

Institut für Hydrologie  
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Andreas Hänsler

**Hydrometrie und natürliche Tracer zur hydrologischen  
Prozessforschung bei Niedrigwassersituationen in einem  
bewaldeten Einzugsgebiet**



Diplomarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Chr. Leibundgut  
Freiburg im Breisgau, November 2005



Institut für Hydrologie  
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Andreas Hänsler

**Hydrometrie und natürliche Tracer zur hydrologischen  
Prozessforschung bei Niedrigwassersituationen in einem  
bewaldeten Einzugsgebiet**

Referent: Prof. Dr. Ch. Leibundgut

Koreferent: Dr. J. Lange

Diplomarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Chr. Leibundgut

Freiburg im Breisgau, November 2005



## Inhaltsverzeichnis

|                                                                  |             |
|------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Inhaltsverzeichnis .....</b>                                  | <b>III</b>  |
| <b>Verzeichnis der Abbildungen im Text .....</b>                 | <b>V</b>    |
| <b>Verzeichnis der Tabellen im Text.....</b>                     | <b>VIII</b> |
| <b>Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen im Anhang.....</b>   | <b>IX</b>   |
| <b>Verzeichnis der Abkürzungen und Einheiten .....</b>           | <b>X</b>    |
| <b>Zusammenfassung .....</b>                                     | <b>XI</b>   |
| <b>Extended English Summary .....</b>                            | <b>XIII</b> |
| <b>1 Einleitung.....</b>                                         | <b>1</b>    |
| 1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....                         | 2           |
| 1.2 Stand der Forschung .....                                    | 3           |
| <b>2 Untersuchungsgebiete.....</b>                               | <b>6</b>    |
| 2.1 Einzugsgebiet Engebächle .....                               | 6           |
| 2.1.1 Morphologie, Topographie und naturräumliche Lage .....     | 6           |
| 2.1.2 Klima .....                                                | 8           |
| 2.1.3 Geologie und Pedologie.....                                | 8           |
| 2.1.4 Landnutzung .....                                          | 10          |
| 2.2 Die Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof.....                 | 11          |
| 2.2.1 Quelle Zipfeldobel .....                                   | 12          |
| 2.2.2 Quelle Zängerlehof .....                                   | 12          |
| <b>3 Methodik.....</b>                                           | <b>14</b>   |
| 3.1 Verwendete Tracer.....                                       | 14          |
| 3.1.1 Haptionen.....                                             | 14          |
| 3.1.2 Säureneutralisationskapazität.....                         | 18          |
| 3.1.3 Gelöste Kieselsäure (Silikat) .....                        | 18          |
| 3.1.4 Elektrische Leitfähigkeit.....                             | 19          |
| 3.1.5 Temperatur.....                                            | 19          |
| 3.1.6 Stabiles Isotop O-18.....                                  | 20          |
| 3.2 Abflusskomponentenseparation mit natürlichen Tracern .....   | 20          |
| 3.3 Messungen im Einzugsgebiet .....                             | 21          |
| 3.3.1 Niederschlag .....                                         | 22          |
| 3.3.2 Wasserstand und Abfluss.....                               | 23          |
| 3.3.3 Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur .....             | 25          |
| 3.3.4 Beobachtung der Auendynamik.....                           | 26          |
| 3.3.5 Messung der Bodenfeuchte.....                              | 27          |
| 3.3.6 Untersuchung der im EZG Engebächle gelegenen Quellen ..... | 27          |
| 3.3.7 Wöchentliche Probenahme .....                              | 29          |
| 3.4 Laboranalysen.....                                           | 30          |
| 3.4.1 Haptionen.....                                             | 30          |

|          |                                                                          |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4.2    | Stabiles Isotop – O-18 .....                                             | 31         |
| 3.5      | Statistische Methoden .....                                              | 31         |
| 3.5.1    | Deskriptive Methoden .....                                               | 31         |
| 3.5.2    | Korrelationsanalyse .....                                                | 32         |
| <b>4</b> | <b>Ergebnisse der Messkampagne .....</b>                                 | <b>33</b>  |
| 4.1      | Einführung .....                                                         | 33         |
| 4.2      | Klimatische Situation .....                                              | 33         |
| 4.3      | Abflussverhalten und Hydrochemie des Engebächles .....                   | 36         |
| 4.3.1    | Diskussion der Ergebnisse .....                                          | 39         |
| 4.4      | Intensivbeprobung im September .....                                     | 41         |
| 4.4.1    | Einführung .....                                                         | 41         |
| 4.4.2    | Ergebnisse und Diskussion .....                                          | 42         |
| 4.5      | Ergebnisse der Bodenfeuchtemessung .....                                 | 45         |
| 4.5.1    | Diskussion der Messergebnisse .....                                      | 46         |
| 4.6      | Ergebnisse der Untersuchung der Quellen im Einzugsgebiet Engebächle .... | 47         |
| 4.6.1    | Quellgruppe Sägedobel .....                                              | 48         |
| 4.6.2    | Quellgruppe Steineck .....                                               | 50         |
| 4.6.3    | Diskussion der Ergebnisse .....                                          | 53         |
| 4.6.4    | Fazit .....                                                              | 61         |
| 4.7      | Grundwasserpegel .....                                                   | 61         |
| 4.7.1    | Messergebnisse und Diskussion .....                                      | 62         |
| 4.8      | Gesamtfazit aus den Messergebnissen .....                                | 66         |
| <b>5</b> | <b>Abflusskomponentenseparation .....</b>                                | <b>67</b>  |
| 5.1      | Definition der Endmember .....                                           | 67         |
| 5.2      | Diskussion .....                                                         | 69         |
| 5.3      | Fazit .....                                                              | 72         |
| <b>6</b> | <b>Statistische Auswertung von Niedrigwasser und Chemie .....</b>        | <b>73</b>  |
| 6.1      | Einleitung .....                                                         | 73         |
| 6.2      | Vorgehensweise und Datengrundlage .....                                  | 73         |
| 6.3      | Ergebnisse und Diskussion .....                                          | 74         |
| 6.4      | Fazit .....                                                              | 79         |
| <b>7</b> | <b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>                             | <b>80</b>  |
| <b>8</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                        | <b>83</b>  |
|          | <b>Anhang .....</b>                                                      | <b>90</b>  |
|          | <b>Ehrenwörtliche Erklärung .....</b>                                    | <b>111</b> |

## Verzeichnis der Abbildungen im Text

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2-1: Übersicht über das Einzugsgebiet Engebächle.....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 7  |
| Abbildung 2-2: Langjähriges Mittel des Niederschlags und der Lufttemperatur der<br>Klimanormalperiode 1971–2000 an der Stadtstation Freiburg (Daten aus<br>www.Klimadiagramme.de).....                                                                                                                                                    | 8  |
| Abbildung 2-3: Übersicht über die Geologie des EZG Engebächle (nach GLA, 1996) ..                                                                                                                                                                                                                                                         | 9  |
| Abbildung 2-4: Verlauf der Quellschüttung der Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof im<br>Zeitraum Nov. 2003 – Nov. 2005 .....                                                                                                                                                                                                              | 11 |
| Abbildung 2-5: Verlauf der Wassertemperatur der Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof<br>im Zeitraum Sept. 2000 – Sept. 2005 .....                                                                                                                                                                                                          | 13 |
| Abbildung 3-1: CTD-Diversonde der Fa. Eijkelkamp/Van Essen .....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 22 |
| Abbildung 3-2: Vergleich der Unterschiede im Wasserstand zu Niedrigwasserzeiten<br>resultierend aus der Luftdruckkompensation verschiedener Luftdruckmessungen                                                                                                                                                                            | 24 |
| Abbildung 3-3: Abflussmessquerschnitt am Engebächle .....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 25 |
| Abbildung 3-4: Skizze zur Darstellung der Höhenverteilung der im Auenbereich<br>eingebrachten Grundwasserpegel .....                                                                                                                                                                                                                      | 26 |
| Abbildung 3-5: Lage der wöchentlich beprobten Quellen im Einzugsgebiet Engebächle<br>.....                                                                                                                                                                                                                                                | 28 |
| Abbildung 4-1: Verlauf des Niederschlags und der Lufttemperatur während der<br>Messperiode .....                                                                                                                                                                                                                                          | 34 |
| Abbildung 4-2: Abweichung der am Ringlihof gemessenen Monatsmittelwerte, sowie<br>der an der meteorologischen Stadtstation Freiburg gemessenen<br>Durchschnittstemperaturen im Vergleich zum langjährigen Mittel der<br>Klimaperiode 1971–2000 an der Station Freiburg (Daten des langjährigen Mittel<br>aus www.Klimadiagramme.de) ..... | 35 |
| Abbildung 4-3: Ergebnisse der CTD-Divermessung am Pegel Engebächle .....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 37 |
| Abbildung 4-4: Konzentration der Hauptionen im Engebächle während der Messphase<br>.....                                                                                                                                                                                                                                                  | 38 |
| Abbildung 4-5: Schwankungsbreite (SB) der Hauptionenkonzentration im Engebächle<br>.....                                                                                                                                                                                                                                                  | 39 |
| Abbildung 4-6: Vergleich des Rezessionsverhaltens des Engebächles bei einem Ereignis<br>direkt nach der Trockenperiode und einem Ereignis nach kontinuierlicher<br>Auffeuchtung .....                                                                                                                                                     | 40 |
| Abbildung 4-7: Vergleich der Messergebnisse des CTD-Divers mit denen zeitlich<br>hochaufgelöster Handmessungen am Pegel Engebächle im Zeitraum von<br>02.09.2005 – 09.09.2005 .....                                                                                                                                                       | 43 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 4-8: Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit (Diver- und Handmessung) am Pegel und oberhalb des Teichs zur Quantifizierung des Einflusses des Fischteichs auf die Gewässerchemie .....                                                                               | 44 |
| Abbildung 4-9: Verlauf des volumetrischen Bodenwassergehalts während verschiedener Niederschlagsinputs in 5 verschiedenen Tiefenregionen .....                                                                                                                                  | 46 |
| Abbildung 4-10: Ergebnisse der Routinemessungen an den Quellen der Quelfassung Sägedobel .....                                                                                                                                                                                  | 49 |
| Abbildung 4-11: Ergebnisse der Routinemessungen an den Quellen der Quelfassung Steineck .....                                                                                                                                                                                   | 51 |
| Abbildung 4-12: Schwankungsbreite (SB) der Haptionen in den im EZG Engebächle gelegenen Quellen auf Datengrundlage wöchentlicher Probenahme (für die Quellen U1, U2 und U5 im Zeitraum 03.06.05 – 13.09.05; für die restlichen Quellen im Zeitraum 03.06.05 – 02.08.2005) ..... | 52 |
| Abbildung 4-13: Chlorid-, O-18- und Schüttungsverlauf der Quelle U1 über den Beobachtungszeitraum .....                                                                                                                                                                         | 54 |
| Abbildung 4-14: Ereigniswasseranteil und Quellschüttung der Quelle U1 .....                                                                                                                                                                                                     | 55 |
| Abbildung 4-15: Vergleich des volumetrischen Bodenwassergehalts und der Quellschüttung der Quelle U1 .....                                                                                                                                                                      | 56 |
| Abbildung 4-16: Chlorid-, O-18- und Schüttungsverlauf der Quelle U2 über den Beobachtungszeitraum .....                                                                                                                                                                         | 57 |
| Abbildung 4-17: Chlorid-, O-18- und Schüttungsverlauf der Quelle U5 über den Beobachtungszeitraum .....                                                                                                                                                                         | 59 |
| Abbildung 4-18: Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung der Quellschüttung und der elektrischen Leitfähigkeit an den verbliebenen Quellen .....                                                                                                                         | 60 |
| Abbildung 4-19: Übersicht über den Wasserstand, die elektrische Leitfähigkeit, Wassertemperatur sowie den Verlauf verschiedener Haptionen am GW-Pegel 1 während der Messperiode .....                                                                                           | 63 |
| Abbildung 4-20: Übersicht über den Wasserstand, die elektrische Leitfähigkeit, Wassertemperatur sowie den Verlauf verschiedener Haptionen am GW-Pegel 2 während der Messperiode .....                                                                                           | 64 |
| Abbildung 4-21: Vergleich des Verlaufs der elektrischen Leitfähigkeit im Bach und im GW-Pegel 1 .....                                                                                                                                                                           | 65 |
| Abbildung 5-1: Mittlere Konzentration der Tracer des jeweiligen Endmembers, sowie der Verlauf von Chlorid und O-18 im Engebächle .....                                                                                                                                          | 68 |
| Abbildung 5-2: Darstellung der einzelnen Komponenten zur Abflussbildung in einem Mischungsdiagramm .....                                                                                                                                                                        | 69 |
| Abbildung 5-3: Übersicht über den Probenahmezeitpunkt der für die Abflussganglinienseparation verwendeten Proben .....                                                                                                                                                          | 70 |

|                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 5-4: Darstellung der einzelnen Komponenten zur Abflussbildung in einem Mischungsdiagramm unter Berücksichtigung der Abflussverhältnisse zum jeweiligen Probenahmezeitpunkt..... | 70 |
| Abbildung 5-5: Ergebnisse der Drei-Komponentenseparation für ereignisbeeinflusste Proben .....                                                                                            | 71 |
| Abbildung 5-6: Vergleich der Chloridgehalte aller untersuchten Quellen mit denen des Engebächles .....                                                                                    | 72 |
| Abbildung 6-1: Schwellenwertansatz zu Niedrigwasseranalyse (aus STAHL, 2001).....                                                                                                         | 74 |
| Abbildung 6-2: Darstellung der Jahresmittelwerte der Hauptionengehalte der Quellen Zängerlehof (Ho) und Zipfeldobel (Zi) im Piperdiagramm.....                                            | 76 |

## Verzeichnis der Tabellen im Text

|                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 6-1: Übersicht über Schüttungsverhalten der Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof in Abhängigkeit der Trockenheit .....                                                                           | 75 |
| Tabelle 6-2: Übersicht über die Verteilung der für die statistische Auswertung herangezogenen Proben der beiden Quellen unter Berücksichtigung verschiedener Schwellenwerte in der Quellschüttung ..... | 75 |
| Tabelle 6-3: Übersicht über die Veränderung des Zusammenhangs der hydrochemischen Parameter bei verschiedenen Dürrestärken .....                                                                        | 77 |
| Tabelle 6-4: Übersicht über die Veränderung der Korrelationsstärke der hydrochemischen Parameter bei verschiedenen Dürrestärken bei direkter Korrelation der Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof .....  | 78 |

## Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen im Anhang

|                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung A 1: Messwehr nach Thomson .....                                                                                                                                                                                                                              | 90  |
| Abbildung A 2: Verifizierung der P/Q-Beziehung am Engebächle mittels<br>Salzverdünnungsmessung .....                                                                                                                                                                    | 90  |
| Abbildung A 3: Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit bei Temperaturkompensation mit<br>verschiedenen Temperaturniveaus nach Formel von ROMMEL (1980) zur<br>Überprüfung des Tagesgangs in der elektrischen Leitfähigkeit zu<br>Niedrigwasserabflussverhältnissen ..... | 91  |
| Abbildung A 4: Filterrohr zum Einbau in <i>Riparian Zone</i> .....                                                                                                                                                                                                      | 91  |
| Abbildung A 5: Zusammenhang zwischen Wasserchemie und Abfluss am Engebächle<br>.....                                                                                                                                                                                    | 92  |
| Abbildung A 6: <i>Echo Probes</i> Bodenfeuchtesonden (kleines Bild oben links) und deren<br>Einbau im Bodenprofil .....                                                                                                                                                 | 93  |
| Abbildung A 7: Schematische Darstellung des Wasserspiegels in den Grundwasserpegel<br>im Niedrigwasser- und im Ereignisfall .....                                                                                                                                       | 93  |
| Abbildung A 8: Übersicht über den Verlauf der Hauptionen in der Quelle U1 .....                                                                                                                                                                                         | 94  |
| Abbildung A 9: Übersicht über den Verlauf der Hauptionen in der Quelle U2 .....                                                                                                                                                                                         | 95  |
| Abbildung A 10: Übersicht über den Verlauf der Hauptionen in der Quelle U5 .....                                                                                                                                                                                        | 96  |
| Abbildung A 11: Übersicht über die im EZG Engebächle durchgeführten Messungen                                                                                                                                                                                           | 97  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
| Tabelle A 1: Messgenauigkeit der Diversonden (verändert nach GUWANG, 2004) .....                                                                                                                                                                                        | 98  |
| Tabelle A 2: Übersicht über die Standardabweichung der Ionenchromatographie –<br>Anionen .....                                                                                                                                                                          | 98  |
| Tabelle A 3: Übersicht über die Standardabweichung der Ionenchromatographie –<br>Kationen .....                                                                                                                                                                         | 100 |
| Tabelle A 4: Parameter der wöchentlichen Quellsbeprobung .....                                                                                                                                                                                                          | 102 |
| Tabelle A 5: Wasserchemieparameter der Quellgruppe Sägedobel .....                                                                                                                                                                                                      | 103 |
| Tabelle A 6: Wasserchemieparameter der Quellgruppe Steineck .....                                                                                                                                                                                                       | 104 |
| Tabelle A 7: Parameter der Wasserchemie Quelle Zängerlehof (Werte in mmol/l) ....                                                                                                                                                                                       | 105 |
| Tabelle A 8: Übersicht über den Korrelationskoeffizient r bei direkter Korrelation der<br>chemischen Parameter der Quelle Zängerlehof .....                                                                                                                             | 107 |
| Tabelle A 9: Übersicht über den Korrelationskoeffizient r bei direkter Korrelation der<br>chemischen Parameter der Quelle Zipfeldobel .....                                                                                                                             | 109 |

## Verzeichnis der Abkürzungen und Einheiten

|                               |                                                                                                           |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ah                            | Humoser Oberbodenhorizont                                                                                 |
| Ai                            | Oberbodenhorizont im Initialstadium                                                                       |
| Bv                            | Mineralbodenhorizont (v – für verwittert)                                                                 |
| Ca <sup>2+</sup>              | Calcium-Ion                                                                                               |
| Cl <sup>-</sup>               | Chlorid-Ion                                                                                               |
| EMMA                          | End Member Mixing Analysis                                                                                |
| EZG                           | Einzugsgebiet                                                                                             |
| GOK                           | Geländeoberkante                                                                                          |
| GW                            | Grundwasser                                                                                               |
| GW-Pegel                      | Grundwasserbeobachtungsrohr im Auenbereich                                                                |
| h                             | Wasserstand [cm]                                                                                          |
| Ho                            | Quelle Zängerlehof                                                                                        |
| K <sup>+</sup>                | Kalium Ion                                                                                                |
| LF                            | Spezifische elektrische Leitfähigkeit [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]                                         |
| m ü. NN                       | Meter über Normalnull [m]                                                                                 |
| mC                            | Festgestein                                                                                               |
| Mg <sup>2+</sup>              | Magnesium Ion                                                                                             |
| N                             | Niederschlag [mm]                                                                                         |
| Na <sup>+</sup>               | Natrium - Ion                                                                                             |
| Ni                            | Niederschlagsintensität [mm/10min]                                                                        |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | Nitrat                                                                                                    |
| O-18                          | Sauerstoff -18                                                                                            |
| PE                            | Pegel Engebächle                                                                                          |
| Q                             | Abfluss; Quellschüttung [l/s]                                                                             |
| Q70; Q80; Q90                 | Tagesmittel der Quellschüttung, welches zu 70% (80%; 90%) der Tage erreicht oder überschritten wird [l/s] |
| QU1 – QU6                     | Quellen, die in der unteren Quellfassung Steineck gefasst sind                                            |
| QO1 – QO6                     | Quellen, die in der oberen Quellfassung Sägedobel gefasst sind                                            |
| r                             | Korrelationskoeffizient                                                                                   |
| R <sup>2</sup>                | Bestimmtheitsmaß                                                                                          |
| S1-5                          | Bodenfeuchtesonden in 5 verschiedenen Tiefen                                                              |
| Si                            | Gelöste Kieselsäure (Silikat) [mg/l]                                                                      |
| SNK                           | Säureneutralisationskapazität [mmol/l]                                                                    |
| SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup> | Sulfat                                                                                                    |
| SB                            | Schwankungsbreite der Hauptionen [mmol/l]                                                                 |
| T                             | Temperatur [°C]                                                                                           |
| Zi                            | Quelle Zipfeldobel                                                                                        |

## Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit befasste sich vorwiegend mit der Erforschung der hydrologischen Prozesse in einem bewaldeten Einzugsgebiet während Niedrigwasser. Zu diesem Zweck wurde über einen Zeitraum von etwa fünf Monaten in dem bei Freiburg gelegenen, mikroskaligen Einzugsgebiet Engebächle ein intensives Messprogramm durchgeführt. Neben quantitativen Messungen wurden im wöchentlichen Rhythmus aus verschiedenen Systemen Wasserproben entnommen und auf den Gehalt an Haptionen und zum Teil auf das stabile Sauerstoff 18- Isotop hin untersucht.

Basis dieser Arbeit bildeten die in zweiminütiger Auflösung vorliegenden Abflussdaten des Engebächles. Hierzu wurde zu Beginn der Arbeit ein Messquerschnitt mit Dreicksüberfall am Engebächle errichtet und kontinuierlich Daten des Wasserstandes mittels einer CTD-Diversonde (Fa. Eijkelpomp/ van Essen) aufgezeichnet, welche anschließend über eine analytische Beziehung in den Abfluss umgerechnet werden konnten. Weiterhin war es mit den Sonden möglich, kontinuierlich die elektrische Leitfähigkeit und die Wassertemperatur zu messen. Zusätzlich zu dem Oberflächengewässer wurde zur Erfassung der Grundwasserdynamik und deren Einfluss auf das Abflussgeschehen im Engebächle drei Grundwassermessstellen in einer an den Bach angrenzenden Auenzone eingerichtet und ebenfalls mit CTD-Divern ausgestattet. Ferner wurden in einem charakteristischen Hangprofil über die gesamte Mächtigkeit verteilt kapazitativ messende Bodenfeuchtesonden eingebracht, um die Dynamik in den periglazialen Hangschichten zu erfassen.

Zu diesen Messungen kam die wöchentliche Untersuchung von zwölf im EZG Engebächle gelegenen Quellen, die der Ergänzung des Prozessverständnisses im Engebächle dienten. Die Untersuchung erfolgte sowohl mengenmäßig durch volumetrische Schüttungsmessungen als auch qualitativ durch die Erfassung der elektrischen Leitfähigkeit sowie die Analyse der Haptionen.

Die klimatische Situation während des Messzeitraums führte zu einer ausgeprägten Niedrigwasserphase von Ende Mai bis Ende Juni, und, unterbrochen durch eine überdurchschnittlich feuchte Phase im Hochsommer, zu einer weiteren zwei Wochen andauernden Trockenzeit zu Beginn des Septembers. Während beider niederschlagsfreien Perioden kam es zu sowohl im Abfluss des Engebächles als auch in den andern untersuchten Systemen zu einem deutlichen Rückgang der Wasserführung mit einem Minimum zum Ende der ersten Trockenperiode.

Ein gerade bei Niedrigwasser auftretender Tagesgang im Abfluss konnte im September durch zeitlich hochaufgelöste Handmessungen belegt und auf die Transpirationsleistung des Waldes zurückgeführt werden.

In Folge des feuchten Sommers mit mehreren starken Niederschlagsereignissen kam es im Zuge zunehmender Auffeuchtung zu einer deutlichen Veränderung der Trockenwetterauslaufcharakteristik im Engebächle als direkte Folge der

Niedrigwassersituation im Frühsommer. Auch im Verlauf der Quellschüttung sind ähnliche Reaktionen erkennbar. Als Erklärung hierfür wird die zeitliche Persistenz des anfänglichen Wasserdefizits in der Bodenzone angeführt, welches erst relativ langsam im Zuge zunehmender Niederschläge wieder aufgefüllt wurde.

Die regelmäßige Untersuchung der Quellen ergab trotz ihres kleinräumigen Auftretens eine durchaus heterogene Reaktion der Quellsysteme auf die verschiedenen klimatischen Verhältnisse, was sowohl auf die große Heterogenität der Fließwege innerhalb der Deckschichten als auch auf eine unterschiedliche Speicherraumansiedlung zurückgeführt wird. Aufgrund ihres hydrodynamischen und hydrochemischen Verhaltens konnten drei der zwölf untersuchten Quellen näher charakterisiert und als repräsentativ für die obere Bodenzone, den Bereich der Zersatzzone, sowie in einen tiefen Grundwasserspeicher ausgewiesen werden

Speziell die Ergebnisse der Quellenbeprobung bildeten das Grundgerüst für eine Abflusskomponentenseparation der über den gesamten Messzeitraum wöchentlich am Engebächle gezogenen Proben. Diese wurden anhand des Abflussgeschehens zum Probenahmezeitpunkt in ereignisbeeinflusste und ereignisunbeeinflusste Proben aufgeteilt, wobei die ereignisbeeinflussten Proben nochmals differenziert wurden. Wie zu erwarten, ergab sich durch die Bilanzierung eine Dominanz des tiefen Grundwassers zu Niedrigwasserzeiten. Erstaunlicherweise setzte sich diese, wenn auch teilweise abgeschwächt, im Ereignisfall fort. Ein Einfluss der Bodenzone konnte nur für Proben direkt während eines Ereignisses angedeutet werden. Eine gemäß früherer Studien zu erwartende, relativ oberflächennahe, dem Bereich des Saproliths zuzuordnende Grundwasserkomponente konnte im Bach über die gesamte Messperiode nicht nachgewiesen werden.

Zusätzlich zu den umfangreichen Feldmessungen wurde im Zuge dieser Arbeit eine statistische Auswertung bereits vorhandener Wasserchemiedaten zweier Quellen mit unterschiedlichem Bewaldungsgrad durchgeführt. Ziel war es, gerade zu Niedrigwasserzeiten unterschiedliche chemische Reaktionen der Quellen abhängig vom Bewaldungsgrad des Quellhanges zu erfassen. Hierzu boten sich die im Bruggaeinzugsgebiet gelegenen Quellen Zängerlehof (100% bewaldet) und Zipfeldobel (30% bewaldet) an. Für beide Quellen liegen ab Oktober 1999 wöchentliche Daten der Quellschüttung und der Wasserchemie vor. Durch Anwendung eines Schwellenwertansatzes wurde der gesamte Datensatz anhand der Häufigkeitsverteilung der jeweiligen Quellschüttung in drei, die verschiedenen Dürrestadien der Quelle repräsentierende Gruppen, aufgeteilt. Aufbauend auf dieser Einteilung wurden mehrere Korrelationsrechnungen durchgeführt.

Eine eindeutig quantifizierbare unterschiedliche Reaktion zwischen den beiden Quellen im Niedrigwasserfall konnte allerdings nicht nachgewiesen werden. Dieses wird zum einen auf die teilweise Bewaldung des zweiten Quellhanges und zum anderen auf die gerade aus der Gruppierung resultierenden geringen Datensätzen für die Korrelationsrechnung zurückgeführt. Die Einbeziehung weiterer Systeme in die Untersuchung könnte dem Abhilfe leisten.

## Extended English Summary

The objective of the following thesis was to investigate the hydrological processes in a forested catchment during low flows. For this purpose a five months lasting intensive measuring programme was conducted in the microscale catchment “Engebächle“. The basin is situated near Freiburg at the Southern Black Forest. Apart from quantitative measurements, water samples have been taken out of different systems on a weekly scale. The water samples were analysed for anions, cations and oxygen-18 isotopes.

The results of this study are based on runoff data of the “Engebächle“ which were recorded in two minutes resolution. To obtain this data, a V-notch weir was installed. Water height was recorded continuously by a CTD-Diver (Fa. Eijkelpkamp/van Essen) and transformed into volumetric runoff by an analytical relation. Furthermore it was possible to measure the electrical conductivity and water temperature by the CTD-Diver.

To observe the groundwater dynamics in the riparian zone and to quantify its influence on the runoff generation in the “Engebächle“ catchment, three piezometers (equipped with CTD drivers) were set up. Moreover, five soil moisture probes which are sensitive to changes in capacitance were installed to investigate the dynamics in the periglacial drift cover.

In addition to these measurements twelve springs situated at the “Engebächle“ basin were weekly observed in a quantitative and qualitative way. This was done quantitatively by measuring the water yield of the springs and qualitatively by measuring the electrical conductivity, the water temperature and by analysing major ions.

Due to the climatic situation during the investigation period, two low flow periods occurred. The first one happened in May/June and lasted five weeks, the second one, lasting two weeks, occurred in the first half of September. During these two periods the water yield in all investigated systems decreased and reached its minimum at the end of June. Characteristic for both periods was a diurnal variation in the runoff of the “Engebächle“. This could be explained by the daily variation of the transpiration rate of the forest.

July and August compensated for this lack of precipitation with rainfall amounts above long term average. In the course of the wet summer a change in the recession characteristic of the “Engebächle“ could be observed. This change was due to the low flow period at the beginning of summer. A similar reaction was visible in the water yield of the springs. As a reason for this, the persistence of the water deficit in the soil zone is assumed. As a result of rising precipitation input, this water deficit was filled up only in a slow way.

Although the springs are very close to each other they showed a different behaviour towards varying climatic situations. This can be explained by the significant heterogeneity of the subsurface flow paths in the periglacial drift covers as well as by different storage systems affecting the springs. Based on the hydrodynamical and hydrochemical data it was possible to characterize three of the twelve springs in more detail. They were assigned to different systems. One was chosen to be representative to the upper soil layer, one for the deeper soil zone (Saprolith) and the third one for the deep groundwater system.

A hydrograph separation was done for the water samples of the “Engebächle” using these three characterised springs as end members. Based on the flow situation during sampling, the water samples were separated in event and non-event samples. As expected, the separation resulted in a predominance of deep groundwater during low flow. Surprisingly, there was still a high amount of groundwater during rainfall events. The influence of an interflow component which was expected according to previous studies could not be proofed.

In addition to the field measurements, a statistical analysis of the hydrochemical data of two springs with different forest covers was conducted. The aim of this approach was to detect different reactions of the springs' hydrochemistry during low flow according to the degree of forest cover. For this statistical analyses data was derived from the springs “Zängerlehof” (100% forest cover) and “Zipfeldobel” (30% forest cover). They are situated in the “Brugga” catchment. For both springs weekly hydrochemical data and spring water yield was available since October 1999. Using a threshold method for the spring runoff, the whole data could be partitioned into three groups representing the different drought levels. For these groups several correlation analyses were done.

Although there have been different reactions in the water chemistry concerning the two springs during low flow, the reactions could not be quantified unambiguously. This might be due to the forest cover at both springs. Furthermore it can also be explained by the lack of data caused by grouping them into several drought levels. Therefore the investigation of more systems with a different degree of forest cover could be beneficial.

### **Key words**

Continuous data for runoff, electrical conductivity and water temperature; forested catchment; low-flow; groundwater dynamics; soil moisture; hydrochemistry; stable Isotopes; geogene Tracers; hydrograph separation; regression analysis; acid neutralisation capacity.

# 1 Einleitung

Die vielfältigen Interaktionen zwischen Landnutzung und Wasserhaushalt sind bedeutende Forschungsschwerpunkte in der hydrologischen Prozessforschung. Schon sehr früh begannen die Menschen mit kontinuierlichen Beobachtungen, inwiefern Landnutzungsänderungen, in Form von Abholzung und Urbarmachung, Folgen auf den Wasservorrat mit sich bringen. Intensiviert wurde die Forschungsarbeit aber insbesondere in den letzten 200 Jahren, in denen die hydrologische und meteorologische Rolle von Wäldern überaus große Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit erregt hat (ANDRÉASSIAN, 2004). Speziell die Auswirkungen von Extremereignissen in Form von Überschwemmungen und Dürren warfen die Frage nach dem direkten Einfluss des Waldmanagements (Abholzung bzw. Aufforstung) auf die Genese jener Extreme auf, weshalb sich ein großer Teil der in bewaldeten Einzugsgebieten durchgeführten Studien auf diesen Sachverhalt bezieht.

Neben dieser Regulierungsfunktion für den Wasserhaushalt erfüllen Wälder eine gerade für uns Menschen in der heutigen Zeit, immer bedeutsamer werdende Rolle. Wälder gelten als Quellbereiche sauberen Trinkwassers und stellen somit eine enorm wichtige Ressource dar (VON WILPERT & ZIRLEWAGEN, 2001;2002). Eine Kenntnis sowohl der hydrologischen als auch der hydrochemischen Entwicklung in diesen Gebieten ist daher von besonderer Relevanz.

Als Ursache für die gute Wasserqualität in Waldgebieten gelten insbesondere die hochwirksame Filter- und Pufferwirkung der Waldböden, sowie der vergleichsweise geringe Einsatz von Dünge- bzw. Pflanzenschutzmitteln in Wäldern. Allerdings unterliegen im Laufe der Zeit all diese Funktionen, hervorgerufen durch die Klimaänderung, einem Wandel. Um nachhaltig mit den gegebenen Ressourcen umgehen zu können, bedarf es daher eines aktuellen Einblicks in die in Waldgebieten ablaufenden hydrologischen Prozesse. Da diese sich meist unterhalb der Erdoberfläche abspielen und sich somit dem direkten Blickfeld des Betrachters entziehen, müssen die Erkenntnisse über indirekte Methoden gewonnen werden. Hier bietet sich insbesondere die Anwendung von natürlichen Tracern an. Grundlage dieser Methodik stellt der *Konvergenzansatz* dar (LEIBUNDGUT, 1984), demzufolge alle im Abfluss enthaltenen Informationen am Gebietsauslass konvergieren. Durch eine intensive Beobachtung sowohl der Dynamik des Abflusses als auch seiner hydrochemischen und isotopischen Eigenschaften, lassen sich Rückschlüsse auf Gebietseigenschaften und an daran gekoppelte Prozesse ziehen.

### ***1.1 Problemstellung und Zielsetzung***

Grundlage für diese Diplomarbeit bilden zwei in den Jahren 2003 (GUWANG, 2004) und 2004 (ADOLPH, 2005) durchgeführte Diplomarbeiten in Gebieten unterschiedlichen Bewaldungsgrades. Insbesondere die Ergebnisse von ADOLPH (2005), welche gerade zu Niedrigwasserzeiten eine divergierende chemische Reaktion unterschiedlich stark bewaldeter Gebiete zeigen, ergab neuen Forschungsbedarf. So stellt sich die Frage, inwiefern sich natürliche Tracer als Indikator für den „Dürrezustand“ eines Systems eignen.

Berücksichtigt man die herausragende Bedeutung der Wälder bezüglich der Trinkwasserversorgung, so ergibt sich weiterer Forschungsbedarf. Gerade im Zuge des prognostizierten Klimawandels und den damit verbundenen, künftig vermehrt auftretenden hydrologischen Extremen – wie etwa die Dürresituation im Sommer 2003 (LANGE & KÜLLS, 2005) – ist eine Erforschung der dominierenden hydrologischen Prozesse während und nach Niedrigwasserzeiten von großer Bedeutung, da diese neben dem Waldwachstum auch die mikrobielle Aktivität in Waldböden verändern und somit zu Einflüssen sowohl auf die Wasserqualität (ARMBRUSTER ET AL., 2003; FEGER ET AL., 1999; LORENZ ET AL., 2001) als auch auf die Wasserquantität führen.

Hauptziel der hier vorgestellten Arbeit ist demzufolge, mittels einer hochaufgelösten hydrometrischen und hydrochemischen Beprobung in einem bewaldeten Einzugsgebiet Aussagen über das Verhalten des hydrologischen Systems während Niedrigwasserzeiten zu treffen. Als hydrologisches Tool bot sich hierfür auch die Methodik der Abflussganglinienseparation an, mittels derer die Konstitution des Bachwassers zu Niedrigwasserabflüssen ermittelt werden kann.

Ein weiterer interessanter Aspekt in diesem Zusammenhang, der im Zuge dieser Arbeit aber aufgrund begrenzter zeitlicher Möglichkeiten nur am Rande behandelt werden konnte, ist, ob sich die Entwicklung der chemischen Zusammensetzung von Wässern aus bewaldeten Gebieten im Niedrigwasserfall grundsätzlich von der aus unbewaldeten Gebieten unterscheidet. Diese Frage gliedert sich aufgrund der hervorgehobenen Bedeutung von Waldgebieten für unsere Trinkwasserversorgung durchaus direkt in den obigen Themenkomplex ein und lässt eventuell ebenfalls Rückschlüsse auf die an der Abflussbildung beteiligten Prozesse zu.

Als erster Anstoß dazu wurde in dieser Arbeit versucht, über Korrelationsanalysen eventuelle Veränderungen der chemischen Zusammensetzung entsprechender Wässer aufzuzeigen. Datengrundlage hierfür bildeten mehrjährige Wasserchemie- und Schüttungsdaten zweier Schwarzwaldquellen mit unterschiedlichem Waldanteil.

## ***1.2 Stand der Forschung***

Wie bereits oben angedeutet, ist der Einfluss von Wäldern bzw. unterschiedlicher Waldnutzung (Aufforstung - Abholzung) auf den Wasserhaushalt Ziel vieler durchgeführter Arbeiten. Um den Einfluss des Waldes direkt quantifizieren zu können wurden des Öfteren zwei Gebiete mit ähnlichen Ausgangsvoraussetzungen miteinander verglichen, von denen eines einer Landnutzungsveränderung unterlag (BROWN ET AL., 2005; STEDNICK, 1996). Fasst man die Kernaussagen dieser Studien zusammen, so kann allgemein postuliert werden, dass in temperierten Gebieten eine Reduzierung des Waldbedeckungsgrades zu einer Erhöhung der jährlichen Wasserfracht führt (ANDRÉASSIAN, 2004; BROWN ET AL., 2005). Dies ist generell auf einen Rückgang der Verdunstung zurückzuführen - dementsprechend führen Wiederaufforstungsmaßnahmen zu einer geringeren jährlichen Wasserfracht. Direkte Auswirkungen sind aber erst ab einer Änderung von 20% der Bestandesfläche identifizierbar und variieren je nach Ausprägung des Einzugsgebiets sehr deutlich (STEDNICK, 1996).

Im Ereignisfall ist die Reaktion nicht eindeutig. Es kann sowohl zu einer Erhöhung des Scheitelabflusses (aber auch des gesamten Abflussvolumens) als auch zu einer Abnahme des Abflussvolumens als Folge von Bestandsumstrukturierungen kommen (ANDRÉASSIAN, 2004). Gerade diese widersprüchlichen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Prozesse der Abflussbildung unter Wald durchaus komplex sind und nicht nur vom Grad der Vegetationsbedeckung abhängen.

Aus diesem Grund ist die Abflussbildungsforschung in bewaldeten Gebieten sehr weit fortgeschritten. Eine sehr gute Übersicht über die Forschungsergebnisse gibt die Arbeit von BONELL (1993). Generell berücksichtigt werden muss in diesem Zusammenhang aber auch die Skalenproblematik. Die meisten Studien zur Prozessforschung wurden in mikroskaligen Gebieten durchgeführt und sind nicht ohne weiteres auf eine andere Skalenebene zu übertragen (BECKER, 1992). Auch gelten die Ergebnisse hauptsächlich für Gebiete in temperierten Klimaten.

Die ursprüngliche Annahme, dass der Abfluss im Ereignisfall durch Überschreitung der Infiltrationskapazität zustande kommt, konnte vor allem in Waldgebieten widerlegt werden. Aufgrund der hohen Dichte von Wurzeln und der Aktivität der Bodenlebewesen sind Waldböden von Makroporen geprägt, welche die Infiltrationskapazität im Ereignisfall erhöhen. Zusätzlich führt die organische Auflage zur verstärkten vertikalen Sickerung. Durch Makroporen, aber auch durch Klüfte, kann es zu einer Umgehung der Matrix im vertikalen Fluss kommen, was dazu führt, dass das Ereigniswasser schneller zur gesättigten Zone vordringt (MCDONNELL, 1990).

Oftmals führen starke Niederschläge auch zur Ausbildung einer Sättigungszone, in der es hangparallel zum Abfluss kommt, wobei die Durchlässigkeiten gerade im oberen Bodenbereich durchaus bemerkenswert sind (UHLENBROOK, 1999).

Dennoch sind im Ereignisfall des Öfteren erhebliche Anteile an Vorereigniswasser im Gesamtabfluss enthalten. Die Frage nach der Herkunft des „alten“, bereits vor dem

Ereignis im System gespeicherten Wassers, konnte durch die Mechanismen des *Pistonflows* und des *Groundwaterripping* erklärt werden (BONELL, 1993). Zusätzlich müssen ablaufende Lösungsprozesse des Direktwassers bei der Matrixpassage berücksichtigt werden, da es ansonsten zu einer generellen Überschätzung des Vorereigniswassers im Abfluss kommen kann (FERGUSON ET AL., 1994).

Eine Identifizierung der dominierenden Prozesse der Abflussbildung ist neben den hydrodynamischen Methoden auch durch hydrochemische (Methoden) möglich. Hierfür bietet sich die Abflusskomponentenseparation, auch *End-member-mixing-analysis* (EMMA) genannt, mit natürlichen Tracern an. Generell ist aber anzumerken, dass sich zur EMMA herangezogene Stoffe im System konservativ verhalten müssen. Daher gelten insbesondere die stabilen Isotope des Sauerstoffs (O-18) und des Wasserstoffs (Deuterium), die integrale Bestandteile des Wassermoleküls sind, als ideale Tracer und werden dementsprechend oft in der hydrologischen Prozessforschung verwendet. Allein am Institut für Hydrologie der Universität Freiburg sind mannigfaltige Anwendungsbeispiele für stabile Isotope gegeben. UHLENBROOK (1999), LINDENLAUB (1997) und DIDSZUN (2004) führten neben Verweilzeitenbestimmungen auch Ganglinienseparationen anhand stabiler Isotope durch. KÖNIGER (2003) nutzte die Informationen zur Quantifizierung von Grundwasserneubildung in einem bewaldeten Gebiet im Oberrheingraben. Auch außerhalb des hydrologischen Instituts kamen sehr viele Isotopenanwendungen zur Veröffentlichung. Insbesondere zur Abtrennung des Herkunftsraumes gibt es sehr viele Studien (unter anderem BAZEMORE ET AL., 1994; CASPER, 2002; SKLASH & FARVOLDEN, 1979).

Neben den stabilen Isotopen lässt sich die EMMA auch anhand unterschiedlicher Ionenkonzentrationen durchführen. Hierzu ist besonders das Anion Chlorid, aufgrund seiner geringen Sorptionsneigung, welche durch seine Größe und Ladung hervorgerufen wird, geeignet (BAZEMORE ET AL., 1994; PETERS & RATCLIFFE, 1997). Weiterhin findet man in der Literatur Anwendungsbeispiele für Sulfat. Bei der Abtrennung von drei Komponenten kommt zusätzlich noch der Konzentrationsverlauf von Calcium (HOOPER ET AL., 1998) hinzu. Beispiele gibt es auch für den Einsatz von Sulfat in Kombination mit Natrium (BURNS ET AL., 2001). Die Aussagen daraus sind aber in Folge der Wechselwirkung mit der Vegetation, sowie aufgrund verschiedener Abbaumechanismen, wie beispielsweise der Reduzierung von Sulfat in gesättigten Bereichen (ARMBRUSTER ET AL., 2003), unter Vorbehalt anzusehen.

Weitere Identifizierungsmerkmale zur Herkunftsraumabtrennung sind die Alkalinität und der pH-Wert (JARVIE ET AL., 2001), die Temperatur (SHANLEY & PETERS, 1988), sowie die elektrische Leitfähigkeit (LAUDONA & SLAYMAKER, 1997).

Betrachtet man den gerade für diese Arbeit bedeutenderen Niedrigwasserfall, so kann man generell zusammenfassen, dass in bewaldeten Gebieten die Abflussspenden geringer sind als in unbewaldeten oder gerodeten Gebieten, da insbesondere während der Sommermonate Niedrigwasser auftritt, in denen Verdunstung und Interzeption am höchsten sind (ANDRÉASSIAN, 2004). Auch reicht in Waldgebieten der Wurzelraum in

eine größere Tiefe vor, was somit zu einer tief greifenden Wasserentnahme aus der Bodenzone führt. Daraus resultieren neben den primären Folgen wie dem Rückgang der Wassermengen und der Wasserstände im Bodenspeicher, Grundwasserleiter und Fließgewässer auch sekundär weitere Gefährdungspotentiale, wie die Minderung der Wasserqualität, sowie Folgen für Flora und Fauna (FVA, 2004; KLEEBERG & MAYER, 1999). Ein gutes Beispiel hierfür stellen die Auenbereiche entlang des Baches (*Riparian Zones*) dar, die einen entscheidenden Einfluss auf die Wasserqualität oberirdischer Gewässer haben. Sie agieren als eine Art Puffer und beeinflussen somit die Zusammensetzung der Abflusskomponenten während eines Ereignisses (MCGLYNN, 2005). Besonders hervorzuheben ist hier die Denitrifikation von Nitrat im wassergesättigten Zustand, was für die Eutrophierungsproblematik oberirdischer Gewässer von großer Bedeutung ist (FEGER ET AL., 1999).

Auch bei Niedrigwasserperioden, sowie insbesondere bei stark schwankenden Wasserspiegeln im Auenbereich, üben sie deutlichen Einfluss auf die Wasserchemie aus, wie z. B. eine erhöhte Sulfatfreisetzung im Anschluss an eine Niedrigwasserperiode (ARMBRUSTER ET AL., 2003; HUNTINGTON ET AL., 1994).

MOSLEY & ROWE (1981) führten eine Studie über die saisonale Änderung der hydrochemischen Zusammensetzung von Oberflächengewässern durch. An 19 verschiedenen Orten – zum Teil bewaldet, zum Teil als Weideland genutzt – wurden im Zeitraum von 1979–1980 auf wöchentlicher Basis Wasserproben entnommen und auf die Ionen Natrium, Magnesium, Kalium, Calcium, Ammonium, Phosphat und Nitrat untersucht. Weiterhin wurden im wöchentlichen Rhythmus der Abfluss (sofern keine kontinuierliche Aufzeichnung eingerichtet war) und die elektrische Leitfähigkeit bestimmt.

Eine saisonale Abhängigkeit in der Wasserchemie konnte mittels der elektrischen Leitfähigkeit eindeutig nachgewiesen werden, wobei die unterschiedliche Landnutzung in dieser Betrachtung vernachlässigt wurde. Diese saisonalen Schwankungen wurden auch von RICE & BRICKER (1995) in einer Studie in zwei bewaldeten Einzugsgebieten im Osten der USA nachgewiesen, mit erhöhten Sulfatgehalten im Winter, hervorgerufen durch den größeren Direktabflussanteil, sowie einer maximalen Basizität, verbunden mit einem entsprechenden Anstieg der basischen Kationen während der Niedrigwasserperiode im Sommer.

Deutlich wird aber der zusätzliche Forschungsbedarf in der Frage, inwiefern Landnutzungsänderungen im Niedrigwasserfall direkt zu Änderungen in der Wasserchemie und somit in der Wasserqualität führen. MOSLEY & ROWE (1981) untersuchten zwar auch den Zusammenhang zwischen Landnutzung und Wasserchemie, direkte Aussagen bezüglich der Tendenzen in der Wasserchemie zu Niedrigwasserzeiten lassen sich aus ihrer Arbeit nicht entnehmen. Auch die statistischen Niedrigwasserstudien beschäftigten sich bisher eher mit dem regionalen und zeitlichen Aspekt der Dürreperioden (DEMUTH, 1993; STAHL, 2001) lassen die Wasserchemie aber außer Betracht.

## 2 Untersuchungsgebiete

Die Wahl des Untersuchungsgebietes unterlag verschiedenen Kriterien. Neben der Landnutzung war speziell wegen des relativ dichten Beprobungszeitraums wichtig, dass das Gebiet gut an das Verkehrsnetz angebunden ist und nicht zu weit von Freiburg entfernt liegt. Des Weiteren war das Gebiet bereits Ziel einer vorangegangenen Untersuchung, so dass eine solide Datengrundlage und ein gewisser Erfahrungsschatz vorhanden waren. Verwiesen werden soll an dieser Stelle auf die Arbeit von ADOLPH (2005), der unter anderem im Gebiet Engebächle bereits sehr viele Informationen gesammelt hat, auf denen diese Arbeit aufbaut.

Bei den für die statistische Auswertung herangezogenen Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof (vgl. a. Kapitel 6) war der unterschiedliche Bewaldungsgrad von oberster Priorität. Für beide Quellen liegen bereits seit Ende Oktober 1998 sowohl Schüttungs- als auch Hydrochemiedaten in wöchentlicher Auflösung vor, so dass hier auch Langzeitwirkungen, folgend aus der Dürre im Sommer 2003, untersucht werden konnten. Beide Quellen waren bereits Inhalt unterschiedlicher Arbeiten (DIDSZUN, 2000;2004; LINDENLAUB, 1998; UHLENBROOK, 1999), so dass die dominierenden Abflussbildungsprozesse als bekannt angenommen werden können.

Aufgrund dessen, dass das Einzugsgebiet Engebächle das Hauptuntersuchungsgebiet dieser Arbeit darstellt, erfolgt an dieser Stelle eine ausführliche Beschreibung dieses Gebietes. Die Beschreibung der beiden Quellen wird etwas kürzer gefasst.

### *2.1 Einzugsgebiet Engebächle*

#### **2.1.1 Morphologie, Topographie und naturräumliche Lage**

Das Einzugsgebiet (EZG) Engebächle liegt ca. 15 km südwestlich von Freiburg. Mit einer Größe von etwa 1,3 km<sup>2</sup> wird es der hydrologischen Mikroskala zugeordnet (BECKER, 1992). Die Form des EZG zeigt einen relativ schmalen und langgezogenen Verlauf. Die breiteste Stelle im EZG sind ca. 800 m, die maximale Längserstreckung beträgt 2,15 km (vgl. a. Abbildung 2-1).

Das EZG erreicht eine maximale Höhe von 858 m ü. NN. Der EZG-Auslass befindet sich auf einer Höhe von 430 m ü. NN. Die Länge des Hauptbachlaufs beträgt 2,3 km. Zusammen mit den beiden Nebenarmen ergibt sich eine gesamte Gewässernetzlänge von 3,4 km, woraus sich eine Gewässernetzdichte von 2,6 km/km<sup>2</sup> ergibt, welche als durchaus typischer Wert für den Schwarzwald gelten kann. Das mittlere Gefälle des Engebächle liegt bei etwa 17 %, was relativ steil, aber dennoch typisch für die Quellregion eines Mittelgebirgsbaches ist.

Der Bachlauf ist teilweise äußerst tief ins Gelände eingeschnitten, so dass daraus sehr steile Hangabschnitte resultieren. Die Übergangszone zwischen Hangfuß und Bach ist vereinzelt durch Auenbereiche geprägt. Diese befinden sich in Teilen des mittleren und unteren Bachlaufes und können bis zu mehreren zehner Metern breit sein. Die Auswirkung dieser Zone war unter anderem Forschungsbestandteil dieser Arbeit.

Die Lage des Pegels wurde im Vergleich zur vorangegangenen Arbeit (ADOLPH, 2005) um ca. 500 m bachaufwärts verschoben. Somit sollten anthropogene Einflüsse durch die direkt am Bach gelegene Stöckenmühle weitestgehend ausgeschlossen werden. Allerdings befindet sich etwa 30 m pegelaufwärts ein Fischteich, für welchen, insbesondere bei Niedrigwasser, prozentual große Abflussmengen ausgeleitet werden. Dies könnte zur Folge haben, dass die am Pegel aufgezeichneten Werte der Wassertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit stark durch den Fischteich geprägt sind. Entsprechende Messungen konnten dies aber nicht eindeutig bestätigen oder ausschließen (vgl. Absatz 4.4).

Eine weitere Beeinflussung des Abflussgeschehens sowie der im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Messungen, entsteht durch das Wegenetz im EZG. Gerade im unteren Gebietsabschnitt in direkter Pegelnähe laufen zwei Waldwege parallel in unmittelbarer Nähe des Bachlaufes. Als Folge der Wegverbauung mit kalkhaltigem Material, die teilweise ins Bachbett hineingreift, kommt es zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit mit zunehmender Fließdauer, was bei der Interpretation der Messergebnisse berücksichtigt werden muss.

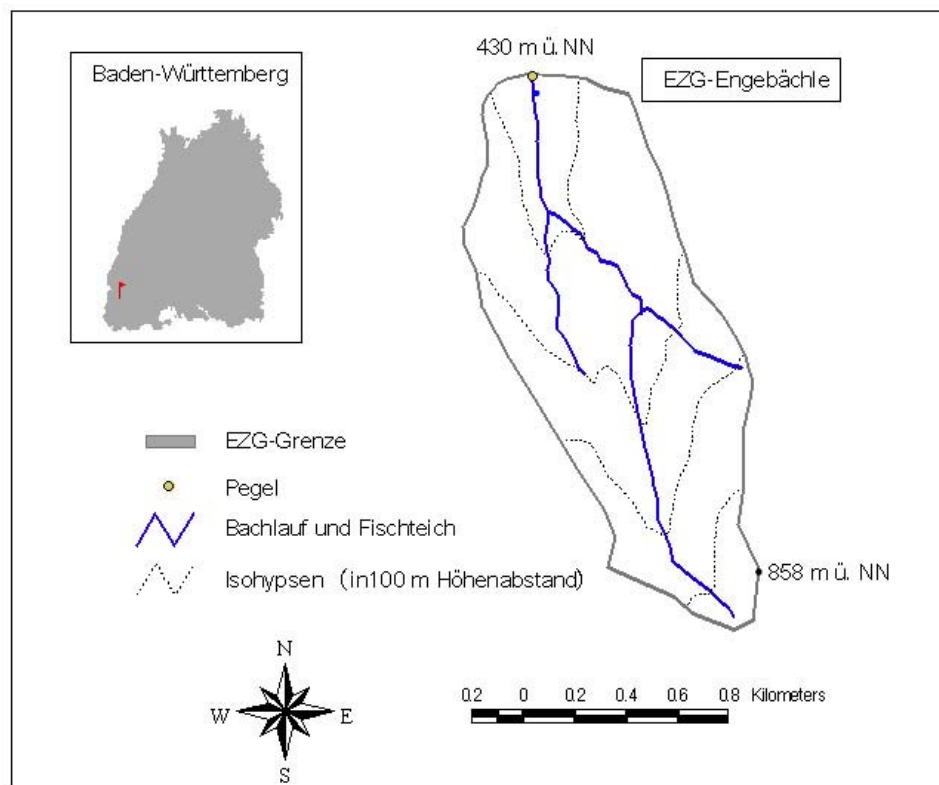
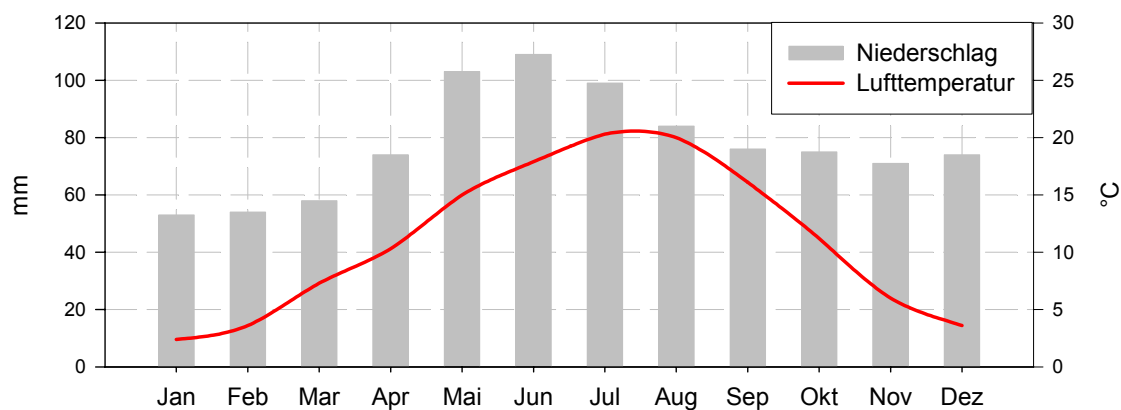


Abbildung 2-1: Übersicht über das Einzugsgebiet Engebächle

### 2.1.2 Klima

Das Klima in der Region um Freiburg ist eindeutig von Westwinden dominiert, die das ganze Jahr über ausreichend Niederschläge bringen, so dass es, wie in Abbildung 2-2 dargestellt, über den längeren Jahresverlauf gesehen keinen ausgeprägten Feucht- oder Trockenzeitraum gibt (PARLOW & ROSNER, 1997). Die jährliche Niederschlagsmenge unterliegt besonders in den nach Westen abfallenden Hangbereichen des Schwarzwaldes einer Höhenabhängigkeit und schwankt zwischen 944 mm im Bereich Freiburg (300 m ü. NN) und knapp 1800 mm auf dem Feldberg (1486 m ü. NN) (UHLENBROOK, 1999). Für das nach Westen ausgerichtete Gebiet des Engebächle kann eine jährliche Niederschlagsmenge von ca. 900-950 mm angenommen werden (ADOLPH, 2005).

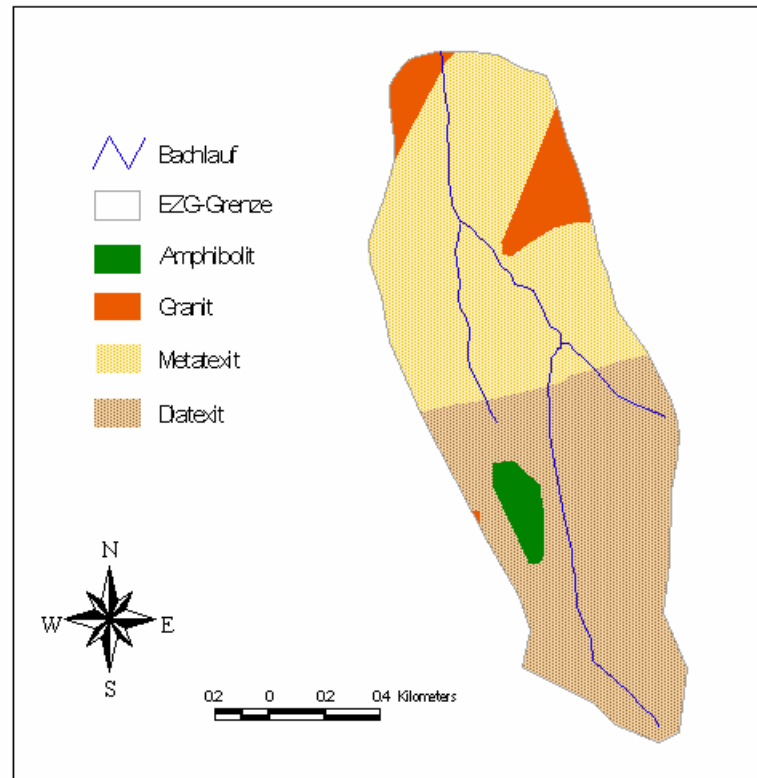


**Abbildung 2-2:** Langjähriges Mittel des Niederschlags und der Lufttemperatur der Klimanormalperiode 1971–2000 an der Stadtstation Freiburg (Daten aus [www.Klimadiagramme.de](http://www.Klimadiagramme.de))

### 2.1.3 Geologie und Pedologie

Das EZG Engebächle ist im Bereich von ca. 10 km östlich der Schwarzwaldrandverwerfung gelegen, welche den kristallinen Grundgebirgsschwarzwald von dem im Tertiär abgesunkenen Oberrheingraben und den darin vorkommenden isolierten Vorbergsschollen abgrenzt, bei denen meist Ablagerungen aus dem Trias und Jura das Anstehende bildet. Das Anstehende im Bereich des Grundgebirgsschwarzwaldes setzt sich überwiegend aus Gneisen verschiedener Genese zusammen. Generell bilden der aus präkambrischen Sedimentserien entstandene Paragneis sowie Anatexite, welche nach der Vergneisung durch regionale Metamorphose mehr oder weniger stark umgewandelt wurden, den Hauptanteil (ERNST & WIDEMANN, 1986; GLA 1996).

Im Engebächle dominieren Anatexite, die in den Quellbereichen in Form von dunkleren Diatexiten und im Bereich des Pegels als Metatexite vorkommen. Daneben findet man größere Granit- und Amphibolitbereiche. Abbildung 2-3 gibt eine Übersicht über die Geologie des Gebietes.



**Abbildung 2-3: Übersicht über die Geologie des EZG Engebächle (nach GLA, 1996)**

Pedologisch betrachtet fallen die im periglazialen Bereich des Kristallin gelegenen Regionen in den Bodentypus der Silikatserie. Je nach Dauer der Bodenbildung sowie Verwitterbarkeit und Mächtigkeit der periglazialen Hauptfolge hat sich die Bodenbildung unterschiedlich stark in Richtung Braunerde (*Ah-Bv-C*) entwickelt. Insbesondere die Mächtigkeit des pleistozänen Frostschuttes ist hier als Steuerungsregulator für die holozäne Bodenbildung hervorzuheben, da diese nicht direkt auf dem anstehenden Gestein abläuft. Weiterhin gilt auch die Steilheit des Geländes als Regulierungsfaktor für die Bodenbildung. So kann davon ausgegangen werden, dass in sehr steilen Bereichen innerhalb der Einzugsgebiete die Bodenbildung beim Entwicklungsstadium des Syrosems (*Ai-mC*) bzw. des Rankers (*Ah-mC*) stehen geblieben ist. In der tieferen, nach Westen ausgerichteten submontanen Fußzone im Höhenbereich von 300-600 m ü. NN (Taleinschnitte, aber auch die unteren Hangbereiche), könnte aufgrund von Lößeinwehung in die Basislage auch eine Entwicklung zu inzwischen vollständig entkalkten Parabraunerden-Braunerden (*Ah-AlBv-Btv-C*) stattgefunden haben (HÄDRICH & STAHR, 1997).

Der vorherrschende Bodentyp im Engebächle ist die Braunerde. Ein zur Erfassung der Bodenfeuchte erstelltes Bodenprofil (vgl. a. Abbildung A 6) wurde vom Autor als Braunerde mit einem zweitem, etwas skelettreicheren *Bv*- Horizont (*Ah-IBv-IIBvCv-C*) klassifiziert. Eine Kalkbeeinflussung im Profil konnte durch einen Lösungsversuch mit 1-molarer Salzsäure (HCl) nicht festgestellt werden. Durch mehrere Sondierungen mittels eines *Pürckhauer-Bohrstock* konnten vereinzelte auftretende Vergleyungserscheinungen in hydromorph beeinflussten Bereichen nachgewiesen werden.

#### **2.1.4 Landnutzung**

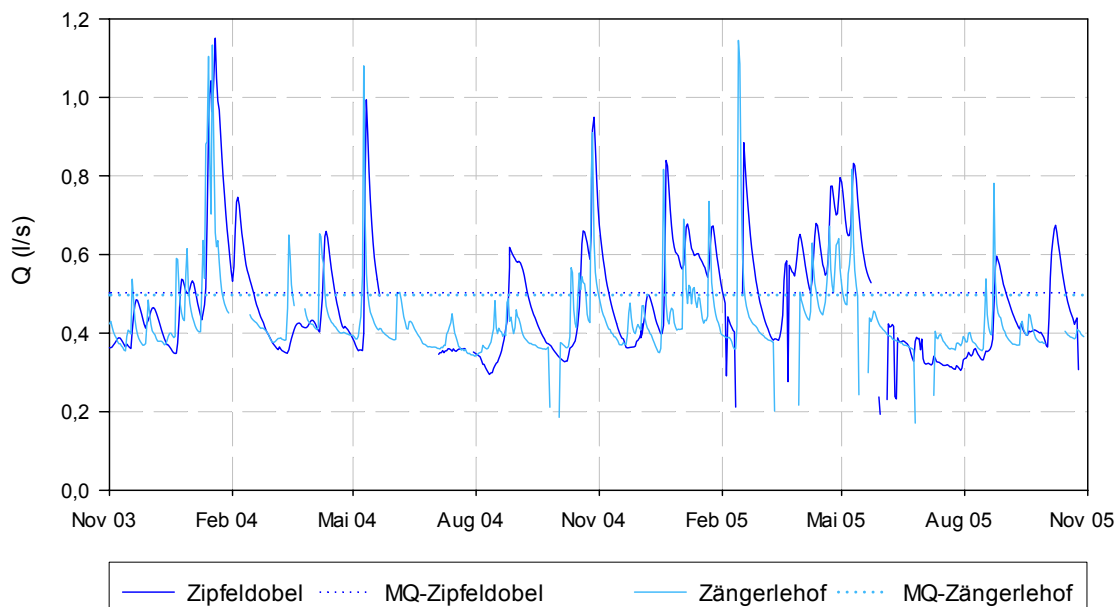
Aufgrund des Forschungszieles ist bei der Landnutzung vor allem der Waldanteil von Interesse. Durch die Verlagerung des Pegels im EZG Engebächle ist dieses Gebiet vollständig bewaldet. Die Bestandsstruktur im Gebiet setzt sich aus ungefähr gleichen Teilen von Fichte, Tanne, Douglasie und Buche zusammen. Weiterhin findet man Eichen, Bergahorn, Kiefern und Lärchen in geringeren Anteilen (STADT FREIBURG, 2003).

## 2.2 Die Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof

Die Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof liegen ca. 20 km östlich von Freiburg im Einzugsgebiet der Brugga. Dieses ist im Bereich des Zentralschwarzwälder Gneis, Anatexit-Gebirge gelegen (GLA, 1996). LINDENLAUB (1998) ordnete beide Quellen anhand von Silikat und Temperaturdaten dem Hangschutt-Typus zu, der einen deutlichen jahreszeitlichen Verlauf der Temperatur aufweist. Der Speicher dieses Quelltypus liegt in den mehr oder minder mächtigen Hangschuttdecken.

Betrachtet man die Landnutzung, so ist der Quellhang der Quelle Zipfeldobel nur im oberen Drittel bewaldet (Fichte), die restliche Fläche wird zur extensiven Grünlandnutzung als Mähwiese und Weide bewirtschaftet. Die Quelle Zängerlehof dagegen ist analog der Quellen im EZG Engebächle unter Wald (Fichte) gelegen (DIDSZUN, 2000).

Naturräumlich sind die Quellen ca. 2,5 km voneinander entfernt und liegen jeweils am Fuße eines nach Norden ausgerichteten Hanges mit einem Gefälle von ca. 25 %. In Abbildung 2-4 sind die Schüttungsdaten der jeweiligen Quelle für die letzten beiden Jahre, sowie die mittlere Quellschüttung dargestellt. Hier wird bereits deutlich, dass beide Quellen ein ähnliches Schüttungsverhalten zeigen. Daten zum Hydrochemischen Verhalten der Quellen sind in Kapitel 6, in dem die statistische Auswertung auf Grundlage von Schüttungs- und Wasserchemiedaten beschrieben ist.



**Abbildung 2-4: Verlauf der Quellschüttung der Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof im Zeitraum Nov. 2003 – Nov. 2005**

### 2.2.1 Quelle Zipfeldobel

Der Quellaustritt der tiefer gelegenen Quelle Zipfeldobel befindet sich auf 530 m ü. NN (Rechts/ Hoch-Wert 34 20 955 / 53 10 100). Die mittlere Schüttungsrate beträgt 0,53 l/s (Zeitraum Oktober 1998 – Oktober 2005). Das Maximum der Schüttung für den beprobten Zeitraum liegt bei 2,66 l/s, das Minimum bei 0,29 l/s. Nach Beobachtungen von DIDSZUN (2000) reagiert die Quelle auf Niedrigwassersituationen relativ langsam und schüttet selbst nach längeren Trockenzeiten ca. 0,4 l/s.

Mit einer mittleren Leitfähigkeit von 53,78  $\mu\text{S}/\text{cm}$  kann sie der Gruppe der gering mineralisierten Quellen zugeordnet werden. Die mittlere Wassertemperatur beträgt 9,75 °C. Der Verlauf der Wassertemperatur zeigt einen ausgeprägten Jahresgang mit einer Amplitude in der Größenordnung von  $\Delta T$  4-4,5 °C (LINDENLAUB, 1998). Die ebenfalls deutliche Reaktion auf einzelne Niederschlagsereignisse im Temperaturverhalten der Quelle führt zu einer unruhigen Temperaturanglinie (vgl. Abbildung 2-5).

Im September 1998 wurde durch Intensivbeprobung während eines Ereignisses mittels der Wasserchemie die Abflussbildung der Quelle Zipfeldobel untersucht. Anhand des kurzzeitigen Anstiegs in der Nitrat- und Kaliumkonzentration, sowie dem Rückgang des Silikatgehalts, konnte eine gewisse Direktabflusskomponente zu Beginn des Ereignisses nachgewiesen werden. UHLENBROOK (1999) beschränkte diesen Anteil aber auf maximal 10 % des Abflussvolumens. Aufgrund der konstanten Frachten der anderen untersuchten Hauptionen wurde aber der *Piston-Flow-Effect* als dominierender Prozess der Abflussbildung an dieser Quelle ermittelt. Ebenfalls wurde anhand wöchentlicher Messungen des stabilen Sauerstoffisotops O-18 die mittlere Verweilzeit in dieser Studie berechnet. Zum Einsatz kam hier das *Exponential-Piston-Flow Modell* nach MALOSZEWSKI & ZUBER (1996). Die Simulation ergab eine mittlere Verweilzeit von 36 Monaten für die Quelle Zipfeldobel (UHLENBROOK, 1999).

### 2.2.2 Quelle Zängerlehof

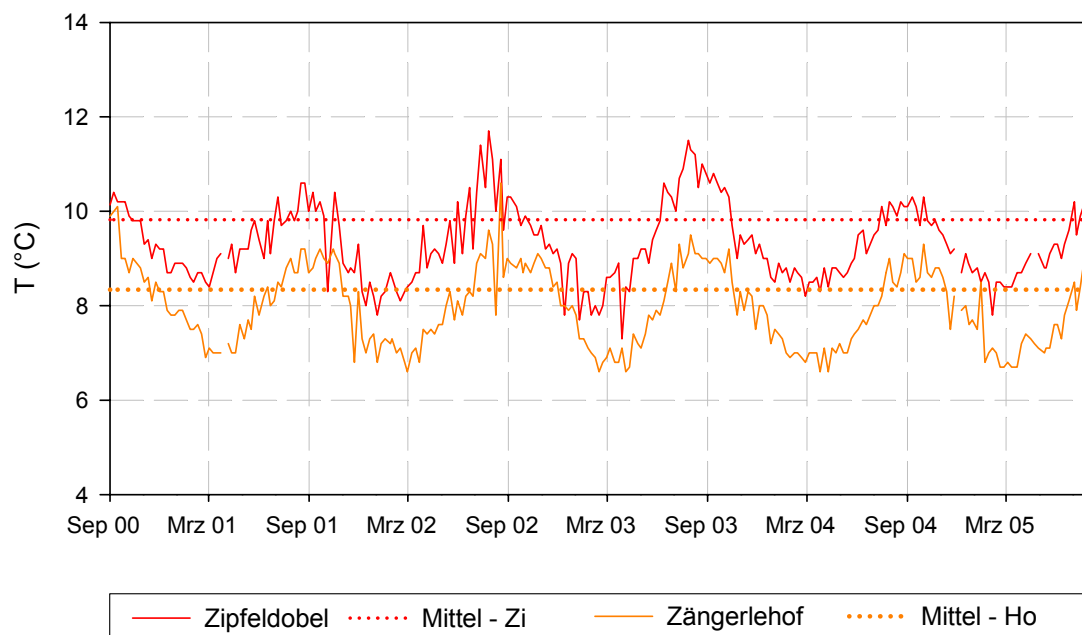
Die unter Wald gelegene Quelle Zängerlehof liegt auf einer Höhe von 655 m ü. NN (Rechts/ Hoch-Wert 34 20 600 / 53 07 325). Die mittlere Quellschüttung für obigen Zeitraum beträgt 0,5 l/s, die Schwankungsbreite ist gegenüber der Quelle Zipfeldobel jedoch etwas abgeschwächt – das Maximum der Schüttung liegt bei 1,24 l/s, das Minimum bei 0,32 l/s.

Der Mineralisationsgrad dieser Quelle ist etwas höher als der der Quelle Zipfeldobel. Als Resultat daraus kommt es zu einer etwas höheren elektrischen Leitfähigkeit von im Mittel 79,39  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Auch die Quelle Zängerlehof zeigt einen eindeutigen Temperaturjahresgang mit einem Jahresmittel von 8,35 °C. Dieser ist, wie ebenfalls in Abbildung 2-5 dargestellt, in der gleichen Größenordnung wie bei der Quelle Zipfeldobel angesiedelt. Allerdings reagiert

die Quelle in ihrem Temperaturverhalten kaum auf Niederschlagsereignisse, was zu einem ruhigeren Temperaturverlauf führt. LINDENLAUB (1998) führt dies unter anderem auch auf den hohen Waldanteil der Quelle zurück.

Die von UHLENBROOK (1999) durchgeführte Bestimmung der Verweilzeit führte zu einem Ergebnis von 28 Monaten und ist somit etwas kürzer als die der Quelle Zipfeldobel.



**Abbildung 2-5: Verlauf der Wassertemperatur der Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof im Zeitraum Sept. 2000 – Sept. 2005**

### 3 Methodik

Im weiteren Verlauf erfolgt eine Übersicht über die im Zuge der Diplomarbeit angewendete Methodik. Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Hydrometrie. Insbesondere während der Anfangsphase musste sehr viel Arbeit im Gelände verrichtet werden, um die entsprechende Messgerätestruktur zu erreichen. Kapitel 3.3 gibt einen Überblick über die eingesetzten Messgeräte, sowie die weiteren durchgeführten Routinebeprobungen. Ein weiteres Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt bei den Einsatzmöglichkeiten natürlicher Tracer. Diese werden in Kapitel 3.1 kurz charakterisiert. Im Abschnitt 3.2 werden die Grundlagen für die Abflusskomponentenseparation erläutert. Auf die im Zuge von natürlichen Tracern unverzichtbaren Laborarbeiten wird in Kapitel 3.4 eingegangen.

#### 3.1 *Verwendete Tracer*

Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Arbeit von ADOLPH (2005) wurde das Hauptaugenmerk auf den Einsatz von natürlichen Tracern gerichtet. Der Schwerpunkt lag hierbei auf den Hauptinhaltsstoffen des Wassers, die in Kapitel 3.1.1 näher vorgestellt werden. Zusätzlich zu den Hauptionen wurde als integraler Faktor die Säureneutralisationskapazität definiert. Weiterhin wurden die elektrische Leitfähigkeit und die Wassertemperatur kontinuierlich aufgezeichnet, um anhand dessen erste Anhaltspunkte bezüglich der hydrologischen Situation im Gebiet abzuleiten.

##### 3.1.1 Hauptionen

Zu den Hauptionen natürlicher Wässer zählt man die Kationen Natrium ( $\text{Na}^+$ ), Kalium ( $\text{K}^+$ ), Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) und Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sowie die Anionen Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ), Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) und Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ). Mit der Erfassung dieser Ionen sind, mit Ausnahme von Wässern besonderer Herkunft, meist über 98% der gesamten Ionenfracht bekannt (KIENZLER, 2001). Da die Untersuchungsgebiete aber allesamt auf silikatischem Ausgangsmaterial liegen, konnte von einer direkten Erfassung des basischen Anions  $\text{HCO}_3^-$  abgesehen werden.

Durch eine kontinuierliche Aufzeichnung der Dynamik der Hauptionen über einen längeren Zeitraum ist es möglich, die Reaktionen des Stoffhaushaltes auf verschiedene Einflüsse zu erfassen und zu quantifizieren. Dies war bereits Ziel mehrerer Studien (z. B. ARMBRUSTER ET AL., 2003; ARMBRUSTER ET AL., 2000; VON WILPERT & ZIRLEWAGEN, 2001).

Weiterhin kamen die Hauptionen auch bei Untersuchungen zur Abflussbildung zum Einsatz. Zum einen können durch die Reaktion verschiedener Ionen Fließpfade

ausgewiesen werden (DIDSZUN, 2004), zum anderen kann man mittels verschiedener Konzentrationen Herkunftsräume unterscheiden, was wiederum zur Abflusskomponentenseparation genutzt werden kann. Das Problem hierbei ist jedoch die mangelnde Konservativität der gelösten Stoffe aufgrund physikalischer und chemischer Reaktionen entlang des Fließweges. Als weitgehend konservativ in Folge seiner Größe und Ladung kann Chlorid betrachtet werden. Es war daher Inhalt zahlreicher Arbeiten zur Komponententrennung (BAZEMORE ET AL., 1994; PETERS & RATCLIFFE, 1997).

Die natürlichen Quellen für die Hauptionen liegen neben der nassen oder trockenen atmosphärischen Deposition vor allem in der Verwitterung des Ausgangsmaterials. Weiterhin findet ein anthropogener Eintrag über atmosphärische Schadstoffe, Düngung bzw. diverse andere Quellen, wie z. B. Streusalz (DIDSZUN, 2004) in das System statt.

Eine übersichtliche Art zur Darstellung der Ergebnisse von Ionenanalysen bietet das *Piperdiagramm*. In Piperdiagrammen können aufgrund der gleichzeitigen Darstellung aller untersuchten Ionen eindeutige qualitative und quantitative Aussagen zur Ionenverteilung der untersuchten Wässer getroffen werden. Ferner kann man bei entsprechender Signaturwahl auch zeitliche Variationen klar erkennbar aus Piperdiagrammen entnehmen (HÖLTING ET AL., 1982).

Zur Erstellung von Piperdiagrammen kam im Zuge dieser Arbeit das Softwarepaket *AquaChem, Version 3.1*, entwickelt von *Waterloo hydrogeologic*, zur Anwendung.

### ***Natrium***

Ausgangspunkt für einen großen Teil des Natriums in der Bodenlösung sind die Feldspate (Plagioklas), welche meist in der Schlufffraktion der Böden vorkommen. Durch Hydrolyse gelangt das Natrium als Ion in die Bodenlösung. Ein weiterer bedeutender Eintragspfad stellt die Deposition über den Niederschlag dar. In meeresfernen Gebieten liegt der jährliche Input über die Atmosphäre bei ca.  $1\text{-}10\text{ kg ha}^{-1}\text{ a}^{-1}$ . Im zeitlichen Verlauf ist beim Niederschlagsinput die Depositionsrate zu Beginn eines Ereignisses am höchsten. Dies wird sowohl dem Auswaschen von Partikeln in tieferen Atmosphärenschichten als auch dem Ablösen trockener Deposition an Pflanzenoberflächen zugeschrieben (PETERS ET AL., 1998).

Da Natrium im Boden nur schwach gebunden wird, liegt sein Anteil am Kationenbelag der Böden meist unter 1%. In der Bodenlösung schwanken die Natriumkonzentrationen meist zwischen  $1\text{-}20\text{ mg l}^{-1}$  (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

Im Grundwasser ist der Natriumgehalt an die Verweilzeit des Wassers gebunden und steigt mit zunehmendem Alter (PETERS ET AL., 1998).

### ***Kalium***

Kalium gelangt hauptsächlich durch die Verwitterung von Orthoklasen, Glimmern und Amphibolen in die Bodenlösung. Durch die starke Kaliumfixierung der Tonminerale im Mineralboden (vgl. z.B. Illitisierung) liegen große Teile des Kaliums in

nichtaustauschbarer Form vor (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). In der Abflussbildungsforschung wurden Kaliumgehalte zur Ausweisung von oberflächennahen Abflusskomponenten genutzt. Sie weisen in der Regel höhere Kaliumanteile auf, da im humosen Oberboden die Kaliumfixierung geringer ist (ELSENBEER ET AL., 1995 zitiert in DIDSZUN, 2004).

### ***Magnesium***

Magnesium stammt hauptsächlich aus der Verwitterung von Silikaten (Pyroxene, Amphibole und Glimmer). Die Magnesiumkonzentration der Bodenlösung schwankt in einem breiten Bereich. In Waldböden liegt sie aber meist unter 10 mg/l. Insbesondere an sehr sauren Standorten kann es zu geringen Magnesiumgehalten kommen, was unter Umständen zu Mangelchlorosen am Bestand führen kann (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

Neben der Verwitterung sind in Wäldern vor allem sogenannte Kompensationskalkungen als Magnesiumquelle zu nennen. Dadurch kann es über einen längeren Zeitraum zu einer Erhöhung der Magnesiumkonzentration im Gewässer kommen (ARMBRUSTER ET AL., 2000).

### ***Calcium***

In Einzugsgebieten auf kristallinem Untergrund ist die Verwitterung von Silikaten, insbesondere Plagioklase, Pyroxene und Amphibole, die Hauptquelle des Calciums der Bodenlösung. Anthropogen wird Calcium vor allem durch Waldkalkung ins System eingebracht.

Da Calcium von den Kationentauschern im Boden bevorzugt gebunden wird, liegt ein großer Teil in austauschbarer Form vor (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

Im Gewässer können hohe Calciumkonzentrationen als zugehöriges Kation auch auf die Auswaschung von Sulfat zurückzuführen sein. Dies würde gleichzeitig einer Gewässerversauerung entgegenwirken (ARMBRUSTER ET AL., 2003).

### ***Chlorid***

Die geogenen Chloridquellen sind bei Gebieten mit magmatischen Ausgangsgesteinen relativ gering, daher kommt der Haupteintrag über den Niederschlag. Im Binnenland liegt der jährliche Input zwischen 5-20kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>.

Als weiterer Eintragspfad kommt die anthropogen verursachte HCl-Deposition über den Niederschlag in Frage, welche aber aufgrund besserer Abluftreinigung seit einigen Jahren rückläufig ist (VON WILPERT ET AL., 1996).

Durch Evaporation findet eine Aufkonzentrierung der Einträge im Bereich des Bodenwassers statt. Im durch Verdunstung unbeeinflussten Grundwasser bleibt die Chloridkonzentration dagegen konstant (PETERS ET AL., 1998). Aufgrund seiner negativen Ladung unterliegt Chlorid in den leicht sauren (bis sauren) Böden unseres

Klimaraumes kaum Wechselwirkungen mit der Bodenmatrix. Es kann daher als ein weitgehend konservativer Tracer betrachtet werden.

### ***Nitrat***

Nitrat ist Teil des vorwiegend durch mikrobielle Aktivitäten gesteuerten Bodenstickstoffkreislaufes. Als Quelle tritt hier in erster Linie der organisch gebundene Stickstoff (N) auf, da der N-Gehalt der Ausgangsgesteine vernachlässigbar gering ist. Durch mikrobielle Aktivität wird der organische Stickstoff im Zuge der Mineralisation zu anorganischem Nitrat nitrifiziert (GISI, 1997). Anthropogen verursacht ist der jährlich relativ konstante Eintrag von Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ), welche durch Verbrennungsprozesse in die Atmosphäre gelangen.

Im Boden verhält sich Nitrat hochmobil und wird bei entsprechenden Niederschlagsereignissen sehr leicht ausgewaschen. Erhöhte Nitratgehalte in Gewässern bewaldeter Einzugsgebiete sind oftmals die Folge von Kalkungsmaßnahmen. Durch die dadurch angeregte mikrobielle Aktivität kommt es zu einer verstärkten Mineralisation und somit zu einem erhöhtem Nitratangebot (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002).

Als Senke für Nitrat gilt neben der Aufnahme durch Pflanzen auch die Denitrifizierung. Aufgrund des geringen Redoxpotentials wird Nitrat in wassergesättigten Bereichen durch heterotrophe Bakterien reduziert. Auenbereiche besitzen diesbezüglich im Hinblick auf die Eutrophierung der Gewässer eine wichtige Pufferfunktion (FEGER ET AL., 1999).

### ***Sulfat***

Geogene Hauptquelle des Sulfats ist die Oxidation von Pyrit- und Sulfiderzen. Insbesondere Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) kann in den untersuchten Einzugsgebieten als Sulfatquelle angenommen werden (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2002). Weiterhin kommt über den atmosphärischen Eintrag von Schwefeloxiden in Form von  $\text{H}_2\text{SO}_4$  über den Niederschlag Sulfat ins System. Diese Form des Sulfateintrages ist allerdings in den letzten Jahren aufgrund verbesserter Abluftreinigung (Rauchgasentschwefelungsanlagen) stark zurückgegangen (ARMBRUSTER ET AL., 2003).

Die Konzentration von Sulfat im Gewässer ist relativ stark an die entsprechende hydrologische Situation geknüpft. Insbesondere die *Riparian Zone* kann zur Sulfatfreisetzung beitragen. Durch Absinken der Wasserstände kann es zur Oxidation organisch gebundenen Schwefels kommen, welcher dann beim nächsten Ereignis als Sulfat ausgewaschen wird (ARMBRUSTER ET AL., 2003). Weiterhin nehmen bei gesättigten Verhältnissen auch die oberen Bodenzonen am Fließgeschehen teil, was ebenfalls in einer Sulfatmobilisation resultiert. Dies führt generell zu einer direkten Beziehung zwischen Sulfatgehalt und Abfluss (HUNTINGTON ET AL., 1994).

### 3.1.2 Säureneutralisationskapazität

Als weiterer Tracer, insbesondere als integraler Wasserchemieparameter bei der statistischen Auswertung, wird in dieser Arbeit die Säureneutralisationskapazität (SNK) verwendet. Dieser auch als Alkalinität bezeichneter Parameter (REUSS & JOHNSON, 1986) kann als versauerungsrelevante Größe als eine Alternative bzw. Ergänzung zum pH-Wert verwendet werden (ARMBRUSTER ET AL., 2000; LINDENLAUB, 1998). In dieser Arbeit soll die SNK analog vorangegangener Arbeiten (unter anderem DIDSZUN, 2004) jedoch als Bilanzparameter verwendet und ihre Aussagen als integraler hydrochemischer Parameter genutzt werden.

Die SNK ist definiert als die Differenz der Äquivalentsumme aller gelösten basischen Kationen und der Äquivalentsumme der starken Säureanionen. Sie lässt sich somit aus den molaren Konzentrationen der Hauptionen berechnen. Nach REUSS & JOHNSON (1986) gilt:

$$\text{SNK [mmol/l]} = [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + 2[\text{Ca}^{2+}] + 2[\text{Mg}^{2+}] - [\text{Cl}^-] - [\text{NO}_3^-] - 2[\text{SO}_4^{2-}] \quad (3.1)$$

Hierbei nicht berücksichtigt sind gelöste organische Säuren (DOC) sowie Aluminium. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass der Anteil organischer Substanz im Quellwasser sowie in den Bächen bei Niedrigwasser sehr gering sein wird. Des Weiteren kann zugrunde gelegt werden, dass bei einem pH-Wert im Bereich von 6,5 - 7 kein freies Aluminium im Bachwasser vorkommt.

### 3.1.3 Gelöste Kieselsäure (Silikat)

Die im Lauf dieser Arbeit entnommenen Wasserproben konnten aus Zeitgründen zwar nicht auf Silikat untersucht werden, im Zuge der statistischen Auswertung wurden aber zuvor gemessene Silikatgehalte mit in die Untersuchung einbezogen. Es soll daher an dieser Stelle nur ein kurzer Überblick gegeben werden. Näheres zum Silikat findet man in der Literatur, unter anderem in (DIDSZUN, 2004; PETERS ET AL., 1998; UHLENBROOK, 1999; WHITE & BRANTLEY, 1995).

Silikat gilt in der Abflussbildungsforschung als sehr guter Tracer zur Ausscheidung von Herkunftsräumen. Es stammt in erster Linie aus der Feldspatverwitterung. Der Silikatgehalt im Wasser ist abhängig von der Kontaktzeit zwischen Wasser und Matrix, der Input über den Niederschlag kann als Null festgesetzt werden. Die Silikatlösung ist ein relativ komplexer Vorgang, der bei niedrigen pH-Werten beschleunigt wird. Weiterhin spielen Temperatur, organische Komplexbildner und die Oberfläche des Verwitterungsmaterials eine Rolle (KIENZLER, 2001).

Der Silikatgehalt kann im Labor über die Extinktion des blauen Molybdat-Kieselsäure-Komplex, welche proportional zum Silikatgehalt ist, mit dem Photometer bestimmt werden (DIDSZUN, 2004).

### **3.1.4 Elektrische Leitfähigkeit**

Entscheidend für die elektrische Leitfähigkeit ist der Mineralisationsgrad des Gewässers. Dieser ist neben der Löslichkeit des Ausgangsmaterials von der Kontaktzeit des Wassers mit der Matrix abhängig. Vereinfacht kann man davon ausgehen, dass unter gleichen geologischen Bedingungen eine längere Verweilzeit zu einer höheren elektrischen Leitfähigkeit des Wassers führt (CASPER, 2002). Dies kann direkt zur Quantifizierung des Direktabflusses genutzt werden (unter anderem GUWANG, 2004).

Problematisch hierbei ist aber, dass unterschiedliche Substanzen, je nach Wertigkeit und Beweglichkeit (Wanderungsgeschwindigkeit in Feldrichtung), unterschiedlich stark zur Leitfähigkeit beitragen. Dies kann dazu führen, dass die Zusammenhänge zwischen Tracerverhalten und den ablaufenden Prozessen im Einzugsgebiet nicht mehr eindeutig sind (LINDENLAUB, 1998). Weiterhin ist die elektrische Leitfähigkeit temperaturabhängig, da die Ionenbeweglichkeit mit steigender Temperatur zunimmt (HÖLTING & COLDEWEY, 2004). Um diese Fehlerquelle zu vermeiden, wird die elektrische Leitfähigkeit auf eine Standardtemperatur normiert und als spezifische elektrische Leitfähigkeit ausgegeben. Ist im Folgenden von der elektrischen Leitfähigkeit die Rede, so ist immer die temperaturkompensierte spezifische elektrische Leitfähigkeit gemeint.

### **3.1.5 Temperatur**

Die Wassertemperatur ist ein vergleichsweise einfaches Mittel zur Erlangung gewisser Vorabinformationen über den Zustand des zu untersuchenden Systems. LINDENLAUB (1998) gruppierte aufgrund ihres unterschiedlichen Temperaturverhaltens verschiedene Quellen (vgl. a. Kapitel 2.2). Neben der Jahresmitteltemperatur, welche hauptsächlich durch topographische Höhe und Exposition beeinflusst wird, sind insbesondere der jahreszeitliche Verlauf sowie kurzfristige Reaktionen auf Niederschlagsereignisse von Bedeutung.

Auch bei Oberflächengewässern bieten sich Temperaturmessungen an. ADOLPH (2005) führte an zwei Stichtagen Temperaturmessungen entlang verschiedener Bachläufe durch. Aufgrund abrupter Temperatursprünge konnten somit konzentrierte Grundwasserzutritte lokalisiert werden. Bei Oberflächengewässern tritt allerdings das Problem von Temperaturschwankungen auf, hervorgerufen durch unterschiedlichen Strahlungsinput bzw. Beschattung, was bei der Interpretation von entsprechenden Messergebnissen berücksichtigt werden muss (SHANLEY & PETERS, 1988).

### 3.1.6 Stabiles Isotop O-18

Das stabile Sauerstoffisotop O-18 gehört zu den am häufigsten verwendeten und am besten untersuchten Isotopen, welche zur hydrologischen Prozessforschung eingesetzt werden (UHLENBROOK, 1999). Es ist Bestandteil des Wassermoleküls und kann daher als idealer Tracer angesehen werden, d.h. es unterliegt weder chemischen noch physikalischen Reaktionen (vgl. Abbau, Absorption, Retardation, etc.) während der Passage des Hydrosystemes.

Das mittlere Verhältnis zwischen O-18 und dem leichteren O-16 beträgt in natürlichen Wässern etwa 1:500. Aufgrund von temperaturabhängigen Fraktionierungsprozessen (*Raleigh fractionation*) bei Phasenumwandlungen ist das Isotopenverhältnis in der Natur nicht konstant. Generell kommt es zu einer Anreicherung der schwereren Isotope in der energieärmeren Phase (MOSER & RAUERT, 1980).

Der Effekt der Isotopenfraktionierung führt sowohl zu einer saisonalen als auch räumlichen Variabilität des Isotopeninputs durch den Niederschlag (DAANSKARD, 1964) und ist somit Grundlage für den Einsatz von O-18 als verweilzeitorientierter Tracer. Neben dem *Jahreszeiteneffekt*, welcher dazu führt, dass Winterniederschläge isotopisch leichter sind als die im Sommer, treten auch noch *Kontinental*-, *Breiten*- *Höhen*- und *Mengeneffekte* auf, die bei den entsprechenden Anwendungen zu berücksichtigen sind.

## 3.2 Abflusskomponentenseparation mit natürlichen Tracern

Die Abflusskomponentenseparation (End Member Mixing Analysis - *EMMA*) eignet sich zur Identifizierung der Herkunftsräume des am Pegel abfließenden Wassers und dient somit zur Gewinnung neuer Erkenntnisse in der Abflussbildung während eines Ereignisses (BURNS ET AL., 2001). Die Methode wurde unter anderem von SKLASH & FARVOLDEN (1979) in die hydrologische Prozessforschung eingeführt.

Zur Abtrennung von  $n$  Abflusskomponenten benötigt man  $n-1$  Tracer. Daraus folgt, dass sich theoretisch bei der Ganglinienseparation nahezu unendlich viele Einzelkomponenten abtrennen lassen. Dies scheitert in der Natur aber an der Grundvoraussetzung der Abflusskomponententrennung, die so lautet, dass sich die jeweiligen Stoffkonzentrationen der Einzelkomponenten eindeutig voneinander abgrenzen müssen (DIDSZUN, 2004). Daher kommt in der Praxis meist die *Zwei*- bzw. *Drei-Komponenten-Separation* zur Anwendung (UHLENBROOK, 1999). Nachfolgend sind beispielhaft die Beziehungen für eine *Zwei-Komponenten-Separation* dargestellt. Die Gleichungen für ein Dreikomponentensystem sind der Literatur zu entnehmen (z.B. OGUNKOYA & JENKINS, 1993).

Zur Aufteilung des Gesamtabflusses  $Q_{ges}$  in die zwei Abflusskomponenten  $Q_a$  und  $Q_b$ , benötigt man die Gesamtkonzentration des Tracers im Gesamtabfluss  $C_{ges}$ , sowie die entsprechenden Tracerkonzentration  $C_a$  und  $C_b$  der beiden Abflusskomponenten (*end member*). Es gilt:

$$Q_{ges} = Q_a + Q_b \quad (3.2)$$

$$C_{ges}Q_{ges} = C_aQ_a + C_bQ_b \quad (3.3)$$

Daraus ergibt sich bei bekannter Konzentration  $C$  durch Einsetzen der beiden Gleichungen ineinander und anschließendem Auflösen nach dem gesuchten Parameter der entsprechende Abflussanteil.  $Q_a$  erhält man z.B. nach:

$$Q_a = Q_{ges}(C_{ges} - C_b / C_a - C_b) \quad (3.4)$$

Neben der signifikant unterschiedlichen Konzentration der Endmember gilt das konservative Verhalten des Tracers im hydrologischen System als Voraussetzung zur Durchführung einer Mischungsrechnung (BURNS ET AL., 2001). Daher eignen sich insbesondere das stabile Sauerstoffisotop Q-18 und das relativ kleine und reaktionsträge Anion Chlorid zur Abflusskomponentenseparation. Diese wurden auch in dieser Arbeit verwendet. Eine weitere wichtige Voraussetzung für die Separationen von drei und mehr Komponenten ist, dass zwischen den Tracern kein kolineares Mischungsverhalten besteht. Dies wird in der Praxis allerdings nicht immer beachtet.

### **3.3 Messungen im Einzugsgebiet**

Grundstock dieser Arbeit waren umfangreiche kontinuierlich im Gebiet vorgenommene Messungen, sowie eine wöchentlich durchgeführte Routinebeprobung.

Die Auswahl der durchgeführten Messungen sowie die Wahl deren Standorte basieren zum Teil auf den Ergebnissen der zuvor durchgeführten Arbeit von ADOLPH, (2005). Wie auch in dieser Arbeit wurden die *CTD-Diversonden* der Fa. *Eijkelpomp/Van Essen* (Abbildung 3-1), mit denen man Wasserdruck, elektrische Leitfähigkeit und Temperatur kontinuierlich erfassen kann, als Standardmessgerät eingesetzt.



**Abbildung 3-1: CTD-Diversonde der Fa. Eijkelpkamp/Van Essen**

Ingesamt kamen sieben CTD-Diversonden und drei etwas veränderte Diversonden zum Einsatz. Eine Zusammenfassung des Messprinzips der Diversonden sowie deren Messgenauigkeit gibt Tabelle A 1 im Anhang.

Zusätzlich wurden aber, um der erweiterten Problematik dieser Arbeit gerecht zu werden, im Versuchsgebiet weitere Messgeräte installiert. Im Folgenden sind die einzelnen Messgeräte näher beschrieben. Eine Übersicht über die im Zuge dieser Studie durchgeführten Messungen gibt Abbildung A 11 im Anhang dieser Arbeit.

### **3.3.1 Niederschlag**

Die Messung des Niederschlages erfolgte, wie bereits in der vorangegangenen Arbeit, am Standort „Ringlihof“. Zum Einsatz kam hier ein *Pluviometer* der Fa. *Ott Messtechnik* (200 cm<sup>2</sup> Auffangfläche, 1 m über Grund), welcher über ein elektronisches Wägesystem im 2-Minuten-Messintervall kontinuierlich die gefallene Niederschlagsmenge aufzeichnet. Der Standort befindet sich auf einer Freifläche etwa 1 km östlich des Pegels auf einer Höhe von ca. 470 m.

### 3.3.2 Wasserstand und Abfluss

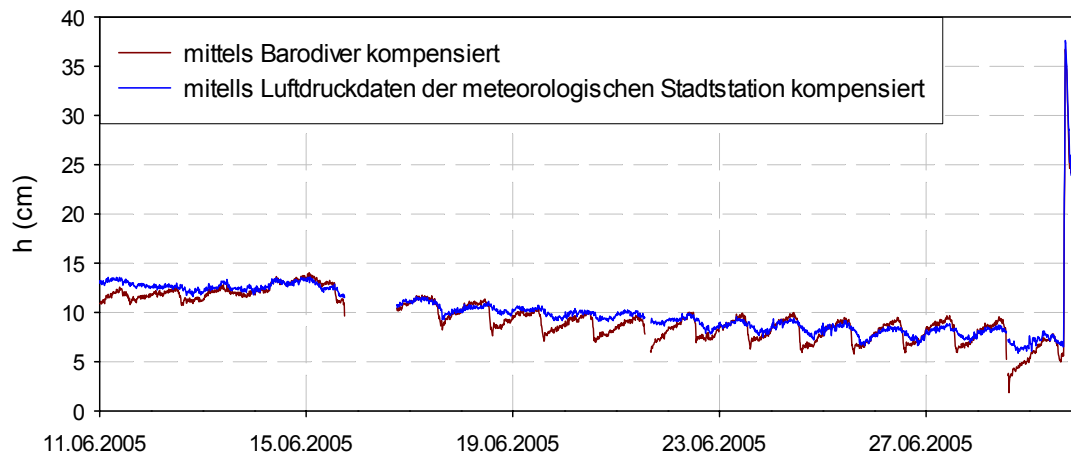
Die Abflussmessstelle am Engebächle wurde aufgrund der veränderten Fragestellung sowie zur Vermeidung anthropogener Einflüsse, durch ein am Bach gelegenes Siedlungsgebiet um ca. 500m bachaufwärts verlagert (vgl. a. Kapitel 2). Der Wasserstand am Pegel wurde wie bereits in der vorangegangenen Arbeit mittels der *CTD-Diversonden* der Fa. *Eijkelpomp/Van Essen* in 2-Minutenabständen aufgezeichnet. Obwohl die Diversonden ursprünglich zur Messung im Grundwasser entwickelt wurden, können sie laut ADOLPH, (2005) bei sorgfältiger Auswahl des Standortes und regelmäßiger Wartung auch im Oberflächengewässer eingesetzt werden. Die Messgenauigkeit der Diver zur Erfassung des Wasserstandes (Druckmessung) liegt laut Angaben des Herstellers bei 0,1 %.

Da die Wassertiefe über den Wasserdruck an der Gewässersohle erfasst wird, muss dieser um den in ihm enthaltenen Luftdruck vermindert werden. Die dazu notwendige Messung des Luftdrucks erfolgte ursprünglich direkt am Pegel Engebächle mittels eines Barodivers, welcher neben dem Luftdruck auch die Lufttemperatur misst. Somit konnte bei der Luftdruckkompensation die Höhenabhängigkeit des Luftdrucks vernachlässigt werden. Aufgrund hoher täglicher Temperaturschwankungen wurde der Barodiver aber, auf Anraten des Herstellers, zur Vermeidung von Messfehlern nachträglich am 19.07.2005 in die relativ temperaturkonstante, aber höher gelegene Quelfassung Steineck verlegt.

Zum Ausgleich des aus dem Höhenunterschied resultierenden generellen Abweichens der Luftdruckdaten, mussten diese anschließend durch Anwendung der Barometrischen Höhenformel auf die veränderte Höhensituation angepasst werden.

Zur Abschätzung der Auswirkungen von hohen Lufttemperaturschwankungen auf die Messung des Luftdrucks wurde für den Messzeitraum vor dem 19.07.2005 die Luftdruckkompensation sowohl mittels des Barodivers als auch zusätzlich mit temperaturbereinigten Luftdruckdaten der meteorologischen Stadtstation des Meteorologischen Instituts der Universität Freiburg (die Messstelle der Stadtstation befindet sich auf dem Dach des Chemiehochhauses der Universität Freiburg in einer Höhe von 323,5 m ü NN) durchgeführt.

Abbildung 3-2 zeigt die daraus resultierenden Unterschiede im Tagesgang des Wasserstandes. Es ist eine deutliche Abnahme der Schwankungsamplitude durch die Kompensation mittels temperaturbereinigter Luftdruckdaten erkennbar. Es verbleibt aber eine Restschwankung, die, wie sich durch weitere Messungen bestätigte, natürlichen Ursprungs ist (vgl. Kapitel 4.4).



**Abbildung 3-2: Vergleich der Unterschiede im Wasserstand zu Niedrigwasserzeiten resultierend aus der Luftdruckkompensation verschiedener Luftdruckmessungen**

Der Messquerschnitt im Engebächle wurde aus vier Betonplatten mit vollständig befestigter Sohle errichtet. Aufgrund der speziell zu Niedrigwasserzeiten zu erwartenden geringen Abflüsse wurde nachträglich ein Dreiecksüberfall nach Thomson installiert (vgl.

Abbildung 3-3 und Abbildung A 1). Dieser bietet durch die Anhebung des Wasserstands speziell bei geringen Abflüssen sehr genaue Messwerte.

Zur quantitativen Erfassung des Abflusses wurden die gemessenen Wasserstände in den Abfluss  $Q$  (l/s) umgerechnet. Da der Öffnungswinkel kleiner  $90^\circ$  gewählt wurde, gilt für die Berechnung des Abflusses  $Q$  die empirische Beziehung (DYCK & PESCHKE, 1995):

$$Q [\text{m}^3/\text{s}] = 8/15 \mu (2g)^{1/2} \tan(\alpha/2) h^{5/2} \quad (3.5)$$

mit:  $\mu$  als Überfallbeiwert (wurde auf 0,6 gesetzt)  
 $g$  als Gravitationskonstante  
 $\alpha$  als Öffnungswinkel ( $52,6^\circ$ )  
 $h$  als Wasserstand in m.

Zur Verifizierung obiger Beziehung wurde manuell für mehrere Wasserstände mittels der *Salzverdünnungsmethode* (mit Momentaneinspeisung des Tracers) der Abfluss nachgemessen. Die mit Formel 3.5 berechneten Durchflüsse stimmen, bis auf eine Ausnahme, durchaus mit den ermittelten Abflüssen der Handmessung überein (Abbildung A 2).

Weiterhin gilt obige Beziehung nur bis zu einem maximalen Wasserstand von 38 cm, da ab diesem der Pegel überflutet wird. Dies führte dazu, dass für manche Spitzenabflüsse wie z.B. beim Ereignis vom 11.07.2005 der Wert nicht mehr belegt ist. Da diese Studie jedoch vorwiegend Niedrig- und Mittelwassersituationen betrachtet, wurde dieser Fehler vernachlässigt.



**Abbildung 3-3: Abflussmessquerschnitt am Engebächle**

### **3.3.3 Elektrische Leitfähigkeit und Temperatur**

Neben dem Wasserstand ist es mittels der CTD-Diversonden der Fa. Eijkelpkamp/van Essen auch möglich, kontinuierlich die elektrische Leitfähigkeit und die Temperatur zu erfassen.

Um Störungen in der Leitfähigkeitsmessung durch Sedimentablagerungen bzw. Bachflohkrebsen zu vermeiden, wurden die Sonde sowie deren Halterung wöchentlich gereinigt. Zusätzlich wurde auch hier das von ADOLPH (2005) empfohlene Messgitter eingesetzt. Trotz dieser regelmäßig durchgeführten Reinigungs- und Wartungsarbeiten traten zeitweise unerklärliche Ausreißer in der Messaufzeichnung auf.

Weiterhin kam es während der Niedrigwasserperiode zu einem deutlichen Tagesgang in der elektrischen Leitfähigkeit. Eine nachträglich durchgeführte Temperaturkompensation nach der Formel von ROMMEL (1980), wie von GUWANG (2004) empfohlen, führte allerdings zu keiner Verringerung der Amplitude, was darauf hindeutet, dass dieses Phänomen nicht durch das Messgerät verursacht wurde (Abbildung A 3).

Die Messung der Temperatur erfolgte über den gesamten Untersuchungszeitraum ohne Probleme und mit hoher Genauigkeit.

### 3.3.4 Beobachtung der Auendynamik

Zur Erfassung der Auendynamik sowie zur Quantifizierung des Einflusses der sogenannten *Riparian Zone* in Bezug auf Niedrigwasser, wurden an einem ca. 15 m breiten charakteristischen Abschnitt drei Filterrohre (Grundwasserpegel - Abbildung A 4) im Abstand von 1 m (**GW-Pegel 1**), 4,5 m (**GW-Pegel 2**) und 9 m (**GW-Pegel 3**) vom Bach eingebracht. Die Installation gestaltete sich aber aufgrund der unterschiedlichen Untergrundbeschaffenheit teilweise recht schwierig. So war es nur bei GW-Pegel 1 möglich, die vollständige Einbringtiefe von 1,10 m zu erreichen. GW-Pegel 2 erfasst Grundwasserschwankungen bis 80 cm Tiefe. Durch einen Unterschied in der Geländehöhe von ca. 30 cm zwischen beiden Pegeln, ergibt sich somit ein ungefährer Höhenunterschied von 60 cm zwischen den beiden Messnullpunkten (Abbildung 3-4). In beide Piezometer wurden die bereits in den Kapiteln 3.3.2–3.3.3 beschriebenen CTD-Diversonden der Fa. Eijkelkamp/Van Essen installiert und im Intervall von zwei Minuten kontinuierlich der Wasserstand, die Leitfähigkeit und die Wassertemperatur aufgezeichnet. Der vom Bachlauf am weitesten entfernte GW-Pegel 3 konnte aufgrund des steinigen Untergrundes nur 50 cm tief versenkt werden. Die Aussagekraft dieses Standortes wurde hierdurch stark beschränkt. Es wurde daher eine etwas vereinfachte Diversonde eingebracht, welche neben dem Wasserstand auch die Temperatur erfasst.

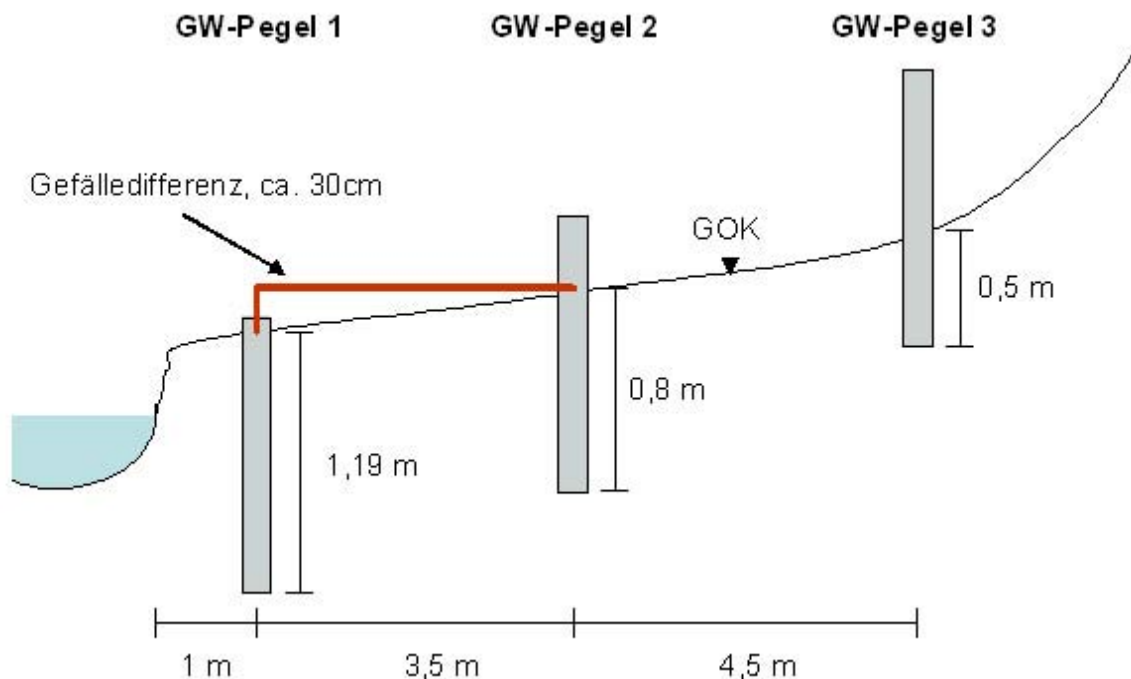


Abbildung 3-4: Skizze zur Darstellung der Höhenverteilung der im Auenbereich eingebrachten Grundwasserpegel

### 3.3.5 Messung der Bodenfeuchte

Zur Erfassung der hydrologischen Prozesse in den oberflächennahen Schichten des Untergrundes wurden an einem charakteristischen Hangprofil (*Ah-IBv-IIBv-Cv*) über eine Tiefenerstreckung von 1,20 m fünf *ECH<sub>2</sub>O*<sup>®</sup>-Bodenfeuchtesonden der Fa. *Decagon* gleichmäßig verteilt eingebracht (Abbildung A 6). Bei der Installation wurde darauf geachtet, dass der natürliche Lagerungszustand möglichst nicht beeinträchtigt wird. Weiterhin wichtig für die Aussagefähigkeit der Sonden ist, dass das die Sonde direkt umgebende und somit für die Messergebnisse ausschlaggebende Material für den entsprechenden Sondenabschnitt repräsentativ ist. Um Randeffekte zu vermeiden, wurde das Profil nach dem Einbau der Bodenfeuchtesonden mit dem zuvor ausgehobenen Material wieder verfüllt. Das Messintervall wurde auf zehn Minuten festgesetzt.

Das kapazitative Messprinzip der *ECH<sub>2</sub>O*<sup>®</sup>-Bodenfeuchtesonden beruht auf der unterschiedlichen Dielektrizitätskonstante von Wasser (80) im Vergleich zur Bodenmatrix (ca. 4) und Luft (1). Ein erhöhter Wassergehalt im Boden führt somit aufgrund der geringeren „isolierenden Wirkung“ von Wasser im Vergleich der anderen Bodenkompimente zu einer erhöhten Kapazität, welche über einen Schaltkreis im Inneren der Sonden in ein direkt messbares Millivolt(mV) -Signal umgewandelt wird. Durch eine im Programm integrierte Eichbeziehung kann dieses Signal in den volumetrischen Wassergehalt (%) umgewandelt werden.

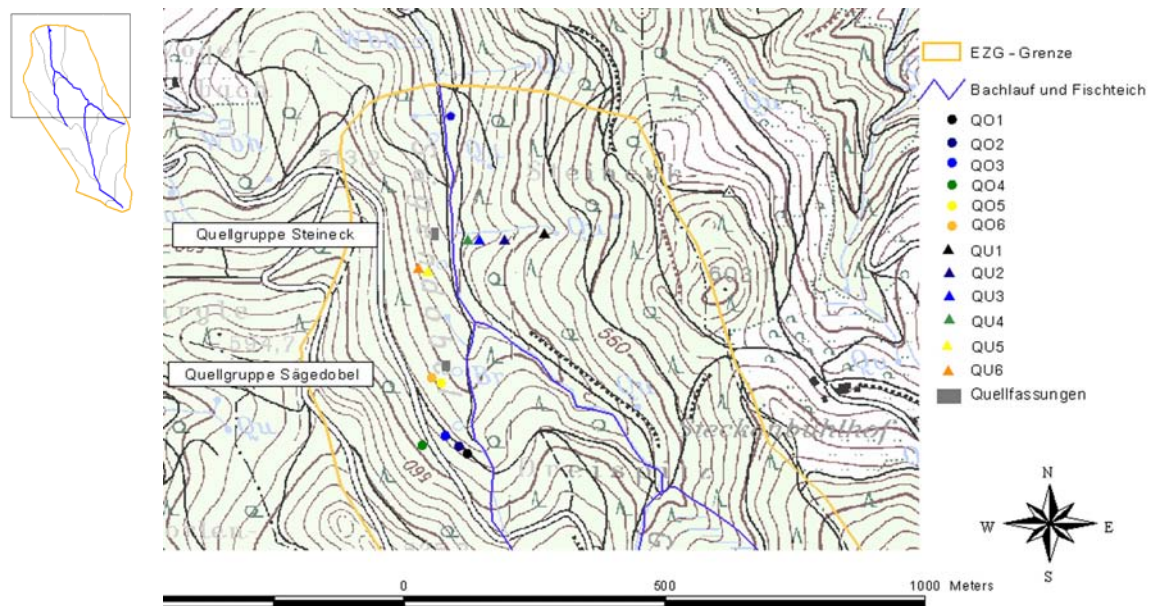
Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit des Bodenwassers sowie der Temperatur führen laut auf der Internetseite des Herstellers publizierten Studien nur zu geringen Änderungen der Messergebnisse (CAMPBELL, a;b). Die Messgenauigkeit mittels der Vorabkalibrierung der Sonden liegt laut Herstellerangaben für beliebige Böden bei +/- 3 Prozent. Über eine, für den Messstandort spezifische Nachkalibrierung kann die Genauigkeit der Messung verbessert werden. Da im Zuge dieser Studie die Dynamik der Bodenzone, nicht aber der genaue Wassergehalt von Bedeutung war, wurde auf eine Nachkalibrierung verzichtet.

### 3.3.6 Untersuchung der im EZG Engebächle gelegenen Quellen

Eine regelmäßige Untersuchung einiger im EZG Engebächle gelegenen Quellen hatte das Ziel, nähere Aussagen über die aktiven Speichersysteme im Untergrund zu treffen. Dies war insbesondere im Hinblick auf die im Zuge dieser Arbeit durchgeführte und später beschriebene Abflusskomponentenseparation von großer Bedeutung.

Zur Beprobung boten sich zwölf gefasste Quellen an, welche im Zuge der Trinkwassergewinnung aus dem Einzugsgebiet Engebächle in zwei Quellenfassungen à sechs Quellen (Quellfassung Steineck - QU1-6 – 460 m ü. NN und Quellfassung

Sägedobel - QO1–6 – 495 m ü. NN) zusammengeführt wurden. Alle Quellen liegen im unteren Teil des Einzugsgebietes Engebächle, in dem der Metatexit hauptsächlich das Anstehende bildet. Die Quellaustritte der jeweiligen Gruppe befinden sich innerhalb eines engen Höhenbereiches, von 505 m ü. NN (QO5) bis 525 m ü. NN (QO1) bei der Quellgruppe Sägedobel, sowie zwischen 475 m ü. NN (QU5) und 512 m ü. NN (QU1) bei der Quellgruppe Steineck. Abbildung 3-5 gibt einen Überblick über die Lage der Quellen im Einzugsgebiet Engebächle.



**Abbildung 3-5: Lage der wöchentlich beprobten Quellen im Einzugsgebiet Engebächle**

Die Beprobung erfolgte im wöchentlichen Rhythmus über 16 Wochen hinweg. Pro Woche wurden jeweils die Schüttung, die elektrische Leitfähigkeit und die Wassertemperatur der Quellen gemessen, sowie von jeder Quelle zwei Wasserproben zur weiteren Auswertung entnommen (vgl. Kapitel 3.3.7).

Um kurzfristige Reaktionen der Quellen auf Ereignisse ebenfalls abzugreifen, wurden zusätzlich kontinuierliche Messungen durchgeführt. Da es technisch jedoch nicht möglich war, jede Quelle einzeln mit Messsonden zu bestücken, wurde jeweils im Sammelbecken der beiden Quellfassungen gemessen, was zu einem erheblichen Informationsverlust führte. Hierzu wurde in das Sammelbecken der höher gelegenen Quellfassung Sägedobel (QO) wiederum ein CTD-Diver eingebracht. Die Quellfassung Steineck wurde mit einem Abflussmesskoffer, ausgestattet mit einer Drucksonde, einem Leitfähigkeitsgerät sowie einem Pt-100 Temperaturelement, bestückt. Die zeitliche Auflösung wurde in beiden Quellen auf zwei Minuten gesetzt.

### 3.3.7 Wöchentliche Probenahme

Um eventuelle Reaktionen in der Wasserchemie bei veränderten Abflusssituationen – insbesondere im Niedrigwasserfall – zu erfassen, wurden von Anfang Juni bis Ende September wöchentlich sowohl das Engebächle (am Pegel), als auch die zwölf Quellen beprobt. Ferner kamen noch die drei im Auenbereich gelegenen Grundwasserpegel hinzu.

Weiterhin erfolgte, sofern Niederschlag vorhanden, eine Beprobung des Niederschlags. Dies ist insbesondere bei der Anwendung von stabilen Isotopen von großer Bedeutung, da der Niederschlag als Input in das System sowohl zeitlich als auch räumlich eine große Heterogenität in den Isotopengehalten aufweist. (vgl. dazu auch Kapitel 3.1.6).

Die Beprobung des Niederschlags erfolgte nicht direkt aus dem Pluviometer, sondern über eine separat eingerichtete Sammelflasche. Der eingesetzte Aufbau wurde bereits des Öfteren in Arbeiten, welche am Institut für Hydrologie stattfanden (unter anderem DIDSZUN, 2004; UHLENBROOK, 1999), verwendet. Hierbei wird über einen waagrecht in ca. 75 cm Höhe aufgestellten Trichter der Niederschlag aufgefangen und über ein kurzes Schlauchstück in eine PET-Sammelflasche geleitet. Um Verdunstungseffekte weitestgehend zu vermeiden, wurde die Flasche zu 2/3 Tiefe eingegraben und mit einem herkömmlichen Blumentopf abgedeckt.

Pro Probenahmestelle wurden jeweils zwei Wasserproben – eine zur Auswertung der Hauptionen, eine zur Isotopenanalyse – entnommen. Die Probenahme erfolgte jeweils in 150 ml fassende PET-Flaschen, welche bis zur Analyse im Labor im Kühlschrank bei 4 °C und unter Lichtausschluss gelagert wurden.

Zu diesen vom Autor entnommenen Proben kamen noch wöchentliche Proben der Quellen Zängerlehof und Zipfeldobel hinzu. Diese beiden Quellen werden im Institut für Hydrologie bereits seit Oktober 1998 (Zipfeldobel) bzw. Oktober 1999 (Zängerlehof) routinemäßig beprobt; die Probenahme wurde daher nicht vom Autor durchgeführt.

### 3.4 Laboranalysen

Die Analysen aller Wasserproben wurden im hydrochemischen Labor des Instituts für Hydrologie an der Universität Freiburg durchgeführt.

#### 3.4.1 Hauptionen

Die wöchentlich entnommenen Wasserproben wurden auf die Kationen Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium, sowie die Anionen Chlorid, Nitrat und Sulfat analysiert. Zum Einsatz kam hier ein Ionenchromatograph *DX500* der Fa. *Dionex*.

Das Prinzip der Ionenchromatographie beruht auf der Messung der elektrischen Leitfähigkeit. Hierzu werden die Wasserproben durch sorbtive Säulen geleitet, welche die gelösten Ionen unterschiedlich lange absorbieren. Die Analyse der Kationen und Anionen wurde jeweils mittels einer spezifischen Säule durchgeführt (Kationen – CS12A 4mm; Anionen – AS4ASC 4mm). Nach ionenspezifischen Zeiten wird der Gang der elektrischen Leitfähigkeit detektiert. Durch Integration des jeweiligen Leitfähigkeitsverlaufs kann über eine Eichbeziehung auf die entsprechende Ionenkonzentration der Probe geschlossen werden. Um eine Verschmutzung der Säulen zu vermeiden, wurden alle Proben vor der Analyse mit einem 40 µm-Filter gefiltert.

Zur Erstellung einer Eichbeziehung wurden vor jedem Messdurchgang 15 Eichstandards gemessen. Bei Dauerbetrieb wurde alle 24 Stunden nachkalibriert. Um Aussagen über die Messgenauigkeit treffen zu können, wurde etwa alle acht Proben ein zufällig ausgewählter Standard mitgemessen. Insgesamt ergaben sich somit 174 Kontrollproben. Die daraus ermittelte Standardabweichung liegt sowohl für Kationen als auch für Anionen im Bereich zwischen 3-5 Prozent, allerdings war die Messgenauigkeit bei den Kationen generell etwas schlechter. Unter einem Ionengehalt von 3 mg/l erhöht sich die Standardabweichung stark. Eine gesamte Übersicht über die einzelnen Standardabweichungen ist im Anhang zu finden (Tabelle A 2 und A3). Eine Antwort auf die Frage, warum sich die Messgenauigkeit im Vergleich zu früheren Studien verschlechtert hat, kann an dieser Stelle nicht gegeben werden. Eine mögliche Ursache könnte die längere Nichtbenutzung des Ionenchromatographs sein.

Die Analyse der Hauptionen der Quellen Zängerlehof und Zipfeldobel wurde vom Autor erst für Proben durchgeführt, die nach dem 29.07.2004 genommen wurden. Die obige Messgenauigkeit gilt deswegen nur für diese Proben. Für die vorherigen Proben, welche im Zuge früherer Untersuchungen am Institut für Hydrologie ausgewertet wurden, wird eine Messgenauigkeit von 3-5 Prozent angenommen, welche sich mit früheren Untersuchungen (unter anderem DIDSZUN 2004) deckt.

### 3.4.2 Stabiles Isotop – O-18

Neben der Hauptionenanalyse wurde für ausgewählte Proben zusätzlich der Sauerstoff-18 (O-18) Gehalt bestimmt. Die Analyse wurde mittels eines „*Isotope Ratio Mass Spectrometer*“ (IRMS) Typ *Delta S* der Fa. *Finnigan/Mat* im Labor des Instituts für Hydrologie durchgeführt. In einem Messdurchgang können 16 Proben sowie acht Standards gemessen werden. Der Isotopengehalt wird relativ zum Bezugsstandard V-SMOV (Vienna standard mean ozean water) als sogenannter Delta ( $\delta$ )-Wert in Promille angegeben. Für Sauerstoff-18 gilt:

$$\delta \text{ O-18 } [\text{‰}] = (R_{\text{PROBE}} - R_{\text{STANDARD}})/R_{\text{STANDARD}} \quad (3.6)$$

mit:  $R_{\text{PROBE}}$  als Isotopenverhältnis in der Probe  
 $R_{\text{STANDARD}}$  als Isotopenverhältnis im Standard

Der Messfehler ist stark vom Zeitraum der Messungen abhängig. Generell nimmt er mit zunehmender Probenanzahl, und dadurch bedingt mit zunehmender Messdauer, zu (DIDSZUN, 2004; KÖNIGER, 2003). Da die Analyse aller Proben aufgrund der begrenzten Anzahl innerhalb weniger Tage durchgeführt werden konnte, kann von einer Standardabweichung der Proben im Bereich von 0,1‰ ausgegangen werden. Für weitergehende Informationen zur Isotopenanalytik wird auf die Arbeit von KÖNIGER (2003) verwiesen.

## 3.5 Statistische Methoden

Zur Auswertung der hydrochemischen Analysen, speziell bei der in Kapitel 6 beschriebenen Analyse der Quellen Zängerlehof und Zipfeldobel, kamen verschiedene statistische Methoden zur Anwendung. Sie wurden alle mit dem Programm *SPSS® 13.0 für Windows* durchgeführt.

### 3.5.1 Deskriptive Methoden

Neben den standardmäßig untersuchten Parametern, wie Mittelwert, Standardabweichung und Extremwerten, wurde für jeden Probenahmeort die Häufigkeitsverteilung aller weiter untersuchten Größen ermittelt. Die Kenntnis der Häufigkeitsverteilung der zur Auswertung herangezogenen Parameter ist bei der statistischen Datenauswertung eine wichtige Voraussetzung, da viele bi- und multivariate Verfahren auf eine Normalverteilung der Daten beruhen. Eine Nichtbeachtung dieser Bedingung kann zu erheblichen unkontrollierbaren Folgefehlern führen (HÖTZL, 1982).

### 3.5.2 Korrelationsanalyse

Zur Prüfung von Zusammenhängen zwischen den untersuchten Parametern wird in der Statistik die Korrelationsanalyse verwendet. Die Güte des Zusammenhangs wird über den Korrelationskoeffizienten  $r$  beschrieben. Am Häufigsten verwendet wird hierbei der Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient nach *BRAVAIS PEARSON*. Dieser berechnet sich aus dem Quotient von Kovarianz ( $S_{xy}$ ) und dem Produkt der Standardabweichung der beiden Variablen (HÖTZL, 1982).

$$r = S_{xy} / S_x S_y \quad -1 \leq r \leq 1 \quad (3.7)$$

Allerdings gilt dieser nur für normalverteilte Parameter und war aus diesem Grunde nur beschränkt für die Auswertung der hydrochemischen Daten einsetzbar. Es wurde deswegen die Rangkorrelationsrechnung nach *SPEARMAN* verwendet. Dies ist die am häufigsten angewandte Methode, um die Korrelationsrechnung **verteilungsfrei** durchzuführen (SCHÖNWIESE, 2000). Für den Korrelationskoeffizienten  $r_s$  gilt hier:

$$r_s = 1 - (6 \sum D_i^2 / (n^3 - n)) \quad i = 1, \dots, n; \quad -1 \leq r_s \leq 1, \quad (3.8)$$

wobei die beiden Datenreihen in eine aufsteigende Reihenfolge gebracht werden müssen. Der Faktor  $D$  gibt die Rangplatzdifferenzen der jeweiligen Korrelationsvariablen an.

Weiterhin wird bei der Berechnung der Korrelation mittels dem Statistikprogramm *SPSS*® ein Signifikanztest durchgeführt. Ein Zusammenhang zwischen zwei Größen wurde bei der Analyse der Daten erst dann angenommen, wenn das Korrelationsergebnis auf dem Niveau von kleiner 0,05 beidseitig signifikant war.

## 4 Ergebnisse der Messkampagne

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen aus dem Einzugsgebiet Engebächle dargestellt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf den Ergebnissen der CTD-Divermessungen sowie der wöchentlich durchgeführten Handmessungen der einzelnen Quellen. Weiterhin werden die Ergebnisse der Laboranalysen thematisiert. Allerdings werden bei den Quellen aus Übersichtsgründen nicht für jede Quelle einzeln die Analyseergebnisse aufgeführt, sondern die Wasserchemie in etwas komprimierter Form betrachtet. Die für die im folgenden Kapitel beschriebene Abflussganglinienseparation wichtigen Quellen werden aber ausführlich charakterisiert.

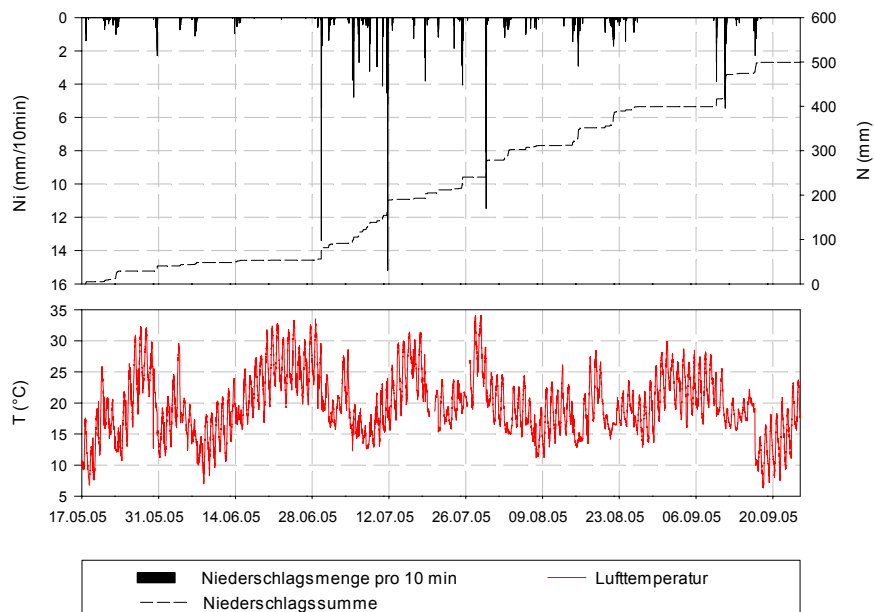
### 4.1 Einführung

Die Installation der Messgeräte im Gelände begann Ende Mai 2005. Je nach Arbeitsaufwand nahm dies unterschiedlich viel Zeit in Anspruch. Die wöchentliche Routinebeprobung des Engebächles, der Quellen und des Niederschlags begann am 03.06.2005. Insgesamt wurden über 16 Wochen hinweg Wasserproben gesammelt und Schüttungsdaten, Temperatur und elektrische Leitfähigkeit aufgezeichnet. Am 09.06.2005 konnte mit der Nachrüstung des Dreiecküberfalls am Pegel Engebächle die Errichtung der hydrometrischen Anlagen abgeschlossen werden.

### 4.2 Klimatische Situation

Dem Niederschlag kommt als Inputgröße in das hydrologische System eine übergeordnete Bedeutung zu. Eine genaue Erfassung der gesamten Niederschlagsmenge, sowie deren zeitlicher Verlauf und insbesondere die Intensität, sind entscheidende Faktoren für die Bewertung weiterer im Einzugsgebiet ablaufender Prozesse. Für diese Arbeit liegen ab dem 17.05.2005 Niederschlagsdaten in zweiminütiger Auflösung vor. Abbildung 4-1 zeigt den Niederschlagsverlauf über die Messperiode am Standort „Ringlihof“. Neben den Zehnminutenwerten des Niederschlags ist auch der Verlauf der Gesamtsumme dargestellt. Gerade am Verlauf der Niederschlagssumme kann die gefallene Niederschlagsmenge sehr schön abgelesen werden.

Ferner lassen sich auch aus dem Verlauf der Lufttemperatur Rückschlüsse auf die klimatische Situation ziehen. Da für den Messzeitraum keine durchgehenden Daten der Lufttemperatur im EZG Engebächle vorlagen, wurde hierfür auf Daten der Meteorologischen Stadtstation in Freiburg zurückgegriffen. Der Gang der Lufttemperatur ist ebenfalls in Abbildung 4-1 dargestellt.

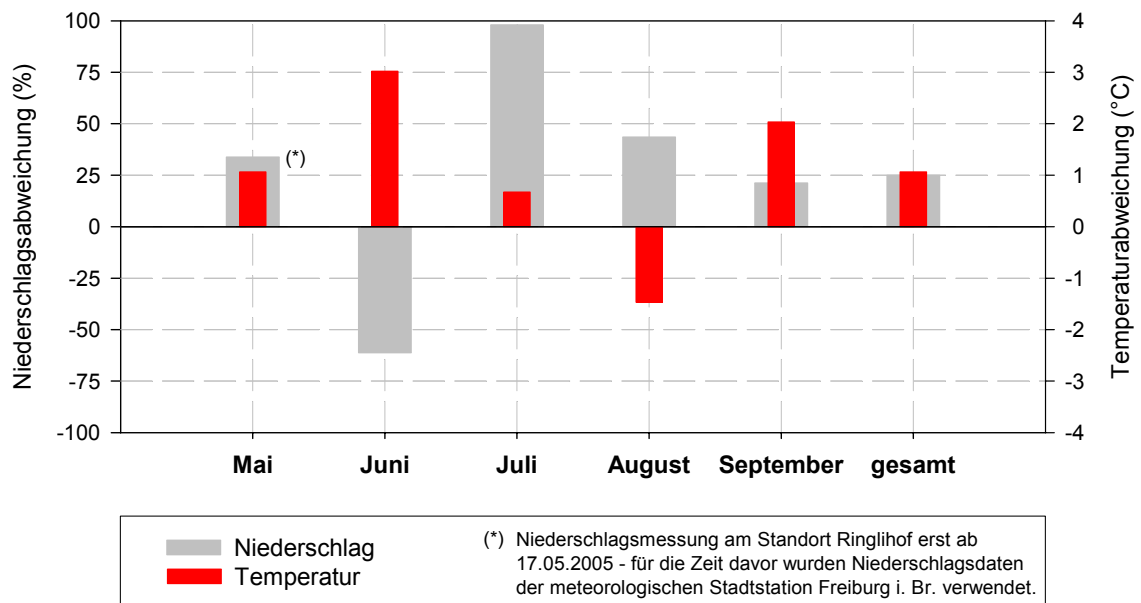


**Abbildung 4-1: Verlauf des Niederschlags und der Lufttemperatur während der Messperiode**

Der Verlauf der klimatischen Situation wurde zuerst durch eine stabile Hochdrucklage im Frühsommer geprägt, die gerade im Juni neben einer kontinuierlichen Temperaturzunahme zu einem sehr geringen Niederschlagsinput von 15 mm bis zum Ereignis vom 29.06.2005 führte. Im Juli und August setzte sich zunehmend unbeständigeres, feuchtes Wetter durch, wobei es vor allem im Juli teilweise zu heftigen Gewitterniederschlägen kam. Als Beispiel hierfür bietet sich das Starkregenereignis vom 11.07.2005 mit einer Niederschlagsspitze von 21 mm in 15 Minuten an. Anfang September konnte sich während zwei Wochen nochmals eine längere Schönwetterperiode aufrechterhalten, bevor Mitte September wieder deutliche Niederschlagsereignisse einsetzten.

Das wechselhafte Wettergeschehen während der Messperiode wird auch beim Vergleich mit den langjährigen Mitteln an der Station Freiburg deutlich. Generell weist die Messperiode gegenüber der langjährigen Monatsmittelwerte (gemessen an der Stadtstation Freiburg) einen deutlich höheren Niederschlagsinput auf (Abbildung 4-2). Allerdings war der Niederschlag über den Beobachtungszeitraum sehr unterschiedlich verteilt. So fiel im Mai und Juni deutlich weniger Regen als im Vergleichszeitraum. Die anderen Monate, und hierbei vor allem der Juli mit einer annähernd doppelt so hohen Niederschlagsmenge wie im langjährigen Mittel, kompensierten das Niederschlagsdefizit aus dem Frühsommer bei weitem und führten somit zu einem generellen Niederschlagsüberschuss.

Auch die Monatsmittelwerte der Lufttemperatur weichen deutlich vom langjährigen Mittel ab. Während es in Folge der Hochdruckwetterlagen im Juni (und September) zu einer signifikanten positiven Temperaturabweichung kam, war der relativ feuchte August um 1,5 °C zu kalt.



**Abbildung 4-2: Abweichung der am Ringlihof gemessenen Monatsmittelwerte, sowie der an der meteorologischen Stadtstation Freiburg gemessenen Durchschnittstemperaturen im Vergleich zum langjährigen Mittel der Klimaperiode 1971–2000 an der Station Freiburg (Daten des langjährigen Mittel aus [www.Klimadiagramme.de](http://www.Klimadiagramme.de))**

Zusammenfassend kann an dieser Stelle vermerkt werden, dass aufgrund der feuchten Witterung im Hochsommer für den gesamten Messzeitraum zwei niederschlagsarme Perioden im Mai/Juni (ca. fünf Wochen andauernd) und Anfang September (zwei Wochen andauernd) ausgewiesen werden können, welche folglich als Grundlage für Aussagen zur Niedrigwasserproblematik dienen. Insbesondere die Trockenperiode im September bietet aufgrund der hohen Vorfeuchte die Möglichkeit, das Leerlaufverhalten der Speicher zu beschreiben.

### ***4.3 Abflussverhalten und Hydrochemie des Engebächles***

Aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Diplomarbeit (ADOLPH, 2005) wurde am neu errichteten Pegel zur genauen Erfassung kleiner Wasserstandsschwankungen ein Dreieck-Überfall installiert. Dadurch verzögerte sich der Beginn der kontinuierlichen Aufzeichnungen etwas und begann schließlich am 09.06.2005. Die zusätzlich zur kontinuierlichen Messung manuell durchgeführten Kontrollmessungen ergaben, dass die eingesetzte Diversonde sowohl den Wasserstand als auch die Wassertemperatur sehr genau aufzeichnete. Nur in der elektrischen Leitfähigkeit zeigten sich des Öfteren erhebliche Ausreißer, sowie eine systematische Abweichung, die nachträglich manuell korrigiert wurde.

Im Zuge der ausgedehnten Hochdruckwetterlage Ende Mai bis Juni mit sehr geringen Niederschlägen kam es, wie in Abbildung 4-3 dargestellt, zu einem kontinuierlichen Rückgang im Abfluss des Pegels Engebächle auf ein minimales Abflussvolumen von etwa 0,6 l/s, unmittelbar vor dem Ereignis vom 29.06.05. Die beiden darauf folgenden Ereignisse führten nur zu sehr kurzen direkten Reaktionen in der Wasserführung, wobei der Abfluss sehr schnell wieder auf das Vorereignisniveau abfiel.

Erst im weiteren Verlauf kam es im Zuge der diversen Niederschlagsereignisse zu deutlichen, länger anhaltenden Reaktionen im Abfluss, mit teilweise additiven Abflussimpulsen Anfang Juli. Das Abflussmaximum im Verlauf der Messperiode trat während des Ereignisses vom 11.06.2005 auf. Der gemessene Scheitelabfluss betrug hierbei 150 l/s. Dieser dürfte allerdings deutlich unterschätzt sein, da es zu einer Überflutung des Messwehres kam.

Ende August/Anfang September kam es als Folge einer zweiwöchigen Niederschlagspause erneut zu einem starken Rückgang in der Wasserführung des Engebächles. Das Abflussminimum während dieses Zeitraums erreichte allerdings nicht mehr das geringe Niveau vom Frühsommer.

Auffällig ist gerade zur zweiten Niedrigwasserperiode der gut erkennbare Tagesgang im Abfluss. Dieser trat ebenfalls bereits im Frühsommer auf, ist aber aufgrund der geringen Abflussmenge aus der Grafik nicht unbedingt zu erkennen.

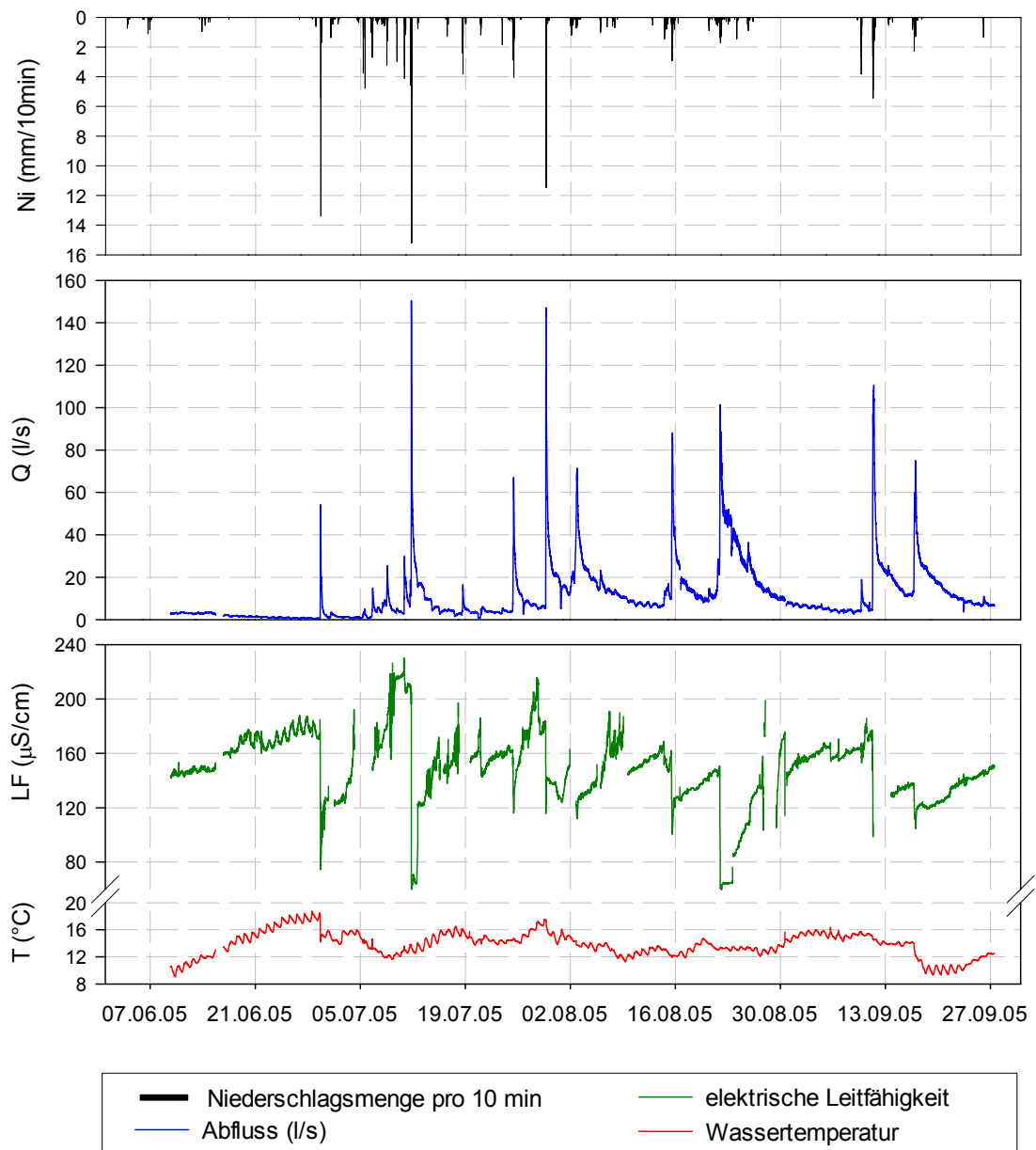
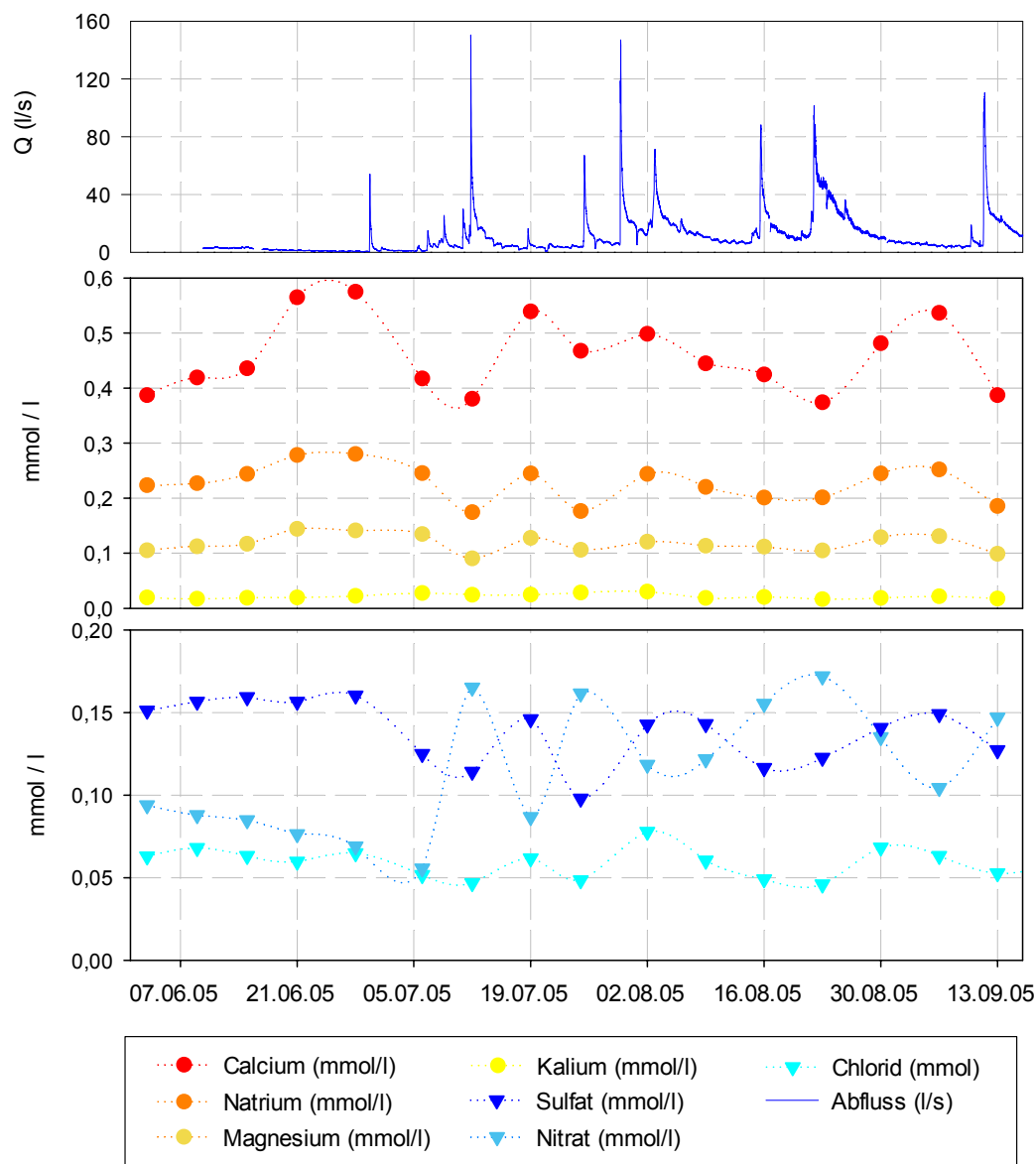


Abbildung 4-3: Ergebnisse der CTD-Divermessung am Pegel Engebächle

Der Verlauf der Wassertemperatur ist von deutlichen Tagesschwankungen geprägt. Resultierend aus der durchgehend warmen Witterung sowie der abnehmenden Wassermenge kam es zu einem kontinuierlichen Temperaturanstieg während der ersten Wochen mit einer maximalen Wassertemperatur von 18,7  $^{\circ}\text{C}$  am Ende der Niedrigwasserphase im Juni. Das Einsetzen der Niederschläge führte zu einem abrupten Rückgang um 3,5  $^{\circ}\text{C}$  und anschließend zu einem deutlich unruhigeren Verlauf, ohne dass allerdings ein direkter Ereigniseinfluss erkennbar ist. Dieser wird in erster Linie durch ähnliche Temperaturverhältnisse im Bach und im Niederschlag verschleiert (SHANLEY & PETERS, 1988). Nähere Betrachtungen zu dieser Problematik finden in einer parallel laufenden Diplomarbeit statt (HUGENSCHMIDT, 2005/2006).

Die hydrochemischen Eigenschaften des Engebächles wurden einerseits durch die kontinuierliche Leitfähigkeitsmessung erfasst. Diese weist eine deutliche Ereignisbeeinflussung auf, was sich in einer starken Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit während der Abflussspitzen widerspiegelt. Zu Niedrigwasserzeiten ergibt sich mit abnehmendem Durchfluss eine leichte, kontinuierliche Leitfähigkeitszunahme, welche sich an einen Wert von ca.  $170 \mu\text{S}/\text{cm}$  annähert. Die teilweise über  $200 \mu\text{S}/\text{cm}$  liegenden Leitfähigkeitsspitzen konnten leider nicht durch Handmessungen belegt werden und könnten auch aus Messungenauigkeiten in Folge starker Sedimentation des Messgerätes resultieren.

Andererseits wurden zur hydrochemische Charakterisierung des Engebächles die wöchentlich entnommenen Wasserproben auf Hauptionen analysiert (Abbildung 4-4).



**Abbildung 4-4: Konzentration der Hauptionen im Engebächle während der Messphase**

Der Verlauf der Kationen zeigt während der Trockenphase einen leichten Anstieg, mit Ausnahme des Kaliums, welches keinen Schwankungen unterliegt. Deutlich werden die im Bereich von größer 4 mmol/l gelegenen Calciumgehalte, die eindeutig das Geschehen prägen. Mit Einsetzen der feuchten Phase kommt es bei allen Ionen zu einem relativ unruhigen Verlauf.

Dominierendes Anion ist das Sulfat, das allerdings keinen ausgeprägten Anstieg im Verlauf der Niedrigwasserphase zeigt. Sehr ausgeglichen mit einer Schwankungsbreite von 0,05 mmol/l ist die Chloridkonzentration im Engebächle. Gerade während der Niedrigwasserphase bleibt die Konzentration relativ konstant, im Ereignisfall kommt es zu leichten Reaktionen. Gegenläufig zu den anderen Ionen verhält sich Nitrat. Mit zunehmender Trockenheit verringert sich der Nitratgehalt im Bach, während sich bei Ereignissen eine deutlich höhere Nitratkonzentration im Bach einstellt.

Ein Überblick über die Variationsbreite der Ionen bietet Abbildung 4-5. Auch hier ist zu erkennen, dass Calcium sowohl den höchsten Gesamtgehalt als auch die höchste Variationsbreite aufweist.

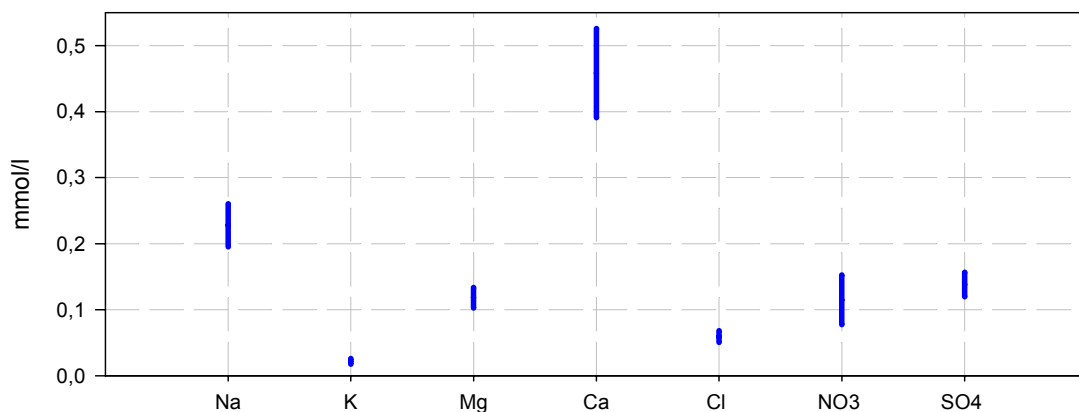


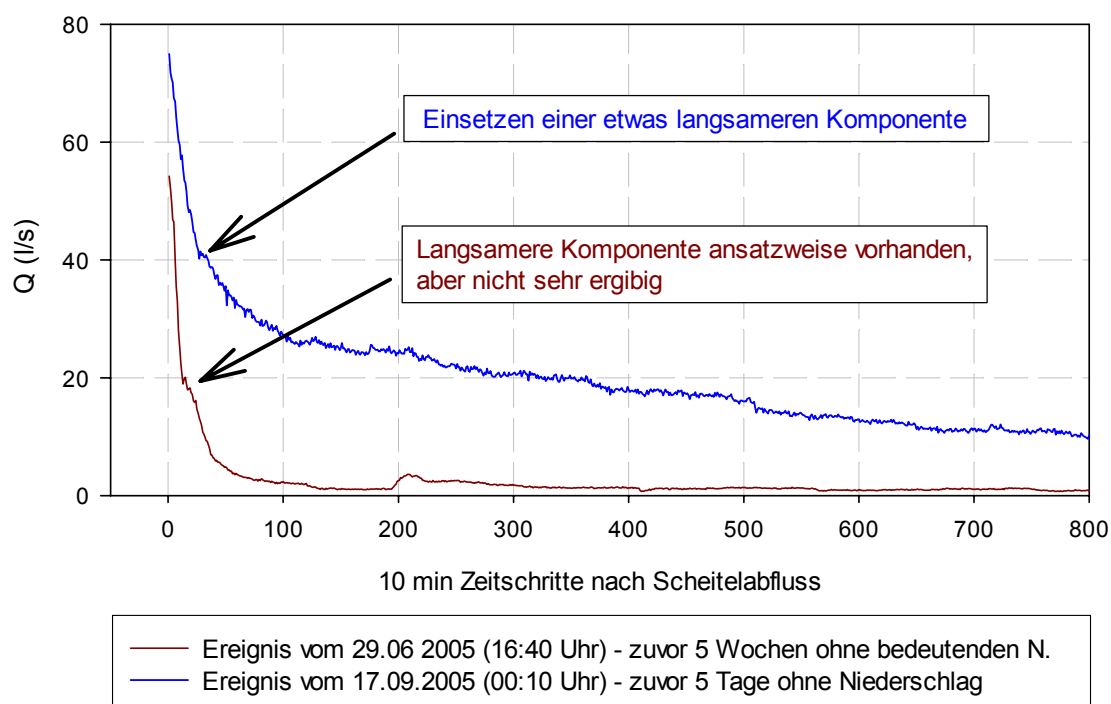
Abbildung 4-5: Schwankungsbreite (SB) der Hauptionenkonzentration im Engebächle

#### 4.3.1 Diskussion der Ergebnisse

Allgemein ist eine sehr schnelle Reaktion des Abflusses auf Niederschlagsereignisse erkennbar, was sowohl auf die flächenmäßig geringe Erstreckung des Gebietes, als auch auf die steilen Hanglagen und dem klaren Vorflutergeräde zurückzuführen ist.

Der am Pegel gemessene Abfluss zeigt deutliche Folgeerscheinungen auf die fünf Wochen andauernde Trockenperiode im Frühsommer. Hier ist in erster Linie die Veränderung der Trockenwetterauslaufcharakteristik während der Messperiode zu nennen, was man als direkte Folge der Niedrigwassersituation zu Beginn der Messperiode werten kann. Dies wird durch einen Vergleich der Auslaufäste verdeutlicht

(Abbildung 4-6). Mit zunehmenden Niederschlägen kommt es zu einem verzögerten Abklingen der Hochwasserabflüsse. Während der ersten Ereignisse fiel der Abfluss innerhalb kürzester Zeit zurück auf den Basisabfluss. Es fehlte hier eine etwas verzögert auftretende, ereignisbeeinflusste Abflusskomponente, welche sich erst im Zuge der feuchteren Witterung wieder einstellt. Zieht man die elektrische Leitfähigkeit im Bach zu Rate, so wird dieser Sachverhalt nochmals verdeutlicht (Abbildung 4-3). Neben dem eine Oberflächenkomponente signalisierenden, durchweg auftretenden, starken sprungartigen Rückgang der elektrischen Leitfähigkeit während der verschiedenen Ereignisse setzt mit zunehmender Beobachtungsdauer eine Verzögerung des Wiederanstiegs ein, was auf eine zusätzliche, im Vergleich zum Direktanteil etwas höher mineralisierte Komponente schließen lässt. Eine Erklärung für die Veränderung des abfallenden Astes des Abflusses nach Niederschlagsereignissen ist in der Wasserführung der Bodenzone zu suchen und wird in Kapitel 4.5.1 näher erläutert.



**Abbildung 4-6: Vergleich des Rezessionsverhaltens des Engebächles bei einem Ereignis direkt nach der Trockenperiode und einem Ereignis nach kontinuierlicher Auffeuchtung**

Die relativ hohen Calcium- und Natriumgehalte lassen sich zum einen durch die Amphibolitverwitterung erklären. Weiterhin kann auch das aufgrund der Wegverbauung im Bachbett liegende kalkhaltige Material durchaus als Calciumquelle auftreten. Gerade zu Niedrigwasserzeiten bei relativ geringen Fließgeschwindigkeiten und dadurch erhöhter Kontaktzeit kann es dadurch zu einer Beeinflussung der Wasserchemie kommen.

Bei den Anionen ist insbesondere das gegenläufige Verhalten des Nitrats bemerkenswert. Eine Zunahme von Nitrat im Ereignisfall kann auf das Vorhandensein einer oberflächennahen Komponente hindeuten (UHLENBROOK, 1999). Gerade in den terrestrischen Böden des Schwarzwaldes kommt es durch Überschussmineralisation und Nitrifikation unter Fichten zu erhöhten Nitratausträgen (FEGER ET AL., 1999). Allerdings muss man die Aussagekraft des Nitrats einschränken, da es sich im System sehr instabil verhält. Die etwas höhere, auch von ADOLPH (2005) in seiner Arbeit erwähnte Sulfatkonzentration lässt sich hauptsächlich durch das Vorhandensein von Pyrit ( $\text{FeS}_2$ ) erklären.

Setzt man die gemessenen Ionen zur Kontrolle in die Ionenbilanz ein, ergibt sich ein Fehlwert auf der Anionenseite. Dies deutet darauf hin, dass auch Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) als weiteres Anion im Bach vorkommt. Da das EZG Engebächle auf silikatischem Ausgangsgestein liegt, die letzte Waldbodenkalkung laut Angaben des FORSTAMT STAUFEN (2005 – persönliche Mitteilung) ca. 15 Jahre zurückliegen und etwaige Lößeinwehungen in die Bodenzone inzwischen vollständig entkalkt sein sollten, bietet sich auch hier das aus der Wegverbauung resultierende, kalkhaltige Material im Bachbett als Quelle an.

Speziell im Hinblick auf die, durch die Arbeit von ADOLPH (2005) aufgeworfenen Frage, inwiefern sich natürliche Tracer als Indikatoren für den Dürrezustand eines Systems eignen, bietet sich die Betrachtung der Ionenkonzentration im Bach bei verschiedenen Abflusshöhen an. Generell kommt es gerade bei den Kationen zu Niedrigwasserzeiten zu einer Zunahme der Ionenkonzentration im Bach. Dies führt auch teilweise zu einem relativ guten Zusammenhang zwischen Abflusshöhe und Chemie, mit einem maximalen Bestimmtheitsmaß bei Natrium (Abbildung A 5). Generell auf andere Gebiete übertragbare Aussagen über eine Dürrepersistenz lassen sich aber aus den Ergebnissen der Wasseranalyse nicht ableiten. Sie sind vielmehr Folge unterschiedlicher Beitragsmengen der an der Abflussbildung beteiligten Speicherräume, die regional betrachtet für jedes Gebiet variieren.

## ***4.4 Intensivbeprobung im September***

### **4.4.1 Einführung**

Anstoß für die Intensivierung der manuell durchgeführten Kontrollmessungen war das Auftreten von Tagesschwankungen in der elektrischen Leitfähigkeit und im Wasserstand (Abfluss) während der Niedrigwasserperiode im Frühsommer. Da die Routinebeprobung im wöchentlichen Rhythmus vorgenommen wurden, konnten die entsprechenden Tagesgänge mit den bis dato aufgenommenen Handmesswerten weder widerlegt noch verifiziert werden, so dass ein Messfehler nicht grundsätzlich auszuschließen war. Aus diesem Grund wurde eine Intensivierung der Beprobung

durchgeführt, welche als Folge der fortwährenden feuchten Witterungslage erst während einer zweiten Niedrigwasserperiode Anfang September durchgeführt werden konnte.

Hauptziel der Intensivmesskampagne war zunächst einmal herauszufinden, ob die relativ großen Temperaturschwankungen im Bachwasser direkte Auswirkungen auf die Messgenauigkeit der CTD-Diversonde haben und somit die Tagesgänge als ein daraus resultierendes Messproblem hervorgerufen wurden. Zusätzlich bot sich die Möglichkeit, direkt den Einfluss des Fischeiches auf die Wasserchemie des Baches zu quantifizieren. Gerade zu Niedrigwasserzeiten ist der Einfluss des Fischeiches aufgrund der Wasserausleitung aus dem Bach und späterer Wiedereinleitung sehr groß. Problematisch hierbei ist die unterschiedliche Wassermenge, welche aus dem Bach ausgeleitet wird. Hier traten zwischen den beiden Niedrigwasserperioden deutliche Unterschiede auf. Während der ersten Phase im Juni, kam der gesamte am Pegel gemessene Abfluss aus dem Überlauf des Fischeiches, das zwischen Ein- und Auslauf gelegene Bachstück fiel während dieser Zeit trocken. Im September dagegen wurden nur etwa 50% des Bachwassers durch den Teich geleitet. Dies muss bei entsprechenden Bewertungen berücksichtigt werden.

Zur Erfassung der Veränderung des Bachwassers durch den Fischeich wurde über dem Teicheinlass eine weitere CTD-Diversonde installiert und kontinuierlich die elektrische Leitfähigkeit und Wassertemperatur aufgezeichnet. Zusätzlich wurden Wasserproben sowohl oberhalb des Teiches als auch am Pegel entnommen, um eventuelle Veränderungen in der Wasserchemie direkt zu quantifizieren. Die Aussagekraft des Wasserstandes am Messpunkt oberhalb des Fischeiches war aufgrund des unbefestigten Messquerschnittes allerdings stark eingeschränkt.

#### **4.4.2 Ergebnisse und Diskussion**

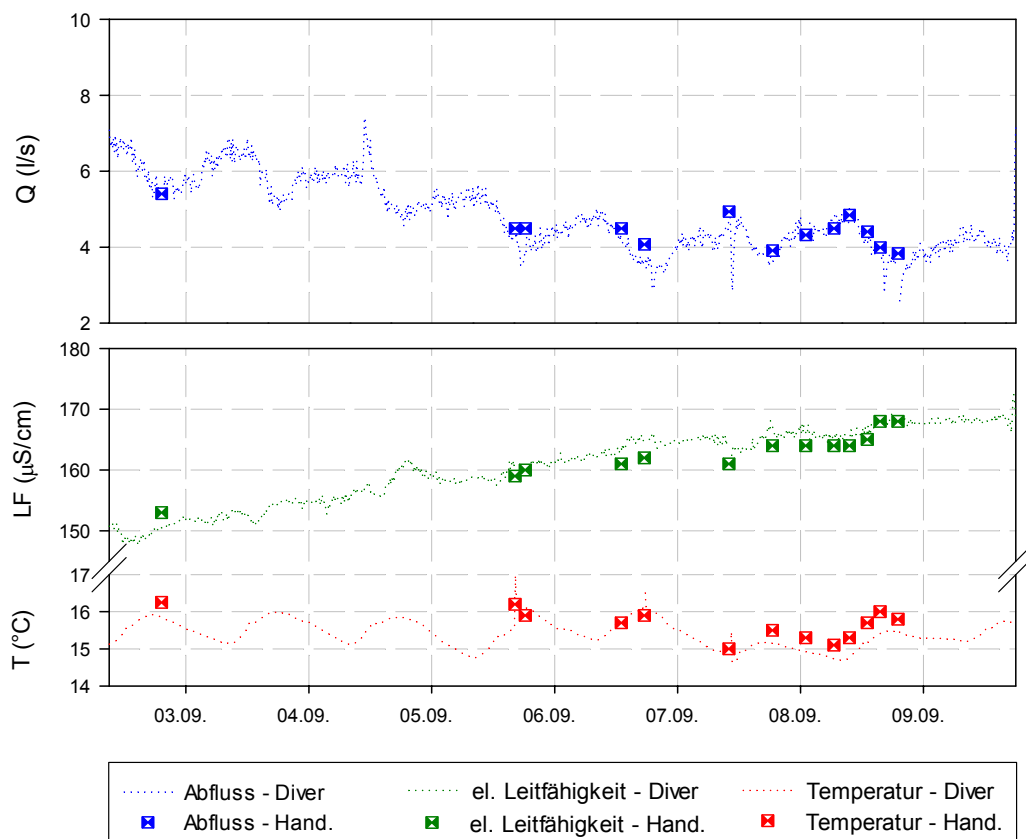
Insgesamt wurden über einen Zeitraum von fünf Tagen 13 Messungen des Wasserstandes, der elektrischen Leitfähigkeit und der Wassertemperatur durchgeführt. Abbildung 4-7 zeigt den Vergleich der Handmessungen mit den vom Diver aufgezeichneten Werten am Pegel. Hier ist deutlich erkennbar, dass sowohl in den Diveraufzeichnungen als auch bei den Handmessungen ein Tagesgang im Wasserstand und daraus resultierend im Abfluss auftritt, und daher die Beeinflussung des Messgeräts durch Tagesschwankungen der Wassertemperatur vernachlässigbar ist.

Berechnet man aus dem Wasserstand die zugehörige Abflussmenge, erhält man eine Tagesschwankung von 0,66 l/s, was bei einem mittleren Abflussvolumen von 4,4 l/s einer Schwankung von 15 % entspricht. Aufgrund dessen, dass die Minima am frühen

Morgen anzutreffen sind, kann man die Ursache für die Schwankungen hauptsächlich in der Transpirationsleistung des Waldes sehen.

Ein Tagesgang in der elektrischen Leitfähigkeit war während der Intensivbeprobung allerdings weder bei den kontinuierlichen noch bei den Handmessungen nachweisbar. Eine genaue Erklärung für das im Juni auftretende Phänomen konnte somit nicht gefunden werden.

Ein direkter Temperatureinfluss wird aber als gering angesehen. Dafür spricht zum einen die Tatsache, dass die CTD-Diversonde die spezifische elektrische Leitfähigkeit ausgibt, also eine Temperaturkompensation der Messwerte bereits im Gerät vorgenommen wird. Zum anderen passen die Maxima des Temperaturverlaufs und der elektrischen Leitfähigkeit nicht zusammen, was eine nachträglich durchgeführte Temperaturkompensation nochmals verdeutlichte (vgl. a. Absatz 3.3.3).



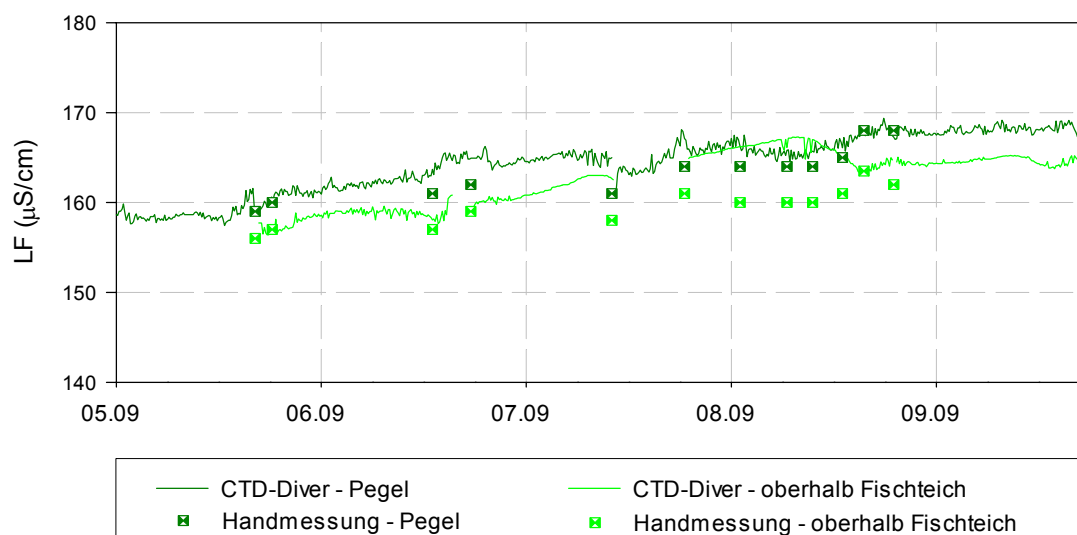
**Abbildung 4-7: Vergleich der Messergebnisse des CTD-Divers mit den zeitlich hochaufgelösten Handmessungen am Pegel Engbächle im Zeitraum von 02.09.2005 – 09.09.2005**

Somit wird eine andere, natürliche Ursache vermutet. Vergleicht man die Messergebnisse der über dem Teich gelegenen Sonde mit der Pegelsonde (Abbildung 4-8), so treten keine signifikanten Unterschiede im Leitfähigkeitsverlauf auf, allerdings eine absolute Differenz zwischen den beiden Standorten, die insbesondere bei den

Handmessungen ersichtlich wird. Als Ursache hierfür wird die oben bereits erwähnte Wegverbauung angeführt, wodurch es zu einer etwas erhöhten Mineralisierung des Bachwassers kommt. Mehrere während dieses Zeitraums durchgeführte Messungen der elektrischen Leitfähigkeit entlang diesem Abschnitt bestätigten diese Vermutung. Auch zeigte die Analyse der Wasserproben einen im Vergleich zum Messpunkt oberhalb des Fischteichs etwas erhöhten Calciumgehalt am Pegel.

Obwohl aus der Messung kein direkter Einfluss des Teichs auf den Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit nachgewiesen werden konnte, könnte die Ursache für den Tagesgang im Frühsommer doch auf ihn zurückzuführen sein. Grundlage hierfür wäre das *Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht* im Wasser, welches insbesondere durch pflanzliche Aktivität gesteuert wird. So kommt es zu Zeiten, in denen die Pflanzen keine Photosynthese betreiben, zu einer Verschiebung hin zum leichtlöslicheren Calciumhydrogencarbonat, woraus resultierend bei entsprechend geringer Wassermenge eine Erhöhung in der Leitfähigkeit denkbar wäre. Da das Maximum der Leitfähigkeit nachts auftrat, könnte dies durchaus als Erklärung für den Tagesgang dienen.

Das Ausbleiben des Tagesganges während der Intensivbeprobung könnte somit sowohl auf das Ende der Vegetationsperiode, als auch auf den geringeren Wasseranteil aus dem Teich zurückgeführt werden. Näheres zum Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht ist der entsprechenden Fachliteratur zu entnehmen (z.B. SCHWOERBEL, 1999). Anzufügen ist allerdings, dass dem Autor bisher keine entsprechenden Veröffentlichungen bekannt sind, die einen Tagesgang in der elektrischen Leitfähigkeit mittels dieses Prozesses beschreiben. Da aber ein direkter Einfluss des Waldes als eher unwahrscheinlich angesehen wird, bliebe der Teich als Hauptursache bestehen.



**Abbildung 4-8: Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit (Diver- und Handmessung) am Pegel und oberhalb des Teichs zur Quantifizierung des Einflusses des Fischteichs auf die Gewässerchemie**

#### ***4.5 Ergebnisse der Bodenfeuchtemessung***

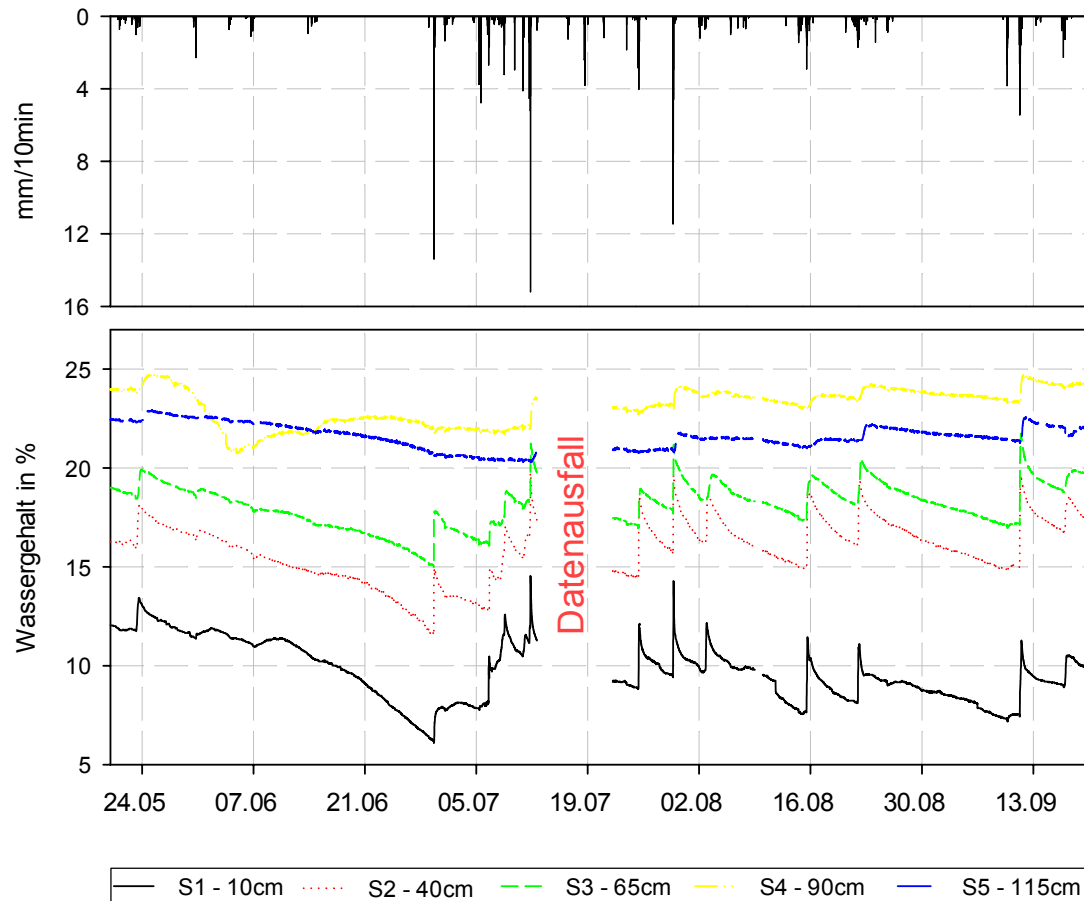
Das Einbringen der Bodenfeuchtesonden erfolgte direkt zu Beginn der Arbeit, so dass Messdaten ab Ende Mai vorlagen. Dies erwies sich als überaus vorteilhaft, da dadurch noch Messdaten vor der Niedrigwasserperiode gewonnen werden konnten. Man kann daher an diesem Datensatz sowohl den Austrocknungsverlauf als auch nachwirkend die Wiederauffeuchtungsphase erkennen (Abbildung 4-9).

Bei der Bewertung der Messergebnisse sollen nur die relativen Schwankungen des Wassergehalts der einzelnen Sonden berücksichtigt werden. Die scheinbare Zunahme des absoluten Wassergehalts zu jedem Zeitpunkt mit zunehmender Tiefe wurde wahrscheinlich durch unterschiedliche Substratverhältnisse vorgetäuscht und hätte durch eine direkte Kalibrierung der Sonden auf das umgebende Material verringert werden können. Da eine genaue Kenntnis des absoluten Wassergehalts aber für diese Arbeit nicht von Bedeutung war, wurde auf eine Nachkalibrierung der Sonden verzichtet.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf des Wassergehalts der einzelnen Sonden, so kommt es im Zuge der niederschlagsarmen Periode zu einem deutlichen Abfall des Wassergehalts im Boden. Auffällig ist der bis zu einer Bodentiefe von 60 cm erkennbare und sich zur Bodenoberfläche hin verstärkende Rückgang des Bodenwassergehaltes ab Mitte Juli, was zu einem „Abknicken“ der Ganglinie führt. Dies kann für den Oberboden (Sonde S1) zum einen auf die verstärkte Evaporationsrate während dieser Zeit zurückgeführt werden. Zum anderen spielt auch die Transpirationsleistung der Vegetation eine bedeutende Rolle. Aus dem gleichmäßigen Verlauf des Rückgangs der in der Zersatzzone gelegenen, in Abbildung 4-9 blau eingefärbten Sonde S5 kann man schließen, dass es in diesem Bereich zu keiner oder nur einer geringen Wasserentnahme durch die Baumwurzeln kommt. Der atypische Verlauf der Sonde S4 (gelbe Ganglinie) mit dem starken Rückgang Anfang Juni und nachfolgendem Wiederanstieg während der Trockenphase muss zufälliger Natur sein und steht daher nicht weiter zur Debatte.

Im weiteren Verlauf kommt es in Folge zunehmender Niederschläge zu deutlichen Reaktionen im Bodenwassergehalt. Insbesondere die drei im A- und B-Horizont gelegenen Sonden zeigen deutliche Ausschläge als unmittelbare Folge der Niederschlagsereignisse. Bei den tiefer gelegenen Sonden S4 und S5 zeigen sich erstmals nach dem Starkregenereignis vom 11.06.2005 leichte Anstiege in dem Bodenwassergehalt. Insbesondere bei der im Saprolith gelegenen Sonde S5 ist trotz anschließender Datenlücke erkennbar, dass die Reaktion auf dieses Ereignis sehr schwach ist. Mit den vor der Trockenheit aufgezeichneten Reaktionen vergleichbare Anstiege auf relativ geringe Niederschläge treten in den untersten Bodenschichten erst wieder Ende August auf. In dieser Zeit ist auch der Gesamtwassergehalt im Boden etwa

wieder auf das selbe Niveau wie vor der Trockenwetterlage angestiegen. In den oberen Regionen stellte sich der Ausgangszustand bereits deutlich früher ein.



**Abbildung 4-9: Verlauf des volumetrischen Bodenwassergehalts während verschiedener Niederschlagsinputs in 5 verschiedenen Tiefenregionen**

#### 4.5.1 Diskussion der Messergebnisse

Aus diesen Beobachtungen lässt sich folgern, dass es im Zuge der Trockenheit zu einem starken Austrocknen über die gesamte Mächtigkeit der Bodenzone kam. Nach Wiedereinsetzen der Niederschläge wurde zuerst das Wasserdefizit der oberen Bodenschichten ausgeglichen. Dies führte dazu, dass weniger ergiebige Niederschläge, speziell zu Beginn der feuchteren Phase Anfang Juli, nicht in tiefere Bodenregionen vordringen konnten. Erst nach dem „Aufsättigen“ der oberen Zone konnte auch bei kleineren Niederschlagsereignissen eine Reaktion in den tieferen Bodenregionen nachgewiesen werden, welche dann durch vertikal versickerndes Matrixwasser

verursacht wurden. Diese Beobachtungen decken sich auch mit Messungen während dem Dürresommer 2003 in einem bewaldeten Gebiet im Oberrheingraben (WENNINGER, 2005- persönliche Mitteilung).

Während Starkniederschlägen kann es bereits in oberen Bodenzonen zur Entstehung einer Sättigungszone kommen und somit, insbesondere aufgrund der relativ steilen Hangsituation, bereits lateral relativ kurzfristig Ereigniswasser dem Vorfluter zufließen, ohne die Zersatzzone zu erreichen (BONELL, 1993). Anhand dieses Prozesses lässt sich auch die direkte Ereignisreaktion im Engebächle erklären. Generell kommt es im unbearbeiteten Boden am ehesten im Übergangsbereich zwischen dem organischen Auflagehorizont und dem Mineralboden zur Ausbildung einer solchen gesättigten Zone (UHLENBROOK, 1999).

Als Erklärung für die trotzdem bereits relativ frühzeitig wieder einsetzende leichte Reaktion der unteren Sonde auf Starkniederschläge könnte das „*Crack-pipe*“-Konzept angeführt werden (MCDONNELL, 1990). Es basiert darauf, dass ein Teil des Niederschlags nicht über die Matrix, sondern über vertikal ausgerichtete Makroporen relativ rasch bis zur Verwitterungszone perkoliert.

Eine Erklärung für das veränderte Trockenwetterauslaufverhalten im Engebächle ist ebenfalls im Verlauf der Bodenfeuchte zu finden. Nach „Auffeuchten“ der Bodenzone auf das Feuchteniveau von vor der Trockenperiode, ist in der Bodenzone während und insbesondere nach Niederschlagsereignissen freies Matrixwasser vorhanden, welches neben dem vertikalen Transport (s.o.) auch lateral, zeitlich etwas verzögert dem Vorfluter zufließen kann. Anhand vorhandenem Datenmaterial wird dabei dem Bereich der Hauptlage (Sonde S2 und S3) das größte Zuflusspotential zugesprochen.

#### ***4.6 Ergebnisse der Untersuchung der Quellen im Einzugsgebiet Engebächle***

Insgesamt wurden an allen zwölf im EZG Engebächle gelegenen Quellen ab dem 03.06.2005 über 16 Wochen im wöchentlichen Rhythmus Messungen der Quellschüttung, sowie der Wassertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit durchgeführt. Zusätzlich wurden jeweils zwei Wasserproben entnommen und anschließend im Labor auf Hauptionen untersucht. Die wasserchemische Auswertung für alle Quellen wurde aber nur für Proben bis zum 02.08.2005 durchgeführt. Anhand dieser Resultate konnten drei Quellen der unteren Quelfassung als interessant für weitergehende Untersuchungen ausgewiesen werden. Eine durchgehende Probenauswertung sowie die Analyse des Verlaufs der stabilen Isotope, wurde nur für diese drei Quellen vorgenommen. Eine nähere Beschreibung der Messergebnisse ist im Folgenden dargestellt.

#### 4.6.1 Quellgruppe Sägedobel

Abbildung 4-10 fasst die Ergebnisse der wöchentlichen Messungen an den Quellen der Quellgruppe Sägedobel zusammen. Relativ betrachtet ergeben die Quellen ein einheitliches Bild. Alle Quellen zeigen sowohl mengenmäßig als auch im Ereignisverhalten ein ähnliches Schüttungsverhalten. Bei allen Quellen geht die Schüttung im Zuge der ca. fünföchigen Phase mit nur geringen Niederschlägen deutlich unter das Anfangsniveau zurück und erreicht bei allen Quellen einheitlich am 28.06.2005 den geringsten Wert. Die Auslaufäste der Quellen verlaufen während dieser Zeit weitgehend parallel.

Im weiteren Verlauf zeigen alle Quellen eine mehr oder weniger starke Reaktion auf die verschiedenen Niederschlagsereignisse. Generell ist eine Zunahme in der quantitativen Reaktion auf Ereignisse im Verlauf der Beobachtungsperiode erkennbar. Die maximale Schüttung tritt bei allen Quellen am 22.08.2005 auf. Die größte Schüttungsvariabilität liegt bei den Quellen O2, O6 und etwas abgeschwächt bei O5.

Betrachtet man den Verlauf der Leitfähigkeit für die Quellen, so stellt man fest, dass sie sich gegenläufig zur Schüttung verhält. Aufgrund der Abnahme im Ereignisfall kann daher auf entsprechende Verdünnungseffekte durch geringer mineralisiertes Ereigniswasser geschlossen werden. Die größte Variabilität in der elektrischen Leitfähigkeit, als Reaktion auf Niederschlagsereignisse zeigt Quelle O2. Die mittlere elektrische Leitfähigkeit der Quellen liegt zwischen 103  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bei der Quelle O1 und 150  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bei der Quelle O4.

Im Temperaturverlauf lassen sich wiederum die Auswirkung der Niederschläge erkennen. Generell ist eine deutliche Temperaturzunahme für alle Quellen bis zum 28.06.2005 feststellbar, während sie im folgenden Messzeitraum relativ konstant um diesen Wert schwankt.

Im Anhang sind die wichtigsten Parameter der wöchentlich durchgeführten Messungen der Quellen der Quellfassung Sägedobel während des Messzeitraumes nochmals zusammengefasst (Tabelle A 4).

Zieht man die Ergebnisse der wasserchemischen Untersuchungen zu Rate, so setzt sich auch hier die Ausgeglichenheit der Quellen fort (Abbildung 4-12 oben). Dominierendes Kation ist, wie auch im Engebächle, das Calcium. Die mittleren Ionengehalte der Quellen untereinander sind relativ ausgeglichen, Ausnahme hiervon ist das Nitrat mit klaren Ausreißern bei den Quellen O4 und O6. Auch ist die Schwankungsbreite relativ gering und liegt meist im Bereich von unter 1 mmol/l. Größere Schwankungsbreiten treten nur beim Calcium auf, wobei speziell die Quelle O2 eine deutliche Abweichung zeigt. Zur Verdeutlichung der in Abbildung 4-12 dargestellten Variationen im Ionengehalt sind in Tabelle A 5 im Anhang die wichtigsten Parameter der Wasserchemie für die einzelnen Quellen angeführt.

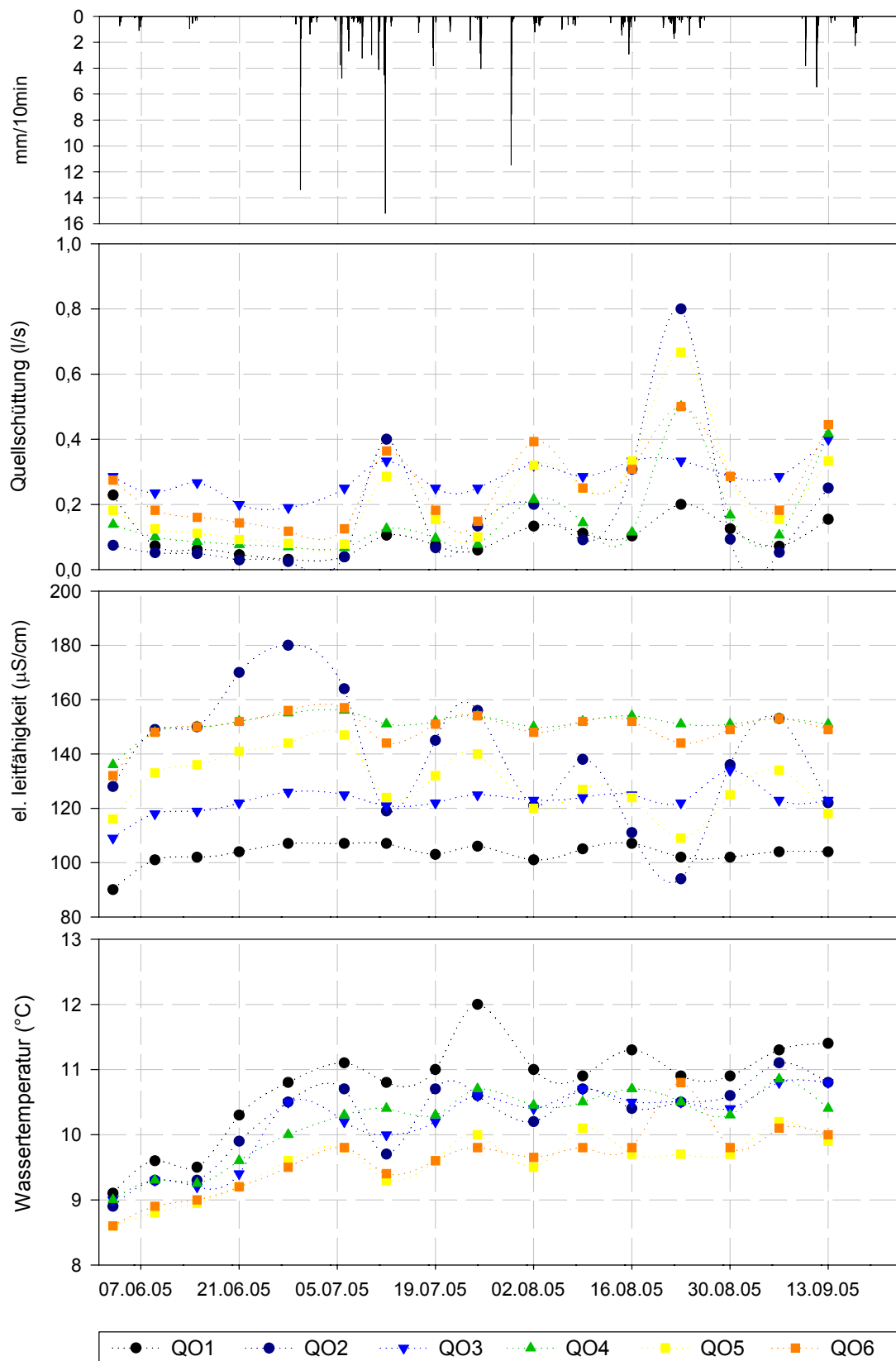


Abbildung 4-10: Ergebnisse der Routinemessungen an den Quellen der Quelfassung Sägedobel

#### 4.6.2 Quellgruppe Steineck

Ein sehr viel heterogeneres Bild ergeben dagegen die Quellen der unteren Quellfassung (Abbildung 4-11). Die stärkste Reaktion zeigt die Quelle U1, welche im Verlauf der Untersuchungsphase sowohl im Juni als auch während der zweiwöchigen Trockenphase im September trocken fiel. Im Ereignisfall dagegen zeigt sie extreme Schüttungszunahmen. Dies führt auch zu einem stark heterogenen Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit, der deutliche Verdünnungserscheinungen zeigt.

Eine klare Reaktion auf Ereignisse zeigt ebenso Quelle U3. Die Quellen U2, U4 und U6 schütten relativ konstant und zeigen nur eine geringe Schüttungszunahmen in Folge Niederschlagsereignisse. Auffällig ist allerdings eine generelle Zunahme der Schüttungsreaktion mit zunehmender Auffeuchtung.

Ein völlig differentes Verhalten zeigt Quelle U5. Dies wird zum einen durch die im Vergleich zu den anderen Quellen der unteren Quellfassung nachdrücklich erhöhte mittlere Schüttungsrate deutlich (vgl. a. Tabelle A 4). Zum anderen zeigt sie keine direkte Reaktion auf die Ereignisse, sondern schüttet teilweise gegenläufig.

Gesamt betrachtet schütten die Quellen der unteren Quellfassung mit Ausnahme der Quelle U5 geringer als die der Quellfassung Sägedobel. Ferner zeigen sie mit einem mittleren Leitfähigkeitsbereich von 144  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Quelle U4) bis 203  $\mu\text{S}/\text{cm}$  bei Quelle U2 einen etwas höheren Mineralisierungsgrad als die höher gelegenen Quellen.

Bei der Temperatur ist während der Probenahme für alle Quellen ein tendenzieller Anstieg erkennbar. Die Schwankungen der einzelnen Quellen decken sich mit der oben bereits angeführten Ereignisbeeinflussung. Tendenziell am wärmsten sind die Quellen U1 und U2, während die Quelle U5 auch hier die geringste Schwankungsbreite zeigt und während des ganzen Beobachtungszeitraums am kühlgsten ist. Verglichen mit den Quellen der Quellfassung Sägedobel sind die unteren Quellen, mit Ausnahme von Quelle U5, um etwa 1 °C wärmer.

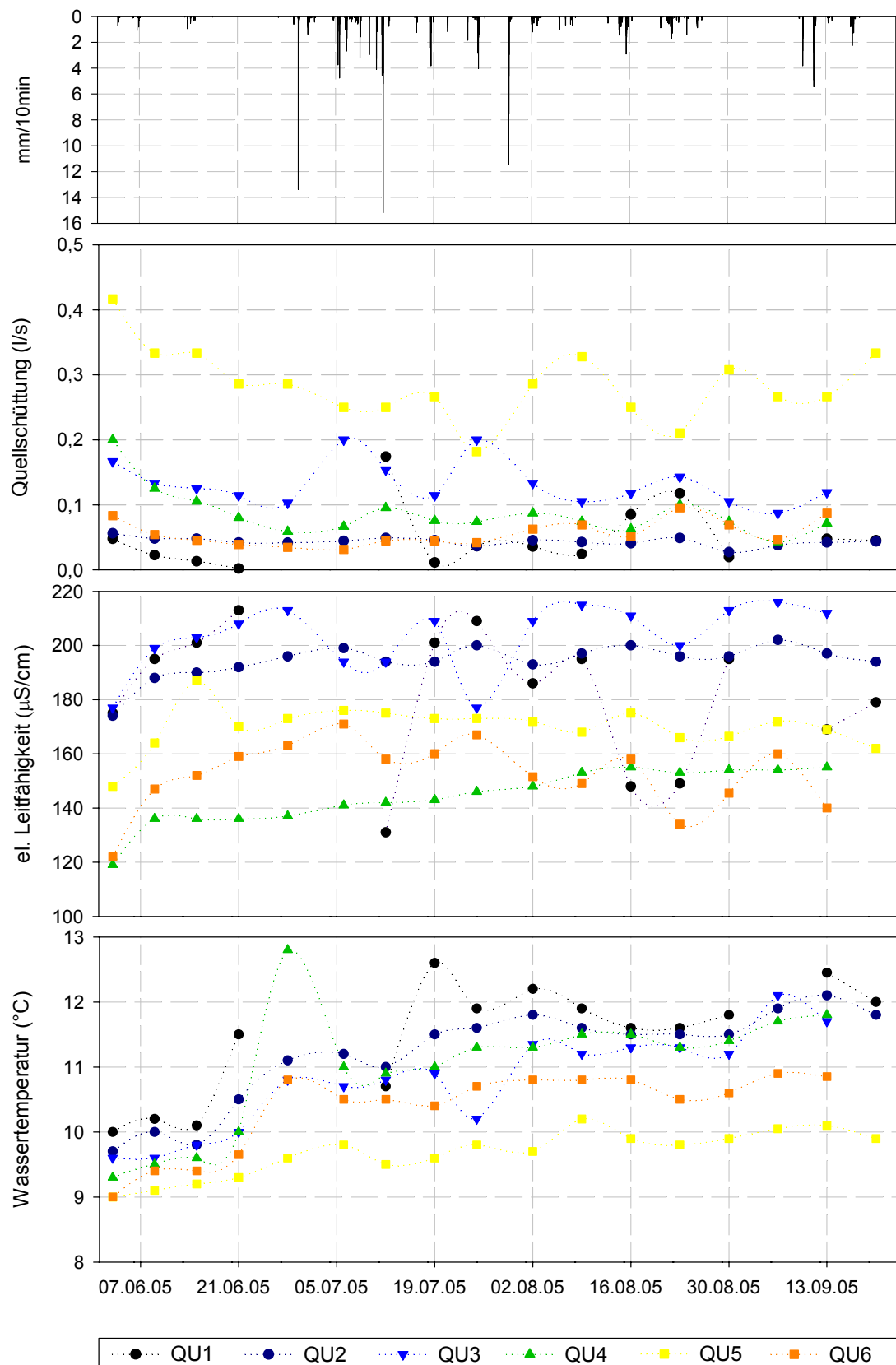
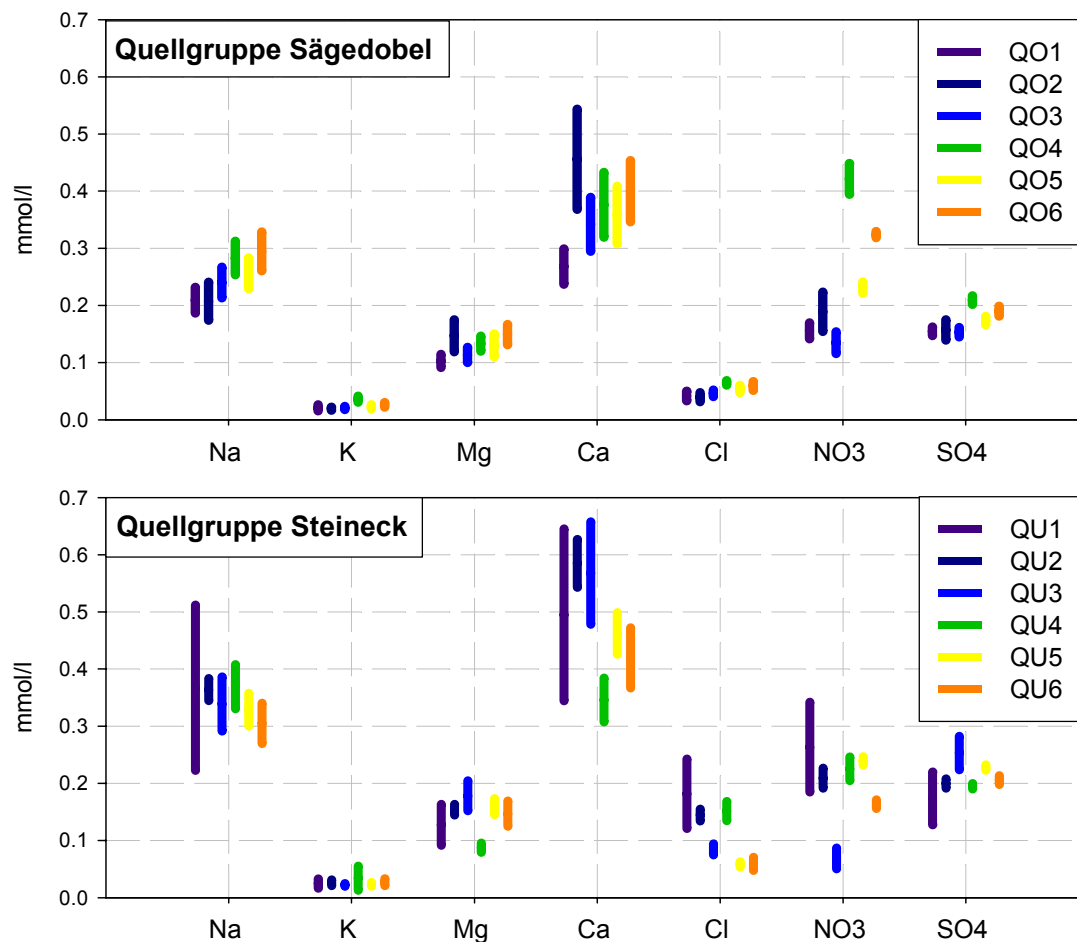


Abbildung 4-11: Ergebnisse der Routinemessungen an den Quellen der Quelffassung Steineck

Einen deutlich heterogeneren Verlauf als zuvor ergibt auch die Verteilung der Hauptionen innerhalb der unteren Quellfassung (Abbildung 4-12 unten). Analog zu den Quellen der Quellfassung Sägedobel dominiert das Calcium, wobei die Calciumgehalte der Quellen der tiefer gelegenen Quellfassung Steineck im Mittel um ca. 0,15 mmol/l höher sind als die der oberen Quellen. Dies könnte neben der allgemein etwas höheren Ionenfracht der unteren Quellen hauptauschlaggebend für die etwas höhere elektrische Leitfähigkeit dieser Quellen sein. Besonders signifikant ist die größere Schwankungsbreite der Calciumkonzentration der Quelle U1 im Bereich von 0,4 mmol/l. Ebenfalls deutlich unterschiedlich zur oberen Quellfassung ist die heterogene Konzentrationsverteilung im Chlorid mit erhöhten Konzentrationen in den Quellen U1, U2 und U4. Dies ist besonders aufgrund des im Vergleich zu den anderen Ionen konservativen Verhaltens von Chlorid im System bemerkenswert. Auch für diese Quellen findet sich im Anhang eine Übersicht über die Werte der Wasserchemie (Tabelle A 6).



**Abbildung 4-12: Schwankungsbreite (SB) der Hauptionen in den im EZG Engebächle gelegenen Quellen auf Datengrundlage wöchentlicher Probenahme (für die Quellen U1, U2 und U5 im Zeitraum 03.06.05 – 13.09.05; für die restlichen Quellen im Zeitraum 03.06.05 – 02.08.2005)**

### 4.6.3 Diskussion der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich erkennen, dass die Quellen trotz ihres kleinräumigen Auftretens innerhalb eines Radius von 300m deutliche Unterschiede in ihrem hydrologischen und hydrochemischen Verhalten zeigen. Generell kann dies sowohl auf kleinräumige geologische Störungen, die gerade im Bereich der Schwarzwald-randverwerfung gehäuft auftreten, als auch auf die Heterogenität der Fließwege innerhalb der gut durchlässigen Deckschichten (Didszun, 2004), sowie unterschiedliches Speicherverhalten zurückzuführen sein.

Aufgrund der wöchentlichen Probenahme geben die Daten nur Stichpunktaufnahmen der Quellsituation wider. Kurzfristige Reaktionen auf Ereignisse lassen sich den Daten nur bedingt entnehmen. Zu diesem Zweck wurde versucht, über kontinuierliche Messungen in den Sammelbecken der beiden Quelfassungen diese direkten Reaktionen auf Niederschlagsereignisse zu erfassen. Allerdings lieferten diese Messungen keine brauchbaren Ergebnisse, was unter anderem auch darauf zurückzuführen ist, dass im Becken keine vollständige Durchmischung stattgefunden hat. Zur weiteren Bewertung der Messergebnisse müssen daher die wöchentlichen Routinemessungen dienen.

Durch die Veränderungen der Quellschüttung und der elektrischen Leitfähigkeit während oder nach Niederschlagsereignissen lassen sich gewisse Aussagen zur Direktwasserbeeinflussung der Quellen gewinnen, woraus wiederum Schlüsse auf die Lage des jeweiligen Grundwasserspeichers im System gezogen werden können. Zieht man den Verlauf der Quellschüttung zu Rate und betrachtet sowohl den Ereignis- als auch den Niedrigwasserfall, zeigen, wie oben bereits angedeutet, drei Quellen einen auffälligen Verlauf:

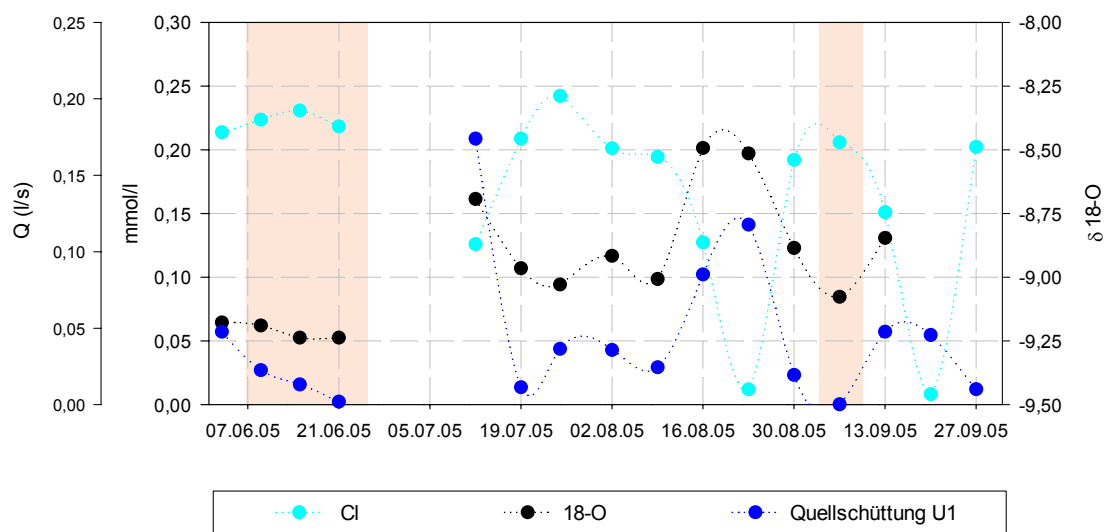
- a) Quelle U1 setzt als einzige Quelle während des Untersuchungszeitraums in der Quellschüttung aus, zeigt aber gerade bei Niederschlagsereignissen eine starke Schüttungszunahme. Beides deutet auf einen oberflächennahen, stark direktwasserbeeinflussten Grundwasserspeicher hin.
- b) Quelle U2 schüttet während der gesamten Messperiode sehr konstant (Standardabweichung der Quellschüttung beträgt 14,6 %), wobei die Schüttungsmenge mit einem Mittel von 0,043 l/s die geringste aller beobachteten Quellen ist. Eine leichte Ereignisbeeinflussung deutet sich erst gegen Ende der Beobachtungsperiode an.
- c) Quelle U5 zeigt im Zuge der trockenen Witterung im Frühsommer eine Abnahme in der Wasserfracht, reagiert aber nicht direkt auf Niederschläge, wodurch ein tieferes Grundwasserstockwerk als Herkunftsraum vermutet

wird. Zudem ist ihre Schüttungsleistung im Vergleich zu den anderen Quellen dieser Quellgruppe deutlich erhöht.

Diese drei Quellen wurden aufgrund ihres Schüttungsverhaltens weitergehend analysiert. Eine genauere Betrachtung der hydrochemischen Zusammensetzung dieser Quellen ist gerade im Hinblick auf die Abflussbildung im Engebächle von Interesse. Zusätzlich zur Analyse der Hauptionen für den gesamten Beprobungszeitraum wurde für diese Quellen auch der Gehalt des stabilen Sauerstoffisotops O-18 bestimmt. Speziell die zeitlichen Variationen im O-18-Gehalt sowie der Verlauf der Chloridkonzentration, sind aufgrund ihres konservativen Verhaltens im System sehr aussagekräftig, und werden im Folgenden für die entsprechenden Quellen näher diskutiert. Weitere Indizien zur Einordnung der Quellen in das Gesamtsystem kann man aus dem Verlauf der anderen Ionen entnehmen. Dieser ist für die drei Quellen in den Abbildungen A8–A10 im Anhang dieser Arbeit dargestellt.

### Quelle U1

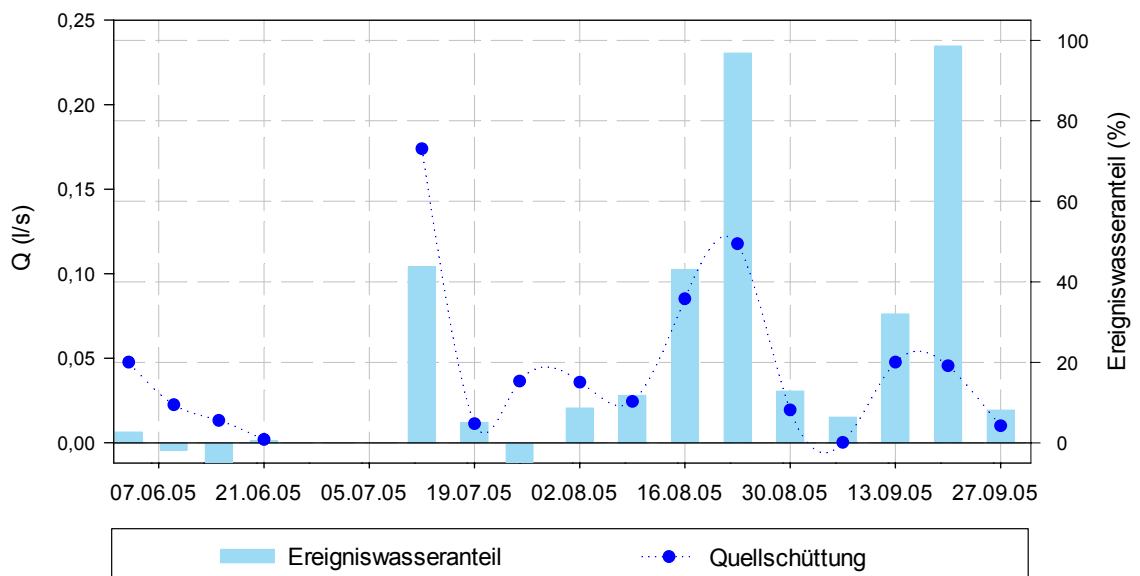
Den markantesten Verlauf im Ereignis- aber auch im Niedrigwasserfall zeigt Quelle U1. Sowohl an der hohen Schüttungsvariabilität als auch am Verlauf der wasserchemischen Komponenten erkennt man deutliche Verdünnungserscheinungen. Interessant hierbei sind besonders die hohen Variationsbreiten des Chlorids und des stabilen Sauerstoffisotops über den Beprobungszeitraum (Abbildung 4-13). Anhand der auftretenden Schwankungen kann man diese Quelle in eine ereignisbeeinflusste und eine ereignisunbeeinflusste Komponente aufteilen.



**Abbildung 4-13: Chlorid-, O-18- und Schüttungsverlauf der Quelle U1 über den Beobachtungszeitraum**

Zur Quantifizierung der Ereignisbeeinflussung der jeweiligen Wasserprobe wurde für die Quelle U1 eine Zwei-Komponentenseparation auf Basis der Schwankungen der Chloridkonzentration durchgeführt. Als Ereigniskomponente wurde die mittlere Chloridkonzentration aus der Niederschlagsmessung am Ringlihof von 0,005 mmol/l angenommen. Die Nicht-Ereigniskomponente ergab sich durch Mittelung der in Abbildung 4-13 rot unterlegten Proben, welche die zwei Niedrigwasserzeiträume jeweils kurz vor Aussetzung der Quellschüttung repräsentieren.

Das Ergebnis zeigt einen deutlichen Direktwasseranteil im Verlauf der Beprobung, der gerade bei guter Vorfeuchte wie Mitte August sehr hohe Anteile erreicht (Abbildung 4-14). Bei der Beurteilung der Ergebnisse müssen allerdings die relativen Abweichungen der Chloridkonzentration im Niedrigwasserfall berücksichtigt werden, wodurch sich auch die teilweise negativen Werte erklären lassen.

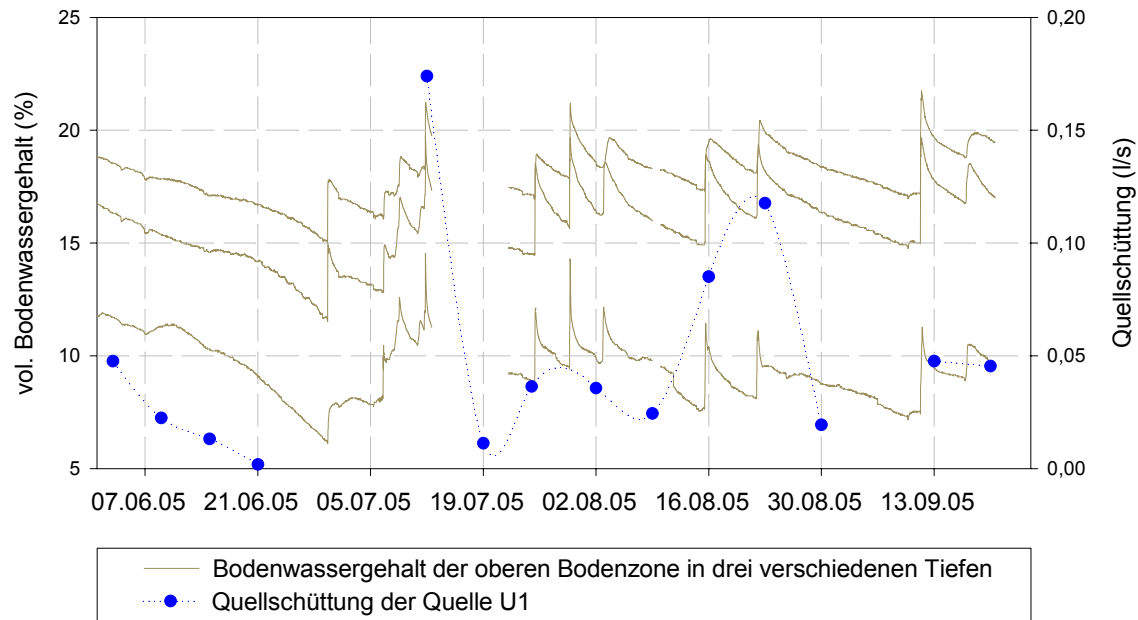


**Abbildung 4-14: Ereigniswasseranteil und Quellschüttung der Quelle U1**

Sowohl die sehr hohen Direktwasseranteile im Ereignisfall als auch das Aussetzen der Quellschüttung im Niedrigwasserfall deuten auf einen oberflächennahen Speicher der Quelle U1 hin. Dies belegt auch die im Vergleich zu den anderen Quellen erhöhte Wassertemperatur mit einem Mittel über den Untersuchungszeitraum von 11,5 °C.

Gerade die ereignisunbeeinflussten Proben weisen im Vergleich zu den anderen Quellen einen deutlich erhöhten Chloridanteil auf (vgl. a. Abbildung 4-12). Da Chlorid im magmatischen Ausgangsgestein nur eine untergeordnete Rolle spielt und der Eintrag in das System nur über den Niederschlag stattfindet, deuten erhöhte Chloridgehalte auf eine Aufkonzentration durch Verdunstung hin, was wiederum auf einen oberflächennahen Speicher schließen lässt (PETERS ET AL., 1998; VON WILPERT, 2005 – persönliche Mitteilung). Zusätzlich ergeben sich, gerade durch das sprunghafte Ansteigen der Quellschüttung im Ereignisfall, deutliche Übereinstimmungen beim

Vergleich der Quellschüttung mit den Messergebnissen der Bodenfeuchtesonden aus den oberen Schichten (Abbildung 4-15). Dies lässt darauf schließen, dass Quelle U1 die Schichten der periglazialen Hauptlage entwässert.



**Abbildung 4-15: Vergleich des volumetrischen Bodenwassergehalts und der Quellschüttung der Quelle U1**

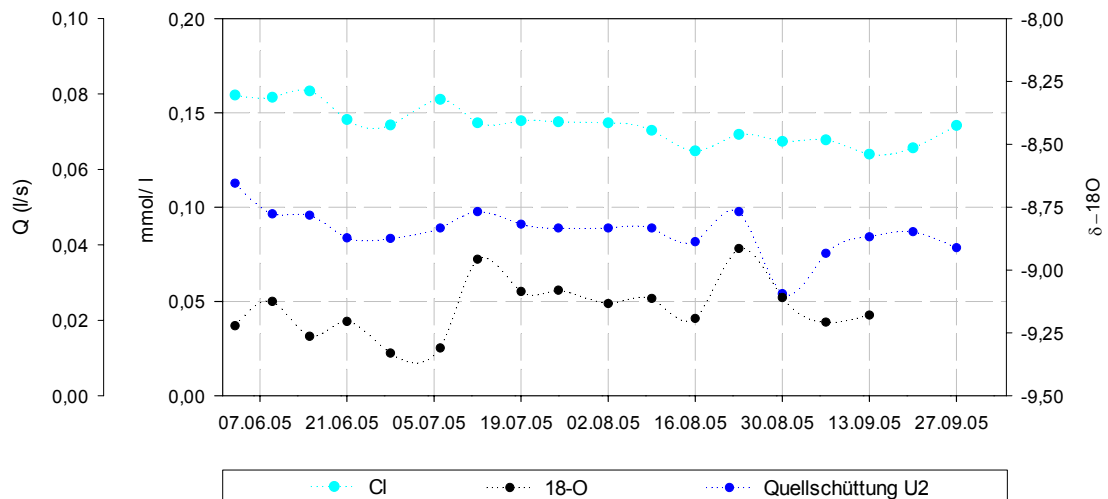
## Quelle U2

Die Quelle U2 schüttet mit einer mittleren Schüttungsmenge von 0,04 l/s am geringsten. Zusätzlich weist sie einen sehr gleichmäßigen Schüttungsverlauf mit sehr geringer Ereignisbeeinflussung auf. Dies spiegelt sich auch in einem relativ ausgeglichenen Verlauf der Hauptionen wider. Einzig bei den Proben am 12.07.2005 und 23.08.2005 lässt sich am Schüttungsverlauf, und etwas deutlicher an der O-18 Komponente, eine leichte Ereignisbeeinflussung feststellen (Abbildung 4-16). Auffällig sind die im Vergleich zu den anderen Quellen (mit Ausnahme von Quelle U1 und U4) signifikant erhöhten Chloridwerte mit einem Mittel von 0,14 mmol/l, anhand derer man einen relativ oberflächennahen Speicher vermuten könnte. Aufgrund der relativ geringen Ereignisbeeinflussung, die nur bei intensiveren Niederschlägen auftritt, sowie den im Vergleich zur Quelle U1 im Nichtereignisfall etwas geringeren Chloridwerten, kann man davon ausgehen, dass die Quelle U2 etwas tiefere Regionen der Bodenzone entwässert. Verdeutlicht man sich die Ereignisbeeinflussung nochmals anhand des in Abschnitt 4.5 dargestellten Bodenfeuchteverlaufs, so kann man die Quelle U2 auch

aufgrund der nur zu Starkregenereignissen auftretenden leichten Reaktionen dem Bereich der untersten, im Saprolith gelegenen Sonde zuordnen.

Gerade die relative Ähnlichkeit in der hydrochemischen Signatur zur Quelle U1 zu Trockenzeiten, die sich auch in einer etwas erhöhten mittleren Temperatur wiederfindet, belegt die Vermutung der oberflächennahen Ausrichtung der Quelle U2. Zusätzlich deutet ihre topographisch-morphologische Lage in einem etwas ins Gelände eingeschnittenen Tal relativ am Oberhang des Gebietes auf einen nicht allzu tiefen Speicher hin.

Allerdings lässt sich aufgrund der relativ konstanten Hydrochemie kein direkter Zusammenhang zum vorher in Abschnitt 4.5.1 angeführten „*Crack-pipe*“-Konzept erkennen. Dies kann aber durchaus auf die wöchentliche Probenahme zurückzuführen sein.



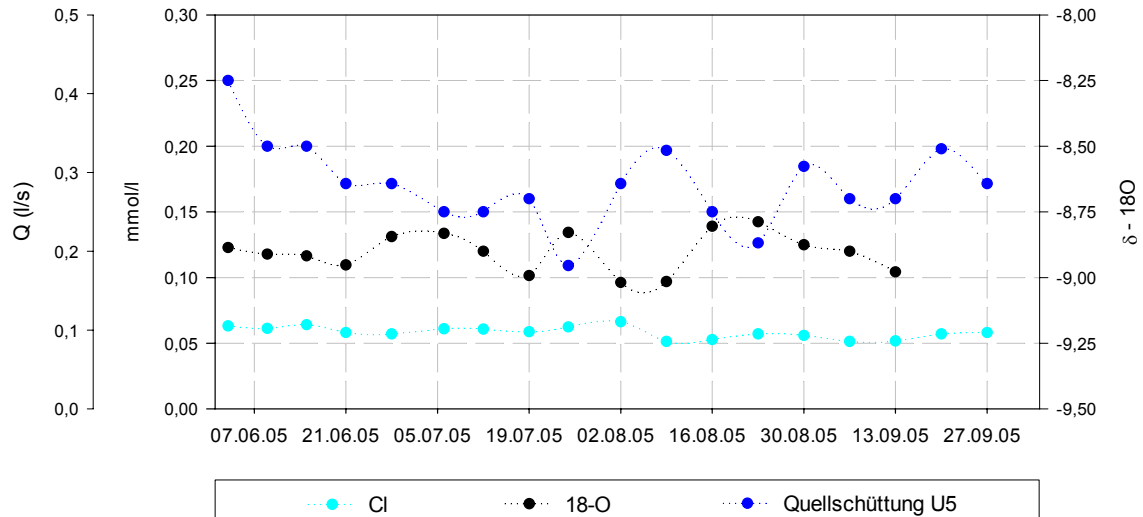
**Abbildung 4-16: Chlorid-, O-18- und Schüttungsverlauf der Quelle U2 über den Beobachtungszeitraum**

### Quelle U5

Dem tiefen Grundwasser lässt sich am ehesten Quelle U5 zuordnen. Hierfür sprechen neben dem atypischen Schüttungsverlauf die konstante, relativ niedrige Wassertemperatur und die vergleichsweise ausgeglichene Hydrochemie über den Messzeitraum. Geringe Schwankungen zeigt zwar die O-18-Konzentration, die allerdings gegenläufig zur Quellschüttung ist und somit nicht mit einer isotopisch verhältnismäßig schwereren Ereigniskomponente in Einklang gebracht werden kann (Abbildung 4-17).

Auffällig sind die geringeren Konzentrationen der Ionen – vor allem Calcium und Chlorid – im Vergleich zu den, der Bodenzonen zugeordneten, Quellen U1 und U2. Während Chlorid im verdunstungsunbeeinflussten, tiefen Bereich keiner zusätzlichen Anreicherung unterliegt und somit dem Gehalt der Bodenzone entsprechen müsste, kann eine Konzentrationserhöhung des Calcium im Grundwasser in Folge von Amphiboliteinlagerungen vermutet werden. Da dies in diesem Gebiet nicht der Fall ist, können zwei Ursachen zur Erklärung herangezogen werden:

- a) Zum einen könnte die Calciumkonzentration der Bodenzone überdurchschnittlich hoch sein. Als Ursache für im Vergleich zum tiefen Grundwasser erhöhte Calciumgehalte im Sickerwasser wären Kalkungsmaßnahmen im Gebiet anzuführen. Da dies im EZG Engebächle die letzten 15 Jahre nicht mehr der Fall war (FORSTAMT STAUFEN, 2005 – persönliche Mitteilung), und weiterhin eine Kalkung meist zu erhöhten Sulfatgehalten führt (ARMBRUSTER ET AL., 2000), welche wiederum nicht gegeben sind, muss eine andere Erklärung gefunden werden. Ferner könnten erhöhte Calciummengen in der Bodenzone auf noch nicht vollständig entcarbonatisierte Lößeinwehungen zurückgeführt werden, wobei entsprechende Tests auf Kalkbeeinflussung im Engebächle negativ ausfielen. Grundsätzlich bewegen sich aber die Calciumgehalte der oben diskutierten Quellen U1 und U2, durchaus im Bereich der Sickerwässern anderer Schwarzwalduntersuchungsgebiete, wie z. B. im Conventwald (VON WILPERT & ZIRLEWAGEN, 2001).
- b) Zum anderen wären unterschiedliche Calciumgehalte auf eine veränderte Verwitterbarkeit des Materials im Festgesteinsaquifer zurückzuführen. Daraus können weitere Schlüsse für die Grundwasserneubildung abgeleitet werden. Geringere Ionenkonzentrationen im Grundwasser lassen darauf schließen, dass die Speicherfüllung nicht über vertikal perkolierendes Sickerwasser geschieht, sondern über schnell entlang Risse und Klüfte infiltrierendes Ereigniswasser zustande kommt. Auch ist die mittlere Verweil- und somit die Kontaktzeit des Wassers mit der Festgesteinsmatrix eher von mäßiger Dauer. Für eine Altersbestimmung mittels stabiler Isotope an dieser Quelle war die vorhandene Datenreihe allerdings nicht ausreichend.



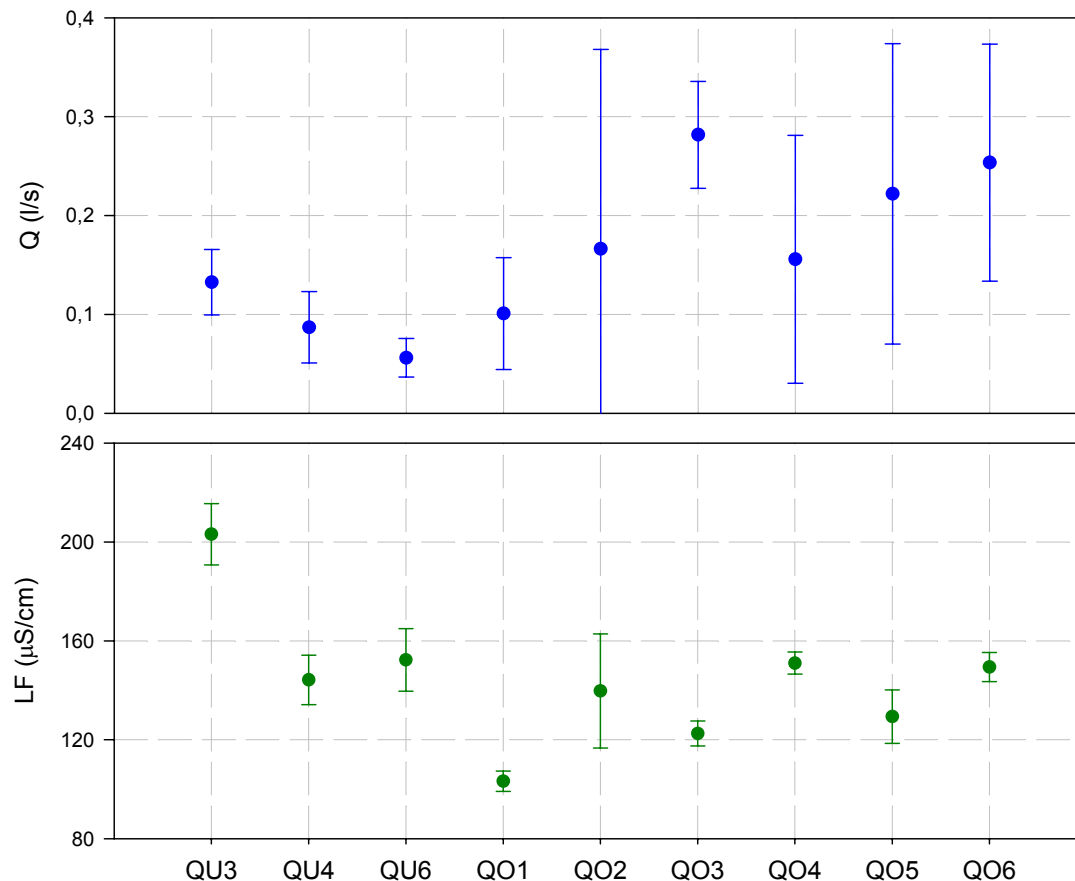
**Abbildung 4-17: Chlorid-, O-18- und Schüttungsverlauf der Quelle U5 über den Beobachtungszeitraum**

### Weitere untersuchte Quellen

Eine genauere Charakterisierung der Speicherräume aller untersuchten Quellen ist aufgrund der aus Zeitgründen nicht über den gesamten Probenahmezeitraum durchgeführten Hauptionenanalyse sowie aufgrund des Fehlens von O-18 Werten nicht möglich. Zudem würde dies gerade auch in Bezug auf die Fragestellung dieser Arbeit sicherlich deren Rahmen sprengen. Ansatzweise soll trotzdem auf das Speicherverhalten der verbliebenen Quellen eingegangen werden.

Hierzu bietet sich nochmals der Vergleich von Schüttungsdaten und elektrischer Leitfähigkeit an. Alle Quellen zeigen im Schüttungsverlauf eine mehr oder minder ausgeprägte Ereignisbeeinflussung. Vergleicht man die Schüttungsvariabilität dieser Quellen nun mit der Schwankungsbreite der elektrischen Leitfähigkeit, kann man Aussagen über die Direktwasserbeeinflussung treffen (Abbildung 4-18).

Die größte Variationsbreite, sowohl in der Quellschüttung als auch in der elektrischen Leitfähigkeit zeigt Quelle O2. Bei dieser Quelle kann daher durchaus von einem bedeutenden Direktwasseranteil ausgegangen werden. Der Speicher dieser Quelle wird demzufolge als relativ oberflächennah eingestuft. Trotz allem deutet die relativ konstante Schüttungsmenge bei anhaltender Trockenheit auf eine weitere, etwas tiefer gelegene Komponente hin, die gerade aufgrund erhöhter Leitfähigkeiten (resultierend aus erhöhten Calciumgehalten) dem Speicherverhalten der Quelle U2 ähnlich ist. Widersprüchlich dazu sind allerdings die relativ geringen Chloridgehalte, wodurch sich wiederum die Komplexität des Systems verdeutlicht.



**Abbildung 4-18: Vergleich von Mittelwert und Standardabweichung der Quellschüttung und der elektrischen Leitfähigkeit an den verbliebenen Quellen**

Äußerst geringe Variationen in der elektrischen Leitfähigkeit bei sehr hohen Schüttungsvariabilitäten zeigen die Quellen O4, O5 und O6. Dies deutet darauf hin, dass die Schüttungszunahme nach Niederschlägen nicht direkt durch Ereigniswasser, sondern durch Mechanismen der Druckübertragung erfolgte. Ein Beispiel hierfür stellt der Prozess des *Pistonflow* dar, welcher zum Ausdrücken von im System gespeichertem Vorereigniswasser durch Infiltration von Niederschlagswasser in den oberen Hangbereichen führt (UHLENBROOK, 1999). Begünstigt wird dieser Prozess durch das Vorhandensein von den Speicherraum überlagernden, etwas undurchlässigeren, hangenden Schichten (WENNINGER, 2002). Man kann daher davon ausgehen, dass der Speicher dieser Quellen etwas tiefer angesiedelt ist.

Am ehesten diesem System zuordnen lassen sich weiterhin die Quellen O1 und O3. Eine Speicherraumcharakterisierung der Quellen U3, U4 und U6 ist dagegen mit vorhandenem Datenmaterial nur unzureichend durchzuführen. Aufgrund der etwas erhöhten Calciumkonzentration und daraus resultierend einer erhöhten Leitfähigkeit zeigt Quelle U3 eine gewisse Ähnlichkeit mit den der oberen Zone zugeordneten Quellen. Allerdings spricht der geringe Chloridgehalt der Quelle U3 gegen diese Zuweisung. Genau entgegengesetzt verhält es sich bei Quelle U4, wodurch es auch bei dieser Quelle nicht möglich ist eindeutigen Aussagen zu treffen.

#### 4.6.4 Fazit

Anhand der Quelldaten können drei Quellen als Endmember für die Abflussbildung ausgewiesen werden. Die Einteilung erfolgt analog der Arbeit von UHLENBROOK ET AL. (2002) in eine, die obere Bodenzone entwässernde, direkte Ereigniskomponente, in diesem Fall von der Quelle U1 im Ereignisfall dargestellt, eine flache Grundwasserkomponente aus den unteren Bereichen der periglazialen Hangserie (Quelle U2), sowie einer durch die Quelle U5 repräsentierte tiefe Grundwasserkomponente, deren Verweilzeit im System aber aufgrund schwacher Mineralisation eher gering eingeschätzt wird. Zusätzlich kann anhand des Verhaltens der Quelle U1 noch eine indirekte Komponente der oberen Bodenzone definiert werden.

Die weiteren Quellen zeigen eine mehr oder minder starke Schüttungsreaktion auf Niederschlagsereignisse. Diese wird teilweise direkt durch Ereigniswasser hervorgerufen, kann bei manchen Quellen aber auch auf Druckübertragungsmechanismen zurückgeführt werden.

Aufgrund des hohen Direktwasseranteils einiger Quellen stellt sich die Frage, inwiefern diese Quellen zur Trinkwassernutzung geeignet sind.

### 4.7 Grundwasserpegel

Mittels kontinuierlicher Messungen des Wasserstandes, der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur in drei Filterrohren im Auenbereich sollte der Einfluss der *Riparian Zone* auf das Abflussgeschehen erfasst werden.

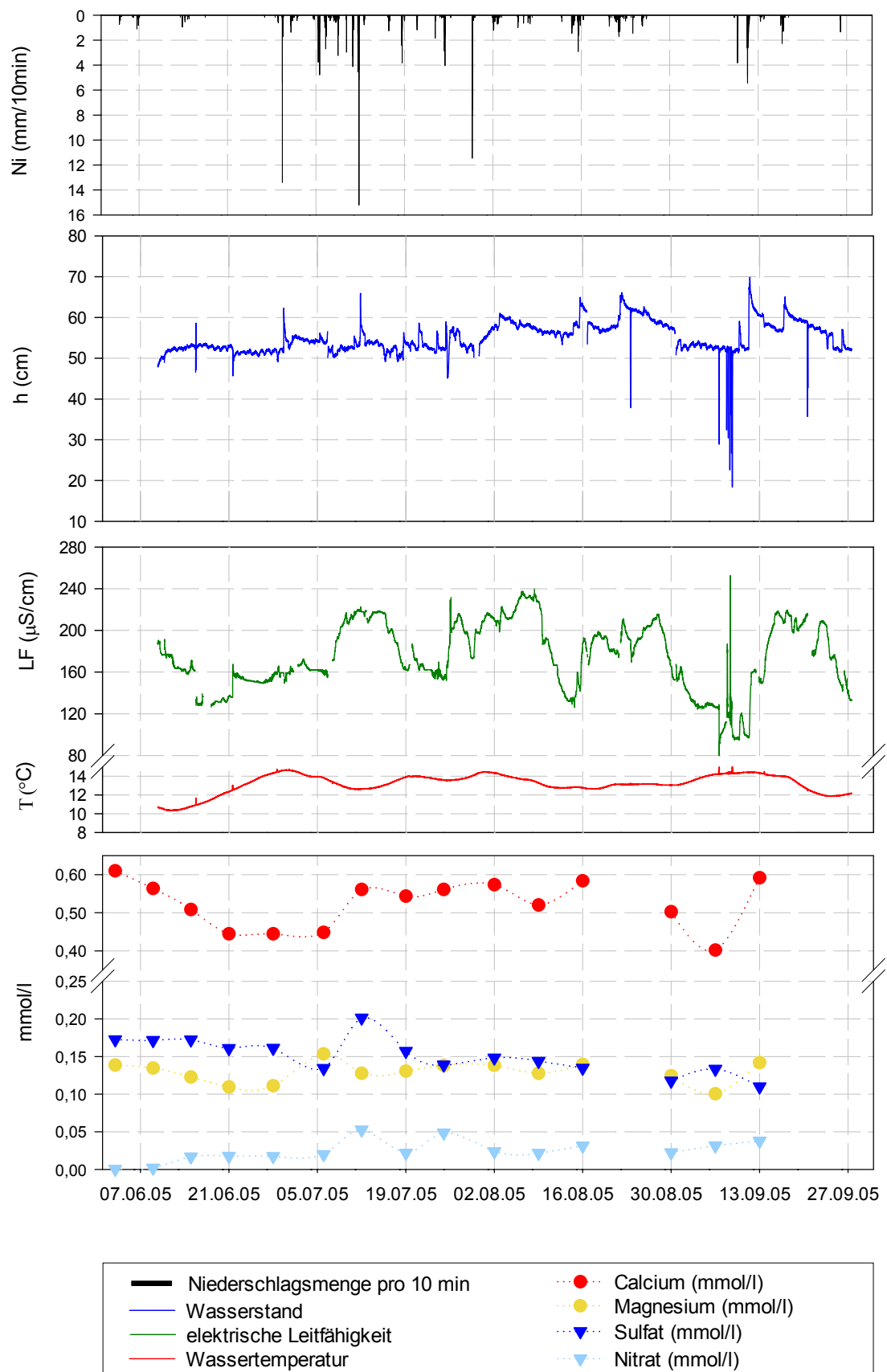
Aufgrund der starken Sedimentation der Grundwassermessstellen während des Einbaus, mussten diese vor dem Einbringen des Divers zuerst mehrmals gespült und anschließend wieder ausgepumpt werden. Die Datenaufzeichnung in den drei Pegeln verzögerte sich daher bis zum 09.06.2005. Aufgrund messtechnischer Probleme im GW-Pegel 2 gibt es nur für den, dem Bach am nächsten gelegenen GW-Pegel 1, über den gesamten Messzeitraum Leitfähigkeitsdaten. Auf eine Darstellung der Messergebnisse des GW-Pegel 3 wird im Folgenden verzichtet. Da er nicht tief genug in den Untergrund eingebracht werden konnte, war er nur bei den größeren Ereignissen unter Wassereinfluss. Die Auswirkungen dieser Niederschlagsereignisse auf die Wasserspiegeldynamik ließen sich aber tendenziell am GW-Pegel 2 besser ablesen. Aufgrund seiner relativ temperaturkonstanten Umgebung in der Grundwassermessstelle sowie seiner geringen räumlichen Distanz, eigneten sich die Druckdaten des GW-Pegel 3 aber hervorragend zur Luftdruckkompensation der anderen Grundwasserpegel.

#### 4.7.1 Messergebnisse und Diskussion

In Abbildung 4-19 und 4-20 sind die Ergebnisse der Messungen in den beiden Grundwasserpegeln dargestellt. Deutlich wird die größere Schwankungsbreite des Wasserstands mit 55 cm im GW-Pegel 2 gegenüber 10 cm im GW-Pegel 1. Dies wird darauf zurückgeführt, dass der näher am Bach gelegene Pegel in direktem hydraulischen Kontakt mit diesem steht und gerade zu Niedrigwasserzeiten aufgrund effluenter Verhältnisse durch Bachwasser gespeist wird. Darauf deutet auch der zunehmend langsamere Rückgang des Wasserstandes nach den Ereignissen im Verlauf der Messperiode hin, da wie oben bereits beschrieben auch die Rezessionsäste im Bach zunehmend flacher werden. Diese Verbindung zwischen Bach und *Riparian Zone* ist in horizontaler Ausstreckung aber beschränkt und reicht nicht bis zum GW-Pegel 2, der als Folge daraus und auch als Folge der Wasserentnahme der Vegetation, ein offensichtliches Absinken der Grundwasserstände zu Trockenzeiten zeigt.

Im Ereignisfall verringert sich der Grundwasserflurabstand im GW-Pegel 2 deutlich, während der direkt in Bachnähe gelegene Messpunkt nur eine verhältnismäßig geringe vertikale Reaktion zeigt, die durchaus im Bereich der Zunahme des Wasserstandes im Bach liegt. Gerade im Zuge steigender Wasserstände im Bach kann es zu einem Aufstauen des vom Hang lateral fließenden Grundwassers kommen und somit zu einer starken Erhöhung des Wasserstandes im GW-Pegel 2 führen. Diese Thematik soll durch eine im Anhang angeführte Skizze nochmals verdeutlicht werden (Abbildung A 7).

Auch im hydrochemischen Verhalten kommt es zu erheblichen Unterschieden zwischen den beiden Beobachtungspunkten. Während sich im GW-Pegel 1, wie durch den Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit angedeutet, die Ionenkonzentrationen nur gedämpft in Folge eines Ereignisses ändert, kann man am Ionenverlauf der Proben aus dem GW-Pegel 2 eine direkte Ereignisbeeinflussung sehen. Verdeutlicht wird dies in den unten dargestellten Abbildungen zum einen durch den Verlauf der Calciumkonzentration, die sich im GW-Pegel 2 abrupt mit einsetzen der Niederschläge verringert. Allerdings dürften die extrem hohen Calciumgehalte im Frühsommer Folge eines gehemmten Wasseraustauschs zwischen Matrix und Filterrohr sein. Interessanter sind die im weiteren Verlauf bei Ereignissen auftretenden erhöhten Nitratgehalte im GW-Pegel 2. Diese liegen in etwa in der Größenordnung des Nitratgehalts der oberflächennahen Quelle U1 und deuten auf laterales Zufließen oberflächennaher Komponenten hin. Leider ist eine kontinuierliche Bewertung der Wasserchemie aufgrund fehlender Leitfähigkeitsdaten im GW-Pegel 2 nicht möglich.



**Abbildung 4-19: Übersicht über den Wasserstand, die elektrische Leitfähigkeit, Wassertemperatur sowie den Verlauf verschiedener Hauptionen am GW-Pegel 1 während der Messperiode**

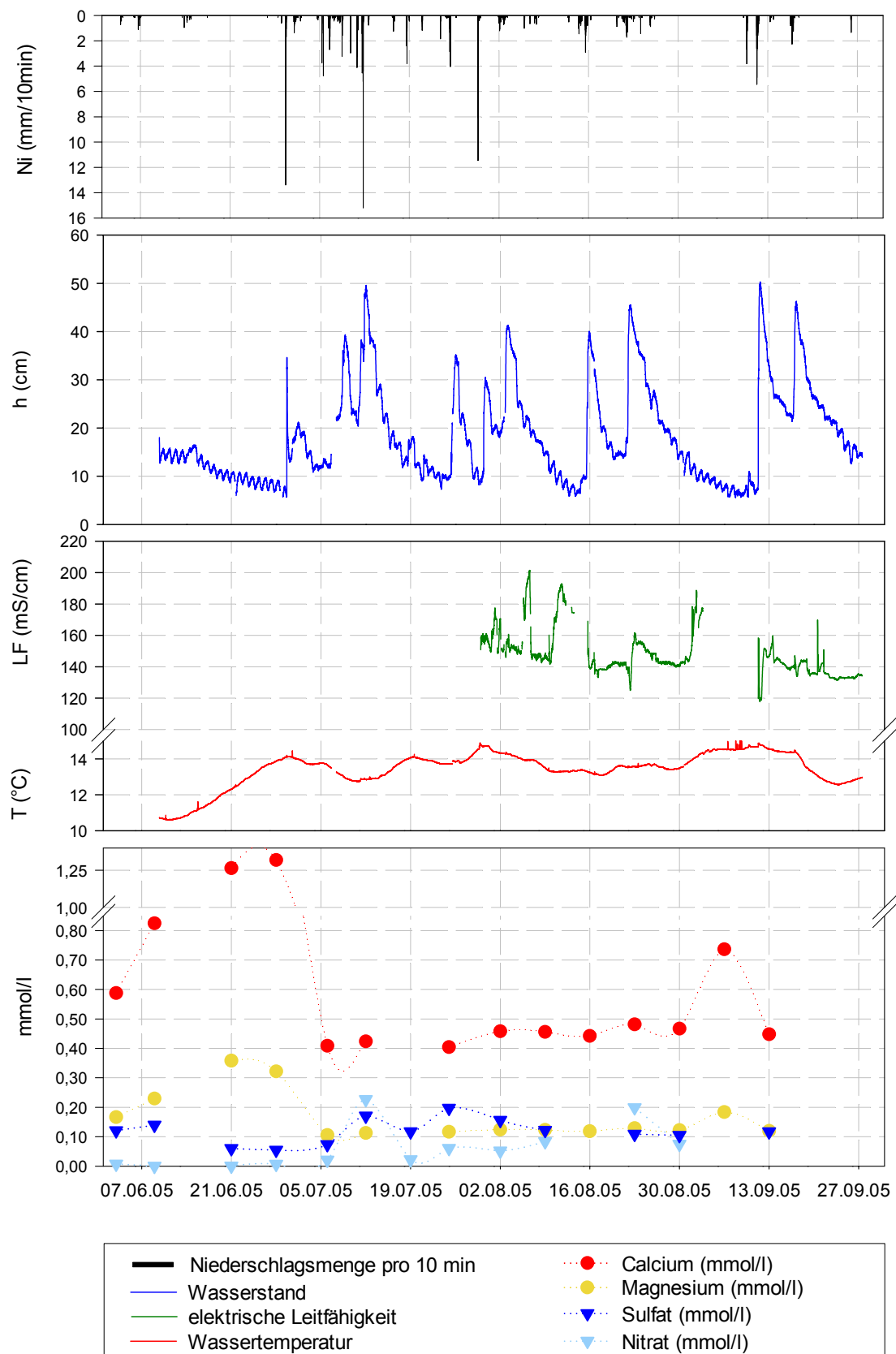
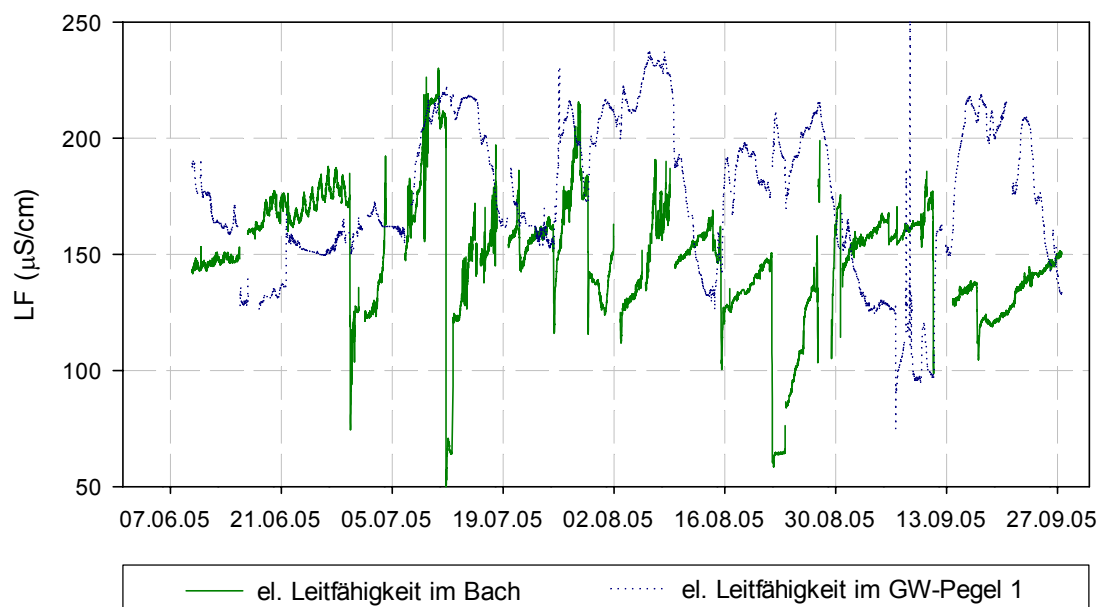


Abbildung 4-20: Übersicht über den Wasserstand, die elektrische Leitfähigkeit, Wassertemperatur sowie den Verlauf verschiedener Haptionen am GW-Pegel 2 während der Messperiode

Vergleicht man den Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit vom GW-Pegel 1 mit dem aus dem Bach, so erkennt man gerade aufgrund der fehlenden direkten Ereignisreaktion deutliche Unterschiede (Abbildung 4-21). Daraus kann man folgern, dass die Beeinflussung des GW-Pegels 1 durch den Bach nicht durch direkt aus dem Bachbett infiltrierendes Wasser, sondern vielmehr durch Druckübertragung innerhalb des aufgesättigten unteren Uferbereichs vonstatten geht.



**Abbildung 4-21: Vergleich des Verlaufs der elektrischen Leitfähigkeit im Bach und im GW-Pegel 1**

Eine Aussage zur Quantifizierung des direkten Einflusses der *Riparian Zone* auf das Abflussgeschehen im Bach ist aus dem vorhandenen Datenmaterial nur ungenügend abzuleiten. Zieht man die Ergebnisse der Studie von (MCGLYNN, 2005) zu Rate, so dürfte er aber aufgrund des geringen Anteils des Auenbereichs an der Gesamtfläche nicht allzu bedeutend sein. Zusätzlich stellt sich die Frage, inwiefern der direkte hydrologische Kontakt zwischen *Riparian Zone* und der Hangzone aufgrund entlanglaufender Waldwege im gesamten Gebiet überhaupt noch gegeben ist.

#### **4.8 Gesamtfazit aus den Messergebnissen**

Zum Abschluss des Messkapitels sollen die Ergebnisse der Messungen nochmals zusammengefasst werden.

Im Engebächle kommt es in Folge der beiden Trockenphasen zu einem deutlichen Rückgang im Abflussvolumen. Dieser Rückgang spiegelt sich auch in allen weiteren untersuchten Systemen wider. Augenscheinlich ändert sich im weiteren Verlauf im Zuge zunehmender Niederschläge die Trockenwetterauslaufcharakteristik im Engebächle. Eine Erklärung hierfür bietet das Wasserdefizit in der oberen Bodenzone in Folge der Trockenheit. Dieses führt dazu, dass es höchstens direkt während eines Ereignisses zu Beitragsmengen aus der Bodenzone kommt. Diese können unter anderem durch die Ausbildung einer oberflächennahen Sättigungszone, hervorgerufen durch hohe Niederschlagsintensitäten, relativ zeitnah dem Vorfluter zufließen. Reichen die Niederschlagsintensitäten allerdings nicht zur Ausbildung einer Sättigungszone aus, kommt es aufgrund hoher Saugspannungen zu keiner weiteren Wasserabgabe aus der Bodenzone, da zuerst der Speicherraum innerhalb der Bodenzone aufgefüllt wird.

Erst durch weitere Niederschläge und somit dem generellen Ausgleich des Wasserdefizits in der Bodenzone, kann es zu einer etwas verzögerten Wasserabgabe aus den aufgesättigten Matrixzwischenräumen kommen. Inwiefern hierfür die Zersatzzone eine Rolle spielt, ist anhand des vorhandenen Datenmaterials nur schwer zu vermuten. Insgesamt zeigen sich aber sowohl bei den unteren beiden Sonden als auch bei der dem Saprolith zugeordneten Quelle U2 nur geringe Reaktionen auf Niederschläge.

Eine allgemeine Zunahme der Ereignisreaktion ist auch bei den Quellen der oberen Quelfassung zu erkennen, welches wiederum auf das Wasserdefizit der Bodenzone zurückzuführen sein kann. Zusätzlich könnte die vermehrte Wasserführung dieser Quellen auch Auswirkungen auf den Verlauf des Abflusses im Engebächle haben.

Ein Einfluss der Auenzone auf das Abflussgeschehen im Engebächle wird als gering angesehen. Dies wird zum einen durch das geringe flächenmäßige Vorkommen sowie durch beidseitig am Bach entlanglaufende Waldwege begründet. Allerdings ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Pegeln erkennbar. Während GW-Pegel 1 vom Bach beeinflusst wird, deutet sich beim GW-Pegel 2 das Vorhandensein einer lateralen Komponente an.

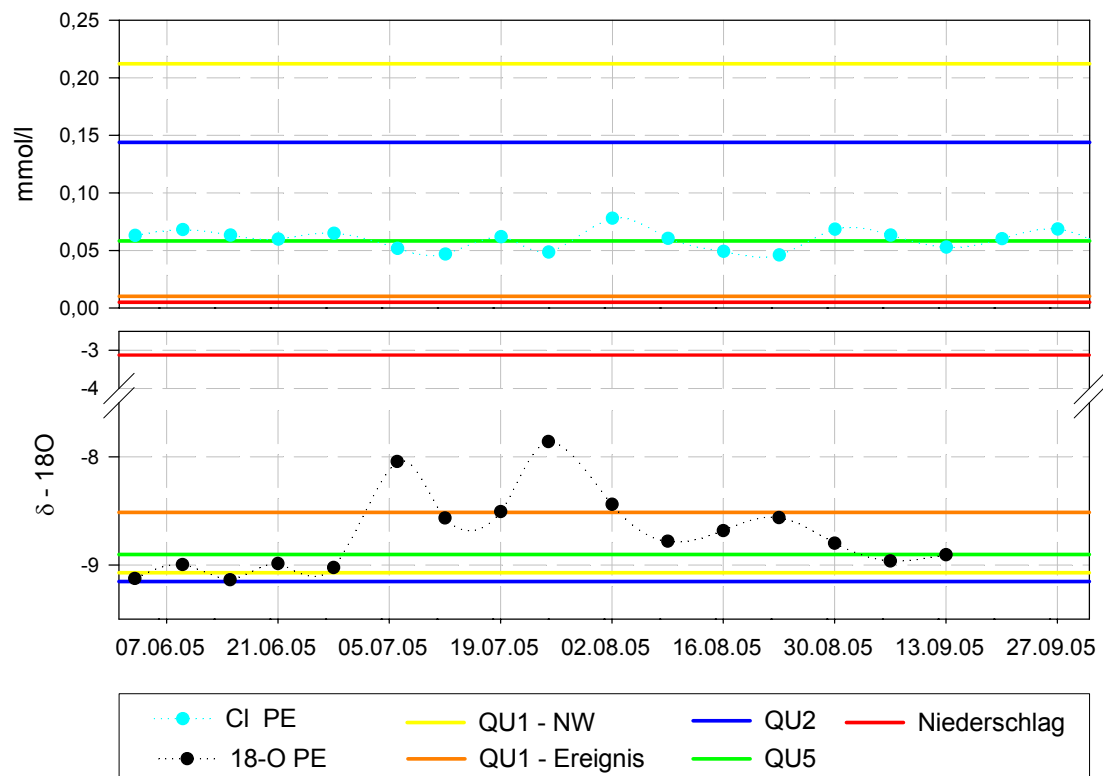
## 5 Abflusskomponentenseparation

Für das Engebächle konnte aufbauend auf den wöchentlich entnommenen Wasserproben zum jeweiligen Probenahmezeitpunkt eine Abflusskomponentenseparation durchgeführt werden. Es bot sich dadurch gezielt die Möglichkeit, die unterschiedliche Konstitution des Baches über einen Zeitraum von vier Monaten zu erfassen und somit Unterschiede der Abflussbildung zu Niedrig-, Mittel- oder Hochwasserzeiten zu erkennen.

Die theoretischen Grundlagen der Abflusskomponentenseparation wurden bereits in Kapitel 3.2 erläutert. Als Tracer wurden sowohl die Chloridkonzentration als auch der O-18-Isotopengehalt der unterschiedlichen Wässer herangezogen. Beide Tracer gelten als weitgehend *konservativ* und eignen sich daher besonders zur Ganglinienseparation.

### 5.1 Definition der Endmember

Neben dem mittleren Chlorid - und Isotopengehalt der Quellen U1 und U2, welche als repräsentativ für die obere (Quelle U1) und untere Bodenzone (Quelle U2) angenommen werden, sowie der von tiefem Grundwasser gespeisten Quelle U5, wurde neben den ereignisbeeinflussten Proben der Quelle U1 zusätzlich eine weitere direkte Ereigniskomponente aus dem Niederschlag definiert. Zur Bestimmung der Niederschlagskomponente wurde zur Vermeidung einer Ereignisüberschätzung die jeweils zwischen der Probenahme gefallene Niederschlagsmenge in die Mittelwertbildung (*incremental mean*) mit einbezogen (WENNINGER, 2002). In Abbildung 5-1 ist der Verlauf der Chlorid- und O-18-Zusammensetzung im Bach, sowie die mittleren Konzentrationen der einzelnen Endmember dargestellt.



**Abbildung 5-1: Mittlere Konzentration der Tracer des jeweiligen Endmembers, sowie der Verlauf von Chlorid und O-18 im Engebächle**

Der Verlauf der Chloridkonzentration im Engebächle ist relativ gleichmäßig auf einem vergleichsweise geringen Niveau. Dagegen sind im Verlauf der O-18-Konzentration durchaus Ereignisreaktionen erkennbar, welche aufgrund des ohnehin sehr geringen Gehaltes im Chlorid nicht so offensichtlich werden.

Augenscheinlich ist vor allem der signifikante Unterschied im Chlorid zwischen den der Bodenzone zugeordneten Quellen U1 und U2 und den restlichen Komponenten. Im Isotopenverlauf verhalten sich die Quellen relativ einheitlich. Der minimal höhere O-18-Gehalt im tiefen Grundwasser kann auf eine veränderte Aufenthaltszeit hindeuten, so dass sich hier die Jahresamplitude verschoben hat. Auffallend sind die sich ergebenden deutlichen Unterschiede im Isotopengehalt der Ereigniskomponente der Quelle U1 und dem Niederschlag. Diese lassen sich erklären, wenn man die Art der Probenahme berücksichtigt. Da die Niederschlagsproben Summenproben über eine ganze Woche sind, treten einzelne Fraktionierungsprozesse, wie z. B. der Mengeneffekt, nicht mehr zu Tage. Weiterhin könnte es trotz Verdunstungsschutz durch Verdunstung zu einer relativen Anreicherung der schwereren Isotope im Sammelgefäß gekommen sein.

Generell erkennt man insbesondere im Chlorid eine Annäherung der Proben des Engebächles an die Quelle U5. Diese Vermutung wird durch Auftragen der Werte in ein Mischungsdiagramm der beiden Konzentrationen verdeutlicht, in dem es zu einer Clusterbildung der Proben des Baches um die Quelle U5 mit einigen Verschiebungen in Richtung Ereigniskomponente kommt (Abbildung 5-2). Die die Bodenzone repräsentierenden Quellen U1 und U2 haben offensichtlich keinen Einfluss auf die Abflussbildung. Allenfalls im Ereignisfall könnte die obere Bodenzone eine Rolle spielen.

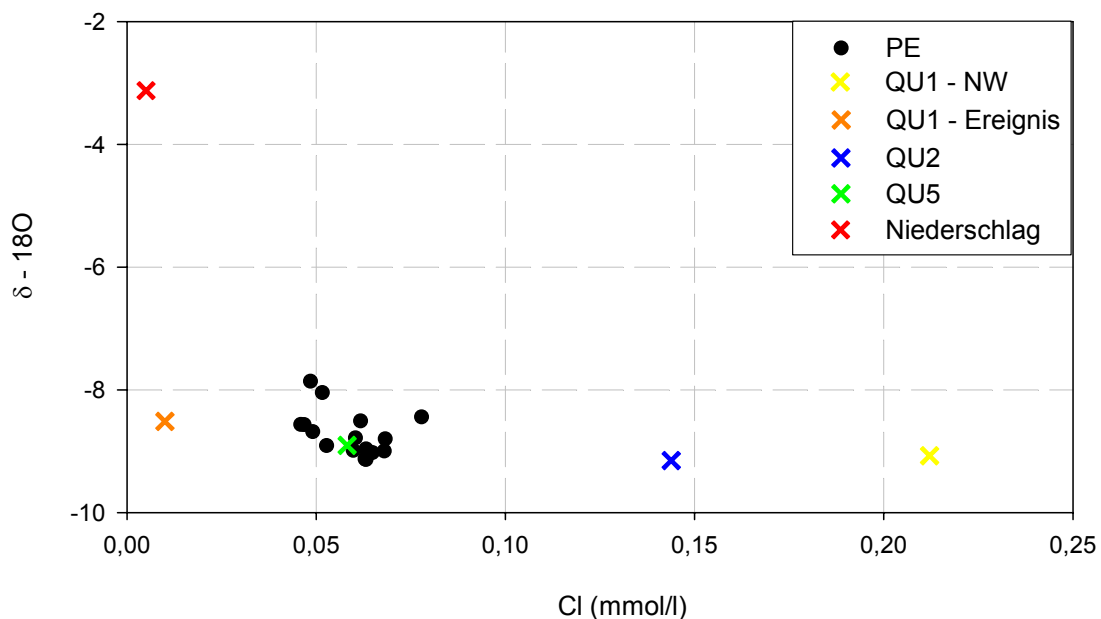
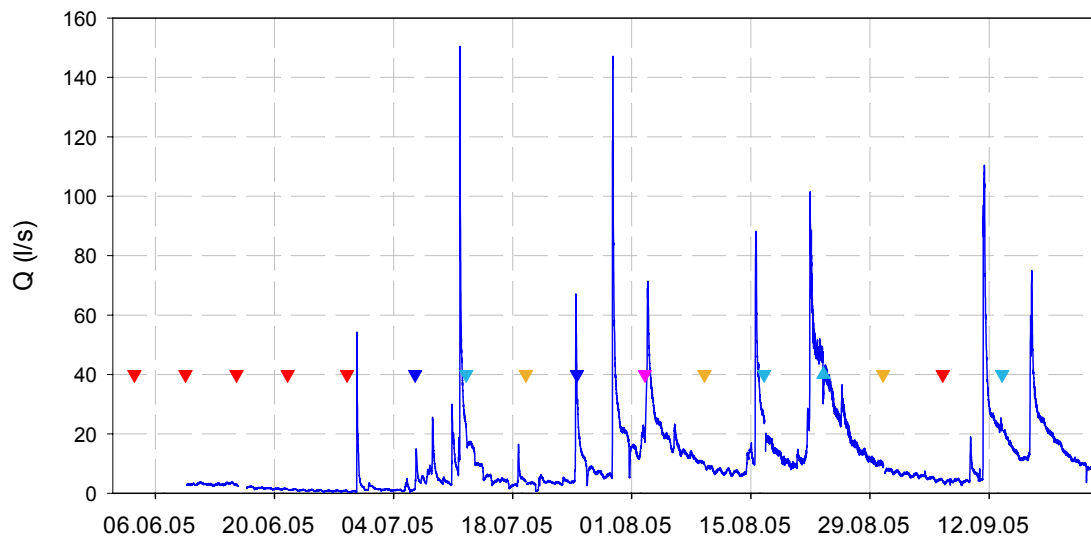


Abbildung 5-2: Darstellung der einzelnen Komponenten zur Abflussbildung in einem Mischungsdiagramm

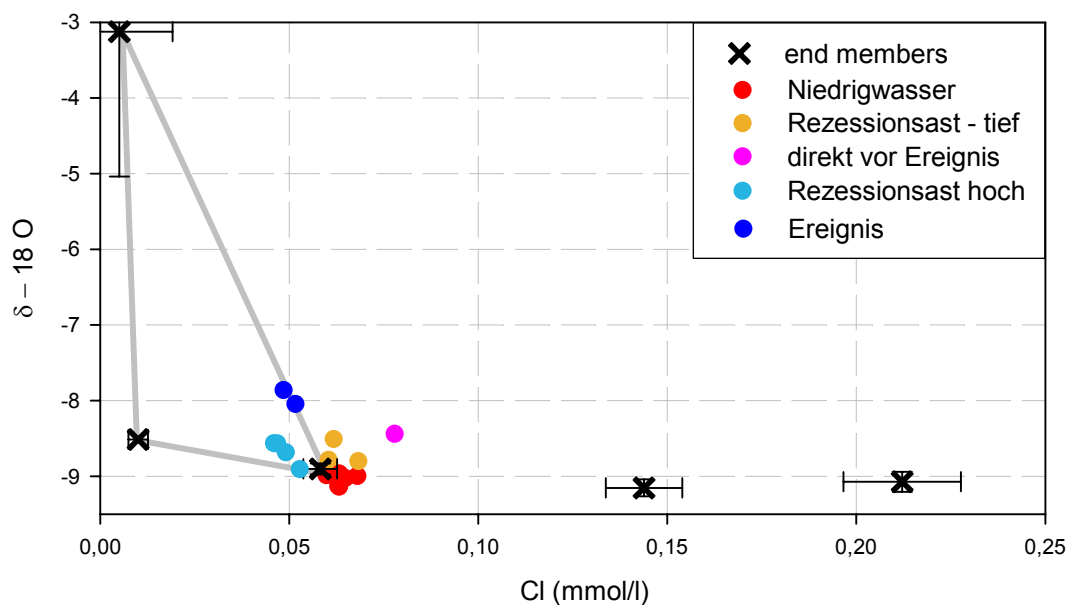
## 5.2 Diskussion

Aufgrund dessen, dass es sich bei den zur Ganglinienseparation herangezogenen Proben nicht nur um Proben von einem Ereignis handelt, sondern die Separation über einen Zeitraum von vier Monaten hinweg durchgeführt wurde, war es sinnvoll die einzelnen Proben weiter zu differenzieren. Hierzu wurde die Abflusssituation zum Probenahmezeitpunkt zu Rate gezogen und die Proben in fünf Gruppen aufgeteilt (Abbildung 5-3). Von den 16 ausgewerteten Wochenproben konnten zwei direkt einem Ereignis zugeordnet werden. Insgesamt sieben Proben wurden während der Rezessionsphase gezogen, vier davon in relativ zeitlicher Nähe zum Abflusspeak, drei im unteren Teil des Rezessionsasts. Zu für die Problematik dieser Arbeit ausschlaggebenden Niedrigwasserzeiten wurden sechs Proben entnommen. Eine letzte Probe wurde während des ansteigenden Astes gezogen und nicht den Ereignisproben zugeordnet.



**Abbildung 5-3: Übersicht über den Probenahmezeitpunkt der für die Abflussganglinienseparation verwendeten Proben**

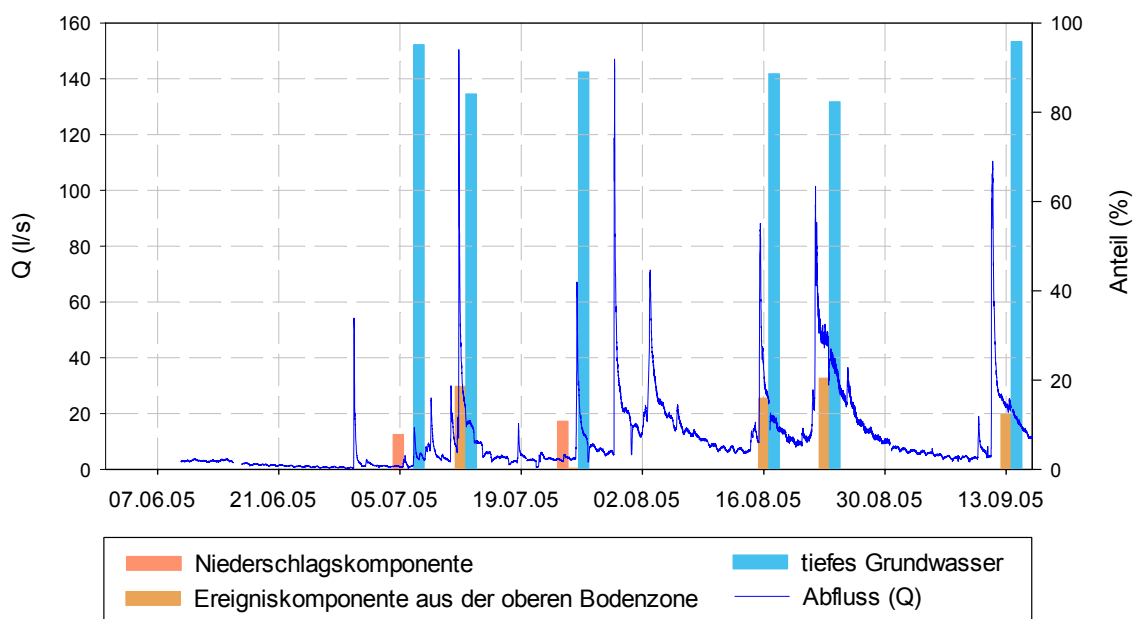
Eine Beurteilung des Mischungsdiagramms auf Grundlage der nun differenzierten Bachproben (Abbildung 5-4) lässt den Schluss zu, dass besonders im Niedrigwasserfall die von tiefem Grundwasser gespeiste Quelle U5 eine übergeordnete Rolle für die Abflusssentstehung im EZG Engbächle hat. Im Ereignisfall kommt es zu einer Verschiebung in Richtung einer kurzfristigen Komponente.



**Abbildung 5-4: Darstellung der einzelnen Komponenten zur Abflussbildung in einem Mischungsdiagramm unter Berücksichtigung der Abflussverhältnisse zum jeweiligen Probenahmezeitpunkt**

Zur Quantifizierung der Ereigniskomponente wurde für die in Abbildung 5-4 in Blautönen eingefärbten Proben eine Dreikomponenten-Mischungsrechnung durchgeführt (Abbildung 5-5). Auch im Ereignisfall ist die Dominanz des tieferen Grundwassers gegeben. Bei den direkten Ereignisproben lässt sich zudem eine Niederschlagskomponente identifizieren, während im Rezessionsbereich die oberen Bodenzonen einen Beitrag zu Abflussbildung leisten. Allerdings dürfen die Ergebnisse nicht überbewertet werden. Zum einen steckt aufgrund der geringen Probenanzahl eine verhältnismäßig hohe Unsicherheit in den Werten, zum anderen handelt es sich um einzelne, zufällig während einem Ereignis entnommene Punktproben. Um genauere Aussagen treffen zu können, müsste eine kontinuierliche Beprobung innerhalb des Ereigniszeitraums stattgefunden haben.

In diesem Zusammenhang soll nochmals auf die Diplomarbeit von HUGENSCHMIDT (2005/2006) verwiesen werden, in deren Rahmen der Versuch einer Komponentenseparation im Ereignisfall anhand kontinuierlicher Trübungs- und Temperaturdaten durchgeführt wird.



**Abbildung 5-5: Ergebnisse der Drei-Komponentenseparation für ereignisbeeinflusste Proben**

Betrachtet man die in Abbildung 5-4 rot eingefärbten Niedrigwasserproben, so erkennt man in der Isotopensignatur eine leichte Verschiebung weg von der Quelle U5 hin zu leichteren Isotopen. Dies legt die Vermutung nahe, dass eine weitere Komponente zu Niedrigwasserzeiten eine Rolle spielt. Aufgrund der im Vergleich zur Isotopensignatur enormen Unterschiede im Chloridgehalt zwischen der Quelle U5 und der Bodenzone, kann davon ausgegangen werden, dass diese Komponenten ebenfalls aus dem tieferen Grundwasser kommen muss. Zieht man hierfür nun erneut die Chloridgehalte der zwölf Quellen zu Rate (Abbildung 5-6), so kämen die einem mittleren Grundwasserleiter zugeordneten Quellen der oberen Quellfassung Sägedobel aufgrund der sehr geringen

Chloridgehalte am ehesten hierfür in Frage. Zusätzlich könnten, aufbauend auf der deutlichen Nähe der Nachereignisproben in der chemischen Signatur zur Chemie des Grundwassers, die oberen Quellen unter anderem eine Ursache für das veränderte Auslaufverhalten des Engebächles im Verlauf der Messperiode sein. Beides bleibt aber reine Spekulation, da die Isotopengehalte dieser Quellen nicht bekannt sind. Die Abweichungen zu Niedrigwasserzeiten könnten daher ebenso messtechnischer Natur sein.

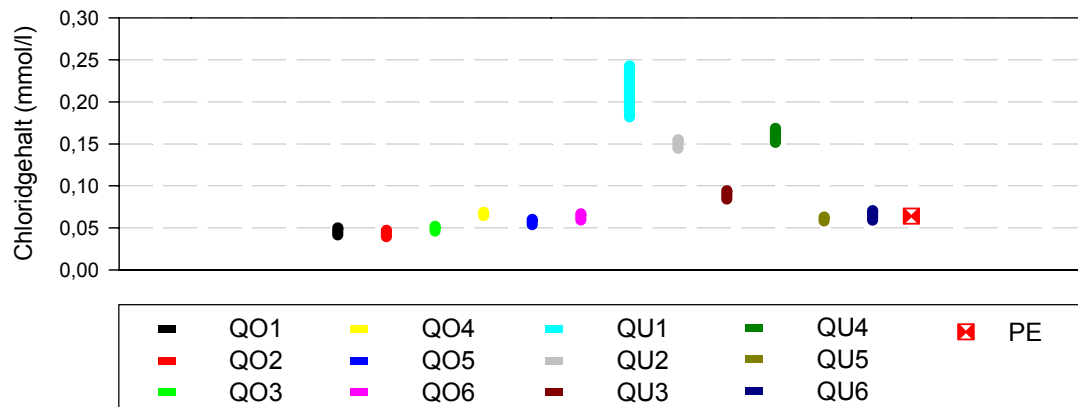


Abbildung 5-6: Vergleich der Chloridgehalte aller untersuchten Quellen mit denen des Engebächles

### 5.3 Fazit

Durch die Anwendung der Abflusskomponentenseparation am Engebächle konnte gezeigt werden, dass das Abflussgeschehen in diesem Gebiet sowohl zu Niedrigwasserzeiten als auch in niederschlagsreicheren Phasen vom tiefen Grundwasser geprägt wird. Ein Einfluss der Bodenzone ist grundsätzlich nur direkt während eines Ereignisses im Bereich der oberen Bodenzone zu vermuten, konnte aber aufgrund der relativ geringen Probendichte nicht eindeutig quantifiziert werden. Interessanterweise konnte eine direkte Beteiligung der zwischen Bodenauflage und anstehendem Gestein gelegenen Zersatzzone, welcher gerade an den steilen Hängen im Südschwarzwald aufgrund hoher Durchlässigkeiten ein deutliches Beitragspotential zur Hochwassergenerierung zugesprochen wird, an der Abflussbildung im Ereignisfall in diesem Gebiet nicht nachgewiesen werden.

Zusätzlich sei aber erwähnt, dass mittels der Endmember gerade zu Niedrigwasserzeiten nicht alle Proben beschrieben werden konnten. Aufgrund der chemischen Signatur dieser Proben konnte aber gezeigt werden, dass diese ebenfalls im Bereich des tieferen Grundwassers anzusiedeln sind.

## 6 Statistische Auswertung von Niedrigwasser und Chemie

### 6.1 Einleitung

Die statistische Aufarbeitung von vorhandenem Datenmaterial ist ein unverzichtbares Mittel in der Hydrologie (DEMUTH, 1993). Bezüglich der Thematik des Einflusses der Landnutzung im Niedrigwasserfall auf die Wasserchemie findet man in der Literatur, wie bereits im Kapitel 1.2 beschrieben, bisher nur die getrennte Untersuchung von Landnutzungsänderung und Niedrigwasser auf Wasserchemie (BROWN ET AL., 2005; MOSLEY & ROWE, 1981), sowie den quantitativen Einfluss von Landnutzungsänderungen (BROWN ET AL., 2005).

In dieser Arbeit wurde nun versucht, anhand einer statistischen Auswertung den gekoppelten Ansatz zu verfolgen und somit eventuelle Änderungen der Wasserchemie bei verschiedenen Landnutzungen im Niedrigwasserfall zu ermitteln.

### 6.2 Vorgehensweise und Datengrundlage

Datengrundlage für die statistische Auswertung waren Schüttungsdaten in täglicher Auflösung, sowie Wasserchemiedaten (Hauptionen, SNK, Silikat, pH-Wert, el. Leitfähigkeit und Wassertemperatur) in wöchentlicher Auflösung der morphologisch ähnlichen, von der Landnutzung im Quellgebiet aber verschiedenen Quellen Zipfeldobel (Waldanteil ca. 30%) und Zängerlehof (Waldanteil 100%). Die kontinuierliche Datenaufzeichnung und Beprobung reicht bei beiden Quellen bis Oktober 1999 zurück. Die nähere Charakterisierung beider Quellsysteme erfolgte bereits im Abschnitt 2.2.

Zur Definition der für die jeweilige Quelle typischen Niedrigwasserabflüsse kam der in der Niedrigwasseranalyse häufig verwendete Schwellenwertansatz zur Anwendung (Abbildung 6-1). Hierbei wurde über die Häufigkeitsverteilung der Tagesmittelwerte der Quellschüttung eine charakteristische Schüttungshöhe für beide Quellen ausgewiesen und alle Wasserchemiedaten für Tage, deren Wassermenge auf oder unterhalb dieses Schüttungsniveaus liegen, in die Niedrigwasseranalyse mit einbezogen. Um eventuelle Tendenzen oder Trends bei der Veränderung der Parameter im Niedrigwasserfall festzustellen, wurden in der vorliegenden Arbeit, neben dem gesamten Datensatz, mit den jeweils reduzierten Niedrigwasserdatensätzen bei den Schüttungsschwellenwerten Q70, Q80 und Q90 Korrelationsrechnungen durchgeführt.

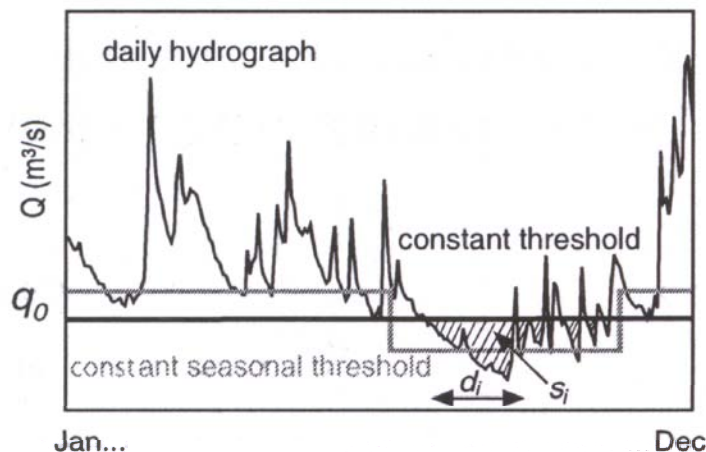


Abbildung 6-1: Schwellenwertansatz zu Niedrigwasseranalyse (aus STAHL, 2001)

Neben der für jede der beiden Quellen durchgeführten Korrelationsrechnung der einzelnen Parameter bei den verschiedenen Niedrigwassersituationen untereinander wurden beide Quellen auch direkt miteinander verglichen. Hierzu wurden die Wasserchemiedaten beider Quellen für jedes Niedrigwasserlevel nach der Quellschüttung sortiert und anschließend auf Korrelationen geprüft.

### 6.3 Ergebnisse und Diskussion

Tabelle 6-1 gibt eine Übersicht über die statistische Auswertung der Tagesmittelwerte der Quellschüttung. Beide Quellen zeigen ein ähnliches Schüttungsverhalten. Die Quelle Zängerlehof schüttet jedoch während allen betrachteten Schüttungsintervallen etwas ausgeglichener, wie man anhand der geringeren Standardabweichung sehen kann. Das etwas höhere Schüttungsminimum bei dieser Quelle deutet auf einen etwas flacheren Rezessionsast hin. LINDENLAUB (1998) führte dies auf die vollständige Bewaldung des Quellhanges zurück.

Mittels der aus der Häufigkeitsverteilung der Quellschüttung gewonnenen Schwellenwerte konnten dann die wöchentlichen Wasserchemiedaten den einzelnen Niedrigwasserniveaus zugewiesen werden. Der gesamte Datensatz verringerte sich dadurch auf etwa 30% der Proben für Q70, 20% für Q80 und nur noch etwa 10% für Q90. Tabelle 6-2 zeigt die Verteilung der Proben über den Messzeitraum. Anhand dieser Daten kann man bereits erste Schlüsse über das quantitative Schüttungsverhalten der Quellen im Niedrigwasserfall ziehen. Vor dem Dürresommer 2003 treten bei der Quelle Zängerlehof (evtl. verfälscht durch eine längere Beprobungspause im Jahr 2000) im Vergleich zur Quelle Zipfeldobel kaum Schüttungsmengen im Niedrigwasserbereich

auf. Im Dürresommer selbst und in den nachfolgenden Jahren 2004 und 2005 zeigt sich aber eine deutliche Zunahme der Niedrigwasserabflüsse selbiger Quelle, was ein Zeichen für einer längere Persistenz der Dürrewirkung im bewaldeten Quellgebiet sein könnte.

**Tabelle 6-1: Übersicht über Schüttungsverhalten der Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof in Abhängigkeit der Trockenheit**

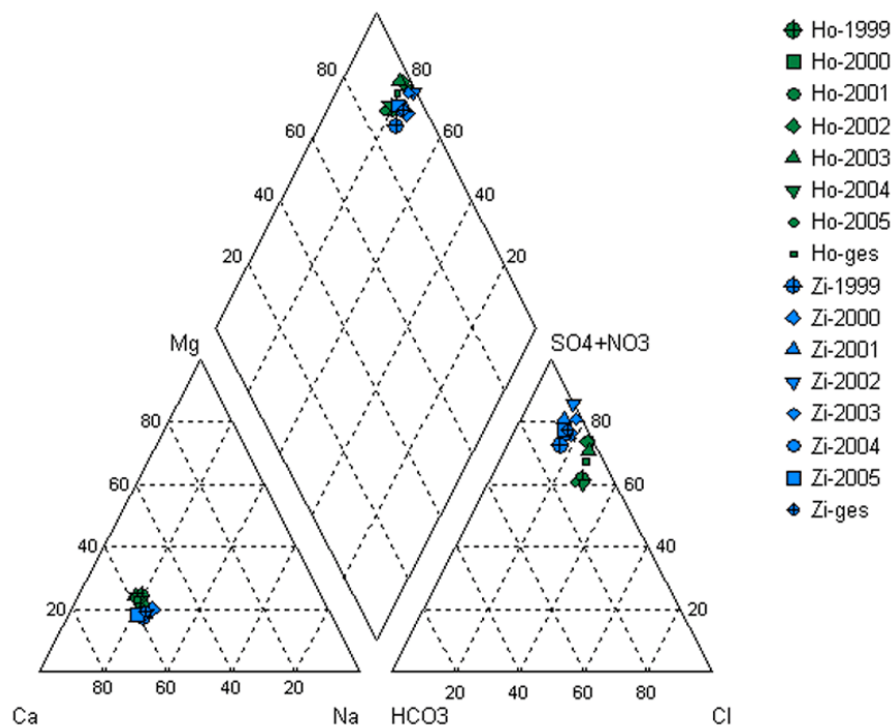
| <b>Zipfeldobel</b> (Schüttungsdaten in l/s) |             |            |           |         |         |                    |
|---------------------------------------------|-------------|------------|-----------|---------|---------|--------------------|
|                                             | Anzahl Tage | Mittelwert | Modalwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
| <b>Gesamt</b>                               | 2164        | 0.52       | 0.36      | 0.21    | 2.33    | 0.21               |
| <b>Q70</b>                                  | 584         | 0.34       | 0.36      | 0.21    | 0.39    | 0.04               |
| <b>Q80</b>                                  | 399         | 0.32       | 0.36      | 0.21    | 0.36    | 0.03               |
| <b>Q90</b>                                  | 195         | 0.29       | 0.32      | 0.21    | 0.32    | 0.03               |

| <b>Zängerlehof</b> (Schüttungsdaten in l/s) |             |            |           |         |         |                    |
|---------------------------------------------|-------------|------------|-----------|---------|---------|--------------------|
|                                             | Anzahl Tage | Mittelwert | Modalwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung |
| <b>Gesamt</b>                               | 1684        | 0.50       | 0.39      | 0.31    | 1.51    | 0.17               |
| <b>Q70</b>                                  | 504         | 0.37       | 0.39      | 0.31    | 0.40    | 0.02               |
| <b>Q80</b>                                  | 329         | 0.36       | 0.38      | 0.31    | 0.38    | 0.02               |
| <b>Q90</b>                                  | 179         | 0.34       | 0.36      | 0.31    | 0.36    | 0.02               |

**Tabelle 6-2: Übersicht über die Verteilung der für die statistische Auswertung herangezogenen Proben der beiden Quellen unter Berücksichtigung verschiedener Schwellenwerte in der Quellschüttung**

|                    | <b>Q70</b> |           | <b>Q80</b> |           | <b>Q90</b> |           | <b>gesamt</b> |           |
|--------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|---------------|-----------|
|                    | <b>Zi</b>  | <b>Ho</b> | <b>Zi</b>  | <b>Ho</b> | <b>Zi</b>  | <b>Ho</b> | <b>Zi</b>     | <b>Ho</b> |
| <b>1999</b>        | 6          | 1         | 2          | 1         | 1          | 1         | 9             | 9         |
| <b>2000</b>        | 11         | 0         | 8          | 0         | 2          | 0         | 45            | 20        |
| <b>2001</b>        | 10         | 3         | 7          | 0         | 4          | 0         | 52            | 52        |
| <b>2002</b>        | 15         | 7         | 11         | 1         | 5          | 0         | 52            | 52        |
| <b>2003</b>        | 29         | 35        | 17         | 24        | 12         | 18        | 52            | 52        |
| <b>2004</b>        | 21         | 24        | 9          | 15        | 3          | 7         | 53            | 53        |
| <b>2005</b>        | 8          | 15        | 7          | 9         | 3          | 4         | 31            | 31        |
| <b>Gesamt</b>      | 100        | 85        | 61         | 50        | 30         | 30        | 294           | 269       |
| <b>Anteil in %</b> | 34         | 32        | 21         | 19        | 10         | 11        | 100           | 100       |

Ein erster Überblick über die chemische Situation der beiden Quellen bietet Abbildung 6-2. Hier sind die Jahresmittelwerte der Hauptionen, sowie das jeweilige Gesamtmittel in einem Piperdiagramm dargestellt. Die Konzentrationen des Hydrogencarbonats ( $\text{HCO}_3^-$ ) wurden nicht gemessen, sondern aus der Ionenbilanz berechnet. Die Grafik gibt allerdings keine Auskunft über innerjährliche Schwankungen, diese lassen sich aber aus der Übersicht im Anhang entnehmen (Tabelle A 7). Nichtsdestotrotz können erste Schlüsse aus der unten dargestellten Ionenverteilung gezogen werden. Deutlich ist die Gruppierung aller Werte im Kationenfall. Geringe Unterschiede zwischen den Quellen lassen sich bei der Anionenverteilung schließen. Signifikante Unterschiede zwischen den Jahren ergeben sich allerdings nicht.



**Abbildung 6-2: Darstellung der Jahresmittelwerte der Hauptionengehalte der Quellen Zängerlehhof (Ho) und Zipfeldobel (Zi) im Piperdiagramm**

Im Folgenden sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Wasserchemiedaten beschrieben. Insgesamt wurden sowohl beim gesamten Datensatz, als auch bei den einzelnen Niedrigwasserstufen jeweils alle Parameter miteinander korreliert. Der besseren Übersicht halber sind nachfolgend in Tabelle 6-3 nur die statistischen Zusammenhänge der einzelnen Parameter zur Quellschüttung Q und zu der als Bilanzierungsparameter eingesetzten Säureneutralisationskapazität (SNK) dargestellt und bewertet. Die vollständigen Korrelationsmatrizen sind im Anhang angefügt (Tabelle A8 und A9). Zur Ausweisung von Tendenzen in der Wasserchemie wurden die Korrelationsergebnisse einer Bewertung unterzogen. Hierbei lag das Augenmerk auf der jeweiligen Veränderung des Korrelationskoeffizienten bei den verschiedenen Schüttungsverhältnissen.

**Tabelle 6-3: Übersicht über die Veränderung des Zusammenhangs der hydrochemischen Parameter bei verschiedenen Dürrestärken**

| <b>Zängerlehof</b> |          |       |       |       |           |            |       |      |       |           |
|--------------------|----------|-------|-------|-------|-----------|------------|-------|------|-------|-----------|
|                    | <b>Q</b> |       |       |       |           | <b>SNK</b> |       |      |       |           |
|                    | gesamt   | Q70   | Q80   | Q90   | Bewertung | gesamt     | Q70   | Q80  | Q90   | Bewertung |
| <b>Q</b>           | 1.00     | 1.00  | 1.00  | 1.00  | =         | -0.56      | -0.13 | 0.04 | -0.15 | ~         |
| <b>LF</b>          | -0.78    | -0.31 | 0.04  | 0.21  | ~         | 0.71       | 0.69  | 0.77 | 0.83  | ~         |
| <b>SNK</b>         | -0.56    | -0.13 | 0.04  | -0.15 | ~         | 1.00       | 1.00  | 1.00 | 1.00  | =         |
| <b>Na</b>          | -0.52    | 0.25  | 0.48  | 0.36  | ~         | 0.81       | 0.76  | 0.78 | 0.72  | ~         |
| <b>K</b>           | -0.37    | -0.04 | -0.13 | -0.22 | ~         | 0.53       | 0.46  | 0.28 | 0.37  | ~         |
| <b>Mg</b>          | -0.74    | -0.21 | 0.34  | 0.33  | ~         | 0.75       | 0.75  | 0.78 | 0.78  | +         |
| <b>Ca</b>          | -0.68    | -0.28 | -0.01 | 0.10  | ->        | 0.86       | 0.85  | 0.85 | 0.93  | +         |
| <b>Cl</b>          | -0.58    | 0.00  | 0.29  | 0.38  | ->        | 0.48       | 0.39  | 0.46 | 0.55  | ~         |
| <b>Nitrat</b>      | -0.24    | 0.28  | 0.68  | 0.59  | ~         | 0.08       | 0.09  | 0.18 | 0.05  | ~         |
| <b>Sulfat</b>      | -0.82    | -0.39 | -0.25 | -0.24 | -         | 0.66       | 0.70  | 0.78 | 0.88  | +         |
| <b>Silikat</b>     | -0.64    | -0.10 | 0.26  | -0.01 | ~         | 0.55       | 0.14  | 0.24 | 0.15  | ~         |
| <b>T</b>           | -0.22    | -0.39 | -0.42 | -0.64 | +         | 0.32       | 0.28  | 0.22 | 0.45  | ~         |
| <b>pH</b>          | 0.08     | 0.26  | 0.14  | 0.22  | ~         | 0.06       | 0.15  | 0.18 | 0.18  | +         |

| <b>Zipfeldobel</b> |          |       |       |       |           |            |       |       |       |           |
|--------------------|----------|-------|-------|-------|-----------|------------|-------|-------|-------|-----------|
|                    | <b>Q</b> |       |       |       |           | <b>SNK</b> |       |       |       |           |
|                    | gesamt   | Q70   | Q80   | Q90   | Bewertung | gesamt     | Q70   | Q80   | Q90   | Bewertung |
| <b>Q</b>           | 1.00     | 1.00  | 1.00  | 1.00  | =         | -0.29      | -0.24 | -0.34 | -0.60 | ~         |
| <b>LF</b>          | -0.71    | -0.50 | -0.62 | -0.64 | ~         | 0.38       | 0.21  | 0.31  | 0.46  | ~         |
| <b>SNK</b>         | -0.29    | -0.24 | -0.34 | -0.60 | ~         | 1.00       | 1.00  | 1.00  | 1.00  | =         |
| <b>Na</b>          | -0.46    | -0.21 | -0.31 | -0.65 | ~         | 0.66       | 0.63  | 0.58  | 0.62  | ~         |
| <b>K</b>           | -0.21    | -0.21 | -0.27 | -0.55 | +         | 0.22       | 0.25  | 0.18  | 0.16  | ~         |
| <b>Mg</b>          | -0.46    | -0.23 | -0.46 | -0.61 | ~         | 0.69       | 0.66  | 0.68  | 0.76  | ~         |
| <b>Ca</b>          | -0.48    | -0.26 | -0.29 | -0.70 | ~         | 0.90       | 0.86  | 0.87  | 0.85  | ~         |
| <b>Cl</b>          | -0.53    | -0.23 | -0.28 | -0.19 | ~         | -0.20      | -0.36 | -0.23 | -0.19 | ~         |
| <b>Nitrat</b>      | -0.19    | 0.17  | 0.01  | -0.09 | ~         | -0.07      | -0.33 | -0.30 | -0.33 | ~         |
| <b>Sulfat</b>      | -0.61    | -0.35 | -0.43 | -0.56 | ~         | -0.02      | -0.09 | -0.01 | 0.24  | ~         |
| <b>Silikat</b>     | -0.31    | 0.05  | -0.21 | -0.44 | ~         | 0.54       | 0.35  | 0.30  | 0.42  | ~         |
| <b>T</b>           | -0.48    | -0.63 | -0.56 | -0.37 | ~         | 0.10       | 0.19  | 0.40  | 0.47  | +         |
| <b>pH</b>          | -0.13    | -0.05 | 0.01  | -0.26 | ~         | 0.35       | 0.22  | 0.17  | 0.24  | ~         |

**Bewertungskriterien:**

- + Korrelationsstärke nimmt mit zunehmender Trockenheit zu
- Korrelationsstärke nimmt mit zunehmender Trockenheit ab
- = Korrelationsstärke ändert sich nicht
- ~ keine einheitliche Veränderung der Korrelationsstärke
- > einheitliche Änderung der Korrelationsstärke sowie Wechsel des Vorzeichens

Generell lässt sich aus den Korrelationsergebnissen kein eindeutig unterschiedliches Verhalten der beiden Quellen bei verschiedenen Austrocknungszuständen nachweisen. Bei den meisten Parametern kommt es bei beiden Quellen zu einem uneinheitlichen Verlauf der Korrelationskoeffizienten. Interessant ist allerdings die zunehmende Korrelationsstärke zwischen den Ionen Ca, Mg und  $\text{SO}_4^{2-}$  und der SNK bei der unter Wald gelegenen Quelle Zängerlehof. Das Ansteigen des Korrelationskoeffizienten könnte in diesem Fall mit einer generellen Zunahme dieser Stoffe gleichgesetzt werden. Andererseits gehen die zweiwertigen Ionen auch doppelt in die Bilanzgleichung ein, was wiederum zu einem Verfälschen des Korrelationsergebnisses beitragen kann.

Eine klare Aussage ist auch aus dem direkten Vergleich der jeweiligen Größen der beiden Quellen (vgl. Tabelle 6-4) nicht zu treffen. Es kommt zwar, mit Ausnahme der Quellschüttung und des Chlorids, zu einer deutlichen Abnahme des Korrelationskoeffizienten, was auf ein Auseinanderdriften der beiden Quellen bezüglich der untersuchten Parameter hindeutet. Allerdings erfolgt diese Abnahme nicht konstant, sondern eher zufällig. Eine Ausnahme hiervon bilden die elektrische Leitfähigkeit und der Nitratgehalt. Hier setzt mit zunehmender Trockenheit eine kontinuierliche Abnahme des Korrelationskoeffizienten ein, der sich bei Schüttungen unterhalb des Q80-Schwellenwertes an den Wert Null annähert. Noch geringere Schüttungen führen schließlich wieder zu einem geringen Zusammenhang, allerdings mit umgekehrtem Vorzeichen.

**Tabelle 6-4: Übersicht über die Veränderung der Korrelationsstärke der hydrochemischen Parameter bei verschiedenen Dürrestärken bei direkter Korrelation der Quellen Zipfeldobel und Zängerlehof**

|                                                                                        | gesamt     | Q70       | Q80       | Q90       | Bewertung |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Anzahl der Punkte (*)</b>                                                           | <b>262</b> | <b>81</b> | <b>46</b> | <b>28</b> |           |
| <b>Q</b>                                                                               | 0.80       | 0.99      | 0.98      | 0.97      | ~         |
| <b>LF</b>                                                                              | 0.66       | 0.23      | 0.00      | -0.28     | ->        |
| <b>SNK</b>                                                                             | 0.47       | -0.01     | -0.04     | 0.24      | ~         |
| <b>Na</b>                                                                              | 0.41       | -0.21     | -0.25     | -0.14     | ~         |
| <b>K</b>                                                                               | 0.38       | -0.10     | -0.01     | 0.19      | ~         |
| <b>Mg</b>                                                                              | 0.54       | 0.01      | -0.12     | -0.14     | ~         |
| <b>Ca</b>                                                                              | 0.58       | 0.12      | 0.02      | 0.06      | ~         |
| <b>Cl</b>                                                                              | 0.58       | -0.05     | -0.03     | -0.60     | ~         |
| <b>Nitrat</b>                                                                          | 0.72       | 0.12      | 0.01      | -0.35     | ->        |
| <b>Sulfat</b>                                                                          | 0.65       | 0.08      | 0.15      | 0.05      | ~         |
| <b>Si</b>                                                                              | 0.33       | 0.11      | 0.29      | 0.23      | ~         |
| <b>T</b>                                                                               | 0.85       | 0.19      | 0.30      | 0.31      | ~         |
| <b>pH</b>                                                                              | 0.31       | 0.01      | -0.09     | 0.13      | ~         |
| (*) Mindestanzahl der Wertepaare, die in die Korrelationsrechnung miteinbezogen wurden |            |           |           |           |           |

## 6.4 *Fazit*

Eine Antwort auf die Fragestellung, ob sich im Niedrigwasserfall signifikante Unterschiede in der Wasserchemie als Folge eines unterschiedlichen Bewaldungsgrads ergeben, konnte in diesem Zusammenhang nicht gefunden werden. Das sich abzeichnende Auseinanderdriften der Quellen im Niedrigwasserfall kann durchaus zufälliger Natur sein.

Die Verwendung der SNK, die als Summenparameter der im Wasser gelösten Ionen ein weiterer Tracer zur Lokalisierung von Änderungen in der Wasserchemie sein sollte (vgl. a. DIDSZUN, 2004), brachte nicht die gewünschten Ergebnisse. Dies könnte zum einen auf eine tendenziell ungerichtete Reaktion der einzelnen Ionen im Niedrigwasserfall zurückgehen. Zum anderen dominieren aber bei der Berechnung der SNK die zweiwertigen Ionen, so dass eventuelle Reaktionen von einwertigen Ionen, wie z.B. Chlorid, am Ende im Bilanzwert nicht in Erscheinung treten.

Ein Problem, welches beim direkten Vergleich der Quellen auftrat, waren die unter Absatz 6.3 bereits erwähnten unterschiedlichen Schüttungsbereiche der beiden Quellen im Niedrigwasserfall. Da für eine Gruppierung der Werte vor Durchführung der Korrelationsrechnung die Datenmenge nicht ausreichend war, bleibt ein gewisser systematischer Fehler in diesen Ergebnissen.

Weiterhin ist die Untersuchung von nur zwei Quellen mit 100% (beziehungsweise 30%) Waldanteil für eine eindeutige statistische Aussage sicherlich nicht ausreichend. Um klarere Aussagen treffen zu können, wäre es daher notwendig, mehrere Gewässer mit differenziertem Waldanteil zu beproben. Daraus könnten dann, analog nach MOSLEY & ROWE (1981), über weitere Korrelations- und Regressionsanalysen unter Einbeziehung verschiedener Niedrigwasserzustände für den jeweiligen Waldanteil entsprechende Parameterkombinationen (Regressionsbeziehungen) ausgewiesen werden.

## 7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich erkennen, dass ein umfangreiches solides Datenmaterial Grundlage jeglicher prozesshydrologischer Forschungsarbeit darstellt. Gerade eine vielseitige Ausrichtung der Messungen mit gleichzeitiger Erfassung sowohl der hydrologischen als auch der hydrochemischen Dynamik in verschiedenen an der Abflussbildung beteiligten Speicherräumen, wie es im Zuge dieser Arbeit zur Anwendung kam, führt zu einem beachtlichen Informationsgewinn über die im Gebiet ablaufenden Prozesse.

Deutlich sichtbar wurde auch die Bedeutung von kontinuierlichen Messungen, insbesondere dann, wenn sich gleichzeitig quantitative und qualitative Ergebnisse, wie es mit den *CTD-Diversonden* der Fa. *Eijkelpomp/Van Essen* möglich war, erzielen lassen.

Speziell bei der Beprobung der Quellen wären kontinuierliche Messungen zur Erfassung der kurzfristigen Dynamik von Vorteil gewesen. Neben der Messung der Schüttung sowie der elektrischen Leitfähigkeit hätte sich hier der Einsatz einer ionensensitiven Sonde besonders zur Erfassung des Chloridverlaufs an den unterschiedlichen Quellen angeboten. Leider war dies aus messtechnischen Gründen nicht durchführbar.

Auch hätte eine Intensivierung des Probenahmerhythmus entsprechende Informationen liefern können. Allerdings wäre aufgrund der beschränkten Zeit, welche für diese Studie zur Verfügung stand, eine häufigere Probenahme und daraus resultierend eine größere Anzahl zu analysierender Proben nicht zu bewältigen gewesen.

Um Messfehler so gering wie möglich zu halten sowie falsche Bewertungen zu vermeiden, ist es ferner von Bedeutung, eventuelle anthropogene Eingriffe in das Abflussgeschehen quantifizieren zu können. Dies ist im Einzugsgebiet Engebächle nicht immer der Fall gewesen. Gerade die Auswirkungen des Fischteiches konnten im Zuge der Arbeit nicht vollständig erfasst werden und bilden somit durchaus eine gewisse Unsicherheit für einen Teil der Ergebnisse dieser Arbeit.

Weiterhin ist der Zeitraum von vier bis fünf Monate sicherlich auch zu gering, um ein komplexes System zu erfassen. Aus diesem Grund sollen im Folgenden Anreize für zukünftige Forschungsarbeiten gegeben werden.

Insbesondere die durch die Arbeit von ADOLPH (2005) aufgeworfene Frage, inwiefern sich natürliche Tracer als Indikatoren für den Dürrezustand eines Systems eignen, kann mit diesen Ergebnissen nicht eindeutig geklärt werden. Zwar konnte auch hier teilweise ein Zusammenhang zwischen Abflussmenge und Chemie gefunden werden, konkrete Schlüsse ließen sich aber daraus nicht ableiten. Anzeichen für eine Dürrepersistenz des Systems lieferten dagegen die Daten der Bodenfeuchtemessung mit einer sehr langsamen Auffeuchtung der unteren Bodenzone. Eine indirekte Verknüpfung mit der Wasserchemie ergibt sich zwar durch die Ergebnisse der Quellenbeprobung, in denen

sich die gedämpfte Reaktion der unteren Bodenzone widerspiegelt. Das zusätzliche Einbringen von Saugkerzen in die entsprechende Tiefe mit daran gekoppelter regelmäßiger Probenahme könnte aber zur direkten Verlinkung von Dynamik und Wasserchemie führen und somit eventuelle Dürrepersistenzen aufdecken.

Ein weiterer interessanter Aspekt, der durchaus auch zukünftiger Forschungsarbeit bedarf, ergibt sich aus der Abflusskomponentenseparation, die eine eindeutige Dominanz des tiefen Grundwassers über den gesamten Beobachtungszeitraum zeigt. Während das Ergebnis bei Trockenwetterabfluss durchaus zu erwarten war, ist das Verhalten des Systems im Ereignisfall nicht konform zu früher durchgeführten Studien (unter anderem UHLENBROOK ET AL., 2002).

Aufgrund dessen, dass die Aussagen auf nur einer Probe pro Ereignis beruhen, muss dieses Ergebnis allerdings etwas relativiert werden. Zusätzlich könnte gerade auch durch eine Verdünnung des hohen Chloridgehalts in der Bodenzone in Folge infiltrierenden Niederschlags, eine Grundwasserdominanz vorgetäuscht werden. Besonders in diesem Zusammenhang sind die Ergebnisse der von HUGENSCHMIDT (2005/06) durchzuführenden Abflusskomponentenseparation auf Basis kontinuierlicher Trübungs- und Temperaturdaten von Interesse.

Die Ereignisreaktion in der schnellen Interflow generierenden Zersatzzone ist allerdings, wie oben bereits erwähnt, deutlich gedämpft. Obwohl die Quelle U2 aufgrund ihrer chemischen Signatur diesem Bereich zugeordnet werden konnte, wären insbesondere hier weitere Messungen von Nöten, um gezielt die Mechanismen der Grundwasserneubildung erfassen und somit den Speicherraum dieser Quelle näher quantifizieren zu können. Hilfreich in diesem Zusammenhang wäre sicherlich eine längerfristige Beprobung der Quellsysteme. Gerade mit Hilfe der Isotopenanalytik wäre es somit möglich, die Verweilzeiten der Quellen zu bestimmen, woraus sich weitere Schlüsse im Bezug auf die Speicherausrichtung ziehen ließen. Zusätzlich bietet sich das Hinzunehmen weiterer Tracer an. Neben einem künstlichen Markerversuch zur Abgrenzung der Speicherräume, welcher aber aufgrund der Trinkwassernutzung dieser Quelle nur eingeschränkt durchführbar ist, böte sich als erster Schritt die Analyse der Wasserproben auf Silikat an. Dies war im Zuge dieser Arbeit aus Zeitgründen leider nicht mehr möglich, könnte aber neue Erkenntnisse über die Speicherraumansiedlung bringen. Ferner wäre es auch für diese Fragestellung von Vorteil, mit dem Einbau der Bodenfeuchtesonden zusätzlich die Möglichkeit zu schaffen, in regelmäßigen Abständen das Sickerwasser in entsprechender Tiefe zu beproben. Weiterhin wären besonders aufgrund seiner geographischen Lage in unmittelbarer Nähe zur Schwarzwaldrandverwerfung detaillierte Informationen zur Untergrundbeschaffenheit im Einzugsgebiet Engebächle von Nöten. Hierzu würde sich der Einsatz von geophysikalischen Methoden eignen, mittels derer sich eventuelle tektonische Störungen und somit präferentielle Fließwege im Festgesteinskörper lokalisieren ließen. Auch für jegliche statistische Auswertung ist ein umfangreiches, zeitlich homogenes Datenmaterial unabdingbar. Aufbauend auf siebenjährigen Datenreihen zweier Quellen

wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Auch hier wurde offensichtlich, dass gerade durch die Gruppierung von Werten ein kürzeres Probenahmeintervall, beziehungsweise kontinuierliche Messdaten, von Vorteil gewesen werden.

Generell zeigen sich Unterschiede im hydrochemischen Verhalten der beiden Quellen im Niedrigwasserfall. Allerdings ist die Frage nach der Ursache aus vorhandenem Datenmaterial nicht zu klären, so dass auch zufällige Tendenzen auftreten können. Zusätzlich bleibt zu klären, inwiefern gerade unbewaldete, aber landwirtschaftlich genutzte Flächen geeignete Korrelationsparameter sind. Besonders zu Niedrigwasserzeiten, welche meist im Sommer auftreten, ist der Einfluss landwirtschaftlicher Maßnahmen auf die Gewässer, wie auch die Arbeit von MOSLEY & ROWE (1981) zeigt, durchaus gegeben. Zur Ausweisung und Quantifizierung eines natürlich bedingten, differenten Verhaltens der Wasserchemie in Abhängigkeit der Waldbedeckung müsste, wie oben bereits in anderem Zusammenhang erwähnt, der Grad anthropogener Einflussnahme auf die Abflusskonstitution bekannt sein. Dies dürfte sich aber als außerordentlich schwieriges Unterfangen erweisen.

Im Gesamtkontext betrachtet liefert diese Arbeit durchaus interessante neue Einblicke in die Abflussbildung in einem bewaldeten Einzugsgebiet. Speziell die Kombination unterschiedlicher Messmethoden und die Einbeziehung der Hydrochemie erwiesen sich als geeignetes Tool zur hydrologischen Prozessforschung. Es zeigte sich jedoch auch, dass noch viele offene Fragen bestehen bleiben beziehungsweise gerade aus dieser Studie neu entstanden sind. Diesen Fragen sollte in weiteren Arbeiten nachgegangen werden.

## 8 Literaturverzeichnis

- ADOLPH, G., (2005): Abflussdynamik und natürliche Tracer zur Beschreibung der Gebietsreaktion. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br.
- ANDRÉASSIAN, V., (2004): Waters and forests: from historical controversy to a scientific debate - A REVIEW. *Journal of Hydrology*, 291: 1 - 27.
- ARMBRUSTER, M., ABIY, M. UND FEGER, K.-H., (2003): The biogeochemistry of two forested catchments in the Black Forest and the eastern Ore Mountains (Germany). *Biogeochemistry*, 65: 341 - 368.
- ARMBRUSTER, M., KÖHLER, H. UND FEGER, K.-H., (2000): Chemische Zusammensetzung zweier quellnaher Waldbäche im Hochschwarzwald - Abflusshängige Variabilität und Einfluss der Bodenkalkung. *Forstw. Cbl.*, 119: 249 - 262.
- BAZEMORE, D.E., ESHLEMAN, K.N. UND HOLLENBECK, K.J., (1994): The role of soil water in stormflow generation in a forested headwater catchment: synthesis of natural tracer and hydrometric evidence. *Journal of Hydrology*, 162: 47 - 75.
- BECKER, A., (1992): Methodische Aspekte der Regionalisierung. In: DFG (1992): Regionalisierung hydrologischer Parameter, VCH-Verlag, Weinheim.
- BONELL, M., (1993): Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal of Hydrology*, 150: 217 - 275.
- BROWN, A.E., ZHANG, L., MCMAHON, T.A., WESTERN, A.W. UND VERTESSY, R.A., (2005): A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310: 28 -61.
- BURNS, D.A., MCDONNELL, J., HOOPER, R.P., PETERS, N.E., FREER, J.E., KENDALL, C. UND BEVEN, K., (2001): Quantifying contributions to storm runoff through end-member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA). *Hydrological Processes*, 15: 1903 - 1924.
- CAMPBELL, C.S., (a): Response of ECH2O Soil Moisture Probes to Variation in Water Content, Soil Type and Solution Electrical Conductivity. Decagon - Application Note, <http://www.ech2o.com/SupportDocumentation.htm>, Stand: Oktober 2005.
- CAMPBELL, C.S., (b): Response of ECH2O Soil Moisture Probes to Temperature Variation. Decagon - Application Note, <http://www.ech2o.com/SupportDocumentation.htm>, Stand: Oktober 2005.
- CASPER, M., (2002): Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald). In: Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH). Heft 210.
- DAANSGARD, W., (1964): Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16: 436 - 468.

- DEMUTH, S., (1993): Untersuchungen zum Niedrigwasser in West-Europa. In: Freiburger Schriften zur Hydrologie. Band 1, 204 S.
- DIDSZUN, J., (2000): Abflussbildung an Hängen. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br.
- DIDSZUN, J., (2004): Experimentelle Untersuchungen zur Skalenabhängigkeit der Abflussbildung. In: Freiburger Schriften zur Hydrologie. Band 19, 221 S.
- DYCK, S. UND PESCHKE, G., (1995): Grundlagen der Hydrologie, 3. stark bearbeitete Auflage. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- ELSENBEER, H., LORIERI, D. UND BONELL, M., (1995): Mixing model approaches to estimate storm flow sources in an overland flow-dominated tropical rain forest catchment. Water Resources Research, 29, No.10: 345 - 354.
- ERNST, M. UND WIDEMANN, N., (1986): Geologie der Umgebung von Merzhausen bei Freiburg im Breisgau. Zum 1200 jährigen Jubiläum der Hexentalgemeinden Merzhausen und Wittnau. Gemeindeverwaltung Merzhausen, 51 S.
- FEGER, K.-H., KÖHLER, H. UND ARMBRUSTER, M., (1999): Beeinflussung der Wasserqualität in einem bewaldeten Einzugsgebiet durch biochemische Stoffumsetzung in Bachnahen Böden. Forstw. Cbl., 118: 345 - 354.
- FERGUSON, R.I., TRUDGILL, S.T. UND BALL, J., (1994): Mixing and uptake of solutes in catchments: model development. Journal of Hydrology, 159: 223 - 233.
- FVA - FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN WÜRTTEMBERG, (2004): Impacts of the Drought and Heat in 2003 on Forests. Abstracts of the scientific conference held at Freiburg, Germany, November 2004. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 57.
- GISI, U., (1997): Bodenökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 305 S.
- GLA - GEOLOGISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (1996): Geologische Karte von Baden-Württemberg - Freiburg i. Br. und Umgebung. Maßstab 1:50000.
- GUWANG, B., (2004): Hydrologische Prozesse im Stadtgebiet von Freiburg und deren adäquate Modellierung. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br.
- HÄDRICH, F. UND STAHR, K., (1997): Die Böden in der Umgebung von Freiburg. In: Schwarzwald und Oberrheintiefland - Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg im Breisgau. Freiburger Geographische Hefte, 137 - 212.
- HÖLTING, B. UND COLDEWEY, W.G., (2004): Hydrogeologie - Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie. Elsevier GmbH, München.

- HÖLTING, B., KANZ, W. UND SCHULZ, H.D., (1982): Geohydrochemie im Bundsandstein der Bundesrepublik Deutschland - Statistische Auswertung von Grundwasseranalysen. In: Auswertung hydrochemischer Daten. DVWK Schriften, 54. Verlag Paul Parey, 87 - 193.
- HOOPER, R.P., AULENBACH, B.T., BURNS, D.A., McDONNELL, J., KENDALL, C. UND BEVEN, K., (1998): Riparian control of stream-water chemistry: implications for hydrochemical basin models. Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters (Proceedings of the HeadWater'98 Conference held at Merano, Italy, April 1998), IAHS Publ. no. 248.
- HÖTZL, H., (1982): Statistische Methoden zur Auswertung hydrochemischer Daten. In: Auswertung hydrochemischer Daten. DVWK Schriften, 54. Verlag Paul Parey, 5 - 73.
- HUGENSCHMIDT, C., (2005 /2006): Kontinuierliche Tracer zur hydrologischen Prozessforschung in bewaldeten Einzugsgebieten. Noch nicht abgeschlossene Diplomarbeit am Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br.
- HUNTINGTON, T.G., HOOPER, R.P. UND AULENBACH, B.T., (1994): Hydrologic processes controlling sulfate mobility in a small forested watershed. Water Resources Research, Volume 30, No. 2: 283 - 295.
- JARVIE, H.P., NEAL, C., SMART, R., OWEN, R., FRASER, D., FORBES, I. UND WADE, A., (2001): Use of continuous water quality records for hydrograph separation and to assess short-term variability and extremes in acidity and dissolved carbon dioxide for the River Dee, Scotland. The Science of the Total Environment, 265: 85 - 98.
- KIENZLER, P., (2001): Experimentelle Untersuchungen zur chemischen Zusammensetzung oberflächennaher unterirdischer Abflusskomponenten im Bruggaeinzugsgebiet. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br.
- KLEEBOEG, H.B. UND MAYER, U., 1999. Hydrologische Extreme - Gefährdungspotentiale in Fließgewässern durch Trockenperioden. Heft 70, Universität der Bundeswehr, München.
- KÖNIGER, P., (2003): Tracerhydrologische Ansätze zur Bestimmung der Grundwasserneubildung. In: Freiburger Schriften zur Hydrologie. Band 16, 89 S.
- LANGE, J. UND KÜLLS, C., (2005): Persistenz und Indikatoren hydrologischer Dürren in bewaldeten Einzugsgebieten - erste Resultate und Forschungsbedarf. Im Druck, 7 S.
- LAUDONA, H. UND SLAYMAKER, O., (1997): Hydrograph separation using stable isotopes, silicate and electrical conductivity: an alpine example. Journal of Hydrology, 201: 82 - 101.

- LEIBUNDGUT, C., (1984): Zur Erfassung hydrologischer Messwerte und deren Übertragung auf Einzugsgebiete verschiedener Dimensionen. *Geomethodica*, 9: 141 - 170.
- LINDENLAUB, M., (1998): Abflusskomponenten und Herkunftsräume im Einzugsgebiet der Brugga. Dissertation, Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br.
- LORENZ, K., FEGER, K.-H. UND KANDELER, E., (2001): The response of soil microbial biomass and activity of Norway spruce forest to liming and drought. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 164: 9-19.
- MCDONNELL, J.J., (1990): A Rationale for Old Water Discharge Through Macropores in a Steep, Humid Catchment. *Water Resources Research*, 26, No.11: 2821 - 2832.
- MCGLYNN, B.L. (Editor), (2005). The role of riparian zones in steep mountain catchments. In: *Global Change and Mountain Regions - Advances in Global Change Research*, 23. Springer Verlag, Berlin, New York, 650 S.
- MOSER, H. UND RAUERT, W., (1980): Isotopenmethoden in der Hydrologie. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart.
- MOSLEY, M.P. UND ROWE, L.K., (1981): Low flow water chemistry in forested and pasture catchments, Mawheraiti River, Westland. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 15: 307 - 320.
- OGUNKOYA, O.O. UND JENKINS, A., (1993): Analysis of storm hydrograph and flow pathways using a three-component hydrograph separation model. *Journal of Hydrology*, 142, 1-4: 71 - 88.
- PARLOW, E. UND ROSNER, H.-J., (1997): Klima am südlichen Oberrhein. In: *Schwarzwald und Oberrheintiefland - Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg im Breisgau*. Freiburger Geographische Hefte, 111 - 125.
- PETERS, N.E. UND RATCLIFFE, E.B., (1997): Tracing hydrologic pathways at the Panola Mountain Research Watershed, Georgia, USA. *Hydrochemistry*, IAHS Publication no. 244.
- PETERS, N.E., RATCLIFFE, E.B. UND TRANTER, M., (1998): Tracing solute mobility at the Panola Mountain Research Watershed, Georgia, USA: variations in  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  concentrations. *Proceedings of the HeadWater'98 Conference held at Meran/Merano, Italy, April 1998.*, IAHS Publication no. 248.
- REUSS, J.O. UND JOHNSON, D.W., (1986): Acid Deposition and the Acidification of Soils and Waters, *Ecological Studies*. New York, 159 S.
- RICE, K.C. UND BRICKER, O.P., (1995): Seasonal cycles of dissolved constituents in streamwater in two forested catchments in the Mid-Atlantic region of the eastern USA. *Journal of Hydrology*, 170: 137 - 158.

- SCHEFFER, F. UND SCHACHTSCHABEL, P., (2002): Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Auflage - neubearbeitet und erweitert. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 583 S.
- SCHÖNWIESE, C.D., (2000): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler, 3., verbesserte und erweiterte Auflage. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart.
- SCHWOERBEL, J., (1999): Einführung in die Limnologie, 8. vollständig überarbeitete Auflage. Gustav-Fischer-Verlag, Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm, 465 S.
- SHANLEY, J.B. UND PETERS, N.E., (1988): Preliminary observations of streamflow generation during storms in a forested piedmont watershed using temperature as a tracer. *Journal of Contaminant Hydrology*, 3: 349 - 365.
- SKLASH, M.G. UND FARVOLDEN, R.N., (1979): The role of groundwater in storm runoff. *Journal of Hydrology*, 43: 45 - 65.
- STADT FREIBURG, (2003): Freiburger Waldansichten. Broschüre der Stadt Freiburg unter Federführung des städtischen Forstamt Freiburg i. Br.
- STAHL, K., (2001): Hydrological Drought - A Study across Europe. Dissertation, Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br., 121 S.
- STEDNICK, J.D., (1996): Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 176, 1-4: 79 - 95.
- UHLENBROOK, S., (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflussbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. In: Freiburger Schriften zur Hydrologie. Band 10, 201 S.
- UHLENBROOK, S., FREY, M., LEIBUNDGUT, C. UND MALOSZEWSKI, P., (2002): Hydrograph separations in a mesoscale mountain basin at event and seasonal timescale. *Water Resources Research*, 38, No.6: 31.1 - 31.14.
- VON WILPERT, K., KOHLER, M. UND ZIRLEWAGEN, D., (1996): Die Differenzierung des Stoffhaushalts von Waldökosystemen durch die waldbauliche Behandlung auf einem Gneisstandort des Mittleren Schwarzwaldes (Ergebnisse aus der Ökosystem-Fallstudie "Conventwald"). *Mitteilungen der Forstlichen Versuchsanstalt Baden - Württemberg (FVA)*, Heft 197: 94 S.
- VON WILPERT, K. UND ZIRLEWAGEN, D., (2001): Bodenversauerung und Entwicklung der Wasserqualität im Bewaldeten Einzugsgebiet der Conventwald-Fallstudie. *Berichte Freiburger Forstliche Forschung*, Heft 33: 123 - 138.
- VON WILPERT, K. UND ZIRLEWAGEN, D., (2002): Was hat Waldbau mit Trinkwasservorsorge zu tun? In: *Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft*. FVA- Forschungstage 5. -6. Juli 2001. 309 - 319.

WENNINGER, J., (2002): Experimentelle Untersuchung zur Dynamik von Hanggrundwasser und dessen Übertritt in die Talaue und den Vorfluter im Bruggaeinzugsgebiet. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Institut für Hydrologie der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i. Br.

WHITE, A.F. UND BRANTLEY, S.L., (1995): Chemical Weathering Rates in Silicate Minerals. Reviews in Mineralogy, Volume 31, Mineralogical Society of America, Washington, D.C.

### **Persönliche Mitteilungen**

Forstamt Staufen, (2005)

VON WILPERT, K., (2005): Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA); Freiburg i. Br.

WENNINGER, J., (2005): Institut für Hydrologie, Albert -Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

### **Sonstige Quelle**

[www.Klimadiagramme.de](http://www.Klimadiagramme.de) (Stand: Oktober 2005)

## **Dank**

Mein herzlicher Dank gilt:

Prof. Dr. Christan Leibundgut für die Übernahme des Referats dieser Arbeit,

Dr. Jens Lange, für seine engagierte fachliche Betreuung dieser Arbeit, die gerade in schwierigen Situationen oftmals neue Impulse brachte,

meiner Kommilitonin Cindy Hugenschmidt, für die sehr nette Zusammenarbeit bei der gemeinsamen Datenerhebung im Gelände, sowie deren Auswertung,

Dipl. Hyd. Jochen Wenninger, für die Analyse der Isotopenproben, sowie besonders für die zeitintensive Einführung in die Ionenchromatographie,

dem Institutstechniker Emil Blattmann für seine technischen Ratschläge und seine stets freundliche Mithilfe bei der Installation der Messgeräte,

dem Wassermeister der Gemeinde Wittnau Herr Binder für die Erlaubnis zur Untersuchung der Quellen im Einzugsgebiet Engebächle,

PD Dr. Andreas Matzarakis zur Bereitstellung der meteorologischen Daten der Stadtstation Freiburg,

den Gemeinde Wittnau, sowie den Besitzern des „Ringlihofs“ für die Erlaubnis zur Durchführung der Messkampagne auf ihrem Grund,

Steffi Riemer, Damaris Hartmann und Katrin Schneider fürs Korrekturlesen dieser Arbeit.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für ihre moralische Unterstützung während der Prüfungs- und Diplomarbeitszeit.

## Anhang

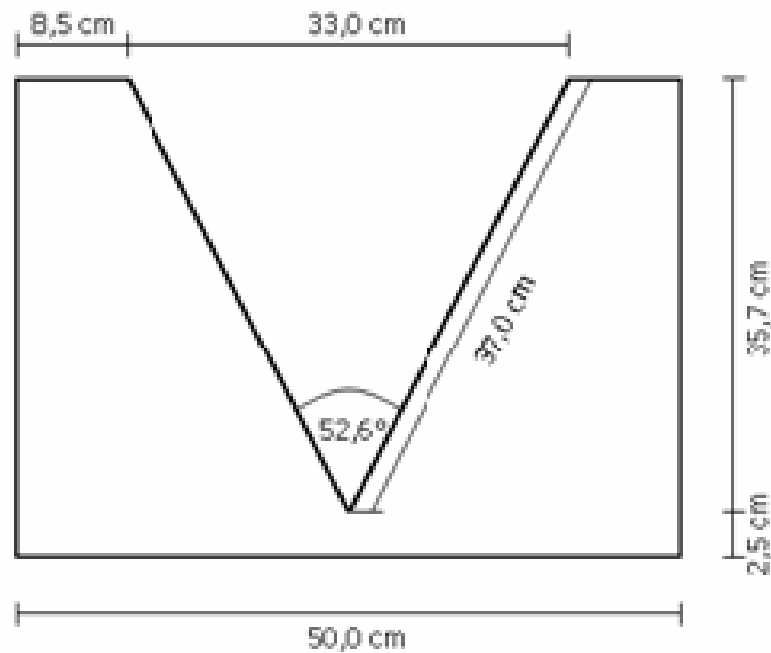


Abbildung A 1: Messwehr nach Thomson

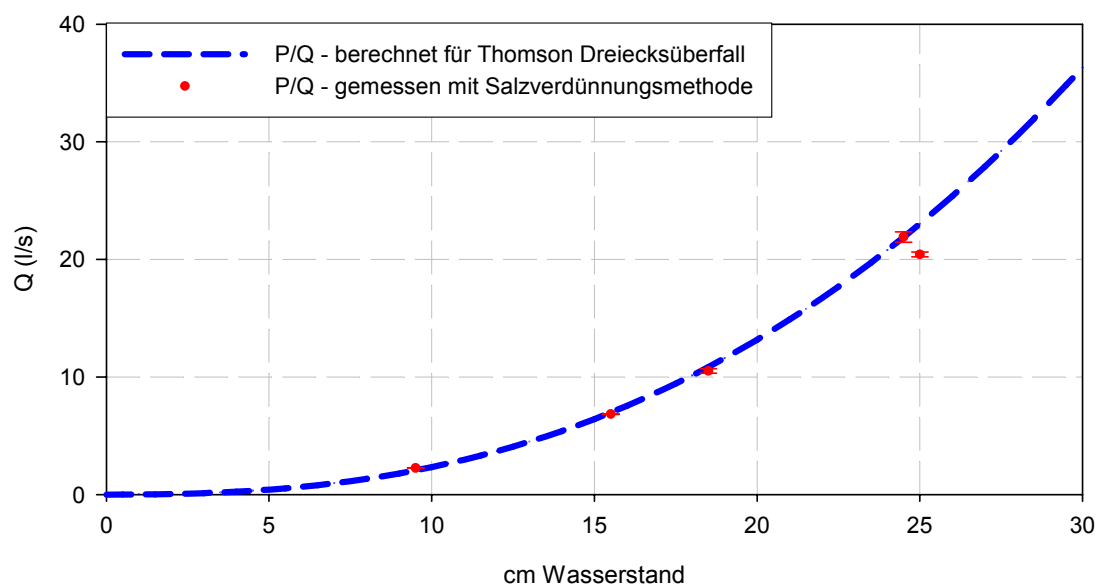
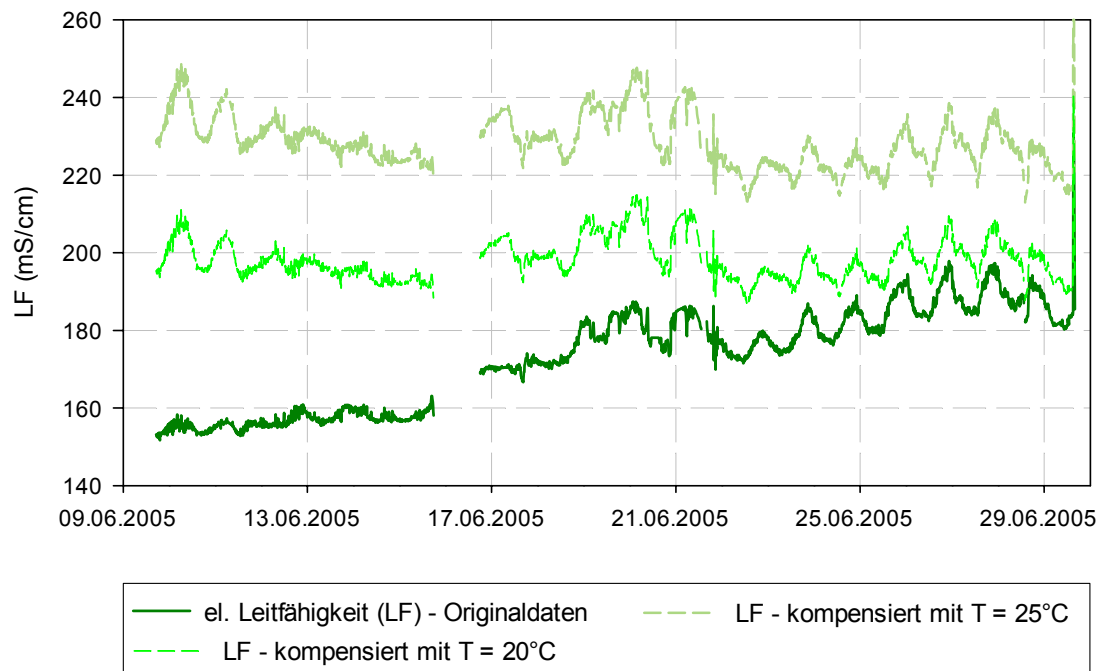


Abbildung A 2: Verifizierung der P/Q-Beziehung am Engebächle mittels Salzverdünnungsmessung



**Abbildung A 3:** Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit bei Temperaturkompensation mit verschiedenen Temperaturniveaus nach Formel von ROMMEL (1980) zur Überprüfung des Tagesgangs in der elektrischen Leitfähigkeit zu Niedrigwasserabflussverhältnissen.



**Abbildung A 4:** Filterrohr zum Einbau in *Riparian Zone*

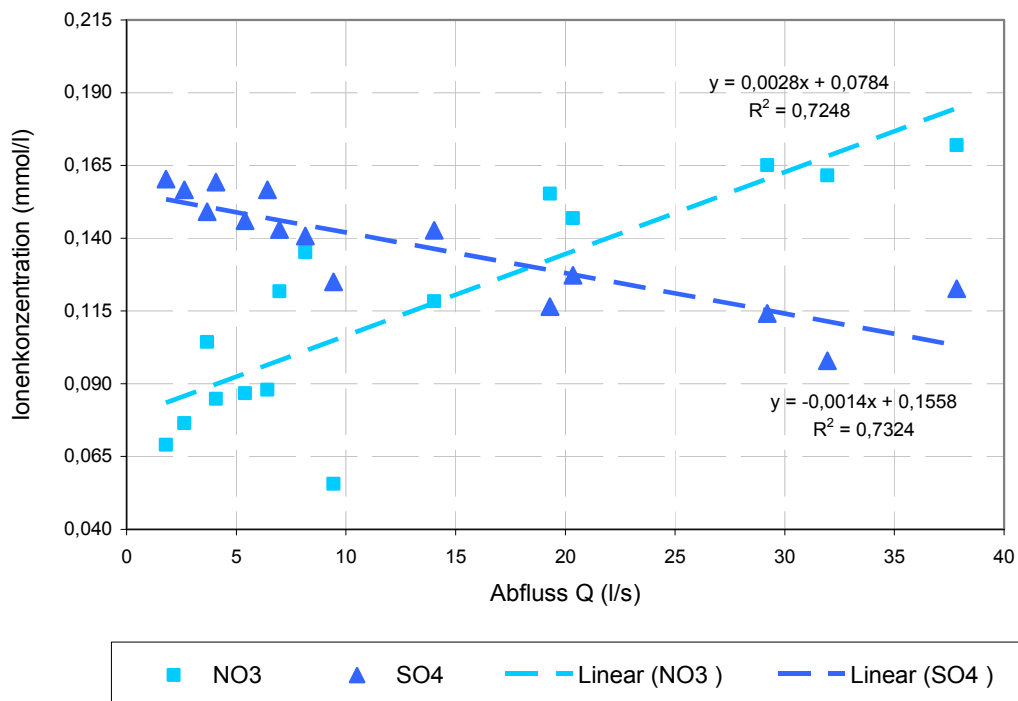
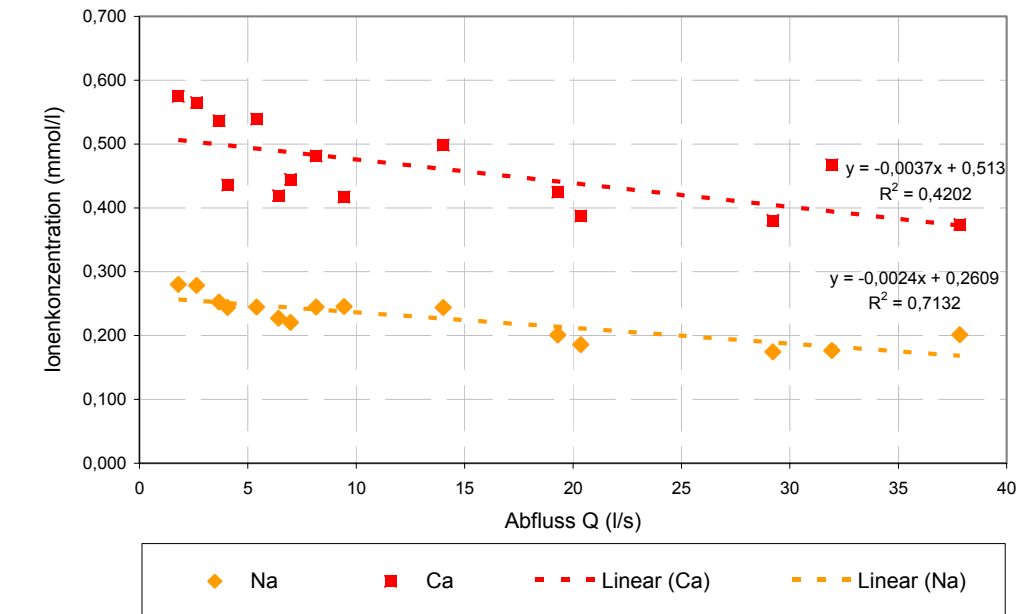


Abbildung A 5: Zusammenhang zwischen Wasserchemie und Abfluss am Engebächle



Abbildung A 6: *Echo Probes* Bodenfeuchtesonden (kleines Bild oben links) und deren Einbau im Bodenprofil

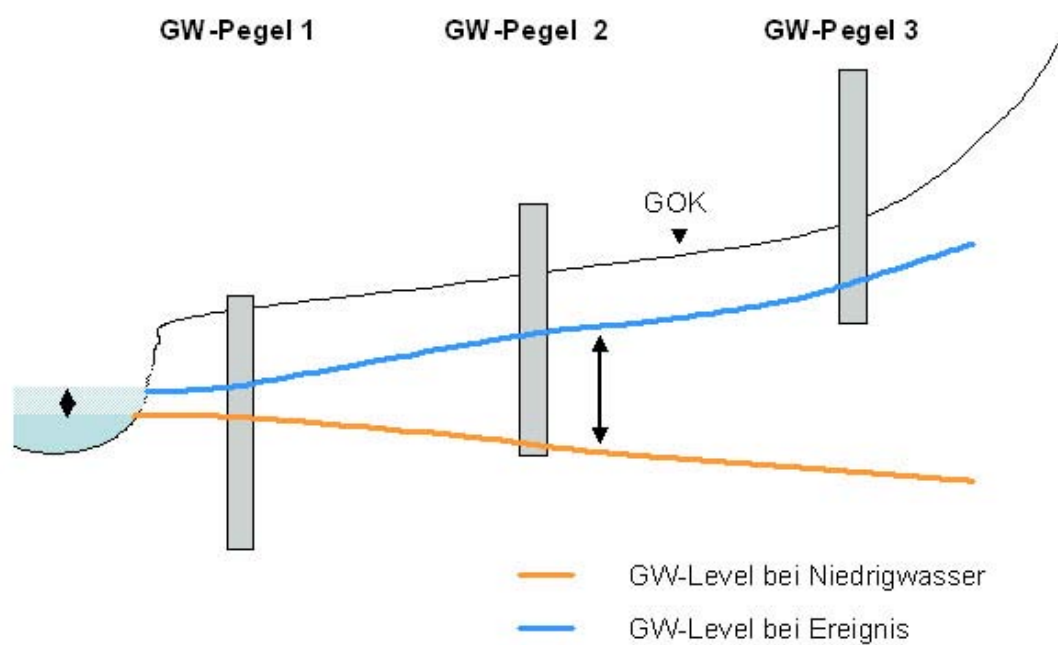


Abbildung A 7: Schematische Darstellung des Wasserspiegels in den Grundwasserpegel im Niedrigwasser- und im Ereignisfall

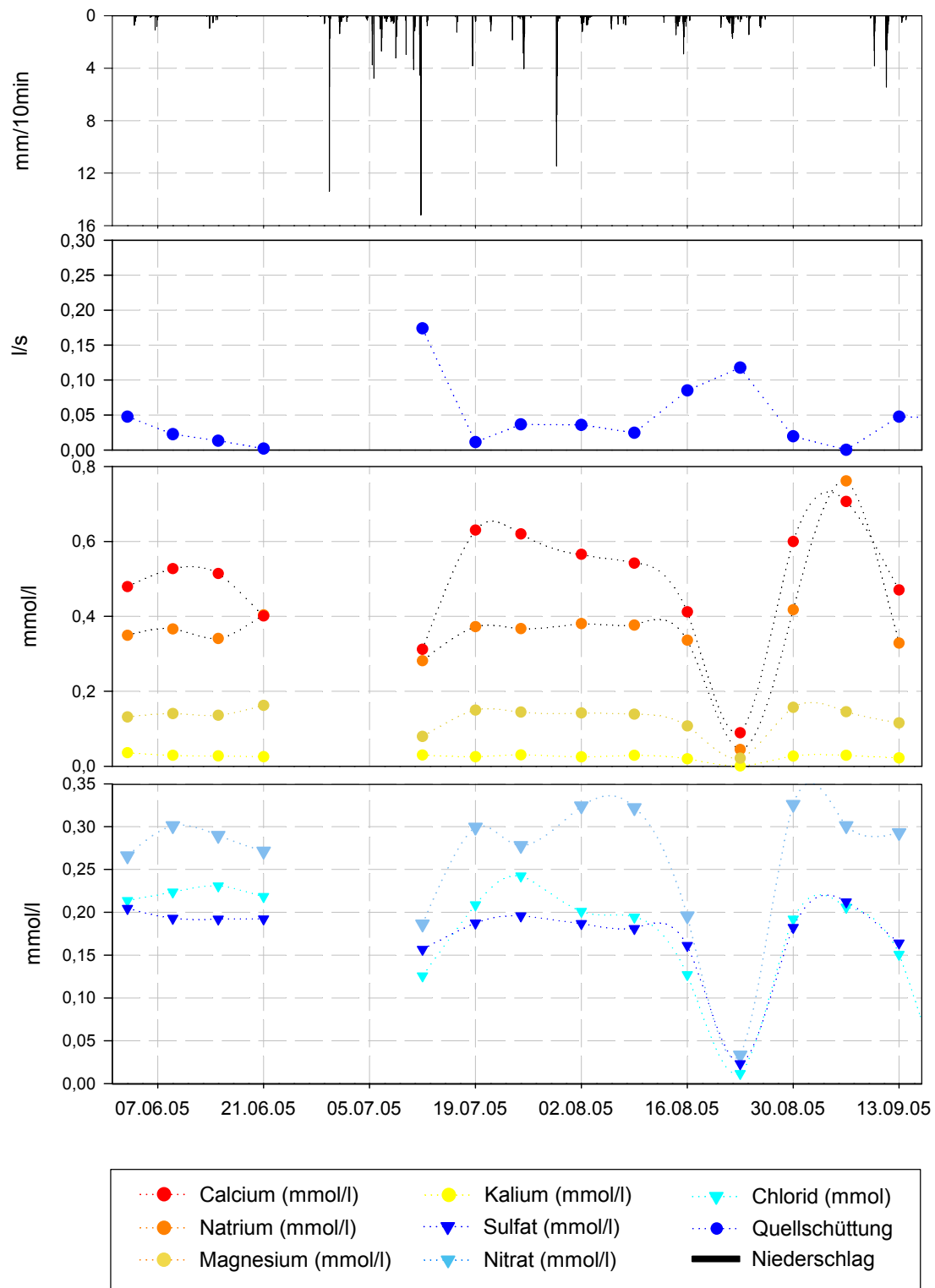


Abbildung A 8: Übersicht über den Verlauf der Hauptionen in der Quelle U1

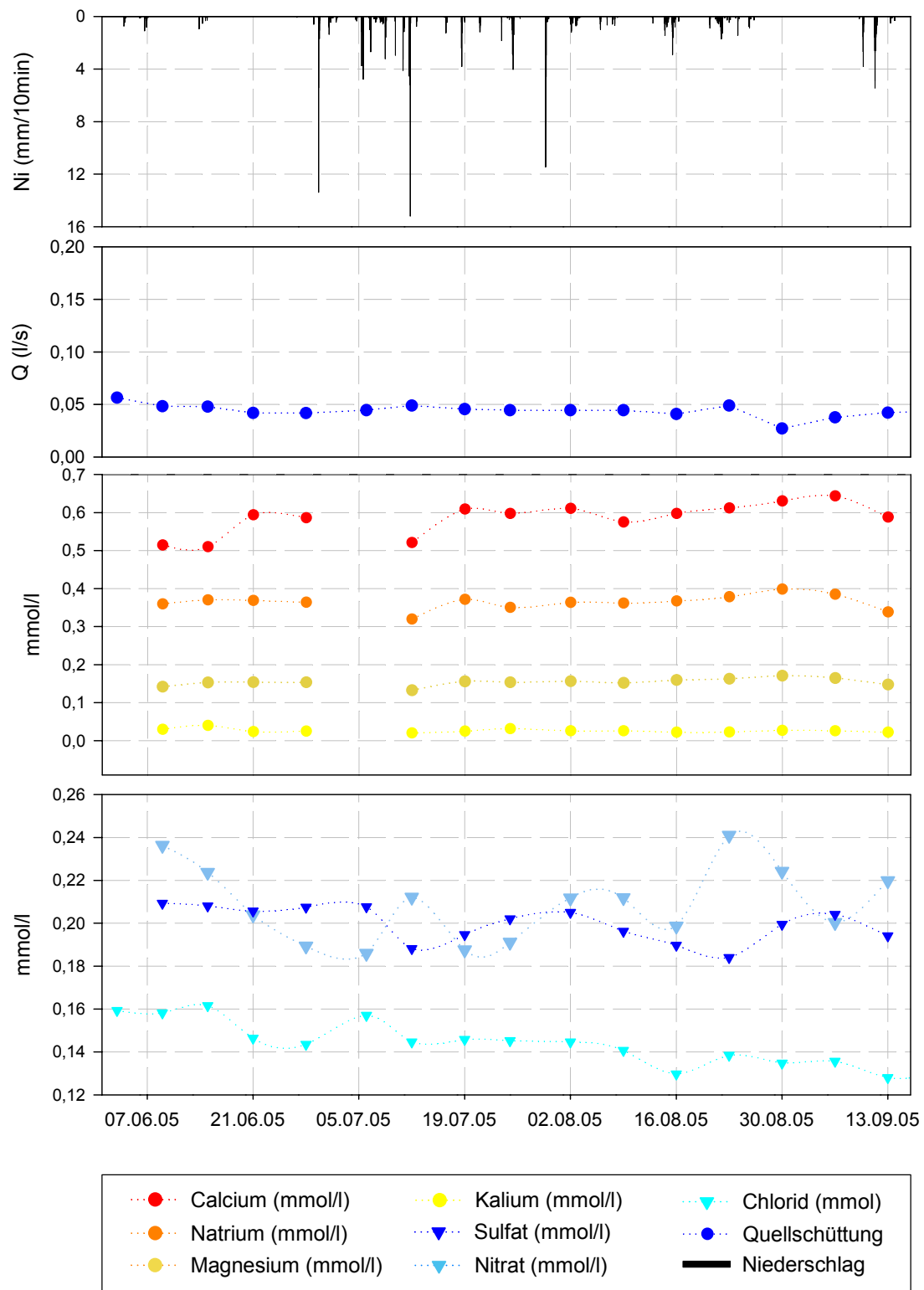


Abbildung A 9: Übersicht über den Verlauf der Hauptionen in der Quelle U2

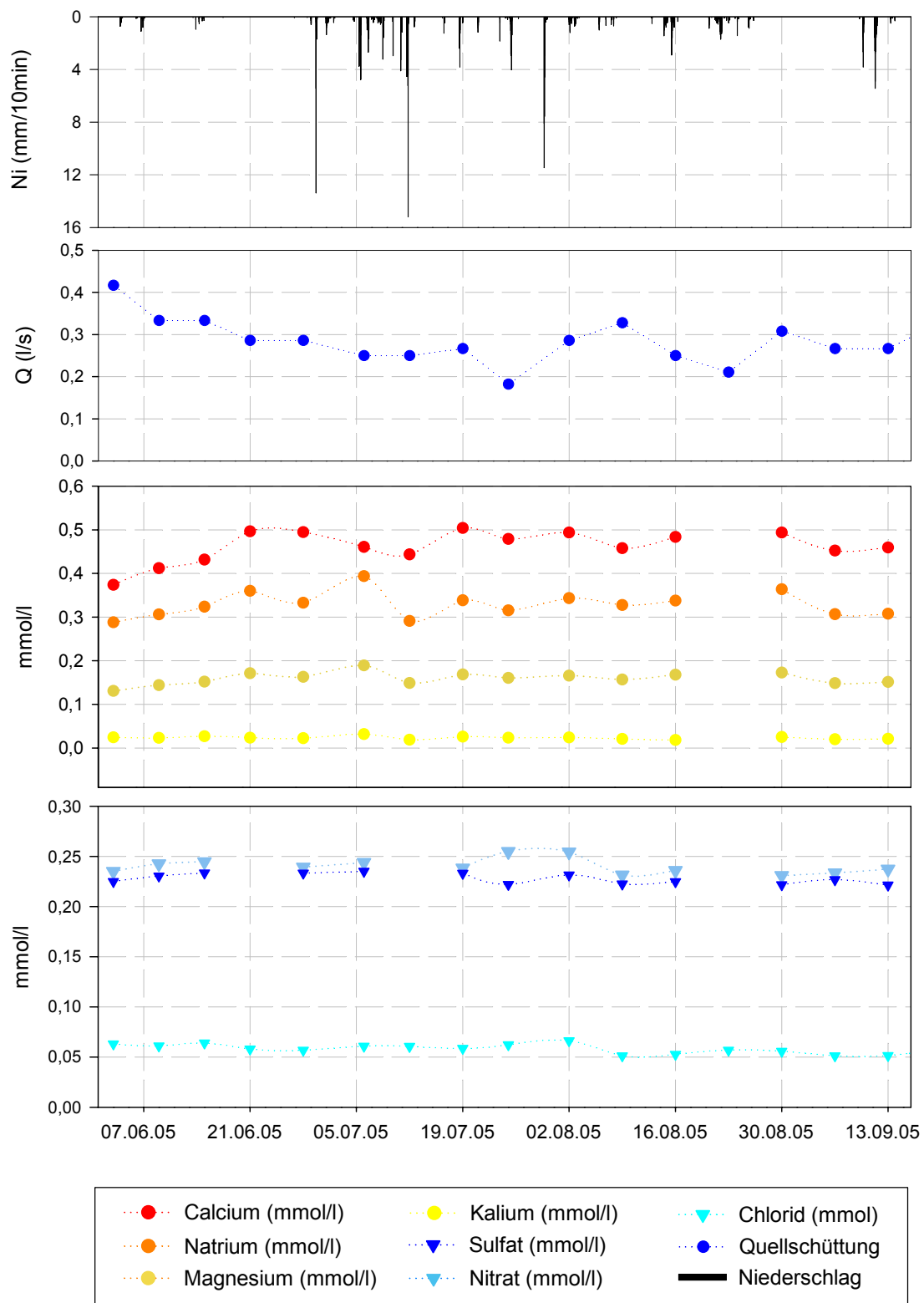


Abbildung A 10: Übersicht über den Verlauf der Hauptionen in der Quelle U5

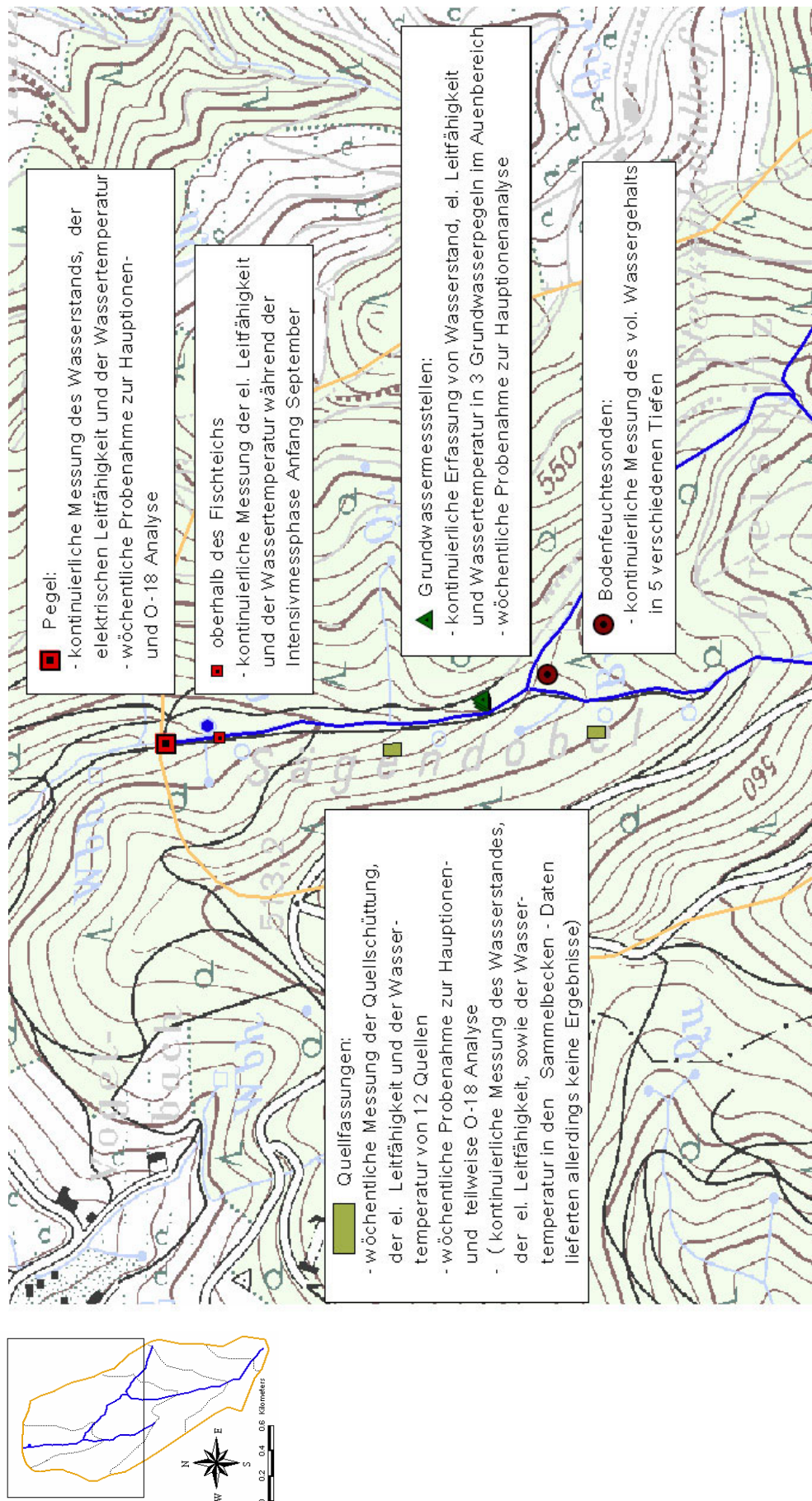


Abbildung A 11: Übersicht über die im EZG Engebächle durchgeführten Messungen

Tabelle A 1: Messgenauigkeit der Diversonden (verändert nach GUWANG, 2004)

| Spezifikationen    |               | CTD-Diver                       | Baro-Diver              |
|--------------------|---------------|---------------------------------|-------------------------|
| Maße               |               | Länge 260 mm, Ø 22 mm           | Länge 125 mm, Ø 22 mm   |
| Betriebstemperatur |               | -20°C bis + 80°C                | -20°C bis + 80°C        |
| Speicherkapazität  |               | 3 * 16.000 Messwerte            | 2 * 24.000 Messwerte    |
| Druck              | Messprinzip   | Dehnmessstreifen-Brücke         | Dehnmessstreifen-Brücke |
|                    | Messbereich   | 950-1950 cm WS                  | 950-1100 cm WS          |
|                    | Genauigkeit   | 0,1 % typ., 0,2 % max. (1-2 cm) | 0,1 % typ., 0,2 % max.  |
| Temperatur         | Messprinzip   | Halbleiter                      | Halbleiter              |
|                    | komp. Bereich | -20°C bis + 80°C                | -10°C bis +40°C         |
|                    | Genauigkeit   | 0,1 °C                          | ca. 0,1 °C              |
| Leitfähigkeit      | Messprinzip   | 4 Elektroden                    | -                       |
|                    | Bereich       | 0-5 mS/cm (0-1.5mS/cm)          | -                       |
|                    | Genauigkeit   | 1% vom Bereich (50 µS/cm)       | -                       |

Tabelle A 2 (A): Übersicht über die Standardabweichung der Ionenchromatographie – Anionen

## Teil I

| Standard (mg/l)     | Anzahl Standards | Mittlere absolute Abweichung (mg/l) | Mittlere relative Abweichung (%) | Maximale Abweichung (%) | Minimale Abweichung (%) |
|---------------------|------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Cl</b>           |                  |                                     |                                  |                         |                         |
| <b>0,5</b>          | 6                | 0,21                                | 42,33                            | 96,00                   | 0,00                    |
| <b>1</b>            | 5                | 0,14                                | 13,80                            | 24,00                   | 4,00                    |
| <b>2</b>            | 4                | 0,18                                | 8,88                             | 13,50                   | 1,00                    |
| <b>3</b>            | 4                | 0,57                                | 19,08                            | 35,33                   | 10,67                   |
| <b>4</b>            | 6                | 0,21                                | 5,21                             | 15,25                   | 1,00                    |
| <b>6</b>            | 3                | 0,41                                | 6,83                             | 11,67                   | 2,83                    |
| <b>8</b>            | 3                | 0,13                                | 1,58                             | 2,25                    | 1,00                    |
| <b>10</b>           | 2                | 0,55                                | 5,73                             | 9,20                    | 2,25                    |
| <b>12</b>           | 4                | 0,20                                | 1,69                             | 3,83                    | 0,50                    |
| <b>14</b>           | 3                | 0,17                                | 1,21                             | 1,79                    | 0,64                    |
| <b>16</b>           | 5                | 0,37                                | 2,30                             | 2,75                    | 1,94                    |
| <b>18</b>           | 4                | 0,26                                | 1,46                             | 2,78                    | 0,56                    |
| <b>20</b>           | 3                | 0,26                                | 1,32                             | 2,55                    | 0,05                    |
| <b>30</b>           | 2                | 0,22                                | 0,72                             | 0,90                    | 0,53                    |
| <b>50</b>           | 0                | -                                   | -                                | -                       | -                       |
| <b>0 (Aquadest)</b> | 21               | 0,06                                | -                                | -                       | -                       |

**Tabelle A 2 (B): Übersicht über die Standardabweichung der Ionenchromatographie – Anionen**  
**Teil II**

| Standard<br>(mg/l)  | Anzahl<br>Standards | Mittlere absolute<br>Abweichung (mg/l) | Mittlere relative<br>Abweichung (%) | Maximale<br>Abweichung (%) | Minimale<br>Abweichung (%) |
|---------------------|---------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <b>Nitrat</b>       |                     |                                        |                                     |                            |                            |
| <b>0,5</b>          | 6                   | 0,07                                   | 14,33                               | 26,00                      | 0,00                       |
| <b>1</b>            | 5                   | 0,04                                   | 4,00                                | 6,00                       | 1,00                       |
| <b>2</b>            | 4                   | 0,08                                   | 3,75                                | 5,50                       | 2,00                       |
| <b>3</b>            | 4                   | 0,14                                   | 4,58                                | 8,33                       | 2,33                       |
| <b>4</b>            | 6                   | 0,17                                   | 4,13                                | 12,50                      | 0,50                       |
| <b>6</b>            | 3                   | 0,07                                   | 1,22                                | 2,17                       | 0,67                       |
| <b>8</b>            | 3                   | 0,44                                   | 5,54                                | 9,13                       | 1,37                       |
| <b>10</b>           | 2                   | 0,50                                   | 5,56                                | 6,13                       | 5,00                       |
| <b>12</b>           | 4                   | 0,53                                   | 4,38                                | 5,42                       | 2,00                       |
| <b>14</b>           | 3                   | 0,26                                   | 1,86                                | 3,43                       | 1,07                       |
| <b>16</b>           | 5                   | 0,47                                   | 2,95                                | 9,19                       | 0,50                       |
| <b>18</b>           | 4                   | 0,29                                   | 1,63                                | 2,78                       | 0,17                       |
| <b>20</b>           | 4                   | 0,62                                   | 3,10                                | 4,85                       | 0,90                       |
| <b>30</b>           | 2                   | 0,91                                   | 3,03                                | 4,87                       | 1,20                       |
| <b>50</b>           | 0                   | -                                      | -                                   | -                          | -                          |
| <b>0 (Aquadest)</b> | 21                  | 0,02                                   | -                                   | -                          | -                          |
| <b>Sulfat</b>       |                     |                                        |                                     |                            |                            |
| <b>0,5</b>          | 6                   | 0,08                                   | 15,67                               | 36,00                      | 8,00                       |
| <b>1</b>            | 5                   | 0,06                                   | 6,20                                | 8,00                       | 3,00                       |
| <b>2</b>            | 4                   | 0,09                                   | 4,50                                | 5,50                       | 3,50                       |
| <b>3</b>            | 4                   | 0,13                                   | 4,25                                | 5,00                       | 2,67                       |
| <b>4</b>            | 6                   | 0,19                                   | 4,67                                | 13,00                      | 0,25                       |
| <b>6</b>            | 3                   | 0,14                                   | 2,39                                | 5,33                       | 0,83                       |
| <b>8</b>            | 3                   | 0,55                                   | 6,83                                | 10,00                      | 2,37                       |
| <b>10</b>           | 2                   | 0,62                                   | 7,01                                | 8,13                       | 5,90                       |
| <b>12</b>           | 4                   | 0,44                                   | 3,63                                | 6,67                       | 0,25                       |
| <b>14</b>           | 3                   | 0,28                                   | 2,02                                | 3,29                       | 0,36                       |
| <b>16</b>           | 5                   | 0,42                                   | 2,63                                | 8,13                       | 0,19                       |
| <b>18</b>           | 4                   | 0,32                                   | 1,76                                | 2,72                       | 0,33                       |
| <b>20</b>           | 4                   | 0,63                                   | 3,13                                | 4,80                       | 1,15                       |
| <b>30</b>           | 3                   | 1,26                                   | 4,19                                | 6,23                       | 0,83                       |
| <b>50</b>           | 0                   | -                                      | -                                   | -                          | -                          |
| <b>0 (Aquadest)</b> | 21                  | 0,02                                   | -                                   | -                          | -                          |

Tabelle A 3 (A): Übersicht über die Standardabweichung der Ionenchromatographie – Kationen

## Teil I

| Standard (mg/l)     | Anzahl Standards | Mittlere absolute Abweichung (mg/l) | Mittlere relative Abweichung (%) | Maximale Abweichung (%) | Minimale Abweichung (%) |
|---------------------|------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Na</b>           |                  |                                     |                                  |                         |                         |
| <b>0,5</b>          | 7                | 0,13                                | 25,14                            | 94,00                   | 0,00                    |
| <b>1</b>            | 4                | 0,12                                | 12,25                            | 17,00                   | 8,00                    |
| <b>2</b>            | 5                | 0,14                                | 7,20                             | 14,50                   | 2,00                    |
| <b>3</b>            | 2                | 0,25                                | 8,33                             | 15,67                   | 1,00                    |
| <b>4</b>            | 6                | 0,19                                | 4,63                             | 18,25                   | 1,25                    |
| <b>6</b>            | 6                | 0,31                                | 5,14                             | 12,50                   | 1,00                    |
| <b>8</b>            | 4                | 0,26                                | 3,22                             | 5,50                    | 1,50                    |
| <b>10</b>           | 7                | 0,42                                | 4,23                             | 8,30                    | 0,30                    |
| <b>12</b>           | 4                | 0,08                                | 0,65                             | 1,50                    | 0,00                    |
| <b>14</b>           | 6                | 0,63                                | 4,48                             | 13,14                   | 0,00                    |
| <b>16</b>           | 4                | 0,21                                | 1,33                             | 2,69                    | 0,00                    |
| <b>18</b>           | 4                | 0,47                                | 2,63                             | 6,06                    | 0,00                    |
| <b>20</b>           | 4                | 0,25                                | 1,25                             | 1,95                    | 0,00                    |
| <b>30</b>           | 4                | 0,01                                | 0,04                             | 0,17                    | 0,00                    |
| <b>50</b>           | 1                | 0,82                                | 1,64                             | 1,64                    | 1,64                    |
| <b>0 (Aquadest)</b> | 29               | 0,11                                | -                                | -                       | -                       |
| <b>Mg</b>           |                  |                                     |                                  |                         |                         |
| <b>0,5</b>          | 7                | 0,05                                | 10,86                            | 36,00                   | 0,00                    |
| <b>1</b>            | 4                | 0,04                                | 3,50                             | 9,00                    | 1,00                    |
| <b>2</b>            | 5                | 0,08                                | 3,80                             | 9,50                    | 2,00                    |
| <b>3</b>            | 2                | 0,13                                | 4,33                             | 8,33                    | 0,33                    |
| <b>4</b>            | 6                | 0,15                                | 3,63                             | 14,25                   | 0,25                    |
| <b>6</b>            | 6                | 0,29                                | 4,81                             | 10,33                   | 0,50                    |
| <b>8</b>            | 4                | 0,28                                | 3,53                             | 7,63                    | 0,00                    |
| <b>10</b>           | 7                | 0,45                                | 4,53                             | 8,50                    | 0,00                    |
| <b>12</b>           | 4                | 0,09                                | 0,79                             | 2,17                    | 0,00                    |
| <b>14</b>           | 6                | 0,62                                | 4,40                             | 12,29                   | 0,00                    |
| <b>16</b>           | 4                | 0,22                                | 1,36                             | 2,81                    | 0,00                    |
| <b>18</b>           | 4                | 0,26                                | 1,43                             | 3,50                    | 0,00                    |
| <b>20</b>           | 4                | 0,17                                | 0,83                             | 1,30                    | 0,00                    |
| <b>30</b>           | 4                | 0,09                                | 0,32                             | 1,27                    | 0,00                    |
| <b>50</b>           | 1                | 0,02                                | 0,04                             | 0,04                    | 0,04                    |
| <b>0 (Aquadest)</b> | 29               | 0,02                                | -                                | -                       | -                       |

Tabelle A 3 (B): Übersicht über die Standardabweichung der Ionenchromatographie – Kationen

## Teil II

| Standard (mg/l)     | Anzahl Standards | Mittlere absolute Abweichung (mg/l) | Mittlere relative Abweichung (%) | Maximale Abweichung (%) | Minimale Abweichung (%) |
|---------------------|------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>K</b>            |                  |                                     |                                  |                         |                         |
| <b>0,5</b>          | 7                | 0,11                                | 22,00                            | 102,00                  | 0,00                    |
| <b>1</b>            | 4                | 0,07                                | 7,00                             | 10,00                   | 1,00                    |
| <b>2</b>            | 5                | 0,09                                | 4,60                             | 9,00                    | 0,00                    |
| <b>3</b>            | 2                | 0,35                                | 11,50                            | 22,67                   | 0,33                    |
| <b>4</b>            | 6                | 0,20                                | 5,08                             | 14,50                   | 1,00                    |
| <b>6</b>            | 6                | 0,18                                | 3,00                             | 7,33                    | 0,00                    |
| <b>8</b>            | 4                | 0,10                                | 1,22                             | 2,13                    | 0,00                    |
| <b>10</b>           | 7                | 0,34                                | 3,39                             | 8,50                    | 0,00                    |
| <b>12</b>           | 4                | 0,15                                | 1,23                             | 2,58                    | 0,00                    |
| <b>14</b>           | 6                | 0,52                                | 3,68                             | 9,93                    | 0,00                    |
| <b>16</b>           | 4                | 0,21                                | 1,30                             | 2,63                    | 0,00                    |
| <b>18</b>           | 4                | 0,21                                | 1,17                             | 1,94                    | 0,00                    |
| <b>20</b>           | 4                | 0,27                                | 1,36                             | 3,10                    | 0,00                    |
| <b>30</b>           | 4                | 0,10                                | 0,33                             | 1,33                    | 0,00                    |
| <b>50</b>           | 1                | 0,73                                | 1,46                             | 1,46                    | 1,46                    |
| <b>0 (Aquadest)</b> | 29               | 0,04                                | -                                | -                       | -                       |
| <b>Ca</b>           |                  |                                     |                                  |                         |                         |
| <b>0,5</b>          | 7                | 0,15                                | 30,00                            | 82,00                   | 0,00                    |
| <b>1</b>            | 4                | 0,13                                | 12,75                            | 21,00                   | 0,00                    |
| <b>2</b>            | 5                | 0,08                                | 3,80                             | 6,00                    | 2,00                    |
| <b>3</b>            | 2                | 0,23                                | 7,50                             | 11,33                   | 3,67                    |
| <b>4</b>            | 6                | 0,19                                | 4,79                             | 17,50                   | 0,00                    |
| <b>6</b>            | 6                | 0,38                                | 6,33                             | 11,83                   | 1,00                    |
| <b>8</b>            | 4                | 0,32                                | 4,03                             | 6,75                    | 2,75                    |
| <b>10</b>           | 7                | 0,53                                | 5,29                             | 9,10                    | 0,50                    |
| <b>12</b>           | 4                | 0,24                                | 2,02                             | 3,33                    | 1,33                    |
| <b>14</b>           | 6                | 0,79                                | 5,64                             | 12,86                   | 0,43                    |
| <b>16</b>           | 4                | 0,41                                | 2,58                             | 3,25                    | 1,19                    |
| <b>18</b>           | 4                | 0,20                                | 1,14                             | 2,50                    | 0,11                    |
| <b>20</b>           | 4                | 0,45                                | 2,26                             | 5,80                    | 0,50                    |
| <b>30</b>           | 4                | 0,50                                | 1,68                             | 2,73                    | 0,63                    |
| <b>50</b>           | 1                | 0,75                                | 1,50                             | 1,50                    | 1,50                    |
| <b>0 (Aquadest)</b> | 29               | 0,26                                | -                                | -                       | -                       |

Tabelle A 4: Parameter der wöchentlichen Quellbeprobung

| Quelle                                   | Anzahl | Mittelwert | Minimum | Maximum | Standardabweichung (%) |
|------------------------------------------|--------|------------|---------|---------|------------------------|
| <b>Q (l/s)</b>                           |        |            |         |         |                        |
| QU1                                      | 14     | 0,049      | 0       | 0,174   | 97,1                   |
| QU2                                      | 17     | 0,043      | 0,027   | 0,056   | 14,6                   |
| QU3                                      | 16     | 0,133      | 0,087   | 0,200   | 25,0                   |
| QU4                                      | 16     | 0,087      | 0,043   | 0,200   | 41,4                   |
| QU5                                      | 17     | 0,285      | 0,182   | 0,417   | 19,1                   |
| QU6                                      | 16     | 0,056      | 0,031   | 0,095   | 34,7                   |
|                                          |        |            |         |         |                        |
| QO1                                      | 16     | 0,101      | 0,031   | 0,229   | 56,1                   |
| QO2                                      | 16     | 0,166      | 0,024   | 0,800   | 121,3                  |
| QO3                                      | 16     | 0,282      | 0,190   | 0,400   | 19,2                   |
| QO4                                      | 16     | 0,156      | 0,067   | 0,500   | 80,5                   |
| QO5                                      | 16     | 0,222      | 0,078   | 0,667   | 68,4                   |
| QO6                                      | 16     | 0,254      | 0,118   | 0,500   | 47,3                   |
| <b>elektrische Leitfähigkeit (µS/cm)</b> |        |            |         |         |                        |
| QU1                                      | 14     | 181,9      | -       | 213     | 13,6                   |
| QU2                                      | 17     | 194,2      | 174     | 202     | 3,3                    |
| QU3                                      | 16     | 203,1      | 177     | 216     | 6,1                    |
| QU4                                      | 16     | 144,3      | 119     | 155     | 6,9                    |
| QU5                                      | 17     | 170,0      | 148     | 187     | 4,7                    |
| QU6                                      | 16     | 152,3      | 122     | 171     | 8,3                    |
|                                          |        |            |         |         |                        |
| QO1                                      | 16     | 103,3      | 90      | 107     | 4,0                    |
| QO2                                      | 16     | 139,8      | 94      | 180     | 16,5                   |
| QO3                                      | 16     | 122,6      | 109     | 134     | 4,1                    |
| QO4                                      | 16     | 151,0      | 136     | 156     | 3,0                    |
| QO5                                      | 16     | 129,4      | 109     | 147     | 8,4                    |
| QO6                                      | 16     | 149,4      | 132     | 157     | 4,0                    |
| <b>Quelltemperatur (°C)</b>              |        |            |         |         |                        |
| QU1                                      | 14     | 11,5       | -       | 12,6    | 7,6                    |
| QU2                                      | 17     | 11,2       | 9,7     | 12,1    | 6,7                    |
| QU3                                      | 16     | 10,8       | 9,6     | 12,1    | 7,0                    |
| QU4                                      | 16     | 11,0       | 9,3     | 12,8    | 8,6                    |
| QU5                                      | 17     | 9,7        | 9,0     | 10,2    | 3,6                    |
| QU6                                      | 16     | 10,4       | 9,0     | 10,9    | 6,0                    |
|                                          |        |            |         |         |                        |
| QO1                                      | 16     | 10,7       | 9,1     | 12,0    | 7,1                    |
| QO2                                      | 16     | 10,2       | 8,9     | 11,1    | 6,2                    |
| QO3                                      | 16     | 10,2       | 9,0     | 10,8    | 5,9                    |
| QO4                                      | 16     | 10,2       | 9,0     | 10,9    | 5,6                    |
| QO5                                      | 16     | 9,5        | 8,6     | 10,2    | 4,8                    |
| QO6                                      | 16     | 9,6        | 8,6     | 10,8    | 5,4                    |

Tabelle A 5: Wasserchemieparameter der Quellgruppe Sägedobel

|                             | Na    | K     | Mg    | Ca    | Cl    | NO3   | SO4  | Na    | K     | Mg    | Ca    | Cl    | NO3   | SO4   |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             | O1    |       |       |       |       |       |      | O2    |       |       |       |       |       |       |
| Anzahl der Proben           | 9     | 9     | 9     | 9     | 10    | 10    | 10   | 9     | 9     | 9     | 9     | 9     | 9     | 9     |
| Mittelwert (mmol/l)         | 0,21  | 0,02  | 0,10  | 0,27  | 0,04  | 0,16  | 0,15 | 0,21  | 0,02  | 0,15  | 0,46  | 0,04  | 0,19  | 0,16  |
| Standardabweichung (mmol/l) | 0,02  | 0,01  | 0,01  | 0,03  | 0,01  | 0,01  | 0,01 | 0,03  | 0,00  | 0,03  | 0,09  | 0,01  | 0,03  | 0,02  |
| Standardabweichung (%)      | 10,77 | 24,66 | 11,00 | 11,54 | 19,74 | 8,95  | 4,79 | 16,06 | 12,22 | 18,94 | 19,21 | 19,22 | 18,13 | 11,16 |
| Minimum (mmol/l)            | 0,18  | 0,02  | 0,09  | 0,22  | 0,03  | 0,14  | 0,14 | 0,16  | 0,02  | 0,11  | 0,33  | 0,03  | 0,16  | 0,13  |
| Maximum (mmol/l)            | 0,24  | 0,03  | 0,12  | 0,32  | 0,06  | 0,18  | 0,16 | 0,25  | 0,02  | 0,18  | 0,59  | 0,05  | 0,26  | 0,18  |
| Modalwert (mmol/l)          | -     | 0,02  | -     | 0,27  | -     | -     | -    | -     | 0,02  | -     | -     | -     | -     | -     |
|                             | O3    |       |       |       |       |       |      | O4    |       |       |       |       |       |       |
| Anzahl der Proben           | 9     | 9     | 9     | 9     | 9     | 10    | 10   | 8     | 8     | 7     | 8     | 9     | 9     | 9     |
| Mittelwert (mmol/l)         | 0,24  | 0,02  | 0,11  | 0,34  | 0,05  | 0,13  | 0,15 | 0,28  | 0,04  | 0,13  | 0,38  | 0,06  | 0,42  | 0,21  |
| Standardabweichung (mmol/l) | 0,03  | 0,00  | 0,01  | 0,05  | 0,01  | 0,02  | 0,01 | 0,03  | 0,01  | 0,01  | 0,06  | 0,00  | 0,03  | 0,01  |
| Standardabweichung (%)      | 11,08 | 13,53 | 11,49 | 13,74 | 12,15 | 14,02 | 5,34 | 10,33 | 14,43 | 9,91  | 15,05 | 5,96  | 6,35  | 3,55  |
| Minimum (mmol/l)            | 0,21  | 0,02  | 0,10  | 0,28  | 0,04  | 0,12  | 0,13 | 0,24  | 0,03  | 0,11  | 0,31  | 0,06  | 0,38  | 0,20  |
| Maximum (mmol/l)            | 0,28  | 0,03  | 0,14  | 0,41  | 0,06  | 0,18  | 0,16 | 0,33  | 0,04  | 0,15  | 0,49  | 0,07  | 0,46  | 0,22  |
| Modalwert (mmol/l)          | 0,24  | 0,02  | -     | -     | 0,05  | -     | -    | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
|                             | O5    |       |       |       |       |       |      | O6    |       |       |       |       |       |       |
| Anzahl der Proben           | 9     | 9     | 9     | 9     | 10    | 10    | 10   | 8     | 8     | 8     | 8     | 10    | 10    | 10    |
| Mittelwert (mmol/l)         | 0,26  | 0,02  | 0,13  | 0,36  | 0,05  | 0,23  | 0,17 | 0,29  | 0,03  | 0,15  | 0,40  | 0,06  | 0,32  | 0,19  |
| Standardabweichung (mmol/l) | 0,03  | 0,00  | 0,02  | 0,05  | 0,01  | 0,01  | 0,01 | 0,03  | 0,00  | 0,02  | 0,05  | 0,01  | 0,01  | 0,01  |
| Standardabweichung (%)      | 10,50 | 15,55 | 15,26 | 14,04 | 11,99 | 4,24  | 4,24 | 11,52 | 14,94 | 11,80 | 13,38 | 12,75 | 1,65  | 4,48  |
| Minimum (mmol/l)            | 0,22  | 0,02  | 0,11  | 0,28  | 0,04  | 0,21  | 0,16 | 0,25  | 0,02  | 0,13  | 0,34  | 0,05  | 0,32  | 0,17  |
| Maximum (mmol/l)            | 0,30  | 0,03  | 0,17  | 0,43  | 0,07  | 0,24  | 0,18 | 0,35  | 0,03  | 0,18  | 0,50  | 0,08  | 0,33  | 0,20  |
| Modalwert (mmol/l)          | -     | 0,02  | -     | -     | 0,05  | -     | 0,17 | -     | -     | -     | -     | -     | 0,32  | -     |



Tabelle A 7 (A): Parameter der Wasserchemie Quelle Zängerlehof (Werte in mmol/l)

| Anzahl                    | Na            | K    | Mg   | Ca   | Cl   | NO3  | SO4  | HCO3 (*) |
|---------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| <b>267</b>                | <b>Gesamt</b> |      |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,16          | 0,01 | 0,10 | 0,24 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,00     |
| <b>Minimum</b>            | 0,00          | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00     |
| <b>Maximum</b>            | 0,83          | 0,07 | 0,12 | 0,43 | 0,38 | 0,29 | 0,31 | 0,00     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,06          | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,00     |
| <b>9</b>                  | <b>1999</b>   |      |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,14          | 0,02 | 0,09 | 0,21 | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,03     |
| <b>Minimum</b>            | 0,13          | 0,01 | 0,08 | 0,18 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,02     |
| <b>Maximum</b>            | 0,16          | 0,02 | 0,10 | 0,23 | 0,10 | 0,07 | 0,07 | 0,03     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,01          | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00     |
| <b>20</b>                 | <b>2000</b>   |      |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,16          | 0,02 | 0,10 | 0,23 | 0,07 | 0,05 | 0,06 | -0,01    |
| <b>Minimum</b>            | 0,13          | 0,01 | 0,08 | 0,19 | 0,06 | 0,03 | 0,05 | -0,03    |
| <b>Maximum</b>            | 0,18          | 0,02 | 0,11 | 0,25 | 0,09 | 0,07 | 0,07 | 0,04     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,01          | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,02     |
| <b>9</b>                  | <b>2001</b>   |      |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,16          | 0,01 | 0,08 | 0,22 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,00     |
| <b>Minimum</b>            | 0,03          | 0,00 | 0,02 | 0,11 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | -0,27    |
| <b>Maximum</b>            | 0,83          | 0,03 | 0,10 | 0,43 | 0,38 | 0,29 | 0,31 | 0,64     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,11          | 0,00 | 0,02 | 0,05 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,10     |
| <b>51</b>                 | <b>2002</b>   |      |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,15          | 0,01 | 0,09 | 0,23 | 0,06 | 0,07 | 0,06 | 0,01     |
| <b>Minimum</b>            | 0,10          | 0,01 | 0,06 | 0,17 | 0,04 | 0,06 | 0,03 | -0,05    |
| <b>Maximum</b>            | 0,23          | 0,03 | 0,11 | 0,38 | 0,08 | 0,09 | 0,07 | 0,04     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,03          | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02     |
| <b>52</b>                 | <b>2003</b>   |      |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,15          | 0,01 | 0,10 | 0,25 | 0,07 | 0,07 | 0,06 | 0,01     |
| <b>Minimum</b>            | 0,10          | 0,01 | 0,07 | 0,19 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | -0,01    |
| <b>Maximum</b>            | 0,19          | 0,02 | 0,12 | 0,30 | 0,10 | 0,09 | 0,07 | 0,04     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,02          | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01     |
| <b>53</b>                 | <b>2004</b>   |      |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,17          | 0,01 | 0,11 | 0,26 | 0,10 | 0,09 | 0,06 | 0,03     |
| <b>Minimum</b>            | 0,02          | 0,00 | 0,02 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,05 | -0,01    |
| <b>Maximum</b>            | 0,31          | 0,06 | 0,12 | 0,33 | 0,19 | 0,24 | 0,07 | 0,20     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,03          | 0,01 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,03     |
| <b>29</b>                 | <b>2005</b>   |      |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,15          | 0,01 | 0,10 | 0,24 | 0,09 | 0,09 | 0,06 | 0,04     |
| <b>Minimum</b>            | 0,00          | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,03    |
| <b>Maximum</b>            | 0,18          | 0,07 | 0,12 | 0,36 | 0,12 | 0,14 | 0,07 | 0,10     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,04          | 0,01 | 0,03 | 0,08 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,02     |

(\*) Werte aus Ionenbilanz berechnet

Tabelle A 7 (B): Parameter der Wasserchemie der Quelle Zipfeldobel (Werte in mmol/l)

| Anzahl                    | Na            | K     | Mg   | Ca   | Cl   | NO3  | SO4  | HCO3 (*) |
|---------------------------|---------------|-------|------|------|------|------|------|----------|
| <b>341</b>                | <b>Gesamt</b> |       |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,13          | 0,01  | 0,05 | 0,16 | 0,03 | 0,07 | 0,03 | 0,00     |
| <b>Minimum</b>            | 0,00          | -0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00     |
| <b>Maximum</b>            | 0,18          | 0,05  | 0,09 | 0,88 | 0,13 | 0,19 | 0,11 | 0,00     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,03          | 0,00  | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00     |
| <b>50</b>                 | <b>1999</b>   |       |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,12          | 0,01  | 0,04 | 0,15 | 0,03 | 0,08 | 0,04 | 0,02     |
| <b>Minimum</b>            | 0,00          | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,07 | 0,03 | -0,21    |
| <b>Maximum</b>            | 0,15          | 0,02  | 0,08 | 0,88 | 0,05 | 0,10 | 0,11 | 0,08     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,04          | 0,00  | 0,02 | 0,13 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,04     |
| <b>45</b>                 | <b>2000</b>   |       |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,13          | 0,02  | 0,05 | 0,15 | 0,03 | 0,07 | 0,03 | 0,01     |
| <b>Minimum</b>            | 0,04          | 0,00  | 0,02 | 0,12 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | -0,07    |
| <b>Maximum</b>            | 0,16          | 0,03  | 0,07 | 0,18 | 0,04 | 0,09 | 0,04 | 0,04     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,02          | 0,01  | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02     |
| <b>52</b>                 | <b>2001</b>   |       |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,12          | 0,01  | 0,05 | 0,15 | 0,02 | 0,07 | 0,03 | 0,01     |
| <b>Minimum</b>            | 0,00          | 0,00  | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,05 | 0,02 | -0,02    |
| <b>Maximum</b>            | 0,15          | 0,02  | 0,06 | 0,18 | 0,04 | 0,14 | 0,07 | 0,17     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,03          | 0,00  | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,03     |
| <b>52</b>                 | <b>2002</b>   |       |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,14          | 0,01  | 0,05 | 0,16 | 0,02 | 0,07 | 0,03 | 0,00     |
| <b>Minimum</b>            | 0,00          | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,06 | 0,03 | -0,03    |
| <b>Maximum</b>            | 0,18          | 0,05  | 0,06 | 0,18 | 0,04 | 0,08 | 0,04 | 0,03     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,02          | 0,01  | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01     |
| <b>52</b>                 | <b>2003</b>   |       |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,14          | 0,01  | 0,06 | 0,18 | 0,03 | 0,07 | 0,04 | 0,00     |
| <b>Minimum</b>            | 0,09          | 0,01  | 0,04 | 0,12 | 0,01 | 0,04 | 0,03 | -0,05    |
| <b>Maximum</b>            | 0,18          | 0,02  | 0,08 | 0,28 | 0,06 | 0,08 | 0,04 | 0,04     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,01          | 0,00  | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01     |
| <b>52</b>                 | <b>2004</b>   |       |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,14          | 0,01  | 0,06 | 0,18 | 0,03 | 0,08 | 0,04 | 0,01     |
| <b>Minimum</b>            | 0,00          | -0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,02 | 0,07 | 0,03 | -0,07    |
| <b>Maximum</b>            | 0,17          | 0,02  | 0,07 | 0,43 | 0,06 | 0,19 | 0,04 | 0,14     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,03          | 0,00  | 0,01 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,03     |
| <b>29</b>                 | <b>2005</b>   |       |      |      |      |      |      |          |
| <b>Mittelwert</b>         | 0,12          | 0,01  | 0,05 | 0,17 | 0,03 | 0,07 | 0,03 | 0,01     |
| <b>Minimum</b>            | 0,00          | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | -0,10    |
| <b>Maximum</b>            | 0,17          | 0,02  | 0,06 | 0,34 | 0,05 | 0,10 | 0,04 | 0,04     |
| <b>Standardabweichung</b> | 0,04          | 0,00  | 0,01 | 0,08 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,03     |

(\*) Werte aus Ionenbilanz berechnet

**Tabelle A 8: Übersicht über den Korrelationskoeffizient r bei direkter Korrelation der chemischen Parameter der Quelle Zängerlehof**

| <b>Zängerlehof - gesamt</b> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
|                             | Na    | K     | Mg    | Ca    | Cl    | NO3   | SO4   | Si    | T     | LF    | pH   | Q     | SNK  |
| Na                          | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| K                           | 0,59  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| Mg                          | 0,72  | 0,35  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| Ca                          | 0,75  | 0,39  | 0,87  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| Cl                          | 0,55  | 0,28  | 0,76  | 0,72  | 1,00  |       |       |       |       |       |      |       |      |
| NO3                         | 0,18  | -0,14 | 0,41  | 0,36  | 0,57  | 1,00  |       |       |       |       |      |       |      |
| SO4                         | 0,66  | 0,41  | 0,76  | 0,75  | 0,69  | 0,27  | 1,00  |       |       |       |      |       |      |
| Si                          | 0,54  | 0,21  | 0,63  | 0,59  | 0,44  | 0,09  | 0,54  | 1,00  |       |       |      |       |      |
| T                           | 0,20  | 0,20  | 0,25  | 0,26  | 0,18  | -0,37 | 0,32  | 0,14  | 1,00  |       |      |       |      |
| LF                          | 0,72  | 0,38  | 0,83  | 0,83  | 0,75  | 0,34  | 0,83  | 0,59  | 0,27  | 1,00  |      |       |      |
| pH                          | 0,21  | 0,17  | 0,02  | 0,08  | 0,18  | 0,25  | -0,01 | 0,02  | -0,31 | 0,10  | 1,00 |       |      |
| Q                           | -0,52 | -0,37 | -0,74 | -0,68 | -0,58 | -0,24 | -0,82 | -0,64 | -0,22 | -0,78 | 0,08 | 1,00  |      |
| SNK                         | 0,81  | 0,53  | 0,75  | 0,86  | 0,48  | 0,08  | 0,66  | 0,55  | 0,32  | 0,71  | 0,06 | -0,56 | 1,00 |
| <b>Zängerlehof - Q70</b>    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
|                             | Na    | K     | Mg    | Ca    | Cl    | NO3   | SO4   | Si    | T     | LF    | pH   | Q     | SNK  |
| Na                          | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| K                           | 0,47  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| Mg                          | 0,67  | 0,23  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| Ca                          | 0,61  | 0,30  | 0,88  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| Cl                          | 0,51  | 0,06  | 0,69  | 0,64  | 1,00  |       |       |       |       |       |      |       |      |
| NO3                         | 0,33  | -0,17 | 0,48  | 0,33  | 0,58  | 1,00  |       |       |       |       |      |       |      |
| SO4                         | 0,44  | 0,24  | 0,68  | 0,79  | 0,52  | 0,00  | 1,00  |       |       |       |      |       |      |
| Si                          | 0,31  | 0,03  | 0,24  | 0,14  | 0,15  | 0,11  | 0,08  | 1,00  |       |       |      |       |      |
| T                           | 0,07  | 0,17  | 0,17  | 0,27  | 0,24  | -0,46 | 0,57  | -0,08 | 1,00  |       |      |       |      |
| LF                          | 0,55  | 0,15  | 0,85  | 0,85  | 0,78  | 0,38  | 0,83  | 0,17  | 0,34  | 1,00  |      |       |      |
| pH                          | 0,27  | 0,09  | 0,17  | 0,11  | 0,17  | 0,30  | 0,03  | 0,23  | -0,31 | 0,18  | 1,00 |       |      |
| Q                           | 0,25  | -0,04 | -0,21 | -0,28 | 0,00  | 0,28  | -0,39 | -0,10 | -0,39 | -0,31 | 0,26 | 1,00  |      |
| SNK                         | 0,76  | 0,46  | 0,75  | 0,85  | 0,39  | 0,09  | 0,70  | 0,14  | 0,28  | 0,69  | 0,15 | -0,13 | 1,00 |
| <b>Zängerlehof - Q80</b>    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
|                             | Na    | K     | Mg    | Ca    | Cl    | NO3   | SO4   | Si    | T     | LF    | pH   | Q     | SNK  |
| Na                          | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| K                           | 0,25  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| Mg                          | 0,92  | 0,15  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| Ca                          | 0,72  | 0,24  | 0,83  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |      |       |      |
| Cl                          | 0,70  | 0,04  | 0,82  | 0,67  | 1,00  |       |       |       |       |       |      |       |      |
| NO3                         | 0,55  | -0,21 | 0,54  | 0,24  | 0,58  | 1,00  |       |       |       |       |      |       |      |
| SO4                         | 0,53  | 0,25  | 0,65  | 0,86  | 0,51  | -0,03 | 1,00  |       |       |       |      |       |      |
| Si                          | 0,48  | 0,14  | 0,30  | 0,12  | 0,12  | 0,05  | 0,06  | 1,00  |       |       |      |       |      |
| T                           | -0,01 | 0,15  | 0,11  | 0,32  | 0,22  | -0,35 | 0,50  | -0,20 | 1,00  |       |      |       |      |
| LF                          | 0,79  | 0,17  | 0,91  | 0,86  | 0,83  | 0,35  | 0,81  | 0,15  | 0,27  | 1,00  |      |       |      |
| pH                          | 0,27  | 0,07  | 0,21  | 0,13  | 0,21  | 0,27  | 0,09  | 0,25  | -0,33 | 0,22  | 1,00 |       |      |
| Q                           | 0,48  | -0,13 | 0,34  | -0,01 | 0,29  | 0,68  | -0,25 | 0,26  | -0,42 | 0,04  | 0,14 | 1,00  |      |
| SNK                         | 0,78  | 0,28  | 0,78  | 0,85  | 0,46  | 0,18  | 0,78  | 0,24  | 0,22  | 0,77  | 0,18 | 0,04  | 1,00 |

| Zängerlehof - Q90 |      |       |      |      |       |       |       |       |       |      |      |       |      |
|-------------------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|
|                   | Na   | K     | Mg   | Ca   | Cl    | NO3   | SO4   | Si    | T     | LF   | pH   | Q     | SNK  |
| Na                | 1,00 |       |      |      |       |       |       |       |       |      |      |       |      |
| K                 | 0,29 | 1,00  |      |      |       |       |       |       |       |      |      |       |      |
| Mg                | 0,93 | 0,24  | 1,00 |      |       |       |       |       |       |      |      |       |      |
| Ca                | 0,81 | 0,23  | 0,90 | 1,00 |       |       |       |       |       |      |      |       |      |
| Cl                | 0,77 | 0,00  | 0,86 | 0,75 | 1,00  |       |       |       |       |      |      |       |      |
| NO3               | 0,44 | -0,14 | 0,44 | 0,32 | 0,71  | 1,00  |       |       |       |      |      |       |      |
| SO4               | 0,59 | 0,30  | 0,68 | 0,82 | 0,51  | 0,01  | 1,00  |       |       |      |      |       |      |
| Si                | 0,31 | 0,10  | 0,24 | 0,10 | -0,02 | -0,45 | 0,13  | 1,00  |       |      |      |       |      |
| T                 | 0,02 | 0,19  | 0,07 | 0,25 | 0,05  | -0,31 | 0,55  | -0,08 | 1,00  |      |      |       |      |
| LF                | 0,87 | 0,29  | 0,95 | 0,91 | 0,83  | 0,39  | 0,79  | 0,16  | 0,19  | 1,00 |      |       |      |
| pH                | 0,28 | 0,04  | 0,31 | 0,32 | 0,38  | 0,31  | 0,25  | -0,08 | -0,22 | 0,34 | 1,00 |       |      |
| Q                 | 0,36 | -0,22 | 0,33 | 0,10 | 0,38  | 0,59  | -0,24 | -0,01 | -0,64 | 0,21 | 0,22 | 1,00  |      |
| SNK               | 0,72 | 0,37  | 0,78 | 0,93 | 0,55  | 0,05  | 0,88  | 0,15  | 0,45  | 0,83 | 0,18 | -0,15 | 1,00 |

| Beurteilung des Korrelationskoeffizient r (SCHÖNWIESE, 2000) |                           |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 0,0                                                          | kein Zusammenhang         |
| 0,0 -0,5                                                     | schwacher Zusammenhang    |
| 0,5 – 0,8                                                    | mittlerer Zusammenhang    |
| 0,8 – 1,0                                                    | starker Zusammenhang      |
| 1,0                                                          | vollkommener Zusammenhang |

**Tabelle A 9: Übersicht über den Korrelationskoeffizient  $r$  bei direkter Korrelation der chemischen Parameter der Quelle Zipfeldobel**

| Zipfeldobel - gesamt |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|                      | Na    | K     | Mg    | Ca    | Cl    | NO3   | SO4   | Si    | T     | LF    | pH    | Q     | SNK  |
| Na                   | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| K                    | 0,64  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Mg                   | 0,77  | 0,44  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Ca                   | 0,54  | 0,10  | 0,62  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Cl                   | 0,21  | 0,36  | 0,23  | -0,01 | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |      |
| NO3                  | -0,01 | 0,01  | 0,16  | 0,06  | 0,46  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |      |
| SO4                  | 0,28  | 0,34  | 0,25  | 0,17  | 0,80  | 0,55  | 1,00  |       |       |       |       |       |      |
| Si                   | 0,33  | -0,08 | 0,49  | 0,55  | -0,21 | -0,10 | -0,11 | 1,00  |       |       |       |       |      |
| T                    | 0,19  | 0,09  | 0,20  | 0,22  | 0,31  | -0,10 | 0,20  | 0,14  | 1,00  |       |       |       |      |
| LF                   | 0,44  | 0,20  | 0,56  | 0,50  | 0,47  | 0,27  | 0,43  | 0,32  | 0,53  | 1,00  |       |       |      |
| pH                   | 0,25  | 0,11  | 0,20  | 0,36  | -0,06 | -0,06 | 0,11  | 0,20  | -0,03 | 0,07  | 1,00  |       |      |
| Q                    | -0,46 | -0,21 | -0,46 | -0,48 | -0,53 | -0,19 | -0,61 | -0,31 | -0,48 | -0,71 | -0,13 | 1,00  |      |
| SNK                  | 0,66  | 0,22  | 0,69  | 0,90  | -0,20 | -0,07 | -0,02 | 0,54  | 0,10  | 0,38  | 0,35  | -0,29 | 1,00 |
| Zipfeldobel - Q70    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|                      | Na    | K     | Mg    | Ca    | Cl    | NO3   | SO4   | Si    | T     | LF    | pH    | Q     | SNK  |
| Na                   | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| K                    | 0,38  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Mg                   | 0,67  | 0,42  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Ca                   | 0,66  | 0,24  | 0,78  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Cl                   | -0,08 | 0,37  | 0,25  | 0,01  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |      |
| NO3                  | -0,25 | 0,39  | 0,14  | -0,12 | 0,86  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |      |
| SO4                  | 0,25  | 0,63  | 0,61  | 0,43  | 0,81  | 0,71  | 1,00  |       |       |       |       |       |      |
| Si                   | 0,34  | 0,20  | 0,52  | 0,34  | 0,17  | 0,01  | 0,40  | 1,00  |       |       |       |       |      |
| T                    | 0,40  | 0,34  | 0,34  | 0,51  | -0,20 | -0,38 | 0,06  | 0,21  | 1,00  |       |       |       |      |
| LF                   | 0,42  | 0,42  | 0,69  | 0,56  | 0,63  | 0,52  | 0,79  | 0,21  | 0,06  | 1,00  |       |       |      |
| pH                   | 0,11  | 0,11  | 0,14  | 0,40  | 0,23  | 0,07  | 0,35  | -0,08 | 0,37  | 0,26  | 1,00  |       |      |
| Q                    | -0,65 | -0,55 | -0,61 | -0,70 | -0,19 | -0,09 | -0,56 | -0,44 | -0,37 | -0,64 | -0,26 | 1,00  |      |
| SNK                  | 0,62  | 0,16  | 0,76  | 0,85  | -0,19 | -0,33 | 0,24  | 0,42  | 0,47  | 0,46  | 0,24  | -0,60 | 1,00 |
| Zipfeldobel - Q80    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|                      | Na    | K     | Mg    | Ca    | Cl    | NO3   | SO4   | Si    | T     | LF    | pH    | Q     | SNK  |
| Na                   | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| K                    | 0,55  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Mg                   | 0,56  | 0,43  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Ca                   | 0,39  | 0,10  | 0,65  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Cl                   | -0,08 | 0,37  | 0,36  | 0,00  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |      |
| NO3                  | -0,33 | 0,20  | 0,17  | 0,02  | 0,74  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |      |
| SO4                  | 0,03  | 0,49  | 0,50  | 0,23  | 0,89  | 0,76  | 1,00  |       |       |       |       |       |      |
| Si                   | 0,09  | -0,04 | 0,20  | 0,27  | -0,06 | -0,02 | 0,09  | 1,00  |       |       |       |       |      |
| T                    | 0,26  | 0,18  | 0,32  | 0,33  | 0,12  | -0,20 | 0,15  | 0,26  | 1,00  |       |       |       |      |
| LF                   | 0,19  | 0,26  | 0,68  | 0,41  | 0,66  | 0,47  | 0,69  | 0,11  | 0,38  | 1,00  |       |       |      |
| pH                   | 0,09  | 0,07  | -0,06 | 0,21  | 0,01  | -0,07 | 0,08  | -0,04 | 0,10  | -0,14 | 1,00  |       |      |
| Q                    | -0,31 | -0,27 | -0,46 | -0,29 | -0,28 | 0,01  | -0,43 | -0,21 | -0,56 | -0,62 | 0,01  | 1,00  |      |
| SNK                  | 0,58  | 0,18  | 0,68  | 0,87  | -0,23 | -0,30 | -0,01 | 0,30  | 0,40  | 0,31  | 0,17  | -0,34 | 1,00 |

| Zipfeldobel - Q90 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
|                   | Na    | K     | Mg    | Ca    | Cl    | NO3   | SO4   | Si    | T     | LF    | pH    | Q     | SNK  |
| Na                | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| K                 | 0,63  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Mg                | 0,58  | 0,40  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Ca                | 0,41  | 0,08  | 0,60  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |       |      |
| Cl                | -0,07 | 0,27  | 0,23  | -0,12 | 1,00  |       |       |       |       |       |       |       |      |
| NO3               | -0,21 | 0,08  | 0,18  | -0,03 | 0,66  | 1,00  |       |       |       |       |       |       |      |
| SO4               | 0,07  | 0,40  | 0,41  | 0,16  | 0,84  | 0,67  | 1,00  |       |       |       |       |       |      |
| Si                | 0,08  | -0,13 | 0,21  | 0,24  | -0,34 | -0,10 | -0,19 | 1,00  |       |       |       |       |      |
| T                 | 0,15  | 0,16  | 0,19  | 0,18  | 0,29  | -0,23 | 0,24  | 0,03  | 1,00  |       |       |       |      |
| LF                | 0,22  | 0,20  | 0,58  | 0,34  | 0,59  | 0,42  | 0,63  | 0,05  | 0,47  | 1,00  |       |       |      |
| pH                | 0,11  | 0,05  | 0,07  | 0,26  | -0,01 | -0,08 | 0,11  | -0,06 | 0,01  | -0,08 | 1,00  |       |      |
| Q                 | -0,21 | -0,21 | -0,23 | -0,26 | -0,23 | 0,17  | -0,35 | 0,05  | -0,63 | -0,50 | -0,05 | 1,00  |      |
| SNK               | 0,63  | 0,25  | 0,66  | 0,86  | -0,36 | -0,33 | -0,09 | 0,35  | 0,19  | 0,21  | 0,22  | -0,24 | 1,00 |

| Beurteilung des Korrelationskoeffizient r (SCHÖNWIESE, 2000) |                           |
|--------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 0,0                                                          | kein Zusammenhang         |
| 0,0 -0,5                                                     | schwacher Zusammenhang    |
| 0,5 – 0,8                                                    | mittlerer Zusammenhang    |
| 0,8 – 1,0                                                    | starker Zusammenhang      |
| 1,0                                                          | vollkommener Zusammenhang |

## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe.

---

Ort, Datum

Unterschrift