Hängen bis zum Wadi wurde in Bezug auf alle Ionen ganz leicht verdünnt, wobei die Verdünnung bei Cl<sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> am stärksten war.



**Abbildung 7.4**: Schoeller-Diagramm für die Wasserproben vom 20.12.2002, die im Untersuchungsgebiet von STEINMANN (2010) gesammelt wurden

In der Abbildung 7.5 ist das Schoeller-Diagramm zu sehen, in denen sich alle Qualitätsdaten zu den Wasserproben vom 20. bis 21.01.2003 befinden. Im Grunde genommen zeigt sich das gleiche Muster wie in der letzten Abbildung, jedoch fand gegenüber des Hangabflusses im Wadiabfluss bis auf Cl<sup>-</sup>,  $SO_4^{2-}$  und  $NO_3^{-}$  keine weitere Verdünnung statt, sondern eher eine leichte Anreicherung. Außerdem zeigen die Niederschlagswässer eine deutlich größere Variabilität.

Auch im nächsten Schoeller-Diagramm (Abbildung 7.6) lässt sich nichts Neues erkennen.



Abbildung 7.5: Schoeller-Diagramm für die Wasserproben vom 20.-21.01.2003, die im Untersuchungsgebiet von STEINMANN (2010) gesammelt wurden



Abbildung 7.6: Schoeller-Diagramm für die Wasserproben vom 14.-15.02.2003, die im Untersuchungsgebiet von STEINMANN (2010) gesammelt wurden

#### 7.4. Vergleich der Spurenelemente in Wässern aus der Stadt

Im Anhang sind in den Tabellen 13 bis 18 alle statistischen Parameter einzelner Spurenelemente bezogen auf die jeweilige urbane Fläche zusammengestellt. Auf den ersten Blick fällt auf, dass in allen Regenwasserabflüssen deutlich höhere Konzentrationen gemessen wurden, als im Niederschlag selbst. Außerdem hat ein grober Überblick der Konzentrationen im Dachwasser ergeben, dass diese vor allem an K, Li, Na, S, Sr und Zn gegenüber den beiden Straßen angereichert war. Solche Vergleiche sind allerdings nicht aussagekräftig genug, da alle Probenwässer eine sehr hohe Variabilität zeigen. Aus diesem Grund sollte innerhalb des Untersuchungsgebiets der Verlauf der Konzentrationsänderung vom Niederschlag über die Dächer bis hin zu den Straßen in sehr kurzen Zeitabständen (Minuten) beobachtet werden, je nachdem wie schnell der Abfluss ist. Da im Wohngebiet die Probensammlung an allen urbanen Flächen in kurzen Zeitabständen erfolgte, kann nun mithilfe von Anreicherungsfaktoren beurteilt werden, welche Spurenelemente in den unterschiedlichen Regenwasserabflüssen verdünnt oder angereichert wurden. Der Übersichtlichkeit wegen wurden als urbane Flächen nur die Dächer (w & e) und die beiden Straßen in die Berechnung einbezogen. In der Abbildung 8.1 sind die Anreicherungsfaktoren der Probenwässer vom 24.03.2003 dargestellt. Die Proben wurden zu Beginn des Niederschlagsereignisses gesammelt, das insgesamt vom 24. bis 26.03.2003 dauerte. War der Anreicherungsfaktor größer als 1, so fand im Regenwasserabfluss der Fläche im Zähler (z.B. Straße (Z)) gegenüber der Fläche im Nenner (entsprechend dem Beispiel: Dach) eine Anreicherung statt. Lag der Anreicherungsfaktor unter 1, so wurde das Element entsprechend verdünnt. Eine sehr starke Anreicherung im Regenwasserabfluss der Dächer im Vergleich zum Niederschlag fand besonders bei Ca, Cr, K, Li, Na, S, Sr, V und Zn statt. All diese Elemente wurden später im Regenwasserabfluss der Straße (Z) verdünnt. Letzteres wurde dann besonders mit Al, Fe und Ti angereichert. Floß dieser Abfluss dann in den Regenwasserabfluss der Straße (A), so wurde dieser zwar leicht mit Al und Fe weiter angereichert, jedoch enthielt dieser deutlich größere Mengen an Ca, Cr, Cu, Li, Mg, Mn, Si, V und Zn. In der Abbildung 8.2 sind die Anreicherungsfaktoren der Probenwässer vom 17.12.2002 dargestellt. Die Proben wurden während des Niederschlagsereignisses gesammelt, der insgesamt vom 16. bis 18.12.2002 anhielt. Ein Vergleich zum Niederschlagswasser konnte nicht mehr hergestellt werden, weil es keine weiteren Daten mehr dazu gibt. Die Abbildung 8.2 zeigt im Vergleich zu der letzten 8.1 eine völlig andere Verteilung der Anreicherung. Lediglich Ti scheint in größeren Mengen nur im Regenwasserabfluss der Straße (Z) vorzukommen. In der nächsten Abbildung 8.3 sind die Anreicherungsfaktoren der Proben vom 13.02.2003 zusehen. Die Proben wurden zu Beginn des Niederschlagsereignisses gesammelt, das bis einschließlich 15.02.2003 anhielt. Anders als in der Abbildung 8.1 fand diesmal eine Anreicherung vieler Elemente im Regenwasserabfluss der Straße (Z) und nicht in dem der Straße (A) statt. Allgemein kann daraus geschlossen werden, dass die Konzentrationen aller Spurenelemente in Regenwasserabflüssen zeitlich und räumlich sehr variabel sind.



Abbildung 8.1: Anreicherungsfaktoren in Regenwasserabflüssen urbaner Flächen zu Beginn des Niederschlagsereignisses am 24.03.2003



Abbildung 8.2: Anreicherungsfaktoren in Regenwasserabflüssen urbaner Abflüsse während des Niederschlagsereignisses am 17.12.2002



Abbildung 8.3: Anreicherungsfaktoren in Regenwasserabflüssen urbaner Abflüsse während des Niederschlagsereignisses am 13.02.2003

In der Abbildung 8.4 wird veranschaulicht, wie stark variabel die einzelnen Konzentrationen der Spurenelemente sind, obwohl die Zeitspanne zwischen den gesammelten Wasserproben recht kurz ist.



Abbildung 8.4: Zeitlicher Vergleich der Spurenelemente, die im urbanen Abfluss an der Station M am 5.11.2002 gemessen wurden

# 7.4.1. Vergleich der Spurenelemente in Regenwasserabflüssen zu den Trinkwasserstandards

In den nachfolgenden Abbildungen 9.1 bis 9.5 sind Schoeller-Diagramme zu sehen, in denen alle gemessenen Spurenelemente der Regenwasserabflüsse aus den verschiedenen urbanen Flächen mit den Trinkwasserstandards verglichen werden können. Die Punkte in den jeweiligen Diagrammen sind Gesamtgehalte der Elemente und die dazugehörenden Kreise die gelösten Gehalte. Folgende Trinkwasserstandards wurden in Regenwasserabflüssen überschritten:

- 1.) Ohne Einfluss der Staubstürme am 29.11.2002 sowie 18.03.2003, sowie des Staubdunstes am 13.02.2003
  - Dächer: Al, Fe, Pb
  - Straße (Z): Al, (Cr), Fe, (Mn), Ni, Pb
  - Straße (A): Al, (Cd), (Cr), Fe, (Mn), (Mo), (Na), (Ni), Pb, (Sb), (Se)
  - Parkplatz: Al, Fe
  - Station M: Al, (Cr), Fe, (Mn), (Ni), Pb, Se

\*Hinweis: Blau markierte Spurenelemente wurden erst im Oktober bzw. November 2003 überschritten. Elemente in Klammern wurden nur teilweise überschritten.

- 2.) Mit Einfluss der Staubstürme und des Staubdunstes
  - Dächer: Al, Fe, Pb, Mn, Cd, Cr
  - Straße (Z): Al, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb

- Straße (A): Al, Cr, Fe, Mn, Pb
- Parkplatz: Al, Fe, Cr, Mn, Pb
- Station M: Al, Cr, Fe, Mn, Pb, Se

\*Hinweis: Die Spurenelemente, die bereits unter 1.) stehen, erreichen mit den Staubereignissen deutlich höhere Konzentrationen.

In der Abbildung 9.5 wird eine wichtige Entdeckung deutlich: Die höchsten Konzentrationen von Al, B, Ba, Ca, Co, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, S und V wurden am 5.11.2002 gemessen. Ab diesem Zeitpunkt fand das erste Niederschlagsereignis der Wintersaison 2002/2003 statt. Das heißt, dass vor dem Ereignis ganz viele Schadstoffe abgelagert werden mussten, um so hohe Konzentrationen im urbanen Abfluss an der Station M messen zu können.



Abbildung 9.1: Schoeller-Diagramm: Vergleich der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus Dächern mit den Trinkwasserstandards



Abbildung 9.2: Schoeller-Diagramm: Vergleich der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus Straße (Z) mit den Trinkwasserstandards



**Abbildung 9.3:** Schoeller-Diagramm: Vergleich der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus Straße (A) mit den Trinkwasserstandards



**Abbildung 9.4:** Schoeller-Diagramm: Vergleich der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus Parkplatz mit den Trinkwasserstandards



**Abbildung 9.5:** Schoeller-Diagramm: Vergleich der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus Station M mit den Trinkwasserstandards

# 7.4.2. Vergleich der Spurenelemente in Regenwasserabflüssen zur Niederschlagsmenge sowie dem Vorregenindex

Aufgrund der vielen gemessenen Spurenelemente wurden in den nachfolgenden Abschnitten nur ein oder zwei Spurenelemente als repräsentative Größen für alle anderen verwendet. Mit Hilfe der Regressionsanalyse wurde die Abhängigkeit der Spurenelemente von der bisher gefallenen Niederschlagsmenge und von dem Vorregenindex getestet. Untersucht wurden dabei die Regenwasserabflüsse vom Dach, von der Straße (A) sowie von der Station M. Die Güte der Regression wurde dabei durch das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> beschrieben. Erreichte R<sup>2</sup> einen Wert größer als 0,5, so wurde von einer repräsentativen Auswertung ausgegangen.

# 7.4.2.1. Niederschlagsmenge

Dach:

Mit zunehmender Niederschlagsmenge eines Ereignisses zeigen Spurenelemente wie Al, B, Ba, Ca, Cu, Mn, S, Si, Sr und V eine exponentielle Abnahme, wie es in Abbildung 9.6 am Beispiel von B zu sehen ist. Die Güte dieses Regressionstyps schwankt zwischen 0,5099 für Ba und 0,8827 für B. Entfernt man allerdings eine Probe, die vom Staubsturm (18.03.2003) beeinflusst wurde, so nahm die Güte von Al, Ca, Ba und Si unter  $R^2 = 0,5$  ab. Für B, Cu, Mn, S, Sr & V bestand weiterhin ein guter Zusammenhang. Des Weiteren konnte für die bisher nicht erwähnten Spurenelemente kein Zusammenhang festgestellt werden.



Abbildung 9.6: Zusammenhang zwischen dem Spurenelementen B und der Niederschlagsmenge, die während der entsprechenden Ereignisse gefallen ist.

#### Straße (A):

Für die Spurenelemente Al, Ba, Co, Cr, Fe, Li, Mn, Ni, Ti sowie V konnte anhand einer polynomischen Regressionsanalyse ein guter Zusammenhang festgestellt werden. Jedoch schwankt der Scheitel aller polynomischen Graphen zwischen 20 und 50 mm Niederschlagsmenge. Der Scheitel bestimmt, ab welcher Niederschlagsmenge mit einem Wiederanstieg der Konzentration zu rechnen ist. In Abbildung 9.7 ist ein polynomischer Zusammenhang zwischen der Cr-Konzentration und der Niederschlagsmenge dargestellt. In der Abbildung 9.8 ist dagegen ein Zusammenhang zwischen der Co-Konzentration und der Scheitel der Scheitel der Graphen eine andere Position haben.

#### Station M:

Obwohl an der Station M deutlich mehr Proben gesammelt wurden, konnte nur ein Zusammenhang der Elemente Co, P, S und Si mit der Niederschlagsmenge festgestellt werden. Bis auf S wird der Zusammenhang der anderen Elemente durch eine polynomische Funktion beschrieben (wie in Abbildung 9.10). Nur S zeigt eine permanente Abnahme mit steigender Niederschlagsmenge (siehe Abbildung 9.9).



Abbildung 9.7: Zusammenhang zwischen der Cr-Konzentration im Regenwasserabfluss der Straße (A) und der Niederschlagsmenge



Abbildung 9.8: Zusammenhang zwischen der Co-Konzentration im Regenwasserabfluss der Straße (A) und der Niederschlagsmenge



Abbildung 9.9: Zusammenhang zwischen der S-Konzentration im urbanen Abfluss an der Station M und der Niederschlagsmenge



Abbildung 9.10: Zusammenhang zwischen der S-Konzentration im urbanen Abfluss an der Station M und der Niederschlagsmenge

# 7.4.2.2. Vorregenindex

Mit dem Vorregenindex (VRI) kann die Abflussbildung geschätzt werden. Der Index geht von der Annahme aus, dass der Einfluss eines Niederschlagsereignisses auf die Abflussbildung und Bodenfeuchte geringer ausfällt, je länger er zurückliegt. Die jüngeren Niederschläge beeinflussen diese hingegen stärker. In der Abbildung 10.1 ist die Ganglinie des Vorregenindexes dargestellt.



Abbildung 10.1: Ganglinie des Vorregenindexes

Da der Vorregenindex pro Tag berechnet wurde, mussten alle Proben gemittelt werden, die am gleichen Tag gemessen wurden. Der Vorregenindex wurde vor allem mit den Spurenelementen in Regenwasserabfluss auf der Straße (A) und mit denen im urbanen Abfluss an der Station M untersucht. Mit Hilfe einer polynomischen Regressionsanalyse konnte die Abhängigkeit zahlreicher Spurenelemente vom Vorregenindex bestätigt werden. Dazu gehören Elemente wie Al, Ba, Cr, Fe, K, Li, Mn, P, Ti und V. Sie verhalten sich im Regenwasserabfluss aus der Straße (A) genauso wie im urbanen Abfluss an der Station M. Dies geht aus den Abbildungen 10.2 und 10.3 hervor, in denen die Al-Konzentration gegen den Vorregenindex aufgetragen ist. Der Scheitel des Graphen kann allerding für die anderen Spurenelemente leicht variieren. Er zeigt, bis wann eine Konzentrationsabnahme im Abfluss stattfindet und gleichzeitig stellt er auch jenen Punkt dar, ab dem die Konzentration wieder exponentiell ansteigt. Zusätzlich muss erwähnt werden, dass die Elemente Co, Cu, Ni, Sr und Zn auf der Straße (A) das gleiche Abhängigkeitsmuster aufweisen, wie die bereits oben genannten Elemente. Allerdings fehlt dieses für die entsprechenden Elementen an der Station M, stattdessen zeigt Si eine identische Abhängigkeit mit dem Vorregenindex. Die Gleichung der Graphen kann nun angewandt werden, um die Konzentration der Spurenelemente dem Vorregenindexes Verlauf des anzupassen. In der Abbildung 10.4 sind die Konzentrationsganglinien von Al und Fe an der Station M dargestellt. Auf diese Weise kann vorhergesagt werden, wann mit erhöhten Al- und Fe- Konzentrationen zu rechnen ist.

Für Spurenelemente wie Ca und S konnte ein Zusammenhang mit dem Vorregenindex durch eine logarithmische Regressionsanalyse an den beiden Standorten festgestellt werden. In den nachfolgenden Abbildungen 10.5 und 10.6 sind die Verläufe der Ca-Konzentrationen gegen den Vorregenindex aufgetragen. Demnach findet mit zunehmendem Vorregenindex eine fortschreitende Verdünnung des Elements statt. An der Straße (A) zeigen zusätzlich B, Mg

und Na die gleiche fortschreitende Verdünnung, wobei an der Station M dieses Verhalten nicht mehr beobachtet werden konnte. Mit Hilfe der Gleichung der Graphen kann ebenfalls eine Konzentrationsganglinie im Vorregenindex erstellt werden. Diese ist in der Abbildung 10.7 dargestellt, in der zu sehen ist, dass mit zunehmenden Vorregenindex eine Ca-Konzentrationsabnahme stattfindet und umgekehrt.



Abbildung 10.2: Abhängigkeit der Al-Konzentration im Regenwasserabfluss aus der Straße (A) vom Vorregenindex



Abbildung 10.3: Abhängigkeit der Al-Konzentration im urbanen Abfluss an der Station M vom Vorregenindex



Abbildung 10.4: Al- und Fe-Konzentrationsganglinien, sowie der Verlauf des Vorregenindexes an der Station M



*Abbildung 10.5:* Abnehmende Ca-Konzentration in Regenwasserabfluss mit zunehmenden Vorregenindex auf der Stra $\beta$ e (A)



*Abbildung* 10.6: *Abnehmende Ca-Konzentration im urbanen Abfluss mit zunehmenden Vorregenindex an der Station M* 



Abbildung 10.7: Konzentrationsganglinie von Ca im urbanen Abfluss, sowie der Verlauf des Vorregenindexes an der Station M

Um Vorhersagen zu können, wann und ob mit erhöhten Konzentrationen entsprechender Elemente im Regenwasserabfluss zu rechnen ist, können die Gleichungen aus der Tabelle 8 angewandt werden, die mithilfe von berechneten Vorregenindizes Hinweise auf die Konzentrationen liefern.

|    | Straße (A)                      | Station M                       |  |
|----|---------------------------------|---------------------------------|--|
| AI | y = 0,0379x2 - 1,8862x + 41,581 | y = 0,0367x2 - 1,7389x + 27,603 |  |
| В  | y = -0,0199Ln(x) + 0,1051       | -                               |  |
| Ba | y = 0,0002x2 - 0,0083x + 0,197  | y = 0,0002x2 - 0,0084x + 0,1853 |  |
| Ca | y = -45,278Ln(x) + 202,77       | y = -26,788Ln(x) + 177,36       |  |
| Co | y = 2E-05x2 - 0,0013x + 0,0192  | -                               |  |
| Cr | y = 5E-05x2 - 0,0026x + 0,0635  | y = 8E-05x2 - 0,0036x + 0,0581  |  |
| Cu | y = 2E-05x2 - 0,0019x + 0,0671  | -                               |  |
| Fe | y = 0,035x2 - 1,8457x + 38,501  | y = 0,0325x2 - 1,6268x + 25,637 |  |
| K  | y = 0,0069x2 - 0,4619x + 10,175 | y = 0,0051x2 - 0,3436x + 8,4542 |  |
| Li | y = 2E-05x2 - 0,0012x + 0,0261  | y = 2E-05x2 - 0,0011x + 0,0217  |  |
| Mg | y = -6,2199Ln(x) + 31,748       | -                               |  |
| Mn | y = 0,0006x2 - 0,0316x + 0,6146 | y = 0,0005x2 - 0,0239x + 0,3985 |  |
| Мо | -                               | -                               |  |
| Na | y = -2,9807Ln(x) + 15,404       | -                               |  |
| Ni | y = 3E-05x2 - 0,0016x + 0,0321  | -                               |  |
| Р  | y = 0,0007x2 - 0,0489x + 1,0845 | y = 0,0014x2 - 0,068x + 1,3507  |  |
| Pb | -                               | -                               |  |
| S  | y = -1,4947Ln(x) + 7,4911       | y = -2,3269Ln(x) + 12,379       |  |
| Se | -                               | -                               |  |
| Si | -                               | y = 0,0544x2 - 2,5497x + 45,323 |  |
| Sn | -                               | -                               |  |
| Sr | y = 0,0002x2 - 0,015x + 0,3242  | -                               |  |
| Ti | y = 0,0009x2 - 0,0429x + 0,9238 | y = 0,0007x2 - 0,0282x + 0,5947 |  |
| V  | y = 8E - 05x2 - 0,0046x + 0,102 | y = 8E - 05x2 - 0,004x + 0,0749 |  |
| Zn | y = 9E-05x2 - 0,0074x + 0,244   | -                               |  |

**Tabelle 8:** Gleichungen, mit denen die Konzentration der entsprechenden Elemente mithilfedes VRI berechnet werden kann

\* y ist die Konzentration des entsprechenden Elements; x ist der Vorregenindex; blaue Farbe deutet auf die permanente Verdünnung der Konzentrationen im VRI hin; schwarze Gleichungen stehen für die Abnahme und den Wiederanstieg der Konzentrationen

#### 7.5. Vergleich der Spurenelemente auf dem Land

Im Anhang befinden sich in den Tabellen 13, sowie 19 bis 21 alle statistischen Parameter, die auf dem Land gemessen wurden. Trotz großer Variabilität in den gemessenen Konzentrationen fällt auf, dass vor allem an der Station I, an der der Abfluss eines 5,5 km<sup>3</sup> großes, ländlichen Gebiets östlich der Stadt Modi'in gemessen wurde, deutlich höhere Schadstoffkonzentrationen aufwies als auf den anderen ländlichen Gebieten wie auf dem natürlichen Hang oder an der Station J, an der der Abfluss eines natürlichen Teileinzugsgebietes gemessen wurde. Ein Vergleich zwischen einzelnen den Konzentrationen, die auf dem Land sowie in der Stadt gemessen wurden, kann aufgrund der räumlichen und zeitlichen Variabilität nicht durchgeführt werden. Mit Hilfe von Schoeller-Diagrammen und den Trinkwasserstandards soll festgestellt werden, wie stark die Abflüsse auf dem Land mit bestimmten Spurenelementen kontaminiert waren. In den Abbildungen 11.1 bis 11.4 sind Schoeller-Diagramme zu finden, in denen sich die Spurenelemente der Abflusswässer, sowie die Trinkwasserstandards befinden. Folgende Trinkwasserstandards wurden überschritten:

- Station I: Al, Cr, Fe, (Mn), (Ni) und Pb
- Station J: Al, (Fe)
- Natürlicher Hang: Al, (Cr), Fe, (Mn), Ni, Pb
- Karstbrunnen: (Al) \*Hinweis: Elemente in Klammern wurden nur teilweise überschritten.



Abbildung 11.1: Schoeller-Diagramm mit Spurenelementen vom Abfluss an der Station I, sowie Trinkwasserstandards



Abbildung 11.2: Schoeller-Diagramm mit Spurenelementen vom Abfluss an der Station J, sowie Trinkwasserstandards



Abbildung 11.3: Schoeller-Diagramm mit Spurenelementen vom Oberflächenabfluss vom natürlichen Hang, sowie Trinkwasserstandards



Abbildung 11.4: Schoeller-Diagramm mit Spurenelementen aus dem Karstbrunnen, sowie Trinkwasserstandards

#### 7.6. Straßenexperimente

Um den First-Flush-Effekt untersuchen zu können, wurden drei Straßenexperimente durchgeführt. Das erste Straßenexperiment fand am 2. Oktober 2002 statt, also vor dem Das zweite Experiment wurde Beginn der Niederschlagssaison. während der Niederschlagssaison am 13. Januar 2003 durchgeführt und das letzte am 30. September 2003 wieder kurz vor Beginn der Niederschlagssaison. Mit Hilfe von Anreicherungsfaktoren konnte nun festgestellt werden, wie stark diese Wässer kontaminiert waren. Dabei wurden das Verhältnis zwischen den Konzentrationen der Spurenelemente und der entsprechenden Trinkwasserstandards berechnet. In den nachfolgenden Abbildungen 12.1 bis 12.3 sind die Anreicherungsfaktoren aller Spurenelemente dargestellt, zu denen Trinkwasserstandards zur Verfügung standen.

Aus den Diagrammen geht klar hervor, dass in den Abflüssen ein First-Flush-Effekt stattfindet. Im ersten Experiment ist zu sehen, dass beim ersten Versuch Fe und Pb mehr als das 30-fache des jeweiligen Trinkwasserstandards überschritten haben. Auch im zweiten und dritten Versuch wurden beim Fe und Pb mehr als das 10-fache des Trinkwasserstandards gemessen. B, Hg, Mn, Ni und Tl überschritten die Trinkwasserstands vor allem als gelöste Elemente. Beim zweiten Experiment wurden vor allem bei Mo, aber auch bei Fe und Pb deutlich höhere Konzentrationen gemessen, als die Trinkwasserstandards erlauben. Beim dritten Experiment waren die Wässer sehr stark mit Fe, Pb und B kontaminiert. Fe überschritt den Trinkwasserstandard beim ersten Versuch um mehr als das 100-fache. Deutlich stärker wurden die Standards vor allem bei Al überschritten, wie aus der Tabelle 9 hervorgeht.



*Abbildung 12.1*: Anreicherungsfaktoren aller drei Versuche aus dem ersten Experiment vom 2. Oktober 2002



Abbildung 12.2: Anreicherungsfaktoren aller drei Versuche aus dem zweiten Experiment vom 13. Januar 2003



*Abbildung 12.3*: Anreicherungsfaktoren aller drei Versuche aus dem dritten Experiment vom 30. September 2003

| Spülversuch        | 02.10.2002 | 13.01.2003 | 30.09.2003 |
|--------------------|------------|------------|------------|
| 1. Gelöster Gehalt | 16,5       | 3,465      | 18,93      |
| 2. Gelöster Gehalt | 3,05       | 0,25       | 8,33       |
| 3. Gelöster Gehalt | 1,8        | 0,215      | 1,88       |
| 1. Gesamtgehalt    | 215        | 40,23      | 559,94     |
| 2. Gesamtgehalt    | 95         | 26,43      | 164,94     |
| 3. Gesamtgehalt    | 105        | 9,08       | 114,94     |

Tabelle 9: Anreicherungsfaktoren von Al in allen drei Experimenten

# 8. Diskussion

#### 8.1. Qualität der Niederschläge in und um Modi'in

Zur kompletten Qualitätssammlung der Hauptionen gehören neben den Kationen Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  auch die Anionen Cl<sup>-</sup>,  $NO_3^{-}$ ,  $SO_4^{-2-}$  und  $HCO_3^{-}$ . Letzteres musste aus der Ionenbilanz berechnet werden, weil es im Labor nicht analysiert wurde. Ionenbilanzen werden normalerweise herangezogen, um die Analysenergebnisse auf ihre Genauigkeit zu überprüfen. Das hilft, Wasserproben auszuschließen, die den Qualitätsansprüchen nicht genügen. Um die Berechnung der HCO3<sup>-</sup>-Konzentration anhand der Ionenbilanz zu umgehen, sollte diese deshalb mithilfe des pH-Wertes berechnet werden. Der pH-Wert ist ein wichtiger physikalisch-chemischer Parameter, der im Wasser die Löslichkeit vieler Schwermetalle wie Fe, Mn und Al steuert. Mit sinkendem pH-Wert werden diese immer mobiler. Als während der DFG-Forschung zahlreiche Wasserproben gesammelt wurden, wurde der pH-Wert in den Wässern nicht gemessen. Mit Hilfe von Piper-Diagrammen, in denen der Verlauf der Hauptionenkonzentrationen vom Niederschlagswasser über die Oberflächenabflüsse an natürlichen Hängen bis hin zum Wadi untersucht wurde, konnte jedoch festgestellt werden, dass die Wässer immer HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> -reichhaltiger wurden. Dies ist ein eindeutiger Beweis dafür, dass die Niederschläge sauer bzw. kohlensäurehaltig waren, weil sie sonst das HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> aus den Kalksteinen nicht gelöst hätten. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass durch die sauren Niederschlagsabflüsse mehr gelöste Schadstoffe in den Untergrund gelangt waren, als dies bei nahezu pH-neutralem Niederschlagsabfluss geschehen wäre. Dazu gibt es allerdings keine Beweise, da es zum einen keine Messungen dazu gibt, und zum anderen möglicherweise die Abflussgeschwindigkeit und -menge beim Schadstofftransport eine weitaus größere Rolle spielen. Autoren wie ÖZSOY ET AL. (2007) und DEMIRAK ET AL. (2006), die die Niederschläge in der Türkei (Mersin sowie Mugla; beide mediterrane Küstenstädte) qualitativ ausgewertet haben, maßen jeweils einen pH-Wert von 6,22 bzw. 6,9, obwohl sie von einem deutlich niedrigeren pH-Wert (<5,6) und damit sauren Niederschlägen ausgegangen waren. Sie konnten nachweisen, dass die Acidität der Niederschläge aufgrund der staubreichen Atmosphäre durch  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  und  $NH_4^+$  weitgehend neutralisiert wird. Es liegt also nahe, dass auch die Niederschläge in Modi'in vor allem durch Ca<sup>2+</sup> stark neutralisiert werden und somit die Löslichkeit einiger Schwermetalle in Wässern hemmen. Sollten in unmittelbarer Zukunft weitere, vergleichbare Messungen zur Wasserqualität stattfinden, sollten die pH-Werte gemessen werden. Dies sollte berücksichtigt werden, um nicht nur die Frage des damit auch des Mobilitätsverhalten der Löslichkeitsund Schwermetalle Regenwasserabflüssen zu klären, sondern auch, um gesicherte Rückschlüsse bezüglich der HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentration ziehen zu können.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Niederschlagswässer zu Ca-(Na)-HCO<sub>3</sub>-(Cl)- Wässern gehören. Dieser Wassertyp spiegelt auch gleichzeitig die Herkunft der Ionen wieder. Es konnte durch die Meeresbeitrags- sowie Nicht-Meeresbeitragsberechnung ermittelt werden, dass Na<sup>+</sup> und Cl<sup>-</sup> eindeutig aus dem Mittelmeer stammen, während Ca<sup>2+</sup> und HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dem Material aus der Erdkruste (Kalzit) zugeordnet werden. K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> scheinen zum Teil ebenfalls die gleiche Herkunft zu haben, wie Ca<sup>2+</sup> und HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Die Assoziation zwischen  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  und  $HCO_3^{-}$  ist das Gestein Dolomit zurückzuführen, während der Zusammenhang zwischen  $SO_4^{2-}$  und  $Ca^{2+}$  durch den Gipsanteil in der Erdkruste zu erklären ist.  $SO_4^{2-}$  ist aber auch dafür bekannt, dass es durch Umwandlung anthropogener Emissionen (z.B. aus Energieerzeugung durch Verbrennung fossiler Brennstoffe) freigesetzt wird. Nur  $NO_3^{-}$  hat keinen eindeutigen Zusammenhang mit den anderen Hauptionen im Niederschlagswasser gezeigt. Es ist als Umwandlungsprodukt vermutlich auf die Emissionen aus der Energieproduktion, Industrie oder der Landwirtschaft zurückzuführen.

Mit Hilfe der Regressionsanalyse wurde untersucht, wie die Konzentrationen einzelner Hauptionen im Niederschlagswasser mit der bisher gefallenen Niederschlagsmenge, mit der maximalen Niederschlagsintensität und mit den vorherigen trockenen Tagen zusammenhängen. Hierbei werden Ergebnisse in Betracht gezogen, in deren Berechnungen auch der Wasserprobenanteil berücksichtigt wurde, der unter deutlich stärkeren Staubeinträgen (Staubstürme von 29. bis 30.11.2002 sowie 5.02.2003) stand. Da Ca<sup>2+</sup> und K<sup>+</sup> mit zunehmender Niederschlagsmenge kontinuierlich verdünnt werden, könnte das Untersuchungsergebnis darauf hindeuten, dass die beiden Hauptionen grundsätzlich nur durch den Niederschlag aus der Atmosphäre ausgewaschen werden. Mg<sup>2+</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> werden zwar auch mit zunehmender Niederschlagsmenge verdünnt, können sich aber weiterhin durch die trockene Deposition in den Wässern ablagern und dort wieder anreichern. Warum sich HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> nicht wie Ca<sup>2+</sup> in der Niederschlagsmenge verhält, ist unklar, obwohl beide Hauptionen die gleiche Herkunft haben und sich in Bezug auf die maximale Niederschlagsintensität nahezu identisch verhalten. Die Anzahl der vorherigen trockenen Tage, die vor dem gemessenen Niederschlagsereignis zurücklag, wird maßgeblich von den Staubereignissen beeinflusst. Zeigten Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ohne Einfluss von Staubstürmen noch einen guten Zusammenhang mit der Anzahl der vorherigen trockenen Tage, so ist dieser Zusammenhang durch den Einfluss nicht mehr vorhanden. Im ersten Fall haben die drei Hauptionen gezeigt, dass deren Konzentration mit ansteigenden vorherigen Trockentagen exponentiell zunahm. Diese Erkenntnis bestätigt nochmal die Vermutung, dass Mg<sup>2+</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> durch die trockene Deposition abgelagert werden. Das Verhalten von K<sup>+</sup> kann nicht eindeutig geklärt werden, weil es sowohl durch die nasse als auch durch die trockene Deposition in die Niederschlagswässer eingetragen wird. Vermutlich wird  $K^+$  aus zwei unterschiedlichen Quellen in die Atmosphäre eingetragen. Für alle bisher nicht genannten Hauptionen (Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> und NO<sub>3</sub>) dürfte der Einfluss der drei klimatischen Parameter recht komplex sein. Möglicherweise spielen dabei andere, in dieser Untersuchung nicht berücksichtigte, klimatischen Faktoren (z.B. die Stärke der Meeresbrise oder der Anteil an NO<sub>X</sub> in der Atmosphäre und die damit verbundenen Umwandlungsprozesse, die zu NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Gehalten im Niederschlagswasser führen) eine größere Rolle.

Das Niederschlagswasser wurde auch auf Spurenelemente untersucht und mit den Trinkwasserstandards verglichen. Es konnte festgestellt werden, dass die Grenzwert-Konzentrationen von Al und teilweise auch von Fe und Pb bereits im Niederschlagswasser überschritten wurden. Dies deutet darauf hin, dass diese Metalle bereits reichlich als Partikel oder Aerosole in der Atmosphäre vorhanden sind. Ursache dafür ist möglicherweise die metallverarbeitende Industrie sowie Emissionen aus dem Verkehr (z.B. Treibstoffverbrauch vor allem in Bezug auf Pb). Die Herkunft aller gemessenen Spurenelemente im Niederschlag konnte jedoch nicht eindeutig zugeordnet werden, da zu wenige Niederschlagswässer (fünf Proben) analysiert wurden. In diesem Zusammenhang hat sich gezeigt, dass die Niederschlagskonzentration von der Windrichtung beeinflusst wird. Dies geht aus der gemeinsamen Quelle für Ca und Na hervor (siehe Tabelle 7.3), die in Niederschlägen aus hauptsächlich südwestlicher Richtung gemessen wurden.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass im Niederschlagswasser der Stadt besonders vermehrt Spurenelemente wie Al, Cu, Fe, Mn, Si, Ti und Zn vorkommen, während auf dem Land vermehrt Ba, Ca, K, Mg, Na, P, S und Sr im Niederschlag zu finden sind. Diese Verteilung wurde allerdings nur während des Niederschlagsereignisses am 10.12.2002 beobachtet, das insgesamt vom 9. bis 11.12.2002 dauerte. Dabei wurde nahezu keine räumliche und zeitliche Verteilung der Niederschlagsmengen zwischen den drei Messstationen A, B und Mo gemessen. Al, Cu, Fe, Mn und Zn könnten eine verkehrsbedingte Ursache (Treibstoffe, Straßenabrieb, Tropfverluste, Korrosion, Verschleiß) haben, während die Elemente auf dem Land eher einer natürlichen, atmosphärischen Quelle (Partikel aus Mineralen wie Baryt, Kalzit, Dolomit, Strontianit (als Kluftfüllung in Kalksteinen) und Tonmineralen mit K, sowie Na aus der Meeresbrise) oder einer landwirtschaftlichen (P und S in Düngemittelprodukten) zugeordnet werden können. Diese Aufteilung der Spurenelemente zwischen Stadt und Land muss aber durch weitere Messungen bestätigt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Unterschiede aufgrund der klimatischen Inkonsistenz (Niederschlagsintensität, -dauer, Windgeschwindigkeit, Windrichtung) sowie der unterschiedlichen Stärke der anthropogenen Aktivitäten verwischt werden.

# 8.2. Qualität der Regenwasserabflüsse in Modi'in

Ein grober Überblick der Mittelwerte aus der statistischen Analyse hat ergeben, dass Dachabflüsse im Gegensatz zu den Regenwasserabflüssen auf den beiden Straßen (A) und (Z) höhere Konzentrationen vor allem an K, Li, Na, S, Sr und Zn mitführen. Um Konzentrationsveränderungen der Spurenelemente in Wässern vom Niederschlag über die Dächer bis hin zu den Straßen verfolgen zu können, wurden Anreicherungsfaktoren berechnet. Sie sollten Aufschluss darüber geben, ob in den jeweiligen urbanen Abflusswässern eine Verdünnung oder Anreicherung des entsprechenden Elements stattfand. Beim Vergleich der Anreicherungsfaktoren von Probenwässern, die am 24.03.2003 gesammelt wurden, konnte festgestellt werden, dass der Regenwasserabfluss von Dächern gegenüber dem Niederschlag und den Abflusswässern der beiden Straßen vor allem mit Ca, Cr, K, Li, Na, S, Sr, V und Zn angereichert war. Dieses Untersuchungsergebnis lässt zusammen mit der Beobachtung aus der statistischen Analyse darauf schließen, dass K, Li, Na, S, Sr und Zn möglicherweise diejenigen Schadstoffe sind, die hauptsächlich in Dachabflüssen zu finden sind. Erhöhte Konzentrationen von K, Li, Na und Sr sind möglicherweise auf marine Salze zurückzuführen, die gebildet werden, wenn das restliche Wasser auf den flachen Dächern verdunstet. Da bei dieser Untersuchung kein Cl gemessen wurde, kann die Hypothese nicht eindeutig belegt werden. S und Zn könnten sich dagegen aus dem Dachmaterial, dem Asphalt, gelöst haben. Aufgrund der geringen Menge an

Qualitätsdaten zum urbanen Niederschlagswasser kann nicht bestätigt werden, dass die vorhin genannten Spurenelemente tatsächlich nur in Dachabflüssen angereichert sind. Um dies zu verifizieren, sind weitere Messungen nötig, auch auf anderen Dächern innerhalb der Stadt.

Des Weiteren konnte beim Vergleich der Konzentrationsverläufe den in Regenwasserabflüssen auf den beiden Straßen festgestellt werden, dass bis auf Ti keines der gemessenen Spurenelemente eindeutig erhöhte Konzentrationen aufwies, so dass man die Herkunft der Elemente den entsprechenden urbanen Flächen zuordnen könnte. Lediglich Ti scheint besonders in Regenwasserabflüssen auf der Straße (Z) angereichert zu sein. Möglicherweise ist dieses Element auf den Abrieb der Straßenmarkierungsfarbe zurückzuführen (BUWAL, 1996). Allgemein kann daraus geschlossen werden, dass die Konzentrationen aller gemessenen Spurenelemente in Regenwasserabflüssen zeitlich und räumlich sehr variabel sind. Dieses Untersuchungsergebnis kam nicht unerwartet, da, wie aus den Berichten zahlreicher Autoren hervorgeht (siehe Einleitung), eine Vorhersage zur Entstehung der unterschiedlichen Schadstoffe in Regenwasserabflüssen sehr komplex und standortbezogen ist. Zahlreiche Faktoren beeinflussen dabei die Zusammensetzung. Dazu gehören unter anderem die Niederschlagseigenschaften, die Luftqualität, urbane Landnutzungsaktivitäten, Oberflächenbedingung, sowie Straßenverkehrsart und -dichte. Erschwert wird eine eindeutige Aussage durch die geringe Anzahl an Qualitätsdaten, die an den urbanen Flächen pro Niederschlagsereignis gesammelt wurden.

Beim Vergleich der Abhängigkeit der Spurenelemente in Regenwasserabflüssen vom Dach mit der Niederschlagsmenge konnte festgestellt werden, dass Al, B, Ba, Ca, Cu, Mn, S, Si, Sr und V mit zunehmender Niederschlagsmenge permanent verdünnt werden. Ohne den Einfluss der Staubereignisse besteht zwischen der Niederschlagsmenge und den Gesamtgehalten an Al, Ba, Ca und Si kein Zusammenhang, d.h., dass diese Elemente nur in Dachabflüssen zu finden sind. wenn vor oder während der Niederschlagsereignisse deutlich erhöhte Staubkonzentrationen gemessen wurden. Da durch GRODEK ET AL. (2011) sowie LEIBUNDGUT ET AL. (2004) bekannt ist, dass Abflüsse bereits nach 1 mm Niederschlagsfall entstehen können, liegt bei diesem Untersuchungsergebnis nahe, dass alle genannten Spurenelemente zu Beginn der Regenabflüsse vom Dach genau hier am höchsten konzentriert sind. Das bedeutet, dass hierbei möglicherweise mit einen First-Flush-Phänomen zu rechnen ist.

Bei den Spurenelementen von Regenwasserabflüssen auf der Straße (A) konnte ein deutlich anderer Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge beobachtet werden. Die Konzentration der Elemente Al, Ba, Co, Cr, Fe, Li, Mn, Ni, Ti und V nimmt bis zu einer bestimmten Niederschlagsmenge kontinuierlich ab, um dann wieder mit der gleichen Kontinuität anzusteigen. Der Scheitelpunkt, ab dem mit einem Wiederanstieg zu rechnen ist, schwankt zwischen ca. 20 (bei Ni) und 60 mm (bei Co) Niederschlagsmenge. Dieses Verhalten der Elemente ist möglicherweise mit dem Modell (siehe Abbildung 3.3) zu erklären, das von GRODEK ET AL. (2011) erstellt wurde und mit dem erläutert wird, ab welcher Niederschlagsmenge (in Kombination mit dem Abflussbeiwert) mit Beiträgen von Regenwasserabflüssen aus anderen urbanen Flächen wie Dächern, Parkplätzen, öffentlichen Gärten und natürlichen Gegenden zu rechnen ist. Zudem deuten die verschiedenen Scheitelpunkte der Spurenelemente darauf hin, dass alle ein unterschiedliches Mobilitätsverhalten aufweisen.

Obwohl an der Station M deutlich mehr Proben gesammelt wurden, konnte das gleiche Verhaltensmuster wie auf der Straße (A) nur bei den Elementen Co, P und Si festgestellt werden. Nur bei S hat sich dagegen erwiesen, dass mit zunehmender Niederschlagsmenge eine permanente, exponentielle Abnahme stattfindet. In diesem Fall bestätigt sich abermals, wie komplex und standortbezogen das Aufkommen der unterschiedlichen Spurenelemente im Regenwasserabfluss ist, da gleiche Messungen an zwei unterschiedlichen Standorten innerhalb von Modi'in zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Der Vorregenindex ist ein Maß für die Schätzung der Größe der Abflussbildung. Er wurde herangezogen, weil der Abfluss im Rahmen der DFG- Forschung bis auf die Stationen I, M und J an den entsprechenden urbanen Flächen nicht gemessen wurde. Bei der Regressionsanalyse stellte sich heraus, dass sowohl an der Straße (A) als auch an der Station M identische Zusammenhänge zwischen den Elementen Al, Ba, Cr, Fe, K, Li, Mn, P, Ti, sowie V und dem Vorregenindex bestehen. Demnach nehmen all diese Elemente mit zunehmendem Vorregenindex bis zu einem bestimmten Grenzwert ab. Ab da steigen die Konzentrationen mit der gleichen Kontinuität wieder an. Der Grenzwert schwankt hinsichtlich des Vorregenindexes zwischen ca. 22 mm für Ti und ca. 32 mm für P. Ein ähnlicher Konzentrationsverlauf trat bereits bei der Untersuchung der Spurenelemente bezüglich der Niederschlagsmenge auf der Straße (A) auf. Vermutlich, wie bereits erwähnt, spielt dabei der zusätzliche Abflussbeitrag aus anderen urbanen Flächen eine entscheidende Rolle. Da für die Elemente Al, Ba, Co, Cr, Fe, Li, Mn, Ni, Ti und V, die im Regenwasserabfluss der Straße (A) gemessen wurden, zwei ähnliche Untersuchungsergebnisse vorliegen, kann nun mithilfe der ermittelten quadratischen Funktionen vorhergesagt werden, welche Konzentrationen der entsprechenden Spurenelemente im Abfluss zu erwarten sind. Ähnliche Ergebnisse liegen für die Station M nur für die Elemente P und Si vor. Zwar zeigen die anderen Elemente eine deutliche Abhängigkeit mit dem Vorregenindex, aber nicht mit der Niederschlagsmenge. Es scheint, als würden an der Station M, an der der urbane Abfluss zusammen mit dem Abfluss von der Station I gemessen wurde, deutlich komplexere Zusammenhänge bestehen, so dass möglicherweise bis auf P und Si keine weiteren Vorhersagen zu den Konzentrationsmengen der anderen Spurenelemente gemacht werden können.

Des Weiteren wurde für die Elemente Ca und S an beiden urbanen Standorten eine permanente Konzentrationsabnahme mit zunehmenden Vorregenindex festgestellt. An der Straße (A) gehören dazu noch die Elemente B, Mg und Na. Zu diesem Konzentrationsverlauf kann keine plausible Erklärung gefunden werden, denn eigentlich müssten sich diese Elemente bei zusätzlichen Abflussbeiträgen aus weiteren urbanen Flächen genau wie Al, Ba, Co, Cr, Fe, Li, Mn, Ni, Ti und V verhalten. Möglicherweise beschränken sich diese Elemente in ihrem Vorkommen nur auf bestimmte Flächen.

Beim Vergleich der Trinkwasserstandards mit den entsprechenden Spurenelementen in Regenwasserabflüssen an allen gemessenen urbanen Flächen (Dächer, beide Straßen, Parkplatz sowie Station M) wurde folgende Beobachtung gemacht: Während der gesamten Wintersaison 2002/2003 wurden in allen gemessenen Regenwasserabflüssen der Stadt die Trinkwasserstandards von Al, Fe und Pb überschritten. Diese Elemente befanden sich bereits in überhöhten Konzentrationen im Niederschlagswasser. Laut EAA (2001) wurde der Grenzwert für Gesamt-Aluminium im Trinkwasser im Wesentlichen aus optischen und geschmacklichen Gründen festgelegt. Seitens der US-EPA wurden diesbezüglich keinerlei gesundheitsrelevante Kriterien angeführt. Auch der Grenzwert von 1 mg/L Eisengehalten im Trinkwasser wurde aus ästhetischen Gründen festgelegt. Für den Menschen ist eine Eisengehaltaufnahme erst ab 200 mg gesundheitsschädlich. Wird der Trinkwasserstandard von Pb überschritten, so kann dies bei Kindern zur Anämie und Gehirnschäden, sowie bei Erwachsenen zu Nierenproblemen und hohem Blutdruck führen (Gray, 2008). Aus diesem Grund ist nur der Gehalt an Pb in den Regenwasserabflüssen mit Besorgnis zu betrachten. Möglicherweise ist er auf verkehrsbedingte Emissionen zurückzuführen. Traten Staubstürme auf, so wurden bei Al, Fe und Pb deutlich höhere Konzentrationen gemessen als sonst. Zudem wurden die Trinkwasserstandards von hauptsächlich Cr und Mn überschritten. Letzteres ist laut US-EPA (in Gray, 2008) gesundheitlich unbedenklich, da der Grenzwert aus den gleichen Gründen wie bei Al und Fe festgesetzt wurde. Cr kann beim Überschreiten des Standards im Trinkwasser zu allergischen Hautentzündungen führen.

Um das First-Flush-Phänomen zu untersuchen, wurden drei Straßenexperimente mit jeweils drei Versuchen durchgeführt. Beim ersten Experiment wurde in allen drei Versuchen deutlich, dass vor allem Fe und Pb bezüglich ihrer Gesamtgehalte mehr als das 10-fache des zulässigen Gehalts im Trinkwasser überschritten haben. B, Hg, Mn, Ni und Tl überschritten die Trinkwasserstandards vor allem als gelöste Elemente. Für B sind keine gesundheitlichen Schäden an Menschen bekannt, aber bei erhöhten Konzentrationen (10 bis 300 mg/L) in Gewässern kann eine Toxizität für verschiedene Fische vorliegen. Laut US-EPA können erhöhte Hg-Konzentrationen zu Nieren- und Leberschäden führen, die sich tödlich auswirken können. Bei Mo besteht eine Toxizität erst bei mehr als 100 mg pro Kilogramm Körpergewicht. Dabei kann mit Durchfall, Anämie und erhöhter Harnsäure gerechnet werden. Bei Ni wird als größtes Risiko die Perinatralsterblichkeit angenommen. Erhöhte Tl-Konzentration im Trinkwasser führen zu Nieren-, Leber- oder Darmproblemen (Gray, 2008). Beim zweiten Experiment wurden überhöhte Konzentrationen nur bei Fe, Mo und Pb Das dritte Experiment übertraf das erste beim Überschreiten der gemessen. Trinkwasserstandards vor allem bezüglich der Elemente B, Fe und Pb um das 2- bis 3-fache. Dermaßen hohe Konzentrationen wurden in den gemessenen Regenwasserabflüssen nicht gemessen. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass vor allem zur Beginn der Niederschlagssaison mit First-Flush zu rechnen ist.

# 8.3. Qualität der Regenwasserabflüsse um Modi'in

Aufgrund der wenigen Beprobungen der Regenwasserabflüsse in den ländlichen Gebieten außerhalb der Stadt und aufgrund der starken räumlichen und zeitlichen Variabilität der vorkommenden Spurenelemente in den Abflüssen ist ein Vergleich der Spurenelement-Konzentrationen mit denen in der Stadt nicht möglich. In diesem Zusammenhang wurde nur untersucht, ob die ländlichen Regenwasserabflüsse bestimmte Trinkwasserstandards überschreiten. In Betracht gezogen wurden dabei die Station I, Station J sowie der natürliche Hang, an dem STEINMANN (2010) Untersuchungen zu hydrologischen Prozessen durchgeführt hat. Es konnte festgestellt werden, dass an der Station I und am natürlichen Hang neben Al, Fe und Pb auch teilweise überhöhte Cr-, Mn- und Ni-Konzentrationen gemessen wurden, obwohl sich diese Standorte jeweils auf der anderen Seite der Stadt befanden. An der Station J konnten keine Gefahr in den Regenwasserabflüssen festgestellt werden. Im Karstbrunnen, der sich ca. 10 km weiter östlich der Stadt befand, wurden nur zwei Wasserproben gemessen. Sie haben keine Verschmutzung angezeigt. Viel bedeutender wäre es, wenn eine Karstquelle beprobt wird, die sich in unmittelbarer Nähe oder unter der Stadt selber befindet, so wie es in Ramallah der Fall ist. Dort konnte festgestellt werden, dass eine Quelle, die einen lokalen Aquifer unterhalb dieser Stadt entwässert, mehr oder weniger auf direktem Wege mit dem Oberflächenabfluss reagiert und deshalb stärkere Verschmutzungen aufwies, als andere, weiter entfernte Quellen.

# 9. Schlussfolgerung

# 10. Referenzen

- Ali, S., Ghosh, N.C. & Singh, R. (2010): Rainfall-runoff simulation using a normalized antecedent precipitation index. Hydrological Sciences Journal, 55, 2, pp. 266-274.
- Alpert, P. & Ganor, E. (1993): A jet stream associated heavy dust storm in the Western Mediterranean. Journal of Geophysical Research, 98, D4, pp. 7339-7349.
- Asaf, L., Nativ, R., Shain, D., Hassan, M. & Geyer, S. (2004): Controls on the chemical and isotopic compositions of urban stormwater in a semiarid zone. Journal of Hydrology, 294, pp. 270-293.
- Bähr, J. (2008) : Ursachen der Urbanisierung. URL: http://www.berlininstitut.org/fileadmin/user\_upload/handbuch\_texte/pdf\_Baehr\_Ursachen\_Urbanisierun g.pdf. Letzter Stand: 3.Oktober 2011
- Benzonic, L.P. & Stadelmann, H.T. (2002): Analysis and predictive models of stormwater runoff volume, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA. Water Research, 36, pp. 1743-1757.
- Bibas, H. (ohne Jahresangabe, vermutlich 2010): Modi'in-Maccabim-Re'ut. URL: http://www.modiin.muni.il/ModiinWebSite/GlobalFiles/010020100104120733.pdf
- BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtsschaft (1996): Gewässerschutzmaßnahmen beim Straßenbau. Grundlagenbericht, Schriftenreihe Umwelt Nr. 263, Bern, pp. 29-61.
- Ceballos, A. & Schnabel, S. (1998): Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Exremadura, SW Spain). Journal of Hydrology, 210, pp. 146-160.
- Chang, M., McBroom, M. & Beasley, R.S. (2004): Roofing as a source of nonpoint water pollution. Journal of Environmental Management, 73, pp. 307-315.
- Chebbo, G. & Gromaire, M.C. (2004): The experimental urban catchment 'Le Marais' in Paris: what lesson con be learned from it?. Journal of Hydrology, 299, pp. 312-323.
- Chiew, F., Duncan, H., Wong, T. & McMahon, T. (2001): Urban Stormwater Pollution. In Maksimovic, C. (chief editor): Urban drainage in specific climate, IHP Technical Document in Hydrology, Vol.3, 40, pp. 75-87.

- Deletic, A. (1998): The first flush load of urban surface runoff. Water Research, Vol. 32, No. 8, pp. 2462-2470.
- Demirak, A., Balci, A., Karaoglu, H. & Tosmur, B. (2006): Chemical Characteristics of rain water ant an urban site of south western Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 123, pp. 271-283.
- Dierkes, C., Göbel, P. & Coldeway, W. (2005): Entwicklung und Optimierung eines kombinierten unterirdischen Reinigungs- und Versickerungssystems für Regenwasser. Abschlussbericht gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter Az. 18622, Münster, pp. 13-20.
- EAA, European Aluminium Assoziation (2001): Aluminium und Gesundheit -Aluminiumverbindungen in der Trinkwasseraufbereitung. URL: http://www.alu.ch/download/gesundheit/trinkwasser.pdf. Letzter Stand: 20.11.2011.
- Fedora, M.A. & Beschta, R.L. (1989): storm runoff simulation using antecedent precipitation index (API) model. Journal of Hydrology, 112, pp. 121-133.
- Förster, J. (1996): Pattern of roof runoff contamination and their potential implications on practice and regulation of treatment and local infiltration. Water Science and Technology, Vol. 33, 6, pp. 39-48.
- Förster, J. (1998): The influence of location and season on the concentrations of macroions and organic trace pollutants in roof runoff. Water Science and Technology, Vol. 38, 10, pp. 83-99.
- Förster, J. (1999): Variability of roof runoff quality. Water Science and Technology, Vol. 39, 5, pp. 137-144.
- Ganor, E. & Foner, H.A. (1996): The mineralogical and chemical properties and the behaviour of Aeolian Saharan Dust over Israel. Zu finden in Guerzoni & Chester (1996), pp. 163-172.
- Ganor, E., Foner, H.A., Brenner, S., Neeman, E. & Lavi, N. (1991): The chemical composition of aerosols settling in Israel following dust storms. Atmospheric Environment, Vol. 25, No. 12, pp. 2665-2670.
- Ganor, E. & Mamane, Y. (1982): Transport of Saharan Dust across the Eastern Mediterranean. Atmospheric Environment, Vol. 16, No. 3, pp. 581-587.

- Gantner, K. (2002): Nachhaltigkeit urbaner Regenwasserbewirtschaftungsmethoden. Dissertation zur Erlangung des akademischen Doktor-Grades, Technische Universität Berlin, Fakultät III – Prozesswissenschaften, pp. 77-92.
- Geiger, W. (1987): Flushing effects in combined sewer systems. Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Lausanne, Switzerland, pp. 40-46.
- Goldreich, Y. (2003): The Climate of Israel Observation, Research and Application. Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York, S. 12-151.
- Goudie, A.S. (2008): Dust storms: Recent developments. Journal of Environmental Management, 90, pp. 89-94.
- Gray, N.F. (2008): Drinking Water Quality Second Edition. Cambridge University Press, United Kingdom, pp. 469-495.
- Grodek, T., Lange, J., Lekach, J. & Husary, S. (2011): Urban hydrology in mountainous middle eastern cities. Hydrology and Earth System Sciences, 15, pp. 953–966.
- Guerzoni, S. & Chester, R. (1996): The impact of Desert Dust Across the Mediterranean. Kluwer Academic Puplishers, Netherlands, xi.
- Gupta, K. & Saul, A.J. (1996): Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. Water Research, 30, pp. 1244-1252.
- Hassan, M.A., Shahin, K., Klinkenberg, B, McIntyre, G, Diabat, M., Tamimi, A. & Nativ, R. (2010): Palestinian Water II: Climate Change and Land Use. Geography Compass, 4(2), pp. 139-157.
- Hintermaier-Erhard, G. & Zech, W. (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, ISBN: 3-342-29971-0.
- Hütter, U. & Remmler, F. (1997): Möglichkeiten und Grenzen der Versickerung von Niederschlagsabflüssen in Wasserschutzgebieten. Veröffentlichung des Instituts für Wasserforschung GmbH Dortmund und der Dortmunder Energie- und Wasserversorgung GmbH, Nr. 54a, Dortmund.
- Israel Central Bureau of Statistics (2010): URL: http://www.cbs.gov.il/population/new\_2010/table3.pdf. Letzter Stand: 18.10.2011.

Jaffe, S. (1977): Meteorology and energy crisis. Meteorologia BeIsrael, 13(2), pp. 37-38.
- Karmon, N. & Shamir, U. (1997): Water-Sensitive Urban Planning: Protecting the Coastal Plain Aquifer. The Center for Urban and Regional Research, Technion, Haifa (in Hebrew).
- Khavich, V. & Ben-Zvi, A. (1995): Flash flood forecasting model for the Ayalon stream, Israel. Hydrological Science Journal, 40, pp. 599-613.
- Lange, J., Greenbaum, N., Husary, S., Ghanem, M., Leibundgut, CH., Schick, A.P. (2003a): Runoff generation from successive simulated rainfalls on a rocky, semi-arid, Mediterranean hillslope. Hydrological Processes, Volume 17, Issue 2, pp. 279-296.
- Lange, J., Greenbaum, N., Husary, S., Timmer, J., Leibundgut, Ch. & Schick, A.P. (2003b): Tracers for runoff generation in a Mediterranean region: comparison of different scals. IAHS, Publ. No. 278, pp. 117-123.
- Lee, J.H., Bang, K.W., Ketchum, L.H., Choe, J.S. & Yu, M.J. (2002): First flush analysis of urban storm runoff. The Science of the Total Environment, 293, pp. 163-175.
- Leibundgut, Ch., Lange, J., Husary, S., Ghanem, M., Tamimi, A., Grodek, T., Lekach, J., Shahin, K. & Schick, A. (2004): The impact of urbanisation in integrated drainage basin hydrology and water resources, West Bank and Israel. Abschlussprojekt des DFG, Code LE 698/10-1-3.
- Lenntech (2005): Composition of Seawater. URL: http://www.lenntech.com/composition-seawater.htm. Letzter Stand: 30. Juli 2011.
- Levin, Z., Ganor, E. & Gladstein, V. (1995): The effects of desert particles with sulphate on rain formation in the Eastern Mediterranean. Journal of Applied Meteorology, 35, pp. 1511-1523.
- Lye, D.J. (2009): Rooftop runoff as a source of contamination: A review. Science of the Total Environment, 407, pp. 5429-5434.
- Maniak, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Springer Verlag, Berlin, pp. 295-303.
- Marsalek, J., Jimenez-Cisneros, B.E., Malmquist, P.-A., Karamouz, M., Goldenfum, J. & Chocat, B. (2006): Urban water cycle processes and interactions. UNESCO, IHP-VI, Technical Documents in Hydrology, Paris, No. 78, pp. 1-81.
- Martinez-Mena, M., Albaladejo, J. & Castillo, V.M. (1998): Factors influencing surface runoff generation in a Mediterranean semi-arid environment: Chicamo watershed, SE Spain. Hydrological Processes 12, pp. 741-754.

- Matthess, G. (1994): Die Beschaffenheit des Grundwassers Lehrbuch der Hydrogeologie, Band 2. Gebrüder Borntraeger, Berlin; Stuttgart, pp. 73-410.
- MH (2000): State of Israel. Ministry of Health. Public Health Services. Environmental Health Division: Public Health Regulations (Sanitary Quality of Drinking Water), 1974 – Consolidated Version, 2000. URL: http://www.health.gov.il/download/forms/a205\_israeli\_drinking\_water\_reguations.doc Letzter Stand: 9.Juli 2011.
- Mikkelsen, P.S., Weyer, G., Berry, C., Walden, J., Colandini, V., Poulsen, S., Grothehusmann, D. & Rolfing, R. (1994): Pollution from urban stormwater infiltration. Water Science and Technology, Vol. 29, 293-302.
- Mimi, Z. (2009): Spatial analysis of urban stormwater quality: Ramallah district as a case study, Palestine. Water and Environment Journal, Vol 23; pp. 128-133.
- Offer, Z.Y & Goossens, D. (2001): Ten years of aeolian dust dynamics in a desert region (Negev desert, Israel): analysis of airborne dust concentration, dust accumulation and the high-magnitude dust events. Journal of Arid Environments, 47, pp. 211-249.
- Özsoy, T., Türker, P. & Örnektekin, S. (2008): Precipitation Chemistry as an Indicator of Urban Air Quality in Mersin, North-Eastern Mediterranean Region. Springer Science + Business Media, DOI 10.1007/s11270-007-9557-z, pp. 69-83.
- Polkowska, Ż., Grynkiewicz, M., Zabiegała, B. & Namieśnik, J. (2001): Levels of Pollutants in Runoff Water from Roads with High Traffic Intensity in the City of Gdańsk, Poland. Polish Journal of Environmental Studies, 10, 5, pp. 351-363.
- Porto, M. (2001): Water quality aspects of urban runoff. In Maksimovic, C. (chief editor): Urban drainage in specific climate, IHP Technical Document in Hydrology, Vol.1, 40, pp. 109-128.
- Potchter, O. & Sa'aroni, H. (1998): Revision of Köppen's climatic region of Israel. Stud.Geog.Isr, 15, pp. 174-179.
- Press, F. & Siever, R. (2003): Allgemeine Geologie Einführung in das System Erde. Spektrum Akademischer Verlag, München, S. 317-320.
- Puigdefabregas J., del Barrio G., Boer M.M., Gutierrez L. & Sole A. (1998): Differential responses of hillslope and channel elements to rainfall events in a semi-arid area. Geomorphology 23, pp. 337–351.

- Rahn, K.A., Borys, R.D., Shaw, G.E. & Schütz, L. (1979): Long-range impact of desert aerosol on atmospheric chemistry: two examples. Zu finden in C.Morales, *Scope 14: Saharan Dust (Mobilization, Transport, Deposition)*, John Wiley and Sons, Chichester, pp. 243-266.
- Saget, A., Chebbo, G. & Bertrand-Krajewski, J.L., (1995): The first flush in sewer system. Proc. Int. Conf. on Sewer Solids-Characteristics, Movement, Effects and Control, Dundee, U.K., pp. 58-65.
- Sansalone, J.J & Buchberger, S.G. (1997): Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. Journal of Environment Engineering, Vol. 123, No. 2, pp. 134-143.
- Sansalone, J.J. & Glenn, D.W. (2000): Temporal variations in heavy metal partitioning and loading in urban highway pavement sheet flow implications for in situ treatment design. Roadside Safety Features and Hydraulic, Hydrology, and Water Quality Issues, pp. 100-111.
- Schütz, T. (2006): Prozessbasierte Niederschlags-Abflussmodellierung in einem mediterranen Kleineinzugsgebiet Wadi Anabe, Israel. Diplomarbeit, Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs Universität Freiburg i. Br., pp. 1-121.
- Sharon, D. & Kutiel, H. (1986): The distribution of rainfall intensity in Israel, its regional and seasonal variations and its climatological evaluation. J. Climatol, 6(3), pp. 277–291.
- Steinmann, A. (2010): Runoff generation in Mediterranean areas. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Forst- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Albert Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., pp. 1-159.
- Stephenson, J.B., Zhou, W.F., Beck, B.F. & Green, T.S. (1999): Highway stormwater runoff in karst areas – preliminary results of baseline monitoring and design of treatment system for a sinkhole in Knoxville, Tennessee. Engineering Geology, 52, pp. 51-59.
- Survey of Israel (1970): Atlas of Israel. Ministry of Labour, State of Israel. Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- Tuncel, G. & Ungör, S. (1996): Rain water chemistry in Ankara, Turkey. Atmospheric Environment, 35, pp. 5989-6002.
- UN-Bericht (2009): World Urbanization Prospects: The 2009 Revision. URL: http://esa.un.org/unpd/wup/index.htm: Letzter Stand: 3. Oktober 2011.

- Vaze, J. & Chiew, F.H.S. (2002): Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface. Urban Water, 4, pp. 379-389.
- Wall, S.M., John, W. & Ondo, J.L. (1988): Meridional distribution of hydroperoxides and formaldehydride in marine boundary layer of the Atlantic (48°N-35°S) measured during Albatros campaign.Journa l of Geophysical Research, 105, pp. 14401-14412.
- Weinberger, G., Rosenthal, E., Ben-Zvi, A. & Zeitoun, D. G. (1994): The Yarkon-Taninim groundwater basin, Israel hydrogeology: case study and critical review. Journal of Hydrogy, 161, 227–255.
- Xu, H., Bi, X.-H., Feng, Y.-Ch., Lin, F.-M., Jiao, L., Hong, Sh.-M., Liu, W.-G. & Zhang, X.-Y. (2011): Chemical composition of precipitation and its sources in Hangzhou, China. Springer Science + Business Media, DOI 10.1007/s10661-011-1963-4.
- Yaalon, D.H. & Ganor, E. (1979): East Mediterranean trajectories of dust-carrying storms form the Sahara and Sinai. Scope 14: Saharan Dust (Mobilization, Transport, Deposition) (edited by Morales C.), John Wiley, Chichester, pp. 187-193.

## 11. Anhang

**Tabelle 10**: Statistische Zusammenfassung der Hauptionen aus Niederschlagswasser im<br/>naturbelassenen Wadi

| 33          | mg/L                  | Median | Mittelwert | *SD   | VK [%] | Minimum | Maximum | Anzahl |
|-------------|-----------------------|--------|------------|-------|--------|---------|---------|--------|
| 200         | Ca                    | 18,35  | 22,81      | 15,74 | 69,01  | 4,33    | 68,47   | 81     |
| 02/         | Mg                    | 1,52   | 1,62       | 0,98  | 60,54  | 0,21    | 6,24    | 81     |
| 20          | Na                    | 6,94   | 7,80       | 3,75  | 48,12  | 0,52    | 18,12   | 81     |
| o           | K                     | 0,85   | 1,24       | 1,34  | 107,66 | 0,13    | 9,09    | 81     |
| ais         | HCO <sub>3</sub> ber. | 54,02  | 64,15      | 47,15 | 73,50  | 11,52   | 195,81  | 81     |
| ers         | CI                    | 11,88  | 12,87      | 7,82  | 60,77  | 0,92    | 37,25   | 81     |
| /int        | $SO_4$                | 5,95   | 7,59       | 4,99  | 65,76  | 0,54    | 24,84   | 81     |
| 5           | $NO_3$                | 3,04   | 4,32       | 4,54  | 104,96 | 0,04    | 24,83   | 81     |
|             | Са                    | 34,33  | 38,18      | 17,95 | 47,02  | 16,98   | 68,47   | 26     |
| 02          | Mg                    | 2,29   | 2,57       | 1,03  | 39,94  | 1,26    | 6,24    | 26     |
| 20          | Na                    | 10,57  | 10,07      | 3,51  | 34,85  | 4,94    | 18,12   | 26     |
| ber         | ĸ                     | 1,83   | 2,43       | 1,82  | 74,84  | 0,89    | 9,09    | 26     |
| lme         | HCO <sub>3</sub> ber. | 85,40  | 107,33     | 57,00 | 53,11  | 17,49   | 195,81  | 26     |
| Ň           | CI                    | 18,15  | 16,94      | 7,65  | 45,14  | 3,84    | 37,25   | 26     |
| Z           | $SO_4$                | 10,72  | 12,46      | 5,28  | 42,35  | 6,31    | 24,84   | 26     |
|             | $NO_3$                | 6,46   | 7,45       | 6,48  | 86,93  | 0,04    | 24,83   | 26     |
|             | Ca                    | 13,93  | 15,14      | 7,29  | 48,19  | 5,64    | 33,51   | 25     |
| 2           | Mg                    | 1,06   | 1,07       | 0,43  | 40,50  | 0,38    | 2,38    | 25     |
| 200         | Na                    | 6,47   | 6,09       | 2,06  | 33,77  | 2,16    | 10,21   | 25     |
| er          | K                     | 0,61   | 0,71       | 0,39  | 54,90  | 0,17    | 1,89    | 25     |
| dm          | HCO₃ ber.             | 41,48  | 44,44      | 23,00 | 51,75  | 15,15   | 105,34  | 25     |
| eze         | CI                    | 11,50  | 9,71       | 3,88  | 39,89  | 1,78    | 15,47   | 25     |
| ݣ           | $SO_4$                | 4,51   | 4,58       | 1,72  | 37,66  | 0,54    | 9,12    | 25     |
|             | NO <sub>3</sub>       | 1,52   | 1,77       | 1,15  | 65,12  | 0,33    | 5,46    | 25     |
|             | Ca                    | 16,00  | 16,40      | 8,11  | 49,44  | 4,33    | 35,59   | 15     |
|             | Mg                    | 1,62   | 1,44       | 0,76  | 52,74  | 0,21    | 2,77    | 15     |
| 03          | Na                    | 9,32   | 8,17       | 5,39  | 65,97  | 0,52    | 16,92   | 15     |
| r 2(        | K                     | 0,73   | 0,73       | 0,40  | 54,26  | 0,13    | 1,51    | 15     |
| Iua         | HCO₃ ber.             | 41,48  | 44,49      | 22,48 | 50,53  | 11,52   | 93,00   | 15     |
| Jar         | CI                    | 17,67  | 13,07      | 11,86 | 90,78  | 0,92    | 31,25   | 15     |
| •           | $SO_4$                | 8,73   | 6,73       | 4,49  | 66,74  | 1,94    | 14,66   | 15     |
|             | NO <sub>3</sub>       | 3,63   | 4,50       | 2,66  | 59,03  | 1,06    | 10,37   | 15     |
|             | Ca                    | 14,52  | 16,75      | 7,53  | 44,94  | 7,11    | 28,97   | 15     |
|             | Mg                    | 0,99   | 1,15       | 0,47  | 40,45  | 0,64    | 1,86    | 15     |
| <b>J</b> 03 | Na                    | 6,18   | 6,83       | 2,51  | 36,73  | 3,89    | 11,21   | 15     |
| r 2(        | K                     | 0,55   | 0,65       | 0,28  | 44,13  | 0,28    | 1,16    | 15     |
| rua         | HCO3 ber.             | 41,74  | 46,72      | 24,47 | 52,38  | 13,85   | 83,74   | 15     |
| -eb         | CI                    | 8,65   | 11,30      | 5,22  | 46,17  | 6,83    | 22,18   | 15     |
|             | $SO_4$                | 5,17   | 5,29       | 0,81  | 15,37  | 3,72    | 6,98    | 15     |
|             | NO3                   | 3,20   | 3,05       | 1,31  | 43,13  | 0,82    | 4,92    | 15     |

| 33   | mg/L                  | Median | Mittelwert | *SD   | VK [%] | Minimum | Maximum | Anzahl |
|------|-----------------------|--------|------------|-------|--------|---------|---------|--------|
| 200  | Ca                    | 41,96  | 43,76      | 15,50 | 35,43  | 13,92   | 73,21   | 25     |
| 02/  | Mg                    | 2,86   | 2,81       | 0,96  | 34,26  | 1,09    | 5,02    | 25     |
| 20   | Na                    | 9,66   | 9,75       | 2,88  | 29,58  | 5,66    | 16,47   | 25     |
| uo   | K                     | 2,18   | 2,46       | 1,13  | 45,84  | 0,99    | 6,21    | 25     |
| ais  | HCO <sub>3</sub> ber. | 145,54 | 146,53     | 53,27 | 36,35  | 46,14   | 270,95  | 25     |
| ers  | CI                    | 7,72   | 9,90       | 6,24  | 63,03  | 1,88    | 26,55   | 25     |
| /int | $SO_4$                | 5,72   | 7,53       | 5,14  | 68,30  | 2,17    | 22,61   | 25     |
| S    | $NO_3$                | 2,51   | 3,95       | 6,06  | 153,30 | 0,16    | 31,13   | 25     |
|      | Ca                    | 54,19  | 50,59      | 10,42 | 20,59  | 33,98   | 60,71   | 6      |
| 02   | Mg                    | 3,27   | 3,44       | 0,54  | 15,59  | 2,86    | 4,24    | 6      |
| 20   | Na                    | 12,71  | 11,96      | 1,69  | 14,15  | 9,17    | 13,55   | 6      |
| Jer  | ĸ                     | 3,32   | 3,06       | 0,70  | 22,88  | 1,95    | 3,77    | 6      |
| amk  | HCO <sub>3</sub> ber. | 154,70 | 159,78     | 45,89 | 28,72  | 84,00   | 208,94  | 6      |
| eze  | CI                    | 10,33  | 14,44      | 9,09  | 62,96  | 6,60    | 26,55   | 6      |
| Δ    | $SO_4$                | 10,41  | 10,86      | 6,25  | 57,59  | 4,00    | 17,67   | 6      |
|      | NO <sub>3</sub>       | 4,22   | 9,50       | 10,91 | 114,92 | 3,39    | 31,13   | 6      |
|      | Ca                    | 35,88  | 39,35      | 13,80 | 35,08  | 13,92   | 59,31   | 11     |
| ~    | Mg                    | 2,45   | 2,58       | 0,77  | 29,99  | 1,09    | 3,63    | 11     |
| ő    | Na                    | 8,56   | 9,06       | 2,27  | 25,04  | 5,74    | 14,16   | 11     |
| ar 2 | ĸ                     | 2,18   | 2,15       | 0,85  | 39,43  | 0,99    | 3,27    | 11     |
| nua  | HCO <sub>3</sub> ber. | 127,60 | 135,03     | 45,59 | 33,76  | 46,14   | 196,51  | 11     |
| Jai  | CI                    | 7,59   | 8,10       | 4,80  | 59,19  | 1,88    | 19,35   | 11     |
|      | $SO_4$                | 5,46   | 6,85       | 5,45  | 79,51  | 2,17    | 22,61   | 11     |
|      | NO <sub>3</sub>       | 2,50   | 2,49       | 1,77  | 71,07  | 0,16    | 6,34    | 11     |
|      | Ca                    | 32,46  | 40,64      | 17,75 | 43,69  | 20,36   | 71,09   | 7      |
|      | Mg                    | 2,35   | 2,33       | 0,95  | 40,84  | 1,26    | 3,66    | 7      |
| 03   | Na                    | 7,18   | 7,97       | 2,31  | 28,93  | 5,66    | 11,11   | 7      |
| r 20 | К                     | 1,79   | 1,88       | 0,45  | 23,98  | 1,43    | 2,69    | 7      |
| rua  | HCO <sub>3</sub> ber. | 120,61 | 135,48     | 54,70 | 40,37  | 70,00   | 216,51  | 7      |
| Febr | CI                    | 7,46   | 8,62       | 4,44  | 51,53  | 4,23    | 16,80   | 7      |
| -    | $SO_4$                | 4,48   | 5,92       | 2,92  | 49,23  | 3,32    | 11,20   | 7      |
|      | NO <sub>3</sub>       | 1,11   | 1,63       | 1,11  | 67,87  | 0,58    | 3,66    | 7      |

**Tabelle 11**: Statistische Zusammenfassung der Hauptionen aus dem Oberflächenabfluss derHänge im naturbelassenen Wadi

| 33    | mg/L                  | Median | Mittelwert | *SD   | VK [%] | Minimum | Maximum | Anzahl |
|-------|-----------------------|--------|------------|-------|--------|---------|---------|--------|
| /20(  | Ca                    | 48,42  | 46,48      | 6,76  | 14,53  | 32,11   | 59,25   | 43     |
| 02/   | Mg                    | 3,97   | 3,93       | 0,77  | 19,62  | 2,61    | 5,39    | 43     |
| 20    | Na                    | 10,42  | 10,42      | 1,54  | 14,81  | 6,85    | 14,60   | 43     |
| noi   | K                     | 3,35   | 3,25       | 0,46  | 14,17  | 1,83    | 3,96    | 43     |
| sais  | $HCO_3$ ber.          | 186,22 | 173,92     | 29,22 | 16,80  | 89,57   | 228,87  | 43     |
| ers   | CI                    | 6,68   | 7,01       | 4,45  | 63,46  | 1,49    | 28,01   | 43     |
| /int  | $SO_4$                | 5,01   | 5,46       | 3,55  | 64,92  | 0,83    | 17,51   | 43     |
| S     | NO <sub>3</sub>       | 0,57   | 1,00       | 1,84  | 185,21 | 0,18    | 12,08   | 43     |
|       | Са                    | 34,20  | 35,05      | 2,43  | 6,93   | 33,16   | 37,79   | 3      |
| 02    | Mg                    | 2,65   | 2,75       | 0,21  | 7,79   | 2,61    | 3,00    | 3      |
| 20    | Na                    | 9,56   | 9,60       | 0,77  | 8,03   | 8,85    | 10,39   | 3      |
| ber   | K                     | 3,19   | 3,28       | 0,29  | 8,71   | 3,05    | 3,60    | 3      |
| ant a | $HCO_3$ ber.          | 124,37 | 129,56     | 17,14 | 13,23  | 115,61  | 148,69  | 3      |
| eze   | Cl                    | 6,63   | 6,48       | 2,00  | 30,95  | 4,40    | 8,40    | 3      |
| Ō     | $SO_4$                | 4,67   | 6,76       | 4,74  | 70,13  | 3,42    | 12,18   | 3      |
|       | $NO_3$                | 2,05   | 1,83       | 1,28  | 69,75  | 0,46    | 2,99    | 3      |
|       | Ca                    | 36,87  | 37,42      | 3,22  | 8,60   | 32,11   | 42,35   | 7      |
| ~     | Mg                    | 3,15   | 3,06       | 0,27  | 8,95   | 2,65    | 3,41    | 7      |
| ö     | Na                    | 8,27   | 8,24       | 1,14  | 13,81  | 6,85    | 10,29   | 7      |
| Ir 2  | ĸ                     | 3,50   | 3,39       | 0,40  | 11,90  | 2,59    | 3,72    | 1      |
| Ina   | HCO <sub>3</sub> ber. | 146,60 | 140,23     | 22,69 | 16,18  | 89,57   | 153,94  | 7      |
| Jai   | CI                    | 2,75   | 5,56       | 5,28  | 94,85  | 2,38    | 16,95   | 1      |
|       | $SO_4$                | 2,27   | 4,36       | 3,73  | 85,68  | 0,83    | 11,73   | 7      |
|       | NO <sub>3</sub>       | 0,86   | 1,10       | 0,78  | 70,57  | 0,65    | 2,83    | 7      |
|       | Ca                    | 49,96  | 49,68      | 4,12  | 8,29   | 38,50   | 59,25   | 32     |
|       | Mg                    | 4,11   | 4,26       | 0,60  | 14,14  | 3,11    | 5,39    | 32     |
| 03    | Na                    | 10,59  | 10,84      | 1,03  | 9,47   | 9,21    | 13,62   | 32     |
| r 2(  | K                     | 3,36   | 3,24       | 0,48  | 14,93  | 1,83    | 3,96    | 32     |
| rua   | HCO <sub>3</sub> ber. | 190,35 | 186,92     | 18,63 | 9,96   | 140,17  | 228,87  | 32     |
| Feb   | CI                    | 6,89   | 7,15       | 4,34  | 60,76  | 1,49    | 28,01   | 32     |
| —     | $SO_4$                | 5,01   | 5,21       | 2,78  | 53,35  | 1,58    | 16,80   | 32     |
|       | $NO_3$                | 0,50   | 0,55       | 0,37  | 68,30  | 0,18    | 2,18    | 32     |

**Tabelle 12**: Statistische Zusammenfassung der Hauptionen aus dem Oberflächenabfluss des Wadis im naturbelassenen Wadi

| mg/L       | Median | Mittelwert | *SD    | *VK [%] | Minimum | Maximum | Anzahl |
|------------|--------|------------|--------|---------|---------|---------|--------|
| Al         | 0,3    | 0,67       | 0,780  | 116,351 | 0,2     | 2,03    | 5      |
| В          | 0,008  | 0,008      | 0,004  | 53,033  | 0,005   | 0,011   | 2      |
| Ba         | 0,068  | 0,0746     | 0,070  | 93,410  | 0,005   | 0,16    | 5      |
| Ca         | 5,5    | 10,935     | 8,760  | 80,111  | 3,8     | 21      | 5      |
| Co         | <0,004 | -          | -      | -       | -       | -       | 0      |
| Cr         | 0,002  | 0,002      | -      | -       | 0,002   | 0,002   | 1      |
| Cu         | 0,008  | 0,008      | 0,001  | 14,434  | 0,007   | 0,009   | 4      |
| Fe         | 0,33   | 0,584      | 0,584  | 100,033 | 0,15    | 1,55    | 5      |
| K          | 0,51   | 0,532      | 0,362  | 68,078  | 0,16    | 1,1     | 5      |
| Li         | 0,001  | 0,001      | 0,000  | 0,000   | 0,001   | 0,001   | 2      |
| Mg         | 0,81   | 1,254      | 0,785  | 62,620  | 0,49    | 2,2     | 5      |
| Mn         | 0,01   | 0,0118     | 0,009  | 76,600  | 0,005   | 0,027   | 5      |
| Мо         | <0,004 | -          | -      | -       | -       | -       | 0      |
| Na         | 3,2    | 3,876      | 2,898  | 74,772  | 0,36    | 6,9     | 5      |
| Ni         | <0,004 | -          | -      | -       | -       | -       | 0      |
| Р          | 0,11   | 0,087      | 0,039  | 44,339  | 0,029   | 0,12    | 5      |
| Pb         | 0,014  | 0,014      | -      | -       | 0,014   | 0,014   | 1      |
| S          | 1,2    | 1,704      | 1,021  | 59,890  | 0,74    | 3,2     | 5      |
| Se         | <0,02  | -          | -      | -       | -       | -       | 0      |
| Si         | 0,9    | 1,57       | 1,278  | 81,432  | 0,5     | 3,6     | 5      |
| Sn         | 0,006  | 0,006      | -      | -       | 0,006   | 0,006   | 1      |
| Sr         | 0,024  | 0,0306     | 0,017  | 56,820  | 0,015   | 0,053   | 5      |
| Ti         | 0,012  | 0,0174     | 0,015  | 86,456  | 0,005   | 0,04    | 5      |
| V          | 0,004  | 0,004      | 0,003  | 70,711  | 0,002   | 0,006   | 2      |
| Zn         | 0,022  | 0,0204     | 0,007  | 35,450  | 0,01    | 0,029   | 5      |
| EC [µS/cm] | 101,5  | 96,35      | 67,210 | 69,756  | 27,4    | 155     | 4      |
| TS [g/L]   | 153,5  | 153,5      | 19,092 | 12,438  | 140     | 167     | 2      |

**Tabelle 13:** Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Niederschlagswasser für die gesamte Wintersaison 2002/2003; Proben von Stadt und Land zusammen

| ma/l       | Modian | Mittolwort | *SD     | *\// [0/1 | Minimum | Maximum | Anzahl |
|------------|--------|------------|---------|-----------|---------|---------|--------|
|            |        | witterwert | 30      | V N [%]   | wiminum |         | Anzani |
| Ag         | 0,003  | 0,003      | -       | -         | 0,003   | 0,003   | 1      |
| AI         | 1,91   | 12,118     | 19,424  | 160,286   | 0,21    | 61      | 13     |
| В          | 0,022  | 0,048      | 0,056   | 114,664   | 0,01    | 0,19    | 12     |
| Ba         | 0,026  | 0,086      | 0,109   | 127,636   | 0,005   | 0,33    | 13     |
| Ca         | 29,3   | 77,691     | 107,456 | 138,312   | 8,38    | 310     | 13     |
| Cd         | 0,005  | 0,004      | 0,004   | 93,264    | 0       | 0,008   | 3      |
| Co         | 0,012  | 0,014      | 0,012   | 84,475    | 0,004   | 0,027   | 4      |
| Cr         | 0,012  | 0,026      | 0,034   | 129,351   | 0,002   | 0,104   | 12     |
| Cu         | 0,014  | 0,033      | 0,037   | 112,785   | 0,004   | 0,122   | 11     |
| Fe         | 1,75   | 11,384     | 19,018  | 167,064   | 0,05    | 63      | 13     |
| K          | 8,18   | 12,593     | 11,717  | 93,043    | 1,59    | 41,7    | 13     |
| Li         | 0,01   | 0,034      | 0,045   | 132,247   | 0,003   | 0,165   | 13     |
| Mg         | 3,73   | 11,256     | 17,612  | 156,468   | 0,67    | 55      | 13     |
| Mn         | 0,045  | 0,205      | 0,329   | 160,751   | 0,008   | 1,11    | 13     |
| Мо         | 0,006  | 0,007      | 0,002   | 22,222    | 0,006   | 0,009   | 4      |
| Na         | 13,5   | 19,312     | 18,646  | 96,552    | 5       | 72      | 13     |
| Ni         | 0,0275 | 0,028      | 0,025   | 87,821    | 0,004   | 0,053   | 4      |
| Р          | 0,158  | 0,495      | 0,628   | 126,884   | 0,02    | 1,93    | 13     |
| Pb         | 0,017  | 0,025      | 0,023   | 92,099    | 0,007   | 0,074   | 9      |
| S          | 5,6    | 10,488     | 11,295  | 107,697   | 2,92    | 40      | 13     |
| Sb         | <0,02  | -          | -       | -         | -       | -       | 0      |
| Se         | <0,02  | -          | -       | -         | -       | -       | 0      |
| Si         | 5,8    | 17,682     | 21,530  | 121,761   | 0,81    | 62      | 13     |
| Sn         | <0,005 | -          | -       | -         | -       | -       | 0      |
| Sr         | 0,071  | 0,171      | 0,224   | 130,690   | 0,019   | 0,75    | 13     |
| Ti         | 0,1125 | 0,353      | 0,513   | 145,373   | 0,009   | 1,439   | 12     |
| V          | 0,026  | 0,046      | 0,051   | 110,519   | 0       | 0,17    | 13     |
| Zn         | 0,097  | 0,340      | 0,572   | 167,921   | 0,02    | 1,808   | 13     |
| EC [µS/cm] | 165    | 285,556    | 269,908 | 94,520    | 78      | 887     | 9      |
| TS [g/L]   | 0,245  | 0,245      | 0,007   | 2,886     | 0,24    | 0,25    | 2      |

**Tabelle 14:** Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus Dächern für die gesamte Wintersaison 2002/2003

| mg/L       | Median | Mittelwert | *SD    | *VK [%] | Minimum | Maximum | Anzahl |
|------------|--------|------------|--------|---------|---------|---------|--------|
| Ag         | 0,002  | 0,002      | -      | -       | 0,002   | 0,002   | 1      |
| AI         | 2,02   | 8,855      | 16,770 | 189,387 | 0,55    | 43      | 6      |
| В          | 0,032  | 0,043      | 0,042  | 98,919  | 0,007   | 0,1     | 4      |
| Ba         | 0,012  | 0,045      | 0,076  | 169,059 | 0,006   | 0,2     | 6      |
| Ca         | 9,05   | 32,483     | 61,578 | 189,573 | 1,81    | 158     | 6      |
| Cd         | 0,0025 | 0,003      | 0,004  | 141,421 | 0       | 0,005   | 2      |
| Co         | 0,0085 | 0,009      | 0,009  | 108,146 | 0,002   | 0,015   | 2      |
| Cr         | 0,0035 | 0,0135     | 0,024  | 176,772 | 0,002   | 0,062   | 6      |
| Cu         | 0,028  | 0,0275     | 0,018  | 65,421  | 0,01    | 0,044   | 4      |
| Fe         | 1,795  | 8,18       | 16,108 | 196,922 | 0,37    | 41      | 6      |
| K          | 1,55   | 3,177      | 4,591  | 144,509 | 0,54    | 12,5    | 6      |
| Li         | 0,001  | 0,007      | 0,013  | 178,665 | 0,001   | 0,031   | 5      |
| Mg         | 1,495  | 6,998      | 13,729 | 196,176 | 0,61    | 35      | 6      |
| Mn         | 0,0285 | 0,137      | 0,262  | 190,988 | 0,01    | 0,67    | 6      |
| Мо         | 0,003  | 0,003      | -      | -       | 0,003   | 0,003   | 1      |
| Na         | 4,425  | 6,323      | 5,086  | 80,425  | 2,9     | 16,5    | 6      |
| Ni         | 0,032  | 0,032      | -      | -       | 0,032   | 0,032   | 1      |
| Р          | 0,0765 | 0,237      | 0,410  | 172,815 | 0,03    | 1,07    | 6      |
| Pb         | 0,025  | 0,025      | -      | -       | 0,025   | 0,025   | 1      |
| S          | 1,335  | 2,193      | 2,129  | 97,074  | 1,04    | 6,5     | 6      |
| Sb         | <0,02  | -          | -      | -       | -       | -       | 0      |
| Se         | <0,02  | -          | -      | -       | -       | -       | 0      |
| Si         | 4,425  | 13,063     | 23,048 | 176,431 | 1,08    | 60      | 6      |
| Sn         | 0,008  | 0,008      | -      | -       | 0,008   | 0,008   | 1      |
| Sr         | 0,032  | 0,090      | 0,143  | 159,110 | 0,012   | 0,38    | 6      |
| Ti         | 0,0675 | 0,212      | 0,343  | 161,861 | 0,022   | 0,9     | 6      |
| V          | 0,0085 | 0,022      | 0,038  | 168,864 | 0,001   | 0,099   | 6      |
| Zn         | 0,04   | 0,068      | 0,081  | 118,617 | 0,018   | 0,23    | 6      |
| EC [µS/cm] | 128,5  | 154,500    | 96,701 | 62,589  | 74      | 287     | 4      |
| TS [g/L]   | 0,48   | 0,480      | -      | -       | 0,48    | 0,48    | 1      |

**Tabelle 15:** Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus dem Parkplatz für die gesamte Wintersaison 2002/2003

| mg/L       | Median | Mittelwert | *SD     | *VK [%] | Minimum | Maximum | Anzahl |
|------------|--------|------------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Ag         | 0,003  | 0,003      | -       | -       | 0,003   | 0,003   | 1      |
| A          | 6,635  | 33,967     | 47,416  | 139,595 | 3,73    | 117     | 6      |
| В          | 0,0565 | 0,072      | 0,068   | 94,916  | 0,013   | 0,16    | 4      |
| Ва         | 0,048  | 0,154      | 0,184   | 119,551 | 0,02    | 0,429   | 6      |
| Ca         | 29,665 | 76,038     | 92,564  | 121,733 | 11,8    | 243     | 6      |
| Cd         | 0,008  | 0,005      | 0,005   | 86,603  | 0       | 0,008   | 3      |
| Co         | 0,0315 | 0,032      | 0,006   | 20,203  | 0,027   | 0,036   | 2      |
| Cr         | 0,0135 | 0,051      | 0,066   | 129,389 | 0,005   | 0,157   | 6      |
| Cu         | 0,0245 | 0,042      | 0,044   | 104,906 | 0,005   | 0,112   | 6      |
| Fe         | 5,84   | 29,247     | 39,294  | 134,353 | 2,8     | 91,7    | 6      |
| К          | 3,065  | 7,325      | 7,515   | 102,588 | 1,6     | 18,7    | 6      |
| Li         | 0,0055 | 0,023      | 0,029   | 128,795 | 0,003   | 0,069   | 6      |
| Mg         | 3,875  | 15,682     | 20,703  | 132,023 | 2,1     | 52      | 6      |
| Mn         | 0,1295 | 0,518      | 0,673   | 129,961 | 0,049   | 1,6     | 6      |
| Мо         | 0,004  | 0,004      | 0,003   | 70,711  | 0,002   | 0,006   | 2      |
| Na         | 7,805  | 10,873     | 8,170   | 75,138  | 3,5     | 25,7    | 6      |
| Ni         | 0,058  | 0,048      | 0,040   | 82,922  | 0,004   | 0,081   | 3      |
| Р          | 0,44   | 1,052      | 1,176   | 111,787 | 0,15    | 2,6     | 6      |
| Pb         | 0,019  | 0,023      | 0,016   | 71,640  | 0,007   | 0,05    | 5      |
| S          | 3,035  | 3,983      | 3,628   | 91,090  | 1,4     | 11,1    | 6      |
| Sb         | <0,02  | -          | -       | -       | -       | -       | 0      |
| Se         | <0,02  | -          | -       | -       | -       | -       | 0      |
| Si         | 11,645 | 30,648     | 33,729  | 110,053 | 7,3     | 86      | 6      |
| Sn         | 0,009  | 0,009      | -       | -       | 0,009   | 0,009   | 1      |
| Sr         | 0,069  | 0,193      | 0,231   | 119,741 | 0,036   | 0,62    | 6      |
| Ti         | 0,255  | 1,077      | 1,646   | 152,796 | 0,075   | 4,247   | 6      |
| V          | 0,021  | 0,077      | 0,097   | 125,381 | 0,008   | 0,236   | 6      |
| Zn         | 0,094  | 0,156      | 0,147   | 93,868  | 0,03    | 0,4     | 6      |
| EC [µS/cm] | 158    | 198,500    | 132,226 | 66,613  | 95      | 383     | 4      |
| TS [g/L]   | 0,79   | 0,790      | -       | -       | 0,79    | 0,79    | 1      |

**Tabelle 16:** Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus der Straße (Ziegel) für die gesamte Wintersaison 2002/2003

| mg/L       | Median | Mittelwert | *SD    | *VK [%] | Minimum | Maximum | Anzahl |
|------------|--------|------------|--------|---------|---------|---------|--------|
| Ag         | 0,002  | 0,002      | -      | -       | 0,002   | 0,002   | 1      |
| AĬ         | 19,25  | 33,222     | 24,576 | 73,973  | 11      | 68      | 9      |
| В          | 0,049  | 0,051      | 0,039  | 75,265  | 0,01    | 0,13    | 9      |
| Ва         | 0,107  | 0,158      | 0,090  | 57,138  | 0,06    | 0,309   | 9      |
| Ca         | 53     | 72,462     | 69,952 | 96,536  | 32,81   | 257     | 9      |
| Cd         | 0,0045 | 0,004      | 0,002  | 54,772  | 0,001   | 0,007   | 6      |
| Со         | 0,0065 | 0,013      | 0,011  | 87,112  | 0,003   | 0,029   | 8      |
| Cr         | 0,032  | 0,052      | 0,033  | 62,722  | 0,018   | 0,1     | 9      |
| Cu         | 0,043  | 0,045      | 0,021  | 45,422  | 0,02    | 0,085   | 9      |
| Fe         | 14,5   | 27,906     | 21,195 | 75,952  | 9,1     | 58      | 9      |
| К          | 3,88   | 5,267      | 3,466  | 65,819  | 2,1     | 13      | 9      |
| Li         | 0,012  | 0,018      | 0,012  | 65,955  | 0,006   | 0,036   | 9      |
| Mg         | 9,3    | 13,808     | 10,889 | 78,860  | 6,18    | 41      | 9      |
| Mn         | 0,243  | 0,482      | 0,393  | 81,413  | 0,125   | 1,105   | 9      |
| Мо         | 0,014  | 0,011      | 0,006  | 55,298  | 0,004   | 0,015   | 3      |
| Na         | 6,6    | 7,171      | 4,695  | 65,470  | 1,5     | 18,5    | 9      |
| Ni         | 0,012  | 0,024      | 0,019  | 80,885  | 0,005   | 0,051   | 9      |
| Р          | 0,44   | 0,569      | 0,341  | 59,962  | 0,22    | 1,33    | 9      |
| Pb         | 0,028  | 0,028      | 0,019  | 67,935  | 0,007   | 0,056   | 7      |
| S          | 2,46   | 3,450      | 2,328  | 67,488  | 1,5     | 8,4     | 9      |
| Sb         | <0,02  | -          | -      | -       | -       | -       | 0      |
| Se         | <0,02  | -          | -      | -       | -       | -       | 0      |
| Si         | 28,8   | 43,583     | 24,874 | 57,073  | 17,26   | 79      | 9      |
| Sn         | 0,008  | 0,009      | 0,005  | 58,076  | 0,004   | 0,014   | 3      |
| Sr         | 0,102  | 0,130      | 0,116  | 89,090  | 0,057   | 0,43    | 9      |
| Ti         | 0,809  | 0,853      | 0,652  | 76,399  | 0,22    | 2,163   | 9      |
| V          | 0,043  | 0,073      | 0,048  | 66,016  | 0,029   | 0,14    | 9      |
| Zn         | 0,124  | 0,149      | 0,073  | 49,116  | 0,08    | 0,268   | 9      |
| EC [µS/cm] | 190,5  | 204,833    | 85,728 | 41,853  | 106     | 312     | 6      |
| TS [g/L]   | 0,47   | 0,470      | 0,042  | 9,027   | 0,44    | 0,5     | 2      |

**Tabelle 17:** Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Regenwasserabfluss aus der Straße (Asphalt) für die gesamte Wintersaison 2002/2003

| mg/L       | Median | Mittelwert | *SD     | *VK [%] | Minimum | Maximum | Anzahl |
|------------|--------|------------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Ag         | <0,004 | -          | -       | -       | -       | -       | 0      |
| Al         | 11,7   | 19,122     | 21,301  | 111,393 | 1,4     | 93      | 32     |
| В          | 0,0705 | 0,070      | 0,043   | 61,098  | 0,019   | 0,236   | 32     |
| Ва         | 0,1055 | 0,134      | 0,083   | 61,956  | 0,034   | 0,392   | 32     |
| Ca         | 92,5   | 124,637    | 122,516 | 98,299  | 30,3    | 630     | 32     |
| Cd         | 0,005  | 0,005      | 0,001   | 20,000  | 0,004   | 0,006   | 3      |
| Со         | 0,012  | 0,012      | 0,007   | 63,062  | 0,003   | 0,023   | 7      |
| Cr         | 0,03   | 0,045      | 0,046   | 101,945 | 0,008   | 0,21    | 32     |
| Cu         | 0,0355 | 0,049      | 0,032   | 66,310  | 0,012   | 0,113   | 32     |
| Fe         | 10,5   | 16,266     | 18,604  | 114,374 | 1,3     | 84      | 32     |
| К          | 5,225  | 5,765      | 2,696   | 46,760  | 2,35    | 13,2    | 32     |
| Li         | 0,013  | 0,016      | 0,012   | 78,355  | 0,004   | 0,062   | 32     |
| Mg         | 9,4    | 11,316     | 8,095   | 71,541  | 3,1     | 42      | 32     |
| Mn         | 0,1605 | 0,237      | 0,245   | 103,385 | 0,026   | 1,01    | 32     |
| Мо         | 0,013  | 0,012      | 0,006   | 44,770  | 0,003   | 0,027   | 19     |
| Na         | 17,2   | 16,162     | 7,055   | 43,648  | 4,42    | 28      | 32     |
| Ni         | 0,018  | 0,028      | 0,028   | 101,046 | 0,003   | 0,13    | 25     |
| Р          | 0,72   | 0,965      | 0,598   | 61,979  | 0,26    | 2,48    | 32     |
| Pb         | 0,0295 | 0,040      | 0,047   | 117,905 | 0,007   | 0,225   | 22     |
| S          | 10,4   | 10,101     | 6,139   | 60,782  | 3,2     | 23      | 32     |
| Sb         | ≤0,03  | -          | -       | -       | -       | -       | 0      |
| Se         | 0,027  | 0,028      | 0,006   | 21,171  | 0,02    | 0,039   | 9      |
| Si         | 26,5   | 33,889     | 26,075  | 76,941  | 4       | 120,05  | 32     |
| Sn         | 0,007  | 0,007      | 0,002   | 28,287  | 0,004   | 0,009   | 5      |
| Sr         | 0,185  | 0,196      | 0,097   | 49,778  | 0,085   | 0,5     | 32     |
| Ti         | 0,27   | 0,461      | 0,484   | 105,036 | 0,04    | 1,92    | 32     |
| V          | 0,039  | 0,051      | 0,046   | 89,442  | 0,01    | 0,22    | 32     |
| Zn         | 0,112  | 0,174      | 0,134   | 76,792  | 0,022   | 0,48    | 32     |
| EC [µS/cm] | 226    | 237,308    | 60,496  | 25,493  | 167     | 420     | 13     |
| TS [g/L]   | 280    | 269,961    | 231,789 | 85,860  | 0,37    | 600     | 9      |

**Tabelle 18:** Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Abfluss der Station M für die gesamte Wintersaison 2002/2003

| 0          |        |            |        |         |         |         |        |
|------------|--------|------------|--------|---------|---------|---------|--------|
| mg/L       | Median | Mittelwert | *SD    | *VK [%] | Minimum | Maximum | Anzahl |
| Ag         | <0,002 | -          | -      | -       | -       | -       | 0      |
| Al         | 45     | 59,412     | 53,176 | 89,503  | 1,58    | 122,68  | 5      |
| В          | 0,086  | 0,074      | 0,029  | 39,119  | 0,03    | 0,1     | 5      |
| Ba         | 0,2    | 0,273      | 0,214  | 78,476  | 0,054   | 0,511   | 5      |
| Ca         | 105    | 136,218    | 83,151 | 61,043  | 56,09   | 239     | 5      |
| Cd         | 0,008  | 0,008      | 0,004  | 45,807  | 0,004   | 0,011   | 3      |
| Co         | 0,024  | 0,023      | 0,016  | 71,454  | 0,005   | 0,038   | 4      |
| Cr         | 0,083  | 0,120      | 0,110  | 91,600  | 0,004   | 0,24    | 5      |
| Cu         | 0,033  | 0,049      | 0,032  | 65,635  | 0,019   | 0,085   | 5      |
| Fe         | 35     | 47,992     | 43,257 | 90,133  | 1,06    | 95      | 5      |
| K          | 5,5    | 5,958      | 3,262  | 54,751  | 2,53    | 9,96    | 5      |
| Li         | 0,019  | 0,029      | 0,026  | 91,419  | 0,003   | 0,063   | 5      |
| Mg         | 15,6   | 16,482     | 9,512  | 57,710  | 5,94    | 27      | 5      |
| Mn         | 0,46   | 0,684      | 0,629  | 91,958  | 0,02    | 1,41    | 5      |
| Мо         | 0,012  | 0,012      | -      | -       | 0,012   | 0,012   | 1      |
| Na         | 7,2    | 9,610      | 4,049  | 42,135  | 6,2     | 14,25   | 5      |
| Ni         | 0,075  | 0,070      | 0,053  | 75,340  | 0,014   | 0,116   | 4      |
| Р          | 1,4    | 2,080      | 1,756  | 84,400  | 0,19    | 4,1     | 5      |
| Pb         | 0,011  | 0,012      | 0,004  | 36,549  | 0,007   | 0,017   | 4      |
| S          | 4,45   | 4,318      | 0,509  | 11,789  | 3,5     | 4,8     | 5      |
| Sb         | <0,02  | -          | -      | -       | -       | -       | 0      |
| Se         | <0,02  | -          | -      | -       | -       | -       | 0      |
| Si         | 51     | 75,812     | 76,306 | 100,651 | 5,01    | 204,05  | 5      |
| Sn         | 0,012  | 0,012      | -      | -       | 0,012   | 0,012   | 1      |
| Sr         | 0,24   | 0,219      | 0,144  | 65,500  | 0,017   | 0,37    | 5      |
| Ti         | 0,89   | 1,321      | 1,269  | 96,056  | 0,054   | 3,1     | 5      |
| V          | 0,085  | 0,117      | 0,099  | 84,479  | 0,008   | 0,23    | 5      |
| Zn         | 0,09   | 0,132      | 0,094  | 71,398  | 0,036   | 0,25    | 5      |
| EC [µS/cm] | 222    | 264,000    | 88,792 | 33,633  | 204     | 366     | 3      |
| TS [a/L]   |        |            |        |         |         |         |        |

**Tabelle 19:** Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Abfluss der Station I für die gesamte Wintersaison 2002/2003

| mg/L       | Median | Mittelwert | *SD     | *VK [%] | Minimum | Maximum | Anzahl |
|------------|--------|------------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Al         | 0,55   | 4,550      | 9,087   | 199,711 | 0,2     | 23      | 6      |
| В          | 0,0325 | 0,043      | 0,029   | 67,849  | 0,016   | 0,094   | 6      |
| Ba         | 0,0475 | 0,057      | 0,028   | 49,472  | 0,034   | 0,11    | 6      |
| Ca         | 48     | 53,333     | 20,743  | 38,893  | 33      | 87      | 6      |
| Co         | 0,007  | 0,007      | 0,003   | 40,406  | 0,005   | 0,009   | 2      |
| Cr         | 0,0315 | 0,032      | 0,029   | 92,036  | 0,011   | 0,052   | 2      |
| Cu         | 0,009  | 0,011      | 0,007   | 67,726  | 0,005   | 0,024   | 5      |
| Fe         | 0,435  | 3,573      | 7,109   | 198,959 | 0,18    | 18      | 6      |
| K          | 2,75   | 2,967      | 0,889   | 29,973  | 1,7     | 4,3     | 6      |
| Li         | 0,0085 | 0,009      | 0,002   | 24,957  | 0,007   | 0,01    | 2      |
| Mg         | 3,65   | 3,917      | 1,499   | 38,261  | 1,9     | 5,8     | 6      |
| Mn         | 0,016  | 0,068      | 0,104   | 153,546 | 0,007   | 0,25    | 5      |
| Мо         | 0,011  | 0,011      | -       | -       | 0,011   | 0,011   | 1      |
| Na         | 6,35   | 6,017      | 2,114   | 35,138  | 2,5     | 8,6     | 6      |
| Ni         | 0,016  | 0,016      | -       | -       | 0,016   | 0,016   | 1      |
| Р          | 0,125  | 0,206      | 0,216   | 104,930 | 0,053   | 0,62    | 6      |
| Pb         | <0,006 | -          | -       | -       | -       | -       | 0      |
| S          | 2,15   | 2,250      | 0,602   | 26,778  | 1,5     | 3,3     | 6      |
| Se         | <0,002 | -          | -       | -       | -       | -       | 0      |
| Si         | 5      | 11,067     | 14,694  | 132,781 | 4,3     | 41      | 6      |
| Sn         | 0,0065 | 0,007      | 0,002   | 32,636  | 0,005   | 0,008   | 2      |
| Sr         | 0,098  | 0,106      | 0,039   | 36,611  | 0,055   | 0,16    | 6      |
| Ti         | 0,008  | 0,103      | 0,206   | 200,387 | 0,004   | 0,52    | 6      |
| V          | 0,034  | 0,034      | 0,033   | 95,667  | 0,011   | 0,057   | 2      |
| Zn         | 0,023  | 0,034      | 0,024   | 71,415  | 0,014   | 0,07    | 6      |
| EC [µS/cm] | 287,5  | 283,333    | 73,192  | 25,832  | 199     | 368     | 6      |
| TS [g/L]   | 159,5  | 527,667    | 676,127 | 128,135 | 60      | 1667    | 6      |

**Tabelle 20:** Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Abfluss der Station J für die gesamte Wintersaison 2002/2003

| ma/l       | Modian | Mittolwort | 90       | VK [0/]  | Minimum         | Maximum | Anzahl |
|------------|--------|------------|----------|----------|-----------------|---------|--------|
| ng/∟       |        |            | 50       | VK [ /0] | Nininium<br>0.4 |         | Anzam  |
| AI         | 3,35   | 34,533     | 54,897   | 158,968  | 0,4             | 135     | 6      |
| В          | 0,025  | 0,048      | 0,046    | 96,335   | 0,016           | 0,13    | 6      |
| Ba         | 0,1295 | 0,213      | 0,229    | 107,967  | 0,038           | 0,63    | 6      |
| Ca         | 59     | 107,500    | 108,214  | 100,664  | 20              | 309     | 6      |
| Co         | 0,0475 | 0,048      | 0,022    | 46,148   | 0,032           | 0,063   | 2      |
| Cr         | 0,01   | 0,078      | 0,105    | 134,814  | 0,005           | 0,24    | 5      |
| Cu         | 0,0095 | 0,030      | 0,035    | 117,001  | 0,008           | 0,092   | 6      |
| Fe         | 2,9    | 29,792     | 47,544   | 159,588  | 0,35            | 117     | 6      |
| K          | 3,95   | 5,137      | 5,329    | 103,737  | 0,12            | 15      | 6      |
| Li         | 0,0485 | 0,049      | 0,025    | 51,028   | 0,031           | 0,066   | 2      |
| Mg         | 4,25   | 11,150     | 12,350   | 110,760  | 3,7             | 34      | 6      |
| Mn         | 0,0575 | 0,673      | 1,071    | 159,113  | 0,009           | 2,6     | 6      |
| Мо         | <0,004 | -          | -        | -        | -               | -       | 0      |
| Na         | 9,3    | 8,100      | 3,826    | 47,237   | 2,5             | 13      | 6      |
| Ni         | 0,1015 | 0,102      | 0,054    | 53,643   | 0,063           | 0,14    | 2      |
| Р          | 0,265  | 0,760      | 0,893    | 117,479  | 0,11            | 2,3     | 6      |
| Pb         | 0,011  | 0,016      | 0,014    | 84,284   | 0,007           | 0,036   | 4      |
| S          | 4,9    | 5,000      | 2,020    | 40,398   | 2               | 8,3     | 6      |
| Se         | <0,002 | -          | -        | -        | -               | -       | 0      |
| Si         | 8      | 35,883     | 46,766   | 130,327  | 3,5             | 112     | 6      |
| Sn         | 0,006  | 0,006      | -        | -        | 0,006           | 0,006   | 1      |
| Sr         | 0,103  | 0,143      | 0,096    | 67,223   | 0,051           | 0,3     | 6      |
| Ti         | 0,089  | 0,855      | 1,324    | 154,765  | 0,01            | 3,2     | 6      |
| V          | 0,014  | 0,104      | 0,139    | 133,878  | 0,008           | 0,32    | 5      |
| Zn         | 0,035  | 0,095      | 0,119    | 125,045  | 0,014           | 0,31    | 6      |
| EC [µS/cm] | 292    | 280,000    | 140,341  | 50,122   | 90              | 441     | 6      |
| TS [g/L]   | 243,5  | 1697,833   | 2682,385 | 157,989  | 100             | 6800    | 6      |

**Tabelle 21:** Statistische Zusammenfassung der Spurenelemente im Oberflächenabfluss am Hang im Untersuchungsgebiet von Steinmann (2010) für die gesamte Wintersaison 2002/2003

 Tabelle 22: Mittlere Ereigniskonzentration (EMC) der Spurenelemente an der Station M

| [mg/L]     | 5.11    | 29.11   | 11.12   | 17.12   | **17.12 | 13.2    | 25.2    | 18.3    | 24.+25.3 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| AI         | 35,687  | 14,377  | 2,093   | 14,460  | 0,016   | 17,310  | 59,440  | 39,000  | 16,685   |
| В          | 0,113   | 0,083   | 0,024   | 0,027   | 0,019   | 0,030   | 0,070   | 0,110   | 0,035    |
| Ва         | 0,184   | 0,165   | 0,051   | 0,124   | 0,026   | 0,130   | 0,275   | 0,250   | 0,088    |
| Ca         | 255,866 | 109,853 | 33,276  | 164,898 | 29,371  | 110,000 | 131,720 | 266,000 | 64,708   |
| Cd         |         |         |         |         |         |         | 0,006   | 0,004   |          |
| Со         |         |         |         | 0,009   |         | 0,003   | 0,020   | 0,017   |          |
| Cr         | 0,075   | 0,043   | 0,010   | 0,041   | 0,003   | 0,044   | 0,133   | 0,061   | 0,029    |
| Cu         | 0,044   | 0,100   | 0,019   | 0,050   | 0,004   | 0,057   | 0,059   | 0,075   | 0,016    |
| Fe         | 30,379  | 12,498  | 1,803   | 12,895  | 0,003   | 12,700  | 47,825  | 40,000  | 13,107   |
| К          | 7,369   | 8,162   | 3,194   | 4,574   | 2,680   | 3,890   | 6,170   | 12,100  | 3,475    |
| Li         | 0,026   | 0,018   | 0,004   | 0,013   | 0,003   | 0,013   | 0,031   | 0,026   | 0,008    |
| Mg         | 13,862  | 13,305  | 3,284   | 15,262  | 1,827   | 11,810  | 15,395  | 42,000  | 8,351    |
| Mn         | 0,395   | 0,185   | 0,034   | 0,265   |         | 0,227   | 0,694   | 0,660   | 0,164    |
| Мо         | 0,015   | 0,015   |         | 0,003   | 0,004   | 0,004   |         |         |          |
| Na         | 23,769  | 18,521  | 9,924   | 7,643   | 7,188   | 5,700   | 10,150  | 24,100  | 10,554   |
| Ni         | 0,048   | 0,019   |         | 0,020   |         | 0,013   | 0,059   | 0,031   | 0,009    |
| Р          | 0,855   | 1,370   | 0,422   | 0,982   | 0,153   | 0,870   | 2,395   | 1,830   | 0,612    |
| Pb         | 0,017   | 0,065   | 0,009   | 0,029   |         | 0,225   | 0,010   | 0,048   | 0,009    |
| S          | 19,039  | 13,609  | 3,864   | 5,672   | 3,465   | 3,470   | 4,325   | 12,600  | 3,573    |
| Se         | 0,027   | 0,030   | 0,020   |         |         |         |         |         |          |
| Si         | 51,828  | 35,190  | 5,032   | 33,856  | 1,482   | 23,030  | 93,025  | 57,000  | 34,771   |
| Sn         |         |         | 0,008   | 0,006   | 0,006   |         | 0,009   |         |          |
| Sr         | 0,248   | 0,245   | 0,087   | 0,200   | 0,077   | 0,165   | 0,247   | 0,500   | 0,145    |
| Ti         | 0,722   | 0,336   | 0,058   | 0,479   |         | 0,685   | 1,487   | 0,830   | 0,648    |
| V          | 0,082   | 0,050   | 0,011   | 0,051   | 0,008   | 0,046   | 0,124   | 0,106   | 0,039    |
| Zn         | 0,133   | 0,410   | 0,057   | 0,217   | 0,008   | 0,157   | 0,140   | 0,330   | 0,065    |
| EC [µS/cm] |         |         | 239,647 | 180,449 | 180,449 |         | 239     | 420     | 247,536  |
| TS [g/L]   |         |         | 272,120 | 1,343   | 1,343   |         |         |         |          |

\*\* nur gelöster Inhalt, alle anderen sind Gesamtgehalte Aus Platzgründen wurde das Jahr der Ereignisse weggelassen; es ist das Wintersaison 2002/2003

| [mg/L]     | 21.02.2003 | 25.02.2003 | 24.+25.03.2003 |
|------------|------------|------------|----------------|
| AI         | 1,580      | 114,840    | 33,127         |
| В          | 0,094      | 0,093      | 0,045          |
| Ва         | 0,054      | 0,501      | 0,156          |
| Ca         | 56,090     | 224,500    | 88,319         |
| Cd         |            | 0,010      | 0,004          |
| Со         |            | 0,037      | 0,009          |
| Cr         | 0,004      | 0,236      | 0,062          |
| Cu         | 0,019      | 0,085      | 0,030          |
| Fe         | 1,060      | 93,500     | 26,120         |
| К          | 2,530      | 9,280      | 4,372          |
| Li         | 0,003      | 0,057      | 0,014          |
| Mg         | 5,940      | 26,135     | 12,166         |
| Mn         | 0,020      | 1,350      | 0,352          |
| Мо         | 0,012      |            |                |
| Na         | 14,250     | 6,900      | 10,071         |
| Ni         |            | 0,115      | 0,025          |
| Р          | 0,190      | 3,940      | 1,169          |
| Pb         |            | 0,014      | 0,009          |
| S          | 4,640      | 4,325      | 4,162          |
| Se         |            |            |                |
| Si         | 5,010      | 127,525    | 59,847         |
| Sn         |            | 0,012      |                |
| Sr         | 0,017      | 0,350      | 0,191          |
| Ti         | 0,054      | 2,620      | 0,659          |
| V          | 0,008      | 0,220      | 0,068          |
| Zn         | 0,036      | 0,233      | 0,080          |
| EC [µS/cm] |            | 204,000    | 295,351        |
| TS [a/L]   |            |            |                |

 Tabelle 23: Mittlere Ereigniskonzentration (EMC) der Spurenelemente an der Station I