

ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG I. BR.  
INSTITUT FÜR HYDROLOGIE

Maria Friderich

# Untersuchungen zur Konnektivität von Sättigungsflächen



Diplomarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler  
Freiburg i. Br., 1. September 2009



ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG I. BR.  
INSTITUT FÜR HYDROLOGIE

Maria Friderich

# Untersuchungen zur Konnektivität von Sättigungsflächen

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler  
Koreferent: Dr. Jens Lange

Diplomarbeit im Studiengang Hydrologie

Freiburg i. Br., 1. September 2009





# Danksagung

## **Folgenden Personen gebührt ein Dankeschön:**

Prof. Dr. Markus Weiler für die Vergabe des Themas dieser Diplomarbeit sowie für die Betreuung und Unterstützung während der gesamten Diplomarbeit

Dr. Jens Lange für die Übernahme des Koreferats

Klemens Rosin für seine Zeit mich in SAGA und R einzuführen, seine Anregungen in Bezug auf den Versuchsaufbau und –durchführung, seine Ideen bei der Darstellung bestimmter Ergebnisse sowie die Diskussionen der Auswertung

Förster Philipp Schell vom Forstbezirk Schauinsland der Stadt Freiburg für die Bereitschaft mir das Gebiet in Freiburg-Ebnet im Staatswald für die Geländearbeit zur Verfügung zu stellen

Emil Blattmann für seine stets hilfreichen Ideen in Bezug auf die Materialien bei der Versuchsumsetzung

Dem Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre, stellvertretend hier Prof. Dr. Ernst E. Hildebrand, Dr. Helmer Schack-Kirchner und Gregor Koch für das Bereitstellen und Erklären der Cobra zur Bohrung der Löcher für die PVC-Rohre der Odyssey Data Logger

Dem Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), insbesondere sei hier Dipl. Ing. Ute Badde erwähnt, sowie dem Deutschen Wetterdienst für die Bereitstellung der Niederschlagsdaten der verwendeten Stationen und der Meteomedia GmbH für die Erlaubnis an die LUBW die Daten der Station Freiburg-Ebnet an mich weiterzugeben

Ein großer Dank gilt Stephanie Blum, Olivier Faber, Andreas Friderich, Anna Friderich, Carina Kögl, Vera Marx, Noémie Patz, Mandy Praechter, Maria Staudinger, Christian von Sperber, die mich alle während des umfangreichen Feldversuchs tatkräftig und ohne zu Klagen unterstützt haben

Freunden und Kommilitonen aus der Rhein- und Hebelstraße und dem Diplomandenraum für die nötigen Ablenkungen und Anregungen

Meiner Familie und vor allem meinem Vater, Thomas Friderich, für die großartige Unterstützung und Hilfe während meines gesamten Studiums



# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| Inhaltsverzeichnis                          | i         |
| Abbildungsverzeichnis                       | iii       |
| Tabellenverzeichnis                         | vii       |
| Notation                                    | ix        |
| Zusammenfassung                             | xi        |
| Abstract                                    | xiii      |
| <b>1 Einführung</b>                         | <b>1</b>  |
| 1.1 Problemstellung .....                   | 1         |
| 1.2 Motivation .....                        | 1         |
| <b>2 Stand der Forschung</b>                | <b>3</b>  |
| 2.1 Abflussbildung .....                    | 3         |
| 2.2 Konnektivität .....                     | 5         |
| <b>3 Untersuchungsgebiet</b>                | <b>11</b> |
| 3.1 Geologie .....                          | 11        |
| 3.2 Pedologie .....                         | 13        |
| 3.3 Vegetation .....                        | 15        |
| 3.4 Hydrometeorologie .....                 | 15        |
| <b>4 Material und Methoden</b>              | <b>19</b> |
| 4.1 Vorgehensweise .....                    | 19        |
| 4.2 Auswahl des Untersuchungsgebietes ..... | 20        |
| 4.3 Messmethoden .....                      | 21        |
| 4.3.1 PVC-Flasche .....                     | 22        |
| 4.3.2 Odyssey Data Rekorder .....           | 23        |
| 4.4 Datenauswertung .....                   | 26        |
| <b>5 Ergebnisse</b>                         | <b>31</b> |
| 5.1 Flurabstand der Probestellen .....      | 32        |
| 5.1.1 Variogrammodell mit Surfer 8 .....    | 34        |
| 5.1.2 Standardabweichung .....              | 40        |
| 5.1.3 Berechnete Variogrammodelle .....     | 42        |

---

|                 |  |           |
|-----------------|--|-----------|
| 5.2             | Anstieg der Wasserstände.....  | 44        |
| 5.3             | Konnektivität .....  | 47        |
| <b>6</b>        | <b>Diskussion</b>  | <b>53</b> |
| 6.1             | Flurabstand der Probestellen .....                                   | 54        |
| 6.2             | Anstieg der Wasserstände der Probestellen.....                       | 56        |
| 6.3             | Konnektivität .....  | 58        |
| <b>7</b>        | <b>Fazit und Ausblick</b>  | <b>61</b> |
| <b>8</b>        | <b>Literatur</b>   | <b>63</b> |
| <b>Anhang A</b> |  | <b>69</b> |
| A.1             | Untersuchungsgebiet.....   | 69        |
| A.2             | Messplan im Untersuchungsgebiet Ebnet .....                          | 72        |
| A.3             | Wasserstandsaufzeichnungen der Odyssey Water Capacitive Logger ..... | 77        |
| A.4             | Auswertung .....   | 95        |

# Abbildungsverzeichnis

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 3.1 | Lage des Untersuchungsgebiets und Darstellung des Topographischen Indexes des Untersuchungsgebietes .....   | 12 |
| Abbildung 3.2 | Bohrkern aus Bohrung für die Wasserstandsmessung bei OD 31952 .....   | 13 |
| Abbildung 3.3 | Bohrstockprofil des Standortes N4 .....   | 14 |
| Abbildung 3.4 | Monatsmittelwerte des Niederschlags 1961-90 von Freiburger Messstationen (DEUTSCHER WETTERDIENST 2009) und Niederschlagswerte der Station Freiburg-Ebnet für die Monate Mai, Juni und Juli 2009 (METEOMEDIA GMBH)....   | 17 |
| Abbildung 3.5 | Niederschlag während des Untersuchungszeitraums vom 01.05.-16.07.2009 (METEOMEDIA GMBH), einschließlich der Trennlinie bei 5 mm (rot), über welcher die Probestellen untersucht wurden.....   | 18 |
| Abbildung 4.1 | Die Probestellen vom Untersuchungsgebiet aufgetragen in Abhängigkeit ihrer Entfernungen zueinander .....  | 22 |
| Abbildung 4.2 | PVC-Flasche mit entsprechenden Wasserein- und Luftauslasslöchern .....  | 23 |
| Abbildung 4.3 | Fläschchen M6 und N5 im Untersuchungsgebiet. Beide waren sowohl bei dem Ereignis vom 26.05.2009 als auch vom 15.07.2009 mit Wasser gefüllt.....   | 23 |
| Abbildung 4.4 | Odyssey Water Capacitive Rekorder 1,0 m .....   | 24 |
| Abbildung 4.5 | Odyssey Water Capacitive Rekorder im Gelände. Der Blaue ist einer der neuen Odysseys und der graue ist ein älterer. Bei dem Blauen ist auch ein Ameisennest zu sehen, dass sich in der Abdeckung (halbe PET-Flasche) gegründet hat. ....  | 24 |
| Abbildung 4.6 | Skizze eines charakteristischen Variogrammes mit Nugget, Variogrammwert bei der Distanz $h = 0$ , Korrelationslänge als Maß für die Glattheit der räumlichen Verteilung der Variablen und Sill als Variogrammniveau (entspricht der Varianz der Variablen) (verändert nach BLÖSCHL 2006)..... | 27 |
| Abbildung 5.1 | Darstellung der kumulierten relativen Häufigkeit der minimalen Flurabstände der Odyssey Rekorder für bestimmte Niederschlagsereignisse .....  | 33 |
| Abbildung 5.2 | Varianz (gestrichelte Linie), experimentelles (schwarz) und theoretisches (blau) Variogramm der minimalen Flurabstände der Odyssey Rekorder des Niederschlagsereignisses vom 15.05.2009 (a) und vom 15.07.2009 (b) .....  | 35 |
| Abbildung 5.3 | Räumliche Interpolation mit Kriging des visuell angepassten Variogrammmodells für die minimalen Flurabstände der Odysseys und der Fläschchen für die Niederschlagsereignisse vom 15.05.2009 (a) und 15.07.2009 (b).....   | 36 |
| Abbildung 5.4 | Räumliche Interpolation mit Kriging der minimalen Flurabstände der Odysseys und Fläschchen für die Niederschlagsereignisse vom 15.05.2009 (a) und 15.07.2009 (b).....   | 37 |

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| Abbildung 5.5  | Varianz (gestrichelt), experimentelles (schwarz) mit Paaren und theoretisches (blau) Variogramm (oben) und räumliche Interpolation mit Kriging (unten) des visuell angepassten Variogrammmodells der minimalsten Flurabstände über den Zeitraum vom 01.05.2009 bis 16.07.2009 ..... | 38 |
| Abbildung 5.6  | Darstellung des Variationskoeffizienten aus den experimentellen Variogrammen von den Fläschchen und den Odysseys gegenüber dem Niederschlag.....  | 39 |
| Abbildung 5.7  | Räumliche Interpolation mit Kriging der Standardabweichung der minimalen Flurabstände der Odysseys über die untersuchten Niederschlagsereignisse .....  | 40 |
| Abbildung 5.8  | Vergleich einer Auswahl von 5 Odyssey Rekorder (31484, 31930, 31931, 31939, 31951), die eine sehr unterschiedliche Standardabweichung aufweisen, über die Zeit und mit dem gefallenen Niederschlag.....   | 41 |
| Abbildung 5.9  | Darstellung der Korrelationslängen von den Variogrammmodellen Gauss, Power und Spherical gegen die Zeit und mit dem gefallenen Niederschlag .....   | 42 |
| Abbildung 5.10 | Darstellung der Korrelationslängen der Variogrammmodelle Gauss, Power und Spherical gegen den Niederschlagsmenge pro Tag für die untersuchten Ereignisse mit den jeweiligen Regressionsgeraden, -gleichungen und dem Bestimmtheitsmaß.....  | 43 |
| Abbildung 5.11 | Darstellung der kumulierten relativen Häufigkeit der maximalen Anstiege des Wasserstandes in den Odyssey Probestellen der für bestimmte Niederschlagsereignisse .....   | 45 |
| Abbildung 5.12 | Räumliche Interpolation mit Kriging über den Gesamtanstieg vom 01.05.2009 bis 16.07.2009 .....  | 46 |
| Abbildung 5.13 | Räumliche Interpolation mit Kriging mit den Werten des maximalen Wasserspiegelanstiegs beim Niederschlagsereignis vom 15.07.2009.....   | 47 |
| Abbildung 5.14 | Darstellung des Flurabstandes [cm] gegen den Niederschlag [mm] für vier Odyssey Rekorder .....  | 48 |
| Abbildung 5.15 | Darstellung des Anteils aller Zellen, die mit dem Ausfluss verbunden sind, in Abhängigkeit der Distanz für verschiedene Niederschlagsereignisse.....  | 50 |
| Abbildung 5.16 | Darstellung des Anteils aller Zellen, die mit dem Ausfluss verbunden sind, in Abhängigkeit der Distanz für den 15.07.2009 zu verschiedenen Uhrzeiten .....  | 51 |

## Anhang

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Abbildung A. 1 | Messplan des Untersuchungsgebietes Ebnet.....            | 72 |
| Abbildung A. 2 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "30369" ..... | 77 |
| Abbildung A. 3 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "30371" ..... | 78 |
| Abbildung A. 4 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "30372" ..... | 78 |
| Abbildung A. 5 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31483" ..... | 79 |
| Abbildung A. 6 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31484" ..... | 79 |
| Abbildung A. 7 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31485" ..... | 80 |
| Abbildung A. 8 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31487" ..... | 80 |
| Abbildung A. 9 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31489" ..... | 81 |

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| Abbildung A. 10 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31495" ..... | 81 |
| Abbildung A. 11 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31498" ..... | 82 |
| Abbildung A. 12 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31929" ..... | 82 |
| Abbildung A. 13 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31930" ..... | 83 |
| Abbildung A. 14 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31931" ..... | 83 |
| Abbildung A. 15 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31932" ..... | 84 |
| Abbildung A. 16 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31933" ..... | 84 |
| Abbildung A. 17 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31934" ..... | 85 |
| Abbildung A. 18 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31935" ..... | 85 |
| Abbildung A. 19 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31936" ..... | 86 |
| Abbildung A. 20 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31937" ..... | 86 |
| Abbildung A. 21 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31939" ..... | 87 |
| Abbildung A. 22 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31940" ..... | 87 |
| Abbildung A. 23 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31941" ..... | 88 |
| Abbildung A. 24 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31942" ..... | 88 |
| Abbildung A. 25 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31943" ..... | 89 |
| Abbildung A. 26 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31944" ..... | 89 |
| Abbildung A. 27 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31945" ..... | 90 |
| Abbildung A. 28 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31946" ..... | 90 |
| Abbildung A. 29 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31947" ..... | 91 |
| Abbildung A. 30 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31948" ..... | 91 |
| Abbildung A. 31 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31950" ..... | 92 |
| Abbildung A. 32 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31951" ..... | 92 |
| Abbildung A. 33 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31952" ..... | 93 |
| Abbildung A. 34 | Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31953" ..... | 93 |





# Tabellenverzeichnis

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tabelle 2.1 | Überblick über die Verwendung des Begriffes der Konnektivität .....  | 8  |
| Tabelle 5.1 | Zusammenfassung der untersuchten Niederschlagsereignisse mit der jeweiligen Niederschlagsmenge (*21,6 mm statt 19,5 mm, das heißt 2,1 mm mehr, da am 27.05.2009 von 0:00 bis 2:00 Uhr noch 2.1 direkt im Anschluss an das Ereignis vom 26.05.2009 gefallen sind) ..... | 31 |
| Tabelle 5.2 | Niederschlagsintensität für die untersuchten Ereignisse .....  | 32 |
| Tabelle 5.3 | Statistische Kenngrößen des Anstieges vom 15.07.2009, des Anstieges und dem minimalsten Flurabstand im Zeitraum vom 01.05.2009-16.07.2009 und der Standardabweichung der minimalen Flurabstände der Odyssey Rekorder für die untersuchten Ereignisse .....             | 47 |
| Tabelle 5.4 | Der notwendige Niederschlag damit der Boden gesättigt wäre, berechnet aus den linearen Regressionsgleichungen. ....  | 49 |

## Anhang

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| Tabelle A. 1  | Gauß-Krüger Koordinaten zur Begrenzung des Untersuchungsgebietes in Freiburg-Ebnet .....   | 69 |
| Tabelle A. 2  | Bodenbestimmung am Standort N4 des Untersuchungsgebietes .....   | 70 |
| Tabelle A. 3  | Bodenbestimmung am Standort G1 des Untersuchungsgebietes .....   | 70 |
| Tabelle A. 4  | Bodenbestimmung am Standort G8 des Untersuchungsgebietes .....   | 70 |
| Tabelle A. 5  | Bodenbestimmung am Standort 31487 des Untersuchungsgebietes .....  | 71 |
| Tabelle A. 6  | Gauß-Krüger Koordinaten der Probestellen im Untersuchungsgebiet .....  | 73 |
| Tabelle A. 7  | Gefallener Niederschlag pro Stunde an der Station Freiburg-Ebnet für den 15.07.2009 .....  | 76 |
| Tabelle A. 8  | Datenaufzeichnung der Odyssey Rekorder über den Untersuchungszeitraum .....  | 94 |
| Tabelle A. 9  | Zusammenfassung der Ergebnisse der einzelnen Odyssey Rekorder in Bezug auf den Wasserspiegelanstieg vom 01.05.-16.07.2009, den minimalsten Flurabstand über den Zeitraum vom 01.05.-16.07.2009 und der Standardabweichung der minimalen Flurabstände der untersuchten Ereignisse ..... | 95 |
| Tabelle A. 10 | Statistische Kenngrößen des experimentellen Variogramms und Varianz und Korrelationslänge des visuell und der berechneten angepassten Variogrammmodelle .....  | 96 |



# Notation

## Abkürzungen

|          |  |
|----------|--|
| Ah       | humoser Oberbodenhorizont  |
| AWST     | automatische Wetterstation   |
| BLUE     | best linear unbiased estimators  |
| Br.      | Breisgau   |
| Bv       | verbraunter, verlehmteter Unterbodenhorizont   |
| c0       | carbonatfrei   |
| GOK      | Geländeoberkante   |
| Hauptbhf | Hauptbahnhof   |
| HCl      | Salzsäure  |
| HRU      | hydrological runoff unit   |
| HW       | Hochwert   |
| i.       | im   |
| Konnekt. | Konnektivität  |
| L-Mull   | organischer Horizont aus Ansammlung von nicht und wenig zersetzter Pflanzensubstanz an der Bodenoberfläche |
|          |  |
| Ls2      | schwach sandiger Lehm  |
| Lt2      | schwach toniger Lehm   |
| Lu       | schluffiger Lehm   |
| MIN      | Minimum  |
| MW       | Mittelwert   |
| N        | Niederschlag   |
| NN       | Normalnull   |
| OD       | Odyssey Water Capacitive Rekorder  |
| PET      | Polyethylenterephthalat  |
| PVC      | Polyvinylchlorid   |
| RW       | Rechtswert   |
| Slu      | schluffig, lehmiger Sand   |
| Stdabw   | Standardabweichung   |
| unders.  | untersuchte  |
| Ut4      | stark toniger Schluff  |
| ü.       | über   |

|          |                       |
|----------|-----------------------|
| Varkoeff | Variationskoeffizient |
| vgl.     | vergleiche            |
| VSA      | variable source area  |

## Symbole

|                   |  |      |
|-------------------|--|------|
| $A$               | Korrelationslänge                            | [m]  |
| $\beta$           | Hangneigung                                  | [°]  |
| $\hat{\gamma}(h)$ | Semivarianz                                  | []   |
| $c_v$             | Variationskoeffizient                        | []   |
| $F$               | Flurabstand                                  | [cm] |
| $h$               | Distanz                                      | [m]  |
| $K_{\max}$        | Varianz                                      | []   |
| $n$               | Anzahl der Versuchsstandorte                 | []   |
| $n(h)$            | Anzahl der Paare des Versuchsstandortes      | []   |
| $R^2$             | Bestimmtheitsmaß                             | []   |
| $Z(x_i)$          | Wert der Varianz $x$ am Versuchsstandort $i$ | []   |

## Zusammenfassung

Untersuchungen zu Sättigungsoberflächenabflussbildung zeigten immer wieder die hohe Variabilität bei der Ausbildung von Sättigungsflächen. Die Abhängigkeit von Niederschlagsmenge, das heißt, je größer das Ereignis desto ausgedehnter, aber auch desto heterogener sind die Sättigungsflächen, ist insbesondere in humiden Gebieten zu beobachten.

Die Konnektivität auch verbunden mit Sättigungsoberflächenabfluss rückte in den letzten Jahren immer mehr ins Blickfeld. Aufgrund der Heterogenität bei der Ausbildung von Sättigungsflächen waren auch immer mehr die möglichen Verbindungen/Wasserfließwege zwischen den einzelnen gesättigten Gebieten von Interesse. Der Grad an Konnektivität wird von McDONNELL et al. (2007) als ein Maß für die Parametrisierung der kleinskaligen Heterogenitäten in einem Einzugsgebiet beschrieben.

Daher wurde versucht mit Hilfe dieser Diplomarbeit diese Verbindungen kleinräumig mit Hilfe von Odyssey Water Capacitive Rekordern und PVC-Fläschchen zu untersuchen. Dafür wurde ein Messnetz mit 199 Probestellen auf einer Fläche von etwa 3770 m<sup>2</sup> in einem Waldgebiet in der Nähe von Freiburg-Ebnet aufgebaut. Der Abstand der Probestellen innerhalb einer Reihe betrug 3,5 m, wobei die Reihen 7 m auseinander lagen.

Es konnte ein Zusammenhang zwischen Ereignisgröße und den Flurabständen sowie den Anstiegen des Wasserstandes festgestellt werden. Durch den negativen Zusammenhang von Korrelationslänge und Niederschlagsmenge kann im Untersuchungsgebiet auf einen Anstieg der Variabilität mit zunehmendem Niederschlag geschlossen werden. Dies weist auf eine höhere Heterogenität bei zunehmender Ereignisgröße hin.

Der Oberflächenabfluss bildet sich im Untersuchungsgebiet überwiegend von Sättigungsflächen. Die gesättigten Bereiche entstehen überwiegend aufgrund von einem Anstieg des Grundwasserspiegels oder bei der Ausbildung eines schwebenden Grundwasserspiegels.

*Stichworte:* Sättigungsflächen, Sättigungsoberflächenabfluss, Heterogenität, Konnektivität, Oberflächenabfluss im Wald, Semivariogramm



## Abstract

Studies on saturation overland flow demonstrated the high variability at saturated areas generation. The dependency on the storm size is observed in particular in humid regions, i.e. the bigger the event the more inhomogeneous are the saturated areas.

The connectivity, associated with saturation overland, flow got more and more attention over the last years. Due to the heterogeneity of saturated areas during their development, the potential water flow paths/connections between the individual saturated areas are of special interest. McDONNELL et al. (2007) describe the degree of connectivity as a measure for the parameterizations of the small-scale heterogeneities in a catchment.

In this diploma thesis, it was attempted to examine these connections with Odyssey Water Capacitive recorders and small PVC-bottles at a small scale. A monitoring network was installed with 199 sample locations on an area of about 3770 m<sup>2</sup> in woodland close to Freiburg-Ebnet. The distance between the sample locations in a row was 3,5 m, with was 7 m between the rows.

A correlation between storm size and the depth of water table as well as the rising of the water table could be determined. By the negative correlation of the spatial range and the storm size it can be concluded that the variability rises with increasing precipitation. This is a sign of a higher heterogeneity with increasing storm size.

The surface runoff in the study area is predominantly generated on saturated areas. These generally result from a rise of the groundwater table or from the development of a perched water table.

*Keywords:* saturated areas, saturation excess overland flow, heterogeneity, connectivity, surface runoff in the forest, semivariogram





# 1 Einführung

## 1.1 Problemstellung

Obwohl schon 1975 DUNNE et al. festhielten, dass die größte Änderung bei den Abflussraten durch die Entstehung und Ausweitung von Sättigungsflächenabfluss aufgrund von direktem Niederschlag auf die gesättigten Flächen erfolgt, rückte die Bedeutung von Sättigungsflächen für den Abfluss etwas in den Hintergrund. Das aufgestellte Modell der variablen Beitragsflächen (VSA) von HEWLETT & HIBBERT (1966) wurde über die letzten Jahre nicht hinterfragt, obwohl es zu immer neueren Erkenntnissen und Ideen kam.

Da das Wasser von gesättigten Flächen überwiegend von unterirdischem Abfluss (subsurface flow), der an die Oberfläche exfiltriert und von Niederschlag, der direkt auf die gesättigten Flächen fällt, stammt (DUNNE & BLACK 1970), zeigt der Sättigungsflächenabfluss als schnelle Abflusskomponente unter anderem die Interaktion zwischen unterirdischem und oberirdischem Abfluss sowie den Einzugsgebietseigenschaften, wie Topographie, Bodeneigenschaften, Wettercharakteristika und Vorbodenfeuchte (PESCHKE & SAMBALE 1999).

Eine dieser neuen Ideen ist die hydrologische Konnektivität als mögliches Konzept der Abflussbildung und Hochwasserkonzentration (BRACKEN & CROKE 2007), auch McDONNELL et al. (2007) sehen darin eine aufstrebende Eigenschaft in der Einzugsgebietswissenschaft als Maß zur Parametrisierung der kleinskaligen Heterogenitäten eines Einzugsgebietes. So ist die Dynamik der Abflussbildung abhängig von der hydrologischen Konnektivität zwischen dem Gerinnenetz und den umliegenden Hängen. Das bedeutet, dass um makroskalige Einzugsgebietsreaktionen in Bezug auf den Konnektivitätsgrad wiedergeben zu können, sind Untersuchungen der Verbindungen zwischen kleinskaligen Heterogenitäten und Messungen des Grades an Konnektivität notwendig. So steht im Vordergrund dieser Arbeit die kleinräumige Untersuchung, das heißt Messung, von Sättigungsflächen, um so mögliche Aussagen über die Verbindungen zwischen diesen Flächen also der Konnektivität treffen zu können.

## 1.2 Motivation

Das Ziel dieser Arbeit ist es durch eine kleinräumige Untersuchung auf einem Unterhang von abflussbeitragenden Flächen, Sättigungsflächen, die Verbindungen zwischen den Flächen detaillierter aufzulösen und so möglicherweise Aussagen über die Konnektivität treffen zu können.

können. Dabei sollen auch die Ursachen der Ausbildung von möglichen Sättigungsflächen im Untersuchungsgebiet berücksichtigt werden. Im Hintergrund stehen dabei die Möglichkeiten in Zukunft abflussbeitragende Flächen genauer zu quantifizieren beziehungsweise festzulegen, um so Aussagen darüber treffen zu können, was effektiv im Gerinne ankommt und ob es notwendig ist, abflussbeitragende Flächen in Modellen mehr zu berücksichtigen.

Die wichtigsten Fragen in meiner Arbeit, die sich in diesem Zusammenhang stellen, wurden zum Teil erst im Verlauf der Untersuchungen erkannt, sind:

- Woher kommt das Wasser einer vermutlichen Sättigungsfläche im Untersuchungsgebiet aus dem Gerinne oder über den Oberflächenabfluss am Hang bzw. den unterirdischen Abfluss?
- Gibt es Verbindungen zwischen den vermutlichen Sättigungsflächen und wenn wie sehen diese aus?
- Ist es möglich Sättigungsflächen mit den angewandten Methoden zu bestimmen und zu messen?

Zur Bearbeitung der aufgezeigten Fragestellungen erwies sich eine gute Vorbereitung der Felduntersuchungen als erforderlich. Dabei setzte die Umsetzung einen hohen zeitlichen Aufwand voraus. Gerinnenahe Sättigungsflächen erzeugen eine schnelle Abflussreaktion in Richtung Gerinne, da sich das Verhalten schlagartig ändern kann sobald es zur Oberflächensättigung entweder durch Anstieg des Wasserspiegels oder durch Sättigung der oberen Bodenschichten kommt (MCDONNELL 2003) und Felduntersuchungen zeigen in der Regel eine hohe Heterogenität und Komplexität der Niederschlags-Abflussbildungsprozesse in immer mehr Einzugsgebieten (MCDONNELL et al. 2007). Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit versucht mit Hilfe von verschiedenen Messmethoden im Feld gesättigte Flächen zu messen, um anhand der gewonnenen Parameter (Flurabstand und gefüllte PVC-Flasche) Aussagen über mögliche Sättigungsflächen und ihre Verbindungen anstellen zu können.

Im Hinblick auf die kleinräumige Auflösung der Probestellen im Untersuchungsgebiet und dem Aufwendungs Aufwand und im Vergleich zu früheren Arbeiten, die versucht haben Sättigungsflächen und ihre Verbindungen auszuweisen bzw. aufzuzeigen, hat das Thema somit einen sehr hohen aktuellen Stellenwert.

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Abflussbildung

Die Abflussbildung blickt in der Hydrologie auf einen langen Entwicklungsprozess zurück, der durch immer wieder neue Studien und Untersuchungen geformt, ergänzt und spezifiziert wurde. Dabei wurde festgestellt, dass der gesamte Prozess der Abflussbildung ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren ist.

Zuerst bekannt wurde die Abflussbildung durch HORTON (1933), der die Rolle der Infiltration innerhalb des hydrologischen Kreislaufs definierte und so wegweisend die Definition des Oberflächenabflusses zu Beginn des 20. Jahrhunderts bestimmt hat. BETSON (1964) hat diese Theorie der Abflussbildung aufgegriffen und mit Versuchen ein Model des teilflächigen Abflusses vorgestellt. Dies basiert darauf, dass nicht das gesamte Einzugsgebiet während eines moderat großen Niederschlagsereignisses zum Abfluss beiträgt, sondern Ereignisabfluss nur auf einem kleinen Teil der Einzugsgebietsfläche auftritt. Die Größe dieser Fläche ist abhängig von der Feuchtespeicherkapazität des Bodens und der Niederschlagsintensität.

HEWLETT & HIBBERT (1966) entwickelten dann das Konzept der variabel abflussbeitragenden Flächen (variable source area concept) bei der Untersuchung von kleinen bewaldeten Einzugsgebieten in humiden Gebieten. Sie gingen dabei von der Annahme aus, dass sämtlicher Abfluss unterirdischer Abfluss (subsurface flow) ist, es sei denn es gibt einen gegenteiligen Beweis dafür. Das Konzept der variabel abflussbeitragenden Flächen beschreibt im Wesentlichen das Überschreiten der Kapazität des Bodenprofils, das das Wasser weiterleitet. Durch den unterirdischen Abfluss von Wasser aus dem Oberhang, wenn dieses Wasser an die Oberfläche gelangt, wodurch die Gerinnelänge zunimmt. Um die schnellen Anstiege des Gerinneabflusses von Waldgebieten aus schon infiltriertem Wasser zu verstehen, unterschieden HEWLETT & HIBBERT (1966) zwischen zwei Arten von Abfluss. Von dem Anteil der zum Direktabfluss beiträgt, sind ein Teil die tatsächlichen Tropfen, die während des Ereignisses fallen und ein anderer Teil ist der sogenannte Translationsfluss (translatory flow). Das bedeutet, dass es einen Beitrag gibt, der schon vor dem Einsetzen des Niederschlags in der Bodenschicht gespeichert war. Dabei beeinflussen in hohem Maße folgende Faktorenkomplexe die Reaktionsfaktoren von kleinen Einzugsgebieten in humiden Gebieten: die durchschnittliche Tiefe der Bodenschicht, die bodenphysikalischen Eigenschaften, die durchschnittliche Hangneigung und die durchschnittliche Größe und Anzahl von größeren Ereignissen sowie die Landnutzung. Dabei stellten sie fest, dass der

Großteil des Direktabflusses von bewaldeten und anderen gut bewachsenen Gebieten unterirdischer Abfluss sein muss.

Zur Bestimmung der Ausweitung der Bildungsgebiete von Ereignisabfluss, das heißt, wie Flächen innerhalb eines Einzugsgebietes zum Ereignisabfluss beitragen, stellten BETSON & MARIUS (1969) daraufhin Untersuchungen in einem Einzugsgebiet in der Nähe von Waynesville, Nord Carolina, USA, an. Dabei stellten sie die Inhomogenität der Abflussreaktion innerhalb eines Einzugsgebietes fest. Diese wurde laut BETSON & MARIUS (1969) zu dieser Zeit auch durch andere Studien belegt.

DUNNE & BLACK (1970) untersuchten die Beiträge der Teilflächen zum Ereignisabfluss in einem kleinen Einzugsgebiet in Vermont und fanden heraus, dass in den Hochlandeinzugsgebieten von Vermont der Hauptanteil des Ereignisabflusses der Oberflächenabfluss von gesättigten Gebieten in Gerinnenähe ist. Das Wasser von diesen gesättigten Flächen stammt vor allem von unterirdischem Abfluss, der an die Oberfläche exfiltriert und von Niederschlag, der direkt auf die Flächen fällt. Dabei bilden die Sättigungsflächen im Wesentlichen nur ein erweitertes Gerinnenetz aus. Dieses zum Oberflächenabfluss beitragende Gebiet ist dynamisch, das bedeutet es variiert saisonal und im Laufe eines Ereignisses. Diese Fluktuationen können, so DUNNE & BLACK (1970), rational mit der Topographie, den Böden, der Vorfeuchte und den Niederschlagscharakteristika in Verbindung stehen. Die Bedeutung des Sättigungsflächenabflusses steigt mit zunehmender Größe des Niederschlagsereignisses.

DUNNE et al. (1975) verfolgten beziehungsweise erweiterten diesen Ansatz, indem sie untersuchten, ob die abflussbildenden Zonen in humiden Gebieten erkannt werden können und schlagen dafür verschiedene hydrologische, pedologische und vegetative Indikatoren zur Vorhersage der maximalen saisonalen Ausweitung gesättigter Bedingungen vor. Desweiteren halten sie fest, dass Horton'scher Oberflächenabfluss in humiden Gebieten, die nicht ernstlich gestört wurden, nicht auftritt und dass es in diesen Gebieten zumindest drei Abflussbildungsprozesse gibt, deren Bedeutung in Abhängigkeit von der Topographie, der Vorbodenfeuchte und der Ereignisgröße variiert. Dabei handelt es sich um unterirdischen Ereignisabfluss (subsurface stormflow), Wasserrückfluss (return flow) und den direkten Niederschlag auf Sättigungsflächen. Die letzteren beiden werden auch unter dem Begriff Sättigungsflächenabfluss zusammengefasst. Zur Bestimmung der Sättigungsflächen ist eine der besten Methode nach DUNNE et al. (1975) die Feldkartierung anhand von bestimmten Einzugsgebietseigenschaften wie Topographie, Basisabfluss, Vorbodenfeuchteindex und den Böden. Auf die Kartierung der Sättigungsflächen, im Brugga-Einzugsgebiet hat auch GÜNTNER (1997) in seiner Diplomarbeit zurückgegriffen, wobei er sich auf die Bodenmerkmale und die Zeigerpflanzen beschränkt hat. DUNNE et al. (1975) stellten fest, dass es möglich ist für Einzugsgebiet mit einer Größe von 5-8 km<sup>2</sup> die saisonale und inter-storm Variation der Sättigungsflächen durch wiederholte Feldkartierung zu bestimmen. Die Feldmessungen zeigen, dass sich die Sättigungsflächen mit dem Niederschlagsereignis ausweiten. Die größte Änderung bei den Abflussraten würde sich durch die Entstehung und

Ausweitung von Sättigungsflächenabfluss aufgrund von direktem Niederschlag auf die Sättigungsflächen ergeben. Der schwierigste zu quantifizierende Prozess ist die Rate, mit der der Rückfluss aus dem Boden über den niederen Schichten hervortritt.

Der Sättigungsflächenabfluss als schnelle Abflusskomponente zeigt, so PESCHKE & SAMBALE (1999) die Interaktion zwischen unterirdischem und oberirdischem Abfluss und Einzugsgebietseigenschaften wie Topographie, Bodeneigenschaften, Vorbodenfeuchte und Wettercharakteristika wie Niederschlagsintensität und -menge. Sie führten Niederschlags-Abfluss-Untersuchungen im Wernersbach-Einzugsgebiet in Ostdeutschland durch. Dabei stellten sie fest, dass die Abflussbildung hauptsächlich durch schnelle Abflusskomponenten ins besondere vom Sättigungsflächenabfluss bestimmt wird. Dieser trat nicht sofort auf, sondern setzte eine zu berücksichtigende Vorfeuchte voraus, um einen maximalen Beitrag leisten zu können.

GÜNTNER et al. (1999) verglichen topographische Indexberechnungen mit Feldkartierungen zur Einschätzung des Sättigungsflächenabflusses. Dabei stellten sie fest, dass wichtige Eigenschaften der räumlichen Struktur der Sättigungsflächen durch die Indexverteilung dargestellt werden konnte. Gleichzeitig zeigt aber der Vergleich der Indexverteilung mit der Feldkartierung einige Schwächen bei der Anwendung eines einfachen topographisch basierten Ansatzes zur Abschätzung der Gebiete mit Sättigungsflächenabfluss im Untersuchungsgebiet. Somit müssen andere Faktoren wie Geologie, klimatische Bedingungen oder räumlich variable Transmissivität mit berücksichtigt werden (GÜNTNER et al. 1999).

Den Einfluss einer verdichteten Pflugsohle auf den Sättigungsflächenabfluss untersuchten VERBIST et al. (2007). Dabei stellten sie fest, dass diese die Anzahl von Abflussereignissen infolge von Sättigungsflächenabfluss beeinflusst, so dass in der Regel schon Abfluss bei relativ geringen Niederschlagsintensitäten auftritt, bei denen sonst kein Abfluss und Erosion auftreten würde.

Der Oberflächenabfluss ist ein schneller und dynamischer Mechanismus des Wassertransports durch ein Einzugsgebiet (GODSEY et al. 2004).

## 2.2 Konnektivität

Konnektivität wurde über die letzten Jahre zu einem immer wichtigeren Prozess in der Einzugsgebietshydrologie (BRACKEN & CROKE 2007). Dabei wurde auch deutlich, dass der Begriff der Konnektivität noch keine eindeutige Definition erfahren hat und in den verschiedenen Disziplinen unterschiedlich verwendet wird (BRACKEN & CROKE 2007, FREEMAN et al. 2007, McDONNELL et al. 2007, PRINGLE 2001, PRINGLE 2003, TETZLAFF et al. 2007).

Hydrologische Konnektivität wurde von PRINGLE (2001) schon im ökologischen Sinn als unmittelbarer Wassertransfer von Materie, Energie und/oder Organismen in oder zwischen den Elementen des hydrologischen Kreislaufs definiert. PRINGLE (2003) hält fest, dass die Konnektivität oft in verschiedenen Zusammenhängen von unterschiedlichen ökologischen Disziplinen benutzt wird, um herauszufinden, inwieweit die anthropogenen Veränderungen der hydrologischen Konnektivität die ökologischen Muster regional und global beeinflussen. Aus Sicht der Hydrologen ist nach FREEMAN et al. (2007) die Konnektivität eine kontinuierliche Größe, da die gesamte Landschaft miteinander verbunden ist.

MCDONNELL et al. (2007) zeigen auf, dass eine wichtiger werdende Eigenschaft eines Einzugsgebietes für die Abflussbildung die Idee der Konnektivität ist. Die Auswirkungen der Heterogenität auf hydrologische Antworten zeigen sich durch die Fließwege des Wassers und dem Grad der Konnektivität dieser Fließwege sowie der Änderung der Konnektivität mit der Zeit als Ergebnis der Interaktionen von Klima- und Landschaftselementen. Dabei gilt der Grad der Konnektivität als ein Maß für die Parametrisierung der kleinskaligen Heterogenitäten in einem Einzugsgebiet. Auch BRACKEN & CROKE (2007) sehen die hydrologische Konnektivität als einen möglichen Ansatz in der Abflussbildung und der Hochwasserkonzentration. Dabei unterscheiden sie in der Hydrologie und der Geomorphologie in 3 sogenannte Haupttypen der Konnektivität: Landschaftskonnektivität, hydrologische Konnektivität und sedimentologische Konnektivität. Im Anschluss daran erstellen sie einen konzeptionellen Rahmen für die hydrologische Konnektivität, dem fünf Hauptkomponenten zugrunde liegen: Klima, Hangabflusspotential, Landschaftsstellung (position), Fließweg (delivery pathway) und laterale Pufferung. Die hydrologische Konnektivität ist abhängig von der Interaktion der Sättigungsflächen entlang den Gerinnen und Hangmulden und dem Mosaik von Flächen, die sensibel auf Starkregenereignisse sind. Dabei benötigt die einzugsgebietsskalige hydrologische Konnektivität anhaltende hochintensive Ereignisse im Gegensatz zur Hangskaligen, die schon durch Ereignisse mit kürzeren Dauern und niedrigeren Intensitäten verursacht werden kann. Es wird in der Abflussbildung in natürlichen Landschaften zwischen stationärer und dynamischer hydrologischer Konnektivität unterschieden. Unter stationärer Konnektivität werden räumliche Strukturen wie hydrologische Abflusseinheiten (HRUs) verstanden. Die dynamische Konnektivität bezieht sich sowohl auf die langzeitige Landschaftsentwicklung als auch auf die kurzfristige Variation in den Vorbedingungen und den Niederschlagsinputs ins System. Zur Messung wird von BRACKEN & CROKE (2007) der Ansatz des ‚Durchbruchvolumens‘ (volume to breakthrough) vorgestellt, das das akkumulierte Abflussvolumen pro Einheitsweite (unit width) an einer Stelle darstellt, bevor es zu einem Fluss an einer hangabwärts liegenden Stelle kommt. So kann die hydrologische Konnektivität als eine Funktion des tatsächlichen Abflusses gebildet von einer Fläche angesehen werden.

Die Konnektivität als ein vereinendes Thema in der Einzugsgebietsforschung zeigen TETZLAFF et al. (2007) anhand des Girnock-Einzugsgebiets in Schottland. Die hydrologische Konnektivität der Einzugsgebietslandschaften bestimmt den Massen- und Energiefluss in die Flusslandschaften und dies wiederum beeinflusst den biologischen Fluss von Organismen in und/oder aus den Flusslandschaften. Im Girnock-Einzugsgebiet wird der Unwetterabfluss hauptsächlich durch den Sättigungsflächenabfluss von den im Gebiet vorherrschenden Torfböden verursacht. Daraus ergibt sich ein schnelles Einzugsgebietsverhalten, da etwa 70-75% des Jahresabflusses von den schnellen hydrologischen Fließwegen kommen. In feuchteren Jahren kommt es so zu ausgedehnten Sättigungsflächen, die zu einem hohen Grad an Konnektivität zwischen den Hangfließwegen und dem Gerinnenetz führen.

Da Konnektivität eine strukturelle Eigenschaft ist, die nach WESTERN et al. (1998) nicht in multi-Gaussian random Feldern vorkommt, ist es nicht möglich sie mit traditionellen Semivariogrammen zu erfassen, weshalb sie bei ihren Untersuchungen in diesem Zusammenhang auf Indikator-Semivariogramme zurückgriffen. Dabei stellten sie fest, dass diese nicht sehr gut definiert sind, da abhängig von der Natur der räumlichen Strukturen die Konnektivität mit den Unterschieden in der Kontinuität der verschiedenen Schwellenwerte verbunden oder nicht verbunden werden kann. WESTERN et al. (2001) zeigen auf, dass Konnektivität eine Eigenschaft ist, die weder durch geostatistische Ansätze noch durch Hinweisgeostatistik erfasst wird. Dabei handelt es sich um geostatistische Ansätze, die die räumliche Variabilität in den zufälligsten räumlichen Wegen, die vereinbar sind mit der räumlichen Korrelation, annehmen. Aus diesem Grund schlagen sie die Anwendung von ‚Connectivity Functions‘ vor. Diese sind in der Lage zwischen räumlichen Strukturen, die sehr verschiedene Konnektivitätscharakteristika aufweisen, in Abhängigkeit von der räumlichen Anordnung der Struktur zwischen den Datenpunkten zu unterscheiden.

STIEGLITZ et al. (2003) untersuchten, inwieweit die hydrologische Konnektivität als Zustand, bei welchem ungleiche Bereiche am Hang über den unterirdischen Abfluss miteinander verbunden sind, möglicherweise den Nährstofftransport beeinflusst. Mit Modellsimulationen fanden sie heraus, dass zwei verschiedene hydrologische Zustände vorherrschen. Zum einen der trockene Zustand und zu anderen der feuchte Zustand, bei dem Hanggebiete über lateralen unterirdischen Abfluss und Bodenfeuchtestrukturen, die räumlich ausgerichtet sind, miteinander verbunden sind. Für sie erklärt die zeitlich veränderliche räumliche Heterogenität bzw. Konnektivität sowohl die Streuung innerhalb der biologischen Leistung entlang einem topographischen Verlauf als auch den Großteil der Variabilität beim Materialaustrag aus dem Einzugsgebiet in den täglichen bis saisonalen Zeitskalen. Obwohl die Simulationen und Beobachtungen den Beweis der variablen hydrologischen Konnektivität erbrachten, die in Einzugsgebieten unterschiedlicher Größe und Charakteristika auftritt, sehen STIEGLITZ et al. (2003), den Bedarf an zusätzlichen Versuchen zur Erlangung eines besseren Verständnisses der Mechanismen, die zu hydrologischer Konnektivität und zu Abwärtsbewegung von Wasser und Nährstoffen entlang des Hanges führen.

Die Messung der Konnektivität von Abflussbildungsgebieten anhand von Vegetationsstrukturen und Topographie ist ein Hilfsmittel zur Einschätzung der potentiellen Wasser- und Bodenverluste in Trockengebieten so MAYOR et al. (2008). Zur Quantifizierung der Konnektivität abflussbeitragender Flächen unter Berücksichtigung von Vegetation und Topographie entwickelten sie eine räumliche Metrik – FLOWLENGTH. Diese wird über den Durchschnitt sämtlicher Abflussweglängen von allen Zellen, das heißt möglichen Abflusswegen, in einer rasterbasierten Karte des Zielgebietes berechnet. Sie fanden heraus, dass die Korrelation zwischen FLOWLENGTH, Abfluss und Sedimentertrag mit der Ereignisgröße steigt.

Für JENSCO et al. (2009) steht die Konnektivität der Hang-Ufer-Wasserstände für die Verbindung zwischen den vorherrschenden Landschaftselementen des Einzugsgebietes (Hänge und Uferzonen) und dem Gerinnenetz. So ist die hydrologische Konnektivität zwischen den Hang-Ufer-Gerinne-Landschaftselementen räumlich heterogen und oft temporär instationär. Sie untersuchten die Beziehung zwischen der akkumulierten hangaufwärts liegenden Fläche und dem Auftreten und der Dauer der Konnektivität des flachen Grundwassers der Hang-Ufer-Gerinne-Einheit. Dabei stellten sie die Rahmenbedingungen der Landschaftsanalyse zur Ausweisung von Abflussbildungsgebieten vor basierend auf deren topographischen Charakteristika. Die Untersuchung weist darauf hin, dass die Landschaftsstruktur innerhalb des Einzugsgebiets, also Topographie und Topologie, eine primäre Steuerungsgröße der Abflussbildungsgebiete und der gesamten Kennzeichen der Einzugsgebietsreaktion ist.

Nochmals einen Überblick über die Verwendung des Begriffes der Konnektivität gibt Tabelle 2.1.

**Tabelle 2.1** Überblick über die Verwendung des Begriffes der Konnektivität

|   |   |
|---|---|
| Konnektivität<br>THE OXFORD ENGLISH DICTIONARY<br>(1989)        | Die Ausprägung oder der Grad oder das Maß (in verschiedenen Zusammenhängen) verbunden zu sein   |
| Hydrologische Konnektivität<br>PRINGLE (2001)                   | In ökologischem Sinn der unmittelbare Wassertransfer von Materie, Energie und/oder Organismen   |
| Hydrologische Konnektivität<br>STIEGLITZ et al. (2003)          | Voraussetzung, bei der ungleiche Bereiche am Hang über den unterirdischen Abfluss verbunden sind  |
| Konnektivität aus Sicht der Hydrologen<br>FREEMAN et al. (2007) | Kontinuierliche Größe, da gesamte Landschaft hydrologisch miteinander verbunden ist   |
| 3 Haupt'arten' der Konnektivität<br>BRACKEN & CROKE (2007)      | Landschaftskonnekt.<br>sedimentologische Konnekt.<br>Hydrologische Konnekt. – stationär & dynamisch   |
| Konnektivität<br>TETZLAFF et al. (2007)                         | Vereinendes Thema in Einzugsgebietswissenschaften<br>Bsp. hydrologische Konnekt. bestimmt Massen- & Energiefluss in Flusslandschaften und dies kann biologischen Fluss von Organismen in und/oder aus diesen beeinflussen |



|   |  |
|---|--|
| Konnektivität<br>McDONNELL et al. (2007)            | Grad an Konnekt. der Wasserfließwege zeigt Heterogenität auf hydrologische Antworten sowie die Änderung der Konnekt. mit der Zeit aufgrund von Interaktion von Klima- & Landschaftselementen – Maß für Parametrisierung der kleinskaligen Heterogenitäten in einem Einzugsgebiet |
| Hydrologische Konnektivität<br>JENSCO et al. (2009) | Entstehung zwischen Hang-Ufer-Gerinne-Landschaftselementen – heterogen und oft temporär instationär  |



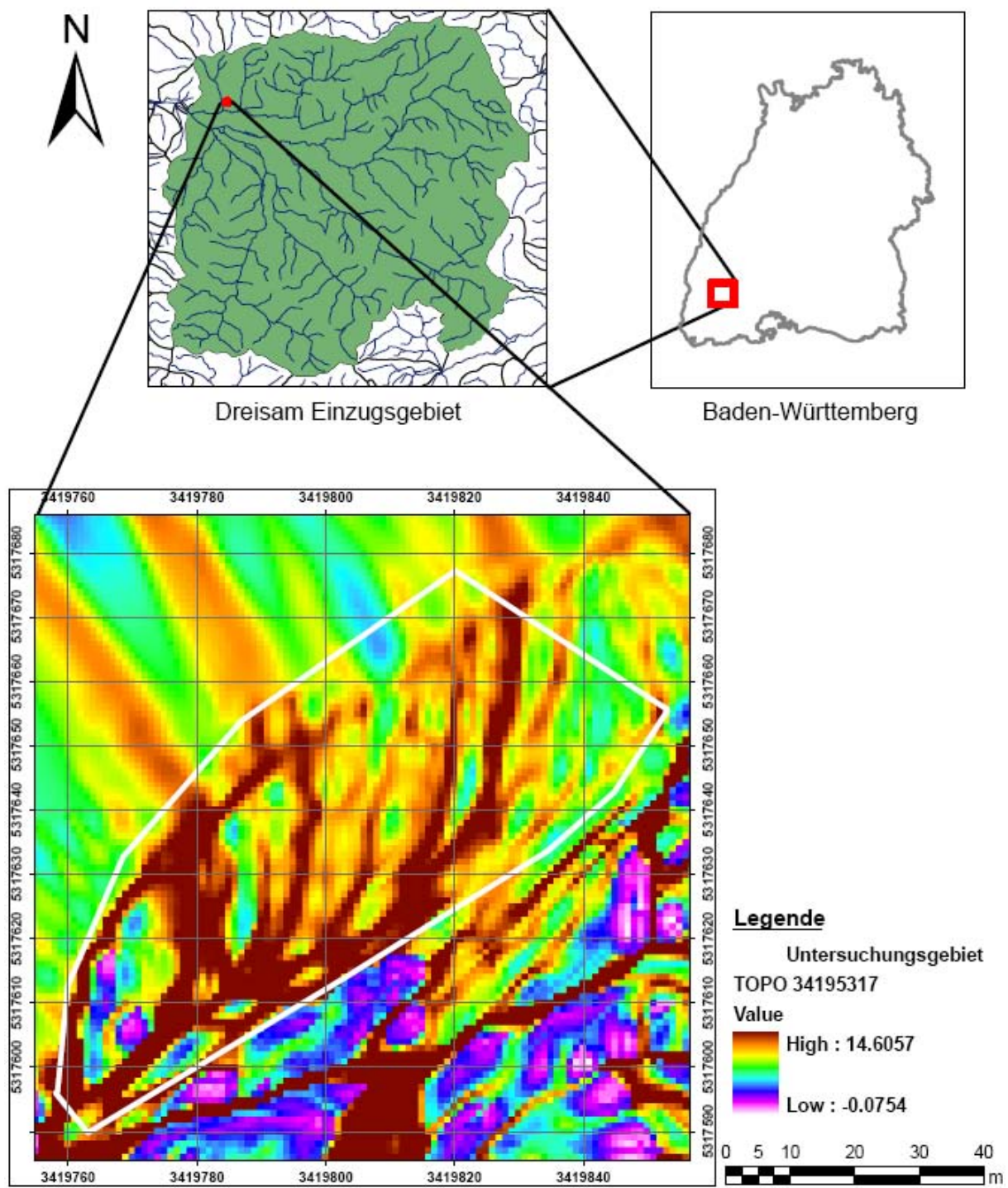
## 3 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im Südwesten Baden-Württembergs am Nordrand des Zartener Beckens in unmittelbarer Nähe zur Gemeinde Ebnet, siehe Abbildung 3.1. Es liegt auf einer Höhe von etwa 340 m ü. NN und hat eine Fläche von etwa 3770 m<sup>2</sup> (Für eine genauere Abgrenzung des Untersuchungsgebietes mit Hilfe von Koordinaten siehe Anhang, Tabelle A. 1).

### 3.1 Geologie

Die GEOLOGISCHE KARTE VON BADEN-WÜRTTEMBERG (1996) zeigt das Untersuchungsgebiet im Paragneis Grundgebirge und den holozänen Talauffüllungen. Ebenso wird ein kleinerer Schwemmfächer direkt unterhalb des Gebietes ausgewiesen. Dies unterstützen sowohl FRIEG (1987) als auch GROSCHOPF et al. (1996), wobei für letztere das Zartener Becken vor allem wegen seiner Grundwasservorräte von Bedeutung ist. Der Nordteil besitzt einen mächtigeren schluffärmeren oberen Abschnitt (24 m) als der Südteil. Im Nordteil fließt der unterirdische Abfluss hauptsächlich in einer rinnenartig eingetieften Zone gut durchlässiger Schotter und Kiese mit Durchlässigkeitswerten um die  $1\text{-}2 \cdot 10^{-3}$  m/s und mittleren Grundwasserfließgeschwindigkeiten von 4-6 m/d. In Trockenzeiten kann es so zu einer vollständigen Versickerung der an der Nordseite fließenden Flüsse wie Eschbach und Wagensteigbach nach dem Eintritt ins Zartener Becken kommen.

Nach FRIEG (1987) bestehen die bis zu mehreren Metern mächtigen holozänen Talauffüllungen aus Sand, Kies und Blöcken. Bei geringem Gefälle kann dies auch zu Ablagerung von Auelehm, wie zum Beispiel im Eschbachtal, führen. Die Schwemmkegel der Nebentäler setzen sich überwiegend aus Lehm, Sand und groben Geröll zusammen. Sie haben wie die Aueablagerungen ein holozänes Alter, da sie sich mit diesen vermischen oder die Niederterrasse überlagern.



**Abbildung 3.1** Lage des Untersuchungsgebiets und Darstellung des Topographischen Indexes des Untersuchungsgebietes

## 3.2 Pedologie

Bei der Bohrung der Löcher für die PVC-Rohre zur Wasserstandsmessung konnte man durch den 4 cm starken Bohrkern des Bohrgerätes die grobe Zusammensetzung des Bodens erkennen. Bei sämtlichen Bohrkernen wurde vor allem der A- und B-Horizont deutlich, was auch auf Abbildung 3.2 zu sehen ist.



**Abbildung 3.2** Bohrkern aus Bohrung für die Wasserstandsmessung bei OD 31952

In sämtlichen Bohrkernen konnte ein Skelettanteil von bis zu 10-25% festgestellt werden, er hatte eine Durchschnittsgröße von etwa 3 cm Durchmesser. Der Skelettanteil verteilte sich über das gesamte Bohrprofil und konnte auch schon bei der Einbringung der Fläschchen Anfang März 2009 immer wieder beobachtet werden.

Zur Bestimmung des Bodentyps wurden am 29. Juli 2009 im Gelände vier Bohrstockproben mit einem Pürckhauer-Bohrstock von 1 m Länge genommen. Bei den vier Standorten wurde darauf geachtet, dass sie in der Nähe von Probestellen liegen. Die Entwicklungstiefe des Bodens lag bei allen Bohrstockproben über der erreichten Tiefe, das bedeutet, es liegen gut entwickelte Böden mit mindestens 100 cm Mächtigkeit vor. Sämtliche Standorte hatten einen pH-Wert von 6 in allen Horizonten, reagierten nicht auf eine 10%ige HCl-Lösung und sind somit carbonatfrei. Bei der Humusform handelte es sich ausschließlich um L-Mull, wobei die L-Lage, das heißt die Streuauflage, teils nur noch gering vorhanden war. Mull ist eine Humusform von Böden, die nährstoffreich und biotisch aktiv ist, so BLUM (2007). Dabei kommt es zu einer schnellen Zersetzung, Humifizierung und Vermischung durch die Bodenfauna von anfallenden, leicht abbaubaren Vegetationsrückständen.



Bei den Horizonten zeigte sich eine ähnliche Aufteilung in allen Profilen (siehe Tabelle A. 2 bis Tabelle A. 5 im Anhang). In Abbildung 3.3 ist ein Beispiel dafür zu sehen.



**Abbildung 3.3** Bohrstockprofil des Standortes N4

Die typischen Horizontabfolgen waren Ah-Bv-Bv/C. Der Ah-Horizont war meist von einer graubraunen Farbe, erreichte eine Tiefe von 10-19 cm und unterschied sich nur in seiner Textur. Aufgrund des Ausgangsgesteins, der Entwicklungstiefe des Bodens und den oben erwähnten Eigenschaften handelt es sich hier um eine Braunerde. Beim Standort G1 könnte aufgrund der Feuchtigkeit und der etwas anderen Farbgebung (siehe Tabelle A. 3) auch ein Braunerde-Pseudogley vorliegen. Aber dafür müsste ein Bodenaufschluss, über den mehr Informationen gewonnen werden können, gemacht werden. Auffallend war auch der Standort 31487 (siehe Tabelle A. 5) durch die rötliche Farbe im Bv-C-Horizont und den hohen Sandanteil im Unterboden. Dies ist vermutlich auf ehemalige Überschwemmungen des vor dem Untersuchungsgebiet abzweigenden Gerinnes oder auf einen ehemaligen anderen Gerinneverlauf zurückzuführen.

HÄDRICH & STAHR (2001) haben festgestellt, dass an den Unterhängen und Hangfüßen der lössbeeinflussten, submontanen Fußzone des Gneisschwarzwaldes (Mittlerer und Südschwarzwald) auf etwa 300-500 m ü NN bei größerer Lössbeteiligung die eingetretene Sackung und Tonverlagerung zu einer Verdichtung im B-Horizont führen kann. Dies kann wiederum im Winter und Frühjahr dazu führen, dass die Niederschläge und das Hangwasser nicht frei versickern können, wodurch zeitweise Stauwasser bei gleichzeitigem Luftmangel im Profil auftreten kann. Es kommt so zur Entwicklung von Pseudogley-Parabraunerden und Norm-Pseudogleyen.

STAHR (1979) untersuchte im Rahmen seiner Habilitation auch Bodenprofile im periglazialen Gneisschwarzwald. Das Attentalprofil im Nachbartal auf 390m ü. NN ist südexponiert und hat eine Neigung von 70%. Durch die Tannen- und Buchennutzung kommt es zu einer Mullmoder-Humusform. Insgesamt führen diese Eigenschaften zu einer hangvergleyten Braunerde-Parabraunerde.

### 3.3 Vegetation

In der Baumschicht dominieren das Untersuchungsgebiet mehrjährige Laubbäume wie Kirsche (*Prunus avium* L.) und Linde (*Tilia* L.) und in der Krautschicht dominieren Brennessel (*Urtica* L.), Brombeere (*Rubus fruticosus*), Farn und Taubnessel (*Lamium* L.), die im Großteil des Untersuchungsgebietes im Frühjahr und Sommer in der Regel bis zu 50 cm hoch wird. Vereinzelt sind auch Eschen- und Ahornsprösslinge sowie Buche, Holunder und Hasel ansässig. Hinzu kommen noch stellenweise Drüsiges Springkraut (*Impatiens glandulifera*) und Kuhnelke (*Vaccaria*). Aufgrund des Vorkommens der Brennessel über das gesamte Untersuchungsgebiet kann von einer guten Stickstoffversorgung im Untersuchungsgebiet ausgegangen werden.

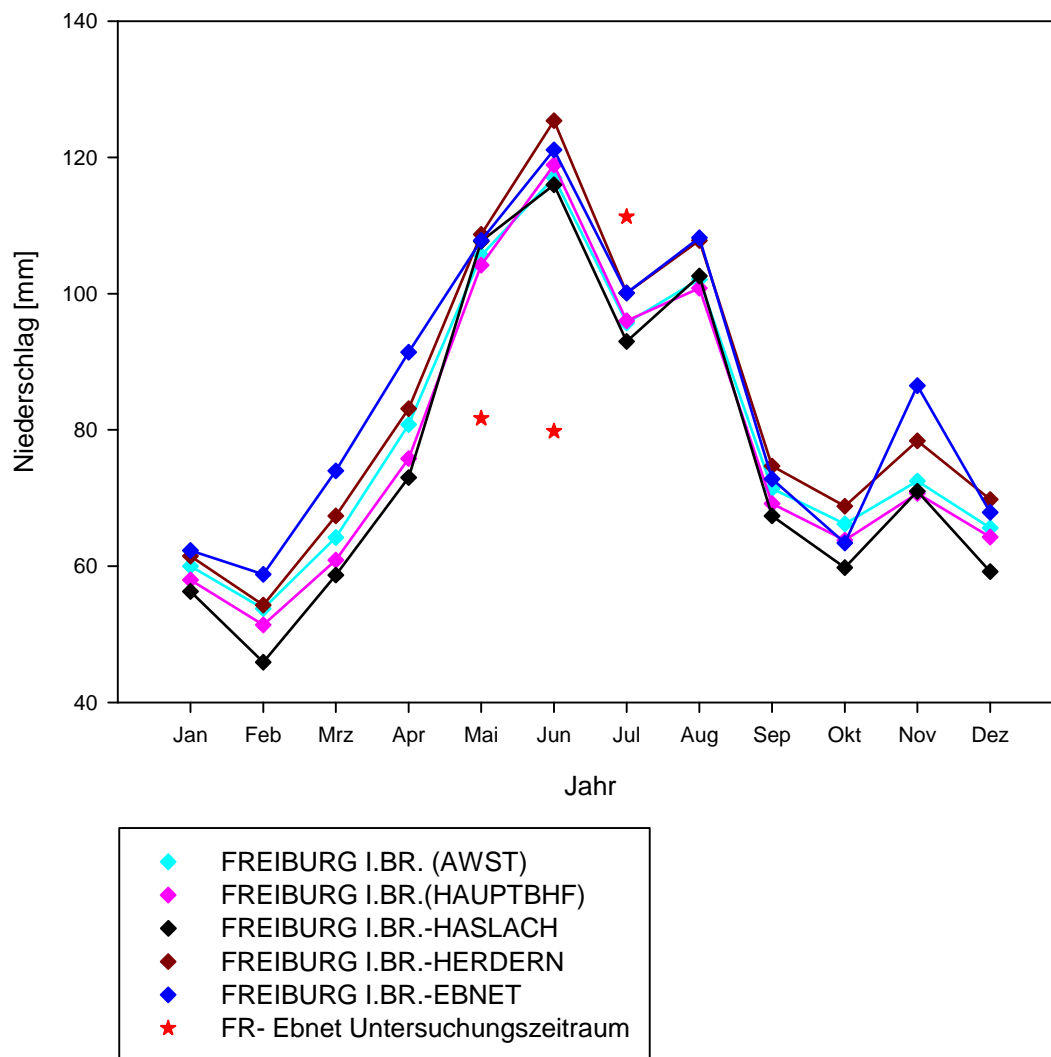
Nach ELLENBERG et al. (1991) drückt die Feuchtezahl das durchschnittliche ökologische Verhalten der Gefäßpflanzensippen gegenüber der Bodenfeuchtigkeit oder dem Wasser als Lebensmedium aus. Obwohl dieser Faktor kurz- und langfristigen Schwankungen unterliegt, ist aufgrund von zahlreichen Untersuchungen eine relative Einstufung möglich. Die Feuchtezahl bezieht sich auf das Vorkommen der Pflanzen in Abhängigkeit der Bodenfeuchte vom flachgründigen trockenen Felshang bis hin zum Sumpfboden sowie vom seichten zum tiefen Wasser. Die Mehrheit der Pflanzen aus dem untersuchten Gebiet sind sogenannte Frischzeiger mit einer Feuchtezahl von 5-6. Das bedeutet, ihr Schwergewicht liegt auf den mittelfeuchten Böden. Eine Ausnahme bildet das Drüsige Springkraut. Dieses besitzt eine Feuchtezahl von 8, ist somit ein Feuchtezeiger und ist überwiegend auf gut durchfeuchteten, aber nicht nassen Böden vorzufinden. Gleichzeitig gilt es aber auch als Überschwemmungszeiger, der auf mehr oder weniger regelmäßig überschwemmten Böden zu finden ist. So lässt sich das Untersuchungsgebiet nach ELLENBERG et al. (1991) in ein Gebiet mit mittelfeuchten Böden, die stellenweise zeitweilig überschwemmt sein können, zusammenfassen.

### 3.4 Hydrometeorologie

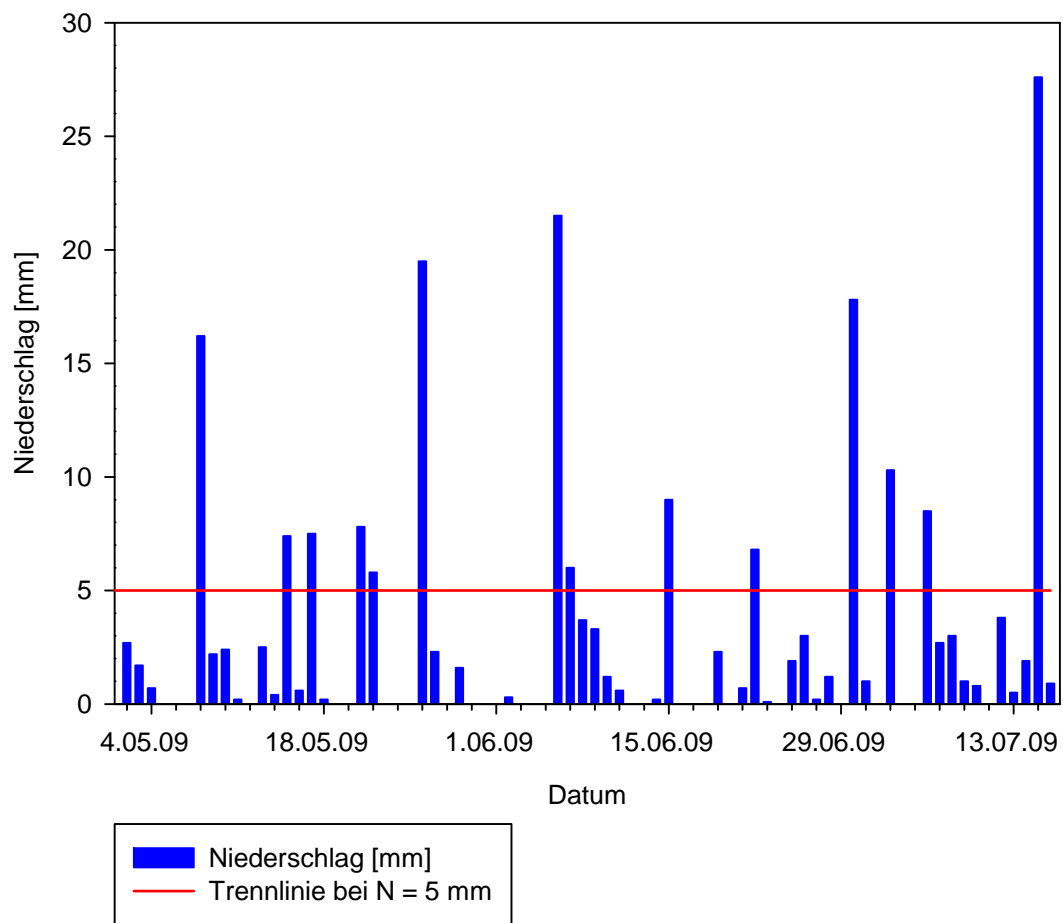
Die Messstation Freiburg-Ebnet (319 m ü. NN, RW3420,384 HW5316,583) in der Nähe des Untersuchungsgebietes hat im langjährigen Mittel des Niederschlags von 1961-90 einen Jahresniederschlag von 1014,2 mm und eine mittlere Jahrestemperatur von 8-9 °C (DWD). Dabei fällt der meiste Niederschlag während des Sommerhalbjahres, das dominiert wird von konvektiven Niederschlagsereignissen, oft in Form von Gewittern (PARLOW & ROSNER 1992). Dies wird durch den niederschlagsstärksten Monat der Referenzperiode, den Juni, mit 121,1 mm unterstützt. Der niederschlagsärmste Monat ist der Februar mit 58,8 mm (DWD). Das Winterhalbjahr ist von stabilen Inversionswetterlagen und von advektiven Niederschlagsereignissen aufgrund der Zyklonenfronten geprägt (PARLOW & ROSNER 1992). Die Station Freiburg-Ebnet (blaue Kurve siehe Abbildung 3.4) liegt bei genauerer Betrachtung des Niederschlags von 1961-90 von mehreren Freiburger Messstationen im

Bereich selbiger Stationen. Für den Untersuchungszeitraum vom 01.05.-16.07.2009 wurden die Niederschlagsmengen der Monate Mai, Juni und Juli in Abbildung 3.4 abgebildet (roter Stern). Dabei ist deutlich zu sehen, dass während des Untersuchungszeitraumes der Niederschlag im Gegensatz zur Referenzperiode in den Monaten Mai und Juni mit etwa 30 bis 40 mm unter dem langjährigen Mittel für diese Monate liegt. Im Gegensatz zum Juli der 2009 über dem langjährigen Mittel von 1961-90 liegt. In Abbildung 3.5 ist der gefallene Niederschlag während des Untersuchungszeitraumes vom 01. Mai bis 16. Juli 2009 dargestellt. Dabei markiert die rote Linie (bei 5 mm Niederschlag) die Trennung zwischen den untersuchten Niederschlagsereignissen und den nicht untersuchten. So kam es zu 14 untersuchten Niederschlagsereignissen während der Untersuchungsperiode, die größer sind als 5 mm.





**Abbildung 3.4** Monatsmittelwerte des Niederschlags 1961-90 von Freiburger Messstationen (DEUTSCHER WETTERDIENST 2009) und Niederschlagswerte der Station Freiburg-Ebnet für die Monate Mai, Juni und Juli 2009 (METEOMEDIA GMBH)



**Abbildung 3.5** Niederschlag während des Untersuchungszeitraums vom 01.05.-16.07.2009 (METEOMEDIA GMBH), einschließlich der Trennlinie bei 5 mm (rot), über welcher die Probestellen untersucht wurden

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Vorgehensweise

Zu Beginn meiner Arbeit wurde für mögliche Untersuchungsgebiete, die anhand von Topographischen Karten ausgewählt wurden, der Topographische Index unter der Benutzung von Geländemodellen (Auflösung von 1x1m) berechnet. Die so entstandenen Fließmuster ermöglichten eine Vorauswahl der interessantesten Gebiete. Mittels des Topographischen Index und nach einer anschließenden Geländebegehung wurde ein Gebiet in Freiburg-Ebnet ausgewählt. Nach Ende der Frostperiode wurden im ausgesuchten Untersuchungsgebiet Transekte mit einem Abstand von 7,0 m abgesteckt und entlang diesen die PVC-Fläschchen und die PVC-Rohre für die Odyssey Datenlogger in einem Abstand von 3,5 m eingebracht. Die PVC-Fläschchen und -Rohre wurden zuvor noch entsprechend der Vorgaben präpariert. Die Odyssey Datenlogger wurden auf die Startzeit programmiert und in die PVC-Rohre gehängt, so dass eine Messperiode ab dem 1. Mai 2009 zur Verfügung stand.

Das Untersuchungsgebiet wurde währenddessen auch eingemessen, damit die Grenzen genau festgehalten werden konnten. Dies geschah mit Hilfe des GPS-Gerätes GPSMAP 76CSx von *Garmin* und der Koordinatenberechnung seitwärts gelegener Kleinpunkte, wie in der Vermessung üblich (PETRAHN 1999). Ebenso wurden die Koordinaten der einzelnen Probestellen ermittelt, wobei es ausreichend schien zwei der 199 Probestellen einzumessen, da anschließend mit diesen die Koordinaten der restlichen 197 Probestellen berechnet werden konnten.

Zur Bestimmung der Vegetation und des vorliegenden Bodentyps im Untersuchungsgebiet wurden Standortaufnahmen mit Hilfe von entsprechender Literatur (RUSHFORTH 2005, AICHELE & GOLTE-BECHTLE 1993, INSTITUT FÜR BODENKUNDE UND WALDERNÄHRUNG 2004, KUBIËNA 1953) durchgeführt. Die Bodenaufnahme erfolgte über Bohrstockproben und der anschließenden Beurteilung der Eigenschaften. Auskunft über den gefallenen Niederschlag im Untersuchungszeitraum geben die Daten der Niederschlagsmessstation Freiburg-Ebnet der *Meteomedia GmbH*.

So konnte dann mit den Messungen ab Anfang Mai 2009 begonnen werden. Dabei wurden die Fläschchen nach jedem Niederschlagsereignis angesehen und ausgeleert sowie deren Füllung festgehalten. Desweiteren wurden die Daten der Odyssey Data Logger ausgelesen und für die weitere Verwendung aufbereitet.

Mit Hilfe des Programmes Surfer 8 der Firma *Golden Software Inc.* wurde das experimentelle Variogramm dargestellt und aus diesem wiederum das theoretische Variogramm für bestimmte Niederschlagsereignisse, den Abstand zur Geländeoberkante und die Standardabweichung der Absolutwerte der Odyssey Logger visuell angepasst. So konnte in Surfer mit Kriging das Untersuchungsgebiet mit den verschiedenen Variogrammmodellen räumlich interpoliert werden konnte. Zu der visuellen Anpassung eines Variogrammmodells wurden auch weitere Variogrammmodelle mit Hilfe der Methode des Abstandes der kleinsten Quadrate für die untersuchten Niederschlagsereignisse berechnet.

Über eine Clusteranalyse unter Verwendung von Spatstat in einem R-Code (ROSIN 2009b) wurde der Konnektivitätsanteil versucht zu berechnen. Das heißt, der Anteil aller Zellen, welche mit dem Ausfluss verbunden sind.

## 4.2 Auswahl des Untersuchungsgebietes

Die möglichen Untersuchungsgebiete wurden zuerst grob anhand von Karten eingeschränkt. Im Anschluss wurden die digitalen Geländemodelle im 1x1m Raster der ausgewählten Gebiete genauer untersucht und der topographische Index mit SAGA GIS Version 2.0.3 in Verbindung mit einem R-Code in der Programmiersprache R Version 2.8.1 berechnet, so dass die Gebiete mit den interessantesten Fließwegmustern dann im Gelände auf Tauglichkeit überprüft werden konnten.

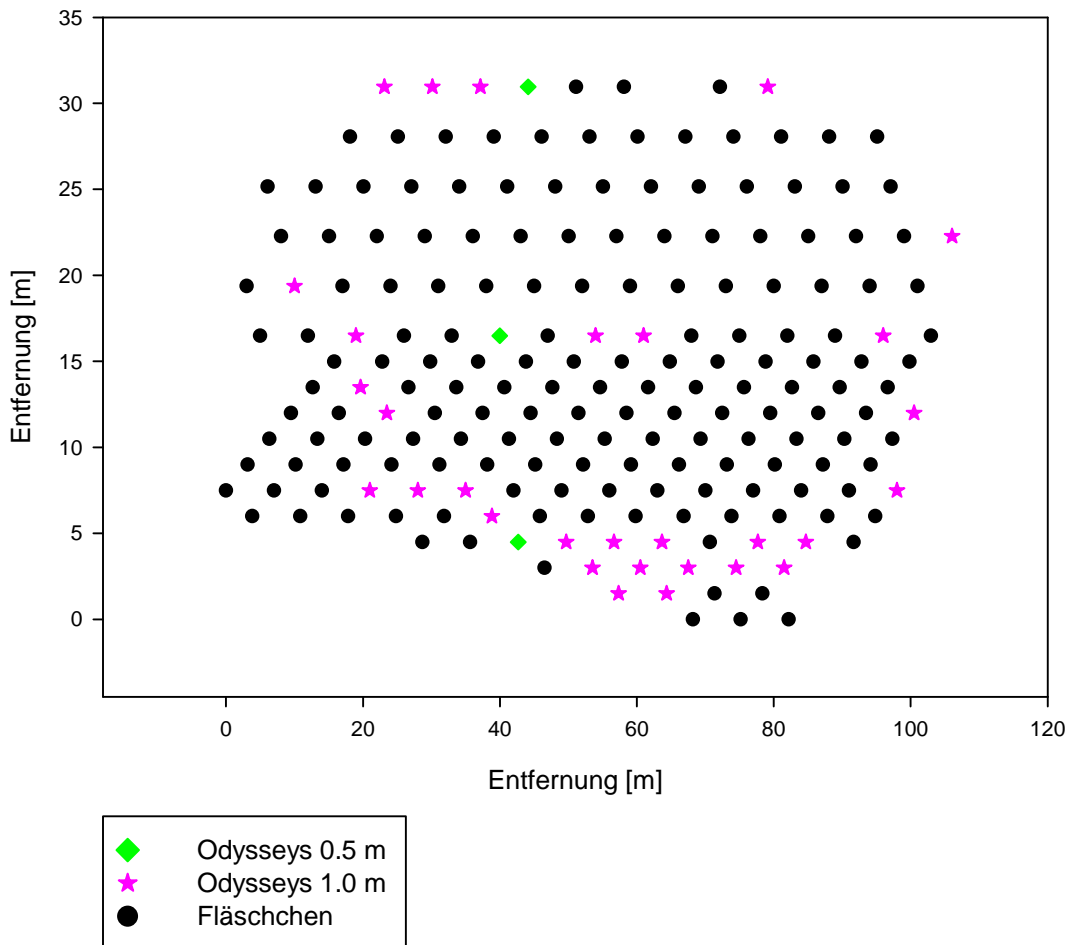
Der topographische Index folgte weitestgehend dem Ansatz von BEVEN & KIRKBY (1979). Er ist definiert als  $\ln(a/\tan(\beta))$ , wobei es sich bei  $a$  um die sich akkumulierte sich hangaufwärts befindende Fläche pro Einheitshöhenlinienlänge und bei  $\tan(\beta)$  um die lokale Steigung handelt. Für den Fließalgorithmus der beitragenden Fläche jedoch wurde die „Deterministic Infinity“ Variante von TARBOTON (1997) bevorzugt. Diese basiert auf dem Vorgang, dass die Fließrichtung an der Ecke angenommen wird, an der die tiefste abnehmende Steigung aller acht gleichschenkligen Facetten innerhalb jedes Pixels ist.

Das Ergebnis in Abbildung 3.1 war ein Fließmuster für das Untersuchungsgebiet in Ebnet anhand dessen das zu beprobende Gebiet eingegrenzt und ein Messplan aufgestellt werden konnte. Nachdem das Messgebiet im Gelände mit Hilfe von Schnüren gekennzeichnet wurde, konnte es mit Hilfe des GPSMAP 76CSx von *Garmin* und Koordinatenberechnung genau festgehalten werden. Es wurden nicht ausschließlich GPS-Punkte zur Bestimmung verwendet, da die Ungenauigkeit im Wald unter den Bäumen im Vergleich zur Größe des Gebietes zu hoch war. So wurden entlang des Waldweges GPS-Punkte mit dem GPS-Gerät festgehalten und von diesen und den Strecken zwischen ihnen die Untersuchungsgebietsgrenzen mit Hilfe der Koordinatenberechnung seitwärts gelegener Kleinpunkte (PETRAHN 1999) bestimmt.

### 4.3 Messmethoden

Für die Wasserstandsmessungen, mit Hilfe derer die Sättigungsflächen im Untersuchungsgebiet ausgewiesen werden sollen, wurde auf zwei Messmethoden zurückgegriffen. Bei diesen handelte es sich zum einen um kontinuierliche Data Logger – Water Capacitive Odyssey Data Rekorder – und zum anderen um ein einfaches, manuelles Messgerät – eine kleine PVC-Flasche.

Der Abstand im Untersuchungsgebiet, welchen die Flaschen zueinander und zu den Odyssey Data Loggern haben, wurde jeweils zur Seite nach rechts und links in einer Reihe mit 3,5 m und der Reihenabstand nach vorne und hinten mit 7,0 m festgelegt. Dafür wurden im Untersuchungsgebiet in Ebnet auf einer Fläche von etwa 3770 m<sup>2</sup> 166 Flaschen, 30 Odyssey Sonden von 1 m Länge und drei mit einer Länge von 0,5 m in den Boden eingebracht. Die Standorte der Sonden wurden vor allem im Randbereich des Gebietes, um mögliche unterirdische Zuflüsse und Abflüsse aus dem Gebiet besser beobachten und aufzeichnen zu können, in der Nähe möglicher Fließwege und bei möglichen Sättigungsflächen gewählt, aber immer unter Beachtung und Einhaltung des Messnetzes und dessen Abständen (siehe Abbildung 4.1). Die einzelnen Fläschchen bekamen auch Buchstaben und Zahlen zugewiesen, damit sie wie die Odyssey Logger über ihre Seriennummer identifiziert werden konnten (Der Messplan mit dem zugewiesenen Identifizierungskennzeichen ist in Abbildung A. 1 dargestellt). Der Feldversuch lief über 2,5 Monate vom 1. Mai 2009 bis 16. Juli 2009.



**Abbildung 4.1** Die Probestellen vom Untersuchungsgebiet aufgetragen in Abhängigkeit ihrer Entfernungen zueinander

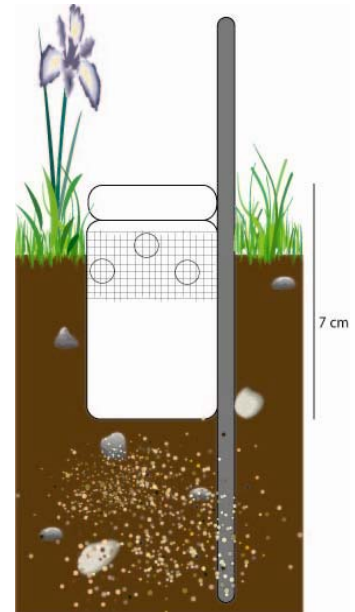
#### 4.3.1 PVC-Flasche

Diese PVC-Flaschen wurden mit Wassereinlass- und Luftauslasslöchern versehen, wodurch sie bei steigendem Wasserspiegel im Boden, also bei Sättigung mit Wasser gefüllt werden, (siehe auch Abbildung 4.2). Die Wassereinlasslöcher liegen dabei etwa 1 cm unter der Bodenoberfläche. Sie befinden sich also in der obersten Bodenschicht und so kann bei gefüllter Flasche von einem gesättigten Zustand ausgegangen werden. Zwei Fläschchen, die während des Untersuchungszeitraumes mit Wasser gefüllt waren, sind in Abbildung 4.3 zu sehen.

Im Untersuchungsgebiet in Ebnet wurden auf einer Fläche von etwa 3770 m<sup>2</sup> 166 Flaschen in den Boden eingebracht. Der Abstand, welchen die Flaschen zueinander und zu den Odyssey Data Loggern haben, wurde jeweils zur Seite nach rechts und links in einer Reihe mit 3,5 m und der Reihenabstand nach vorne und hinten mit 7,0 m festgelegt. Der Feldversuch lief über 2,5 Monate von 1. Mai 2009 bis 16. Juli 2009.

Schon DUNNE et al. (1975) haben versucht mit Hilfe von Kunststoffbechern, die in den Boden parallel des normalen Gerinnes eingebracht wurden, die maximale Ausdehnung von Sättigungsflächen zu bestimmen. Die Becher wurden überdeckt, damit kein direkter Niederschlag einfallen konnte und es wurden kleine Öffnungen an der Seite auf Oberflächenniveau freigelassen, so dass bei Anstieg des Wasserspiegels bis zur Bodenoberfläche oder bei Auftreten von Sättigungsflächenabfluss der Becher mit Wasser gefüllt wird.

**Abbildung 4.2** PVC-Flasche mit entsprechenden Wasserein- und Luftauslasslöchern



**Abbildung 4.3** Fläschchen M6 und N5 im Untersuchungsgebiet. Beide waren sowohl bei dem Ereignis vom 26.05.2009 als auch vom 15.07.2009 mit Wasser gefüllt.

#### 4.3.2 Odyssey Data Rekorder

Der Water Capacitive Odyssey Data Rekorder der Firma *Dataflow Systems Pty Ltd* ist ein Datenlogger zur kontinuierlichen Aufzeichnung von Wasserständen (siehe Abbildung 4.4). Anwendung fand dieser Datenlogger innerhalb dieser Arbeit bei der Aufzeichnung der Wasserstände im Boden. Dabei wurde mit Hilfe eines Bohrgerätes, eine *Atlas Copco Cobra*

Modell 148, ein etwa 1,2 m tiefes und im Durchmesser 4 cm breites Loch in den Boden gebohrt und ein PVC-Rohr mit demselben Durchmesser eingeführt. Das PVC-Rohr wurde zuvor durchgängig perforiert und von unten mit einem Stopfen verschlossen, so dass es nicht zu Verschmutzungen bei der Einführung der Rohre in den Boden kommen kann. Da sowohl das Bohrloch als auch das perforierte Rohr den gleichen Durchmesser haben, wurde sichergestellt, dass das Rohr auch in direktem Kontakt mit dem Boden steht und so das Wasser in das Rohr gelangen kann, ohne große Widerstände wie Hohlräume zwischen Boden und Rohr zu überwinden. Der Odyssey Data Rekorder wurde dann in das PVC-Rohr gehängt, so dass dieser den Wasserstand im Rohr aufzeichnen kann. Zwei der 33 Odysseys in einem PVC-Rohr im Gelände sind in Abbildung 4.5 zu sehen.



**Abbildung 4.4** Odyssey Water Capacitive Rekorder 1,0 m

Diese handelsüblichen PVC-Rohre besitzen am oberen Ende eine vergrößerte Öffnung mit einem Dichtungsring. Dadurch konnte auch sichergestellt werden, dass kein Wasser durch die Öffnung in das Rohr einfließen konnte. Die Aufzeichnung des Odyssey Recorders erfolgt im



**Abbildung 4.5** Odyssey Water Capacitive Rekorder im Gelände. Der Blaue ist einer der neuen Odysseys und der graue ist ein älterer. Bei dem Blauen ist auch ein Ameisennest zu sehen, dass sich in der Abdeckung (halbe PET-Flasche) gegründet hat.

„Compressed Data Mode“, dabei überprüft der Sensor innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls (in diesem Fall von 10 Minuten) den Wasserstand und die Aufzeichnung des neuen Wertes erfolgt nur, sollte dieser um den festgesetzten Auflösungsfaktor – 5 mm – vom alten Wert abweichen. Unnötig große Datenmengen werden dabei vermieden und man erhält sehr kompakten Datendateien.



Die Capacitive Water Level Sonden basieren auf dem Kondensatorprinzip. Ein Kondensator besteht aus zwei leitenden Platinen oder Zylindern, die durch einen Nichtleiter voneinander getrennt sind (BEST et al. 2000). Ist der Abstand zwischen den Elektroden konstant, ist die Kapazität direkt proportional zu der Elektrodenfläche.

Um den Einfluss des Nichtleitermaterials auf die Messbeständigkeit oder Qualität des Kondensators nach DATAFLOW SYSTEMS PTY LTD (2009) zu minimieren, wird Teflon als Nichtleiter eingesetzt. Teflon absorbiert keine Feuchte und somit werden seine Charakteristika nicht durch Eintauchen in Wasser verändert. So fungieren das Wasser, in das die Sonde eingetaucht wird, und das mit Teflon abgedeckte Messelement als Platinen bei den Capacitive Water Level Sonden. Wenn sich der Wasserspiegel ändert, ändert sich auch die Wasserfläche, die in Kontakt mit der Teflonoberfläche ist. Das Wasser ähnelt dann einem Zylinder, der um das zylindrische Teflonelement an- und absteigt. Daher ist die Änderung der Kapazität direkt proportional der Höhenänderung des mit dem Teflon in Kontakt stehenden Wassers. Das Messinggegengewicht am Ende des Sensorelements wird auch dazu benutzt, um mit dem Wasser elektrischen Kontakt herzustellen. Die Kapazität wird mit Hilfe eines elektronischen Moduls am oberen Ende der Sonde gemessen und mit Hilfe des Odyssey Rekorders, der im elektronischen Modul eingefügt ist, aufgezeichnet. Dieses Modul konvertiert den Wert für die Kapazität in ein digitales Signal, so dass es mit dem Odyssey Data Rekorder gemessen wird.

Die Kalibrierung der Water Capacitive Odysseys erfolgte im Vorfeld. Hierbei wurden bei gemessenen Abständen ausgehend von der Unterseite des Gewichts die unkalibrierten Werte mit Hilfe des „Probe Trace Modes“ des von *Dataflow Systems Pty Ltd* mit gelieferten Programmes festgehalten. Anschließend wurden diese über „Enter Calibration Data“ in diesem Programm festgehalten und mit Hilfe der im Programm verwendeten Formel die Steigung und der Achsenabschnitt berechnet.

Im Untersuchungsgebiet wurden 30 Odyssey Sonden von 1 m Länge und drei mit einer Länge von 0,5 m verteilt. Die Standorte der Sonden wurden vor allem im Randbereich des Gebietes, um mögliche unterirdische Zuflüsse und Abflüsse aus dem Gebiet besser beobachten und aufzeichnen zu können, in der Nähe möglicher Fließwege und bei möglichen Sättigungsflächen gewählt, aber immer unter Beachtung und Einhaltung des Messnetzes und dessen Abständen.

Auch JENSCO et al. (2009) versuchten bei ihren Untersuchungen zu hydrologischer Konnektivität im Tenderfoot Creek Versuchswaldgebiet in zentral Montana, zwischen Hang-Ufer-Gerinne Zonen ebenfalls versucht den Wasserstand in Brunnen mit Hilfe von `Water Capacitance Rods` (allerdings einer anderen Herstellerfirma) zu messen. Sie zeichneten den Wasserstand während ihres Untersuchungszeitraums in den Brunnen aber nur in einem 30 minütigen Rhythmus auf. Zusätzlich maßen sie noch wöchentlich den Wasserstand elektrisch zur Bestätigung der Capacitance Rekorder.

## 4.4 Datenauswertung

Die Auswertung der Odysseydaten erfolgte mit dem Programm Surfer 8, einem Grid basierten Graphikprogramm (GOLDEN SOFTWARE INC. 2002). Durch das Hochladen von XYZ-Daten können verschiedene Karten erzeugt werden. An das isotrope experimentelle Semivariogramm aus den Messdaten konnte ein theoretisches Variogramm angepasst werden. Durch die Isotropie wird angenommen, dass die räumliche Variabilität in alle Richtungen gleich ist. Auch schon WESTERN et al. (2004) haben dies bei ihrer Auswertung von Semivariogrammen zu Bodenfeuchtestrukturen in Victoria, Australien, und Neuseeland angenommen. Mithilfe dieses theoretischen Variogramms konnte räumlich interpoliert werden, so dass aus den Punktdaten Aussagen zur Fläche des gesamten Untersuchungsgebiets gemacht werden konnten. Die räumliche Interpolation kann mit Hilfe von Surfer auch sofort aus den Messdaten erfolgen. Dies wendeten schon SRINIVASAN et al. (2002) bei ihren Messdaten zur Untersuchung der Dynamiken der Ereignisabflussbildung an einem Hang an.

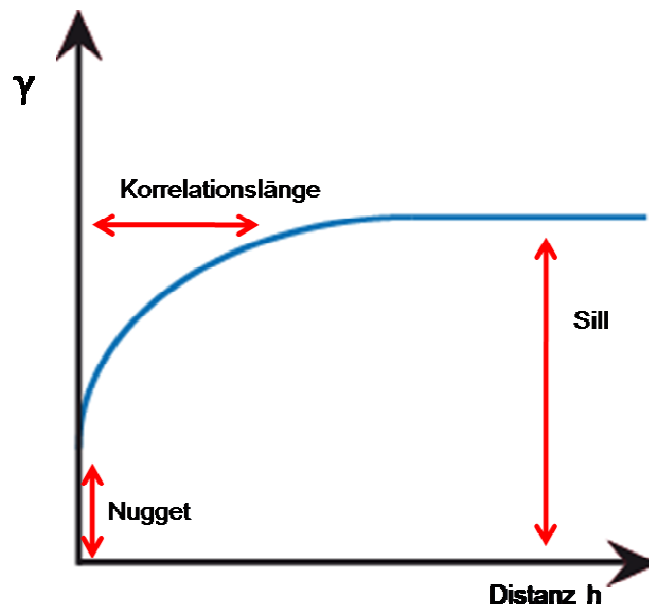
Ein Variogramm ist eine geostatistische Methode und erfasst die räumliche Variabilität der Zufallsvariablen durch die räumliche Varianz, die dann gegen die Distanz zweier beliebiger Punkte aufgetragen wird (BLÖSCHL 2006). Die Variographie ist die Abschätzung der räumlichen Varianz, so FORTIN & DALE (2005). Die Abschätzung der räumlichen Struktur einer Variablen von erhobenen Daten basiert auf der Annahme einer intrinsischen Stationarität der regionalisierten Variablen. Das bedeutet der erwartete Unterschied zwischen den Werten an zwei Versuchsstandorten, die einen festgelegten Abstand  $h$  zueinander besitzen, ist Null und dass die Varianz dieses Unterschieds sich nur entsprechend  $h$  ändert. Über die Semivarianzfunktion in Gleichung (1) wird die räumliche Varianz einer quantitativen Variablen abgeschätzt, dabei ist  $z$  der Wert der Varianz  $x$  am Versuchsstandort  $i$  und  $n(h)$  sind die Anzahl der Paare des Versuchsstandortes innerhalb einer Distanz  $h$ .

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Damit nicht jedes Paar der Versuchsstandorte zweimal in der Berechnung über die Gesamtsumme 1 bis  $n$  (Anzahl der Versuchsstandorte) berücksichtigt wird, wird der Wert durch 2 dividiert. Das Semivariogramm errechnet sich aus den erhobenen Messdaten, so dass man ein experimentelles Variogramm erhält.

An dieses kann ein sogenanntes theoretisches Variogramm (oder auch Variogrammmodell) angepasst werden. Für diese sind unterschiedliche Formen üblich. In dieser Arbeit wurde das sphärische Modell angewandt, da davon ausgegangen werden kann, dass ab einer Distanz von 35 m kein Zusammenhang mehr besteht, da das Untersuchungsgebiet auch nur eine Fläche von etwa 100 m auf 35 m besitzt.

In Abbildung 4.6 ist ein charakteristisches Variogramm mit den wichtigen Eigenschaften dargestellt. Dabei ist Nugget der Achsenabschnitt vom Ursprung, der größer ist als Null (FORTIN & DALE 2005) oder die Varianz zweier Punkte mit sehr kleinem Abstand (BLÖSCHL 2006). Die Korrelationslänge (spatial range oder Length (A)) ist der Abstand von Null, solange sich die räumliche Struktur ändert (FORTIN & DALE 2005). Sill (Niveau des Variogramms) entspricht der Varianz der Variablen insgesamt, das heißt je höher das Niveau desto stärker variiert die Variable (BLÖSCHL 2006). Das bedeutet nach der Korrelationslänge beeinflusst der Abstand zwischen den einzelnen Messstandorten die räumliche Struktur der Daten nicht mehr, so dass sich die Semivarianz beim Variogrammniveau einpendelt. Je größer die Korrelationslänge ist, über desto weitere Entfernungen korreliert die Variable.



**Abbildung 4.6** Skizze eines charakteristischen Variogramms mit Nugget, Variogrammwert bei der Distanz  $h = 0$ , Korrelationslänge als Maß für die Glattheit der räumlichen Verteilung der Variablen und Sill als Variogrammniveau (entspricht der Varianz der Variablen) (verändert nach BLÖSCHL 2006)

Nach der Anpassung eines Variogrammmodells an das experimentelle Variogramm erfolgte eine räumliche Interpolation mit dem geostatistischen Verfahren Kriging. Es besteht aus einer Reihe von linearen Regressionen, die die beste Kombination der Gewichte zur Interpolation der Daten bestimmen, ähnlich einer inversen Gewichtungsabstandsmethode durch Minimierung der Varianz, die über die räumliche Kovarianz der Daten hergeleitet wird (FORTIN & DALE 2005, ISAACS & SRIVASTAVA 1989). Kriging gehört mit zu den sogenannten BLUE (best linear unbiased estimators) –Methoden, also den besten linearen Schätzmethoden ohne systematischen Fehler (bias), so BLÖSCHL (2006). Dies kommt, da der mittlere quadratische Fehler ein Minimum sein soll, da die Annahme gilt, dass sich der interpolierende Wert als gewichtetes Mittel (Linearkombination) der Messwerte darstellen lässt und da zudem auch die Annahme gilt, dass der Erwartungswert des Fehlers gleich Null ist. Im Wesentlichen ist Kriging eine Methode des gewichteten gleitenden Durchschnittswertes (FORTIN & DALE

2005). Die benötigten räumlichen Parameter (Korrelationslänge, Sill und Nugget) werden über das experimentelle Variogramm geschätzt, das bedeutet durch Anpassung eines theoretischen Variogramms an das experimentelle.

Da das theoretische Variogramm in Surfer 8 visuell angepasst wird, wurden zusätzlich noch Berechnungen unter Verwendung eines R-Codes (ROSIN 2009a) für verschiedene Variogrammmodelle – Sphärisch (Spherical), Exponentiell (Expo), Gauss, Power und Sphärisch1 (Spherical1) (Verwendung des Sill aus der Anpassung in Surfer 8, somit nur ein Parameter), durchgeführt. Dabei wurden die Variogrammmodelle mit der Methode des Abstandes der kleinsten Quadrate von den Werten des experimentellen Variogramms angepasst, das heißt die Quadrate der vertikalen Abstände vom experimentellen Variogramm zur Kurve des theoretischen Variogramms werden unter der Bedingung, dass sie ein Minimum sind, berechnet (vgl. KREYSZIG 1970, CRESSIE 1991).

Das sphärische Variogrammmodell gehört zu den nach oben beschränkten Modellen (FORTIN & DALE 2005). Das bedeutet, dass sie über die Varianz der experimentellen Werte nach oben hin beschränkt werden und somit einen Grenzwert besitzen. Das sphärische Modell wird bestimmt von den Parametern: Korrelationslänge A, Varianz bzw. Sill  $K_{max}$  und der Distanz h, dargestellt in folgender Gleichung (vgl. ARMSTRONG 1998):

$$\gamma(h) = \begin{cases} K_{max} * \left[ \frac{3h}{2A} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{A} \right)^3 \right] & \text{für } h < A \\ K_{max} & \text{für } h \geq A \end{cases} \quad (2)$$

Mit zu den meist benutzten theoretischen Variogrammen ohne Begrenzung gehört das exponentielle Variogrammmodell (FORTIN & DALE 2005). Wie das sphärische Variogrammmodell verhält sich auch das Exponentielle linear für kleine Abstände, steigt aber viel schneller an und tendiert nur zu einem Grenzwert, erreicht ihn im Gegensatz zum sphärischen Modell aber nie (ARMSTRONG 1998). Es gehen die gleichen Parameter ein wie in das sphärische Modell und berechnet sich über folgende Gleichung (vgl. ARMSTRONG 1998):

$$\gamma(h) = K_{max} * \left[ 1 - e^{\left( -\frac{h}{A} \right)} \right] \quad (3)$$

Das Gauss'sche Variogrammmodell ist wie das Sphärische nach obenhin begrenzt über das Varianzniveau (Sill)  $K_{max}$  (FORTIN & DALE 2005) und der Unterschied zum Exponentiellen in der Formel liegt im quadrierten Exponenten der e-Funktion. Es steht für einen eher kontinuierlichen Verlauf einer Kurve (ARMSTRONG 1998). Daraus folgt Gleichung (4) (vgl. ARMSTRONG 1998):

$$\gamma(h) = K_{max} * \left[ 1 - e^{\left( -\frac{h}{A} \right)^2} \right] \quad (4)$$

Das Power Variogrammodell ist eine weitere Form zur Anpassung eines Modells an ein experimentelles Variogramm. Die Ausgangsfunktion in der Gleichung (5) ist eine Potenzfunktion (vgl. ARMSTRONG 1998).

$$\gamma(h) = K_{max} * h^A \quad \text{für } 0 < A \leq 2 \quad (5)$$

Das Sphärisch1-Modell wurde als Vergleich zu den vorherigen Variogrammodellen berechnet. Dabei erfolgt die Berechnung über die Gleichung des sphärischen Variogrammodells, aber nur mit einem Parameter, der Korrelationslänge A. Für das Varianzniveau (Sill) gehen die Werte in die Gleichung ein, die zuvor schon bei der Berechnung des experimentellen Variogramms mit Hilfe von Surfer 8 bestimmt wurden.

Die Berechnung der statistischen Kenngrößen wie Standardabweichung und Variationskoeffizient erfolgte nach den allgemein gültigen Gleichungen wie sie unter anderem bei MANIAK (1993) zu finden sind.

Zur Betrachtung der Konnektivität, des Anteils aller Zellen, welche mit dem Ausfluss verbunden sind, wurde eine Clusteranalyse durchgeführt. Dafür wurde das Entwässerungsgerinne am Rand des Waldweges etwa 6-9 m vom Untersuchungsgebiet als Ausfluss angenommen, da sonst kein Ausfluss innerhalb des Untersuchungsgebietes zu erkennen war. Die Clusteranalyse erfolgte mittels der Clusterfunktion von Spatstat (BADDELEY & TURNER 2005) in einem R-Code (ROSIN 2009b). Spatstat ist nach BADDELEY & TURNER (2005) in der Lage simulierte Ausführungen einer großen Auswahl von stochastischen Punktprozessen zu erzeugen. Dabei sind einige der Prozessparameter (Intensitätsfunktion, Clusterverteilung) frei wählbare und benutzerbezogene Funktionen in der Programmiersprache R. Es werden Markov-Prozessmodelle einer allgemeinen Art, die frei wählbare Inhomogenität und benutzerbezogenes Interaktionspotential miteinschließen, unter Anwendung einer schnellen Fortran Ausführung des Metropolis-Hastings Algorithmus simuliert.

Die Eingangsparameter des R-Codes (ROSIN 2009b) sind die Koordinaten der Probestellen und eine Binärverteilung. Die Kriterien der Binärverteilung für eine Sättigung an der Probestelle wurden für die Flurabstände und die Anstiege festgelegt. Bei der Clusteranalyse bestimmter Niederschlagsereignisse galt die Probestelle als gesättigt, wenn der maximale Anstieg größer gleich 20 cm oder der minimale Flurabstand kleiner gleich 5 cm war. Die Probestelle galt bei der Untersuchung jeweils zur vollen Stunde eines Ereignisses (15.07.2009) als gesättigt bei einem Anstieg größer gleich 10 cm, einem Flurabstand kleiner gleich 10 cm oder einem von mindestens zweimal aufeinanderfolgenden Anstieg von größer gleich 5 cm. Die Probestelle galt solange als gesättigt bis es zu einer Abnahme des Flurabstandes von größer gleich 5 cm auf einmal oder in der Summe von zwei aufeinanderfolgenden Stunden kommt.



## 5 Ergebnisse

Für die Auswertung interessante Niederschlagsereignisse im Untersuchungszeitraum vom 01.05.2009 bis 16.07.2009 sind Ereignisse mit einer Niederschlagsmenge größer als 5 mm pro Tag. Diese sind in Tabelle 5.1 mit Datum und Menge aufgeführt. Nur diese 14 Ereignisse wurden in der anschließenden Auswertung des minimalen Flurabstandes und des maximalen Anstieges der Wasserstände an den Probestellen (Odyssey Rekorder und Fläschchen) berücksichtigt.

**Tabelle 5.1** Zusammenfassung der untersuchten Niederschlagsereignisse mit der jeweiligen Niederschlagsmenge (\*21,6 mm statt 19,5 mm, das heißt 2,1 mm mehr, da am 27.05.2009 von 0:00 bis 2:00 Uhr noch 2.1 direkt im Anschluss an das Ereignis vom 26.05.2009 gefallen sind)

| untersuchte N | N [mm] |
|---------------|--------|
| 08.05.2009    | 16.2   |
| 15.05.2009    | 7.4    |
| 17.05.2009    | 7.5    |
| 21.05.2009    | 7.8    |
| 22.05.2009    | 5.8    |
| 26.05.2009    | 21.6*  |
| 06.06.2009    | 21.5   |
| 07.06.2009    | 6      |
| 15.06.2009    | 9      |
| 22.06.2009    | 7.5    |
| 30.06.2009    | 17.8   |
| 03.07.2009    | 10.3   |
| 06.07.2009    | 8.5    |
| 15.07.2009    | 27.6   |

Die Niederschlagsintensität für die untersuchten Ereignisse ist in Tabelle 5.2 dargestellt. Dabei ist auffallend, dass nicht unbedingt die niederschlagsstärksten Ereignisse die mit der höchsten Intensität sind. Die größeren Ereignisse sind oft von einer längeren Dauer und besitzen somit keine so hohe Intensität.

**Tabelle 5.2** Niederschlagsintensität für die untersuchten Ereignisse

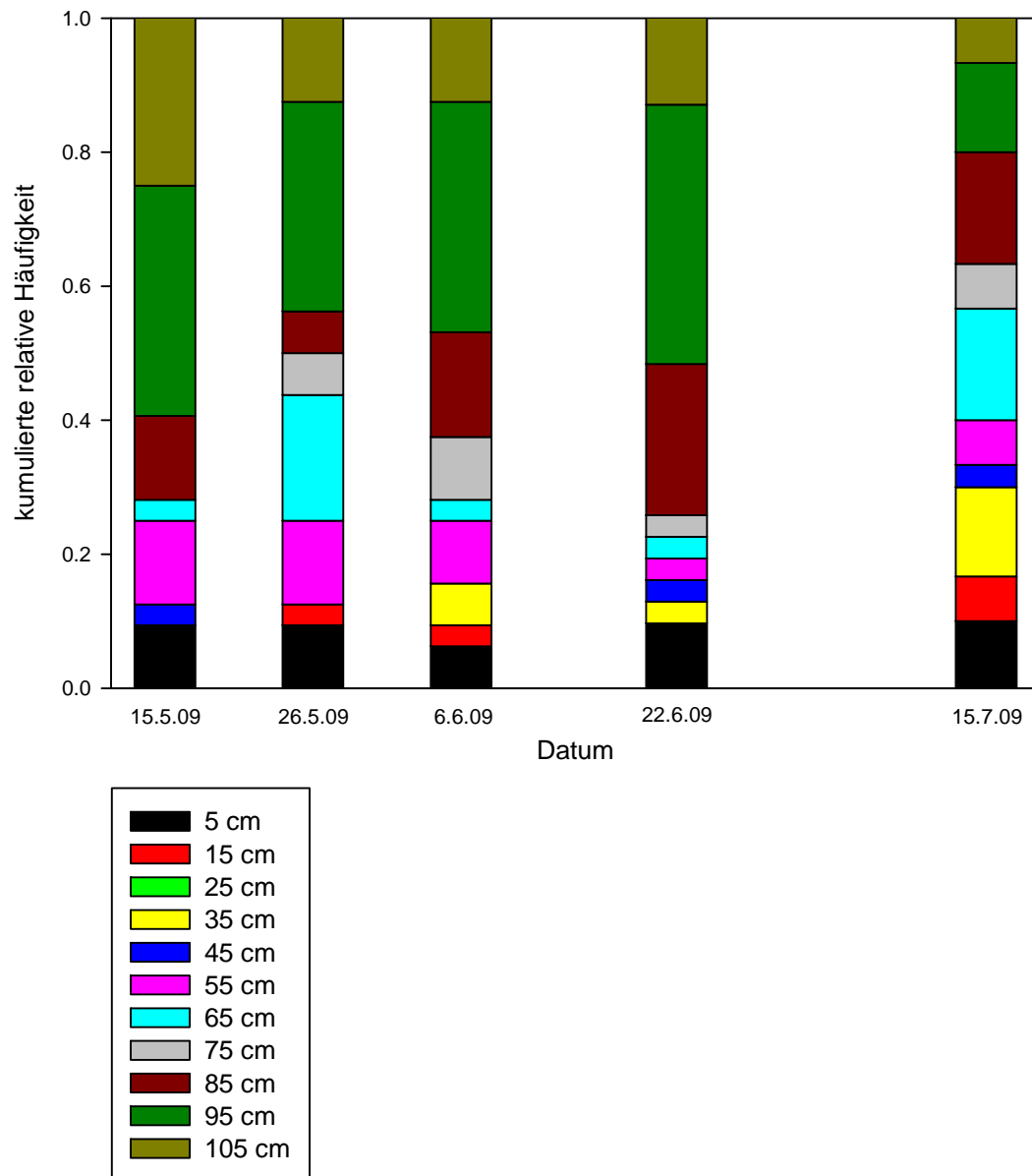
|               | N    | Dauer | Nintensität | mittlere<br>Nintensität |
|---------------|------|-------|-------------|-------------------------|
| untersuchte N | [mm] | [h]   | [mm/h]      | [mm/h]                  |
| 08.05.2009    | 9.5  | 4     | 2.4         | 2.7                     |
|               | 6.1  | 2     | 3.1         |                         |
| 15.05.2009    | 6.3  | 8     | 0.8         | 0.8                     |
| 17.05.2009    | 3.2  | 1     | 3.2         | 1.6                     |
|               | 4.3  | 3     | 1.4         |                         |
| 21.05.2009    | 3.2  | 4     | 0.8         | 0.9                     |
|               | 1.4  | 2     | 0.7         |                         |
|               | 3.2  | 3     | 1.1         |                         |
| 22.05.2009    | 5.6  | 4     | 1.4         | 1.4                     |
| 26.05.2009    | 5.1  | 2     | 2.6         | 2.3                     |
|               | 5.4  | 4     | 1.4         |                         |
|               | 14.4 | 5     | 2.9         |                         |
| 06.06.2009    | 21.5 | 16    | 1.3         | 1.3                     |
| 07.06.2009    | 5.6  | 4     | 1.4         | 1.4                     |
| 15.06.2009    | 6.4  | 5     | 1.3         | 0.9                     |
|               | 2.6  | 6     | 0.4         |                         |
| 22.06.2009    | 1.1  | 4     | 0.3         | 2.1                     |
|               | 2.4  | 1     | 2.4         |                         |
|               | 3.6  | 1     | 3.6         |                         |
| 30.06.2009    | 17.7 | 2     | 8.9         | 8.9                     |
| 03.07.2009    | 10.1 | 2     | 5.1         | 5.1                     |
| 06.07.2009    | 8.4  | 3     | 2.8         | 2.8                     |
| 15.07.2009    | 27.4 | 10    | 2.7         | 2.7                     |

## 5.1 Flurabstand der Probestellen

Die minimalen Flurabstände der Odyssey Rekorder wurden in Klassen mit einer Größe von 10 cm Flurabstand unterteilt. So konnte die sekundäre kumulative relative Häufigkeit für verschiedene Niederschlagsereignisse in Abbildung 5.1 für die Mittelwerte dieser Klassen berechnet werden. Dabei wurden die drei höchsten (26.5.09, 6.6.09 und 15.7.09) und zwei niedrigere Ereignisse (17.5.09 und 22.6.09) der untersuchten Niederschlagsereignisse ausgewählt. Es fällt auf, dass sich Unterschiede in den Flurabständen bei verschiedenen Niederschlagsmengen erst für Abstände größer als 15 cm zeigen, wobei der Unterschied zwischen den Niederschlagsmengen dann deutlich zunimmt. Auffällig bei der Betrachtung der Flurabstände bis 65 cm (cyan) ist der Unterschied zwischen den Niederschlagsereignissen. Sowohl beim 26. Mai als auch beim 15. Juli machen diese Abstände der Odyssey Rekorder über 40% aus, beim 15. Juli sogar fast 60%. Auch wenn der 6. Juni zu den höheren



Niederschlagsereignissen zählt, liegt der Anteil an niedrigeren Flurabständen nur bei knapp 30%. Dafür zeigen sich an diesem Tag und bei den anderen beiden höheren Niederschlagsereignissen Flurabstände von 15 cm. Im Gegensatz zeigen sich bei den beiden niedrigeren Niederschlagsereignissen (15. Mai und 22. Juni) überwiegend Flurabstände im Bereich von 85-105 cm. Diese machen bis zu 75% der gesamten Flurabstände der Odyssey Rekorder.



**Abbildung 5.1** Darstellung der kumulierten relativen Häufigkeit der minimalen Flurabstände der Odyssey Rekorder für bestimmte Niederschlagsereignisse

### 5.1.1 Variogrammodell mit Surfer 8

Als Beispiele für die experimentellen und theoretischen Semivariogramme sowie die räumliche Interpolation mit Kriging der minimalen Abstände zur Geländeoberkante der einzelnen Niederschlagsereignisse stehen die Abbildung 5.2 und die Abbildung 5.3. Die beiden Ereignisse vom 15.05.2009 und 15.07.2009 stehen repräsentativ für Niederschlagsereignisse mit entsprechenden Niederschlagsmengen während des Untersuchungszeitraumes vom 01.05.2009 bis 16.07.2009.

In Abbildung 5.2 ist das experimentelle Variogramm (schwarze Kurve) mit den jeweiligen Paaren und das sphärische, theoretische Variogramm (blaue Kurve) sowie die Varianz der Wertepaare (gestrichelte Kurve) für die minimalen Abstände zur Geländeoberkante der Odyssey Rekorder für das Niederschlagsereignis vom 15.05.2009 (a) und für den 15.07.2009 (b) dargestellt. Zusätzlich wurden für den 15.07.2009 auch noch die gefüllten Fläschchen bei der Erstellung des experimentellen Variogramms berücksichtigt. Der Unterschied in der Korrelationslänge zwischen den beiden sphärischen Variogrammmodellen ist deutlich erkennbar. Dabei ist die Korrelationslänge vom 15. Juli 2009 mit 15 m geringer im Vergleich zu den 26 m Korrelationslänge vom 15. Mai 2009. Dies wird auch durch die Steigung der sphärischen Variogrammkurven, bis das Varianzniveau erreicht ist, bestätigt.

Die im Anschluss daran erfolgte räumliche Interpolation mit Kriging unter Berücksichtigung der sphärischen Variogrammmodelle für beide oben genannten Niederschlagsereignisse ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Dreiecke (rot) stehen in der Abbildung für die Standorte der Odyssey Data Rekorder beziehungsweise bei einem Absolutwert von 0,0 für den Standort eines PVC-Fläschchens. Der Unterschied zwischen den Niederschlagsereignissen in Bezug auf den Abstand zur Geländeoberkante, gleichbedeutend mit dem Anstieg des Wasserstandes im PVC-Rohr der Odyssey Rekorder, ist deutlich anhand der Farbgebung (dunkler je geringer der Abstand zur GOK) und zusätzlich auch anhand der Absolutwerte des Minimalabstandes zur Geländeoberkante erkennbar. Die Flurabstände können dabei über einen Bereich von bis zu 100 cm variieren, wobei der kleinste Flurabstand vom 15. Juli 0,0 cm und vom 15. Mai 2,2 cm beträgt.

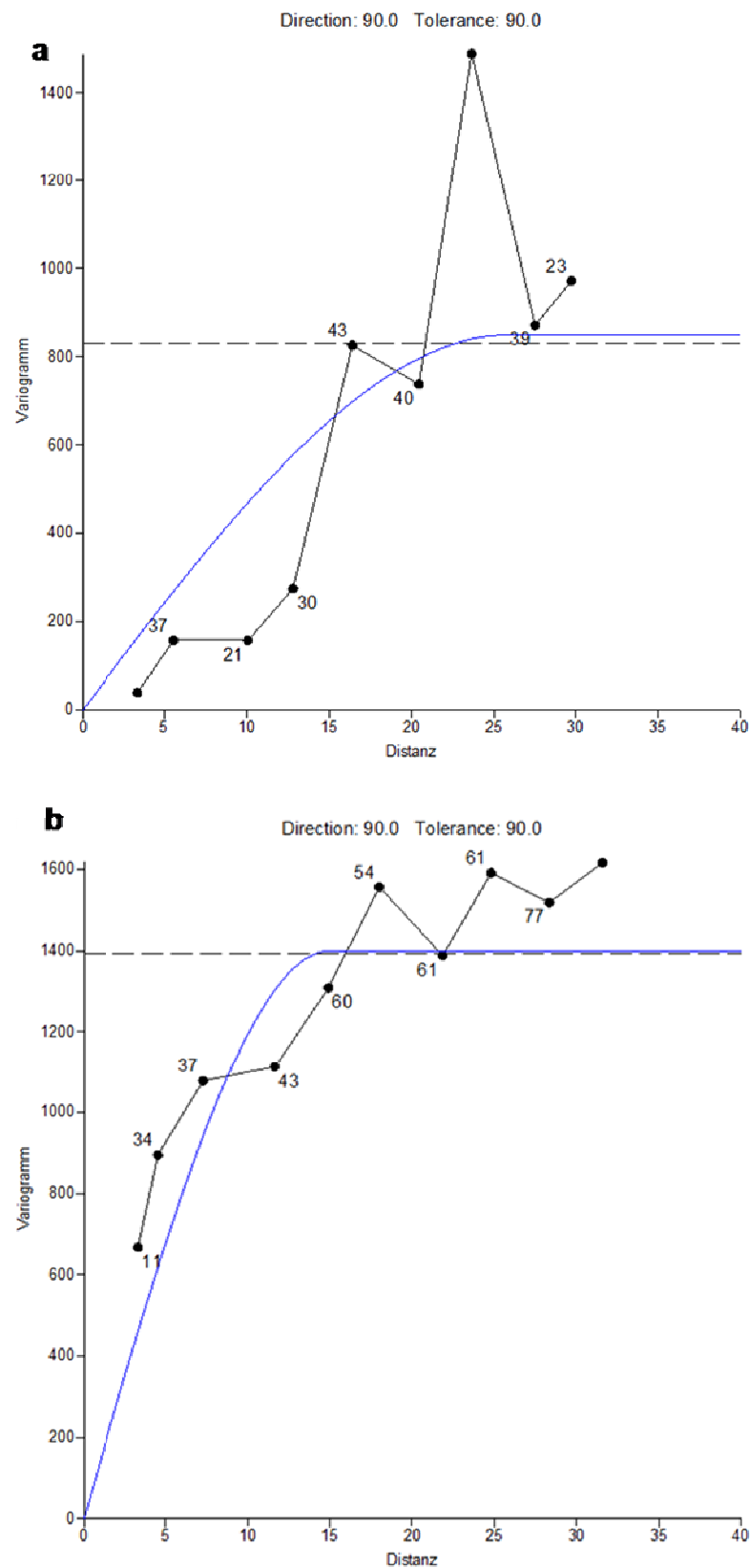
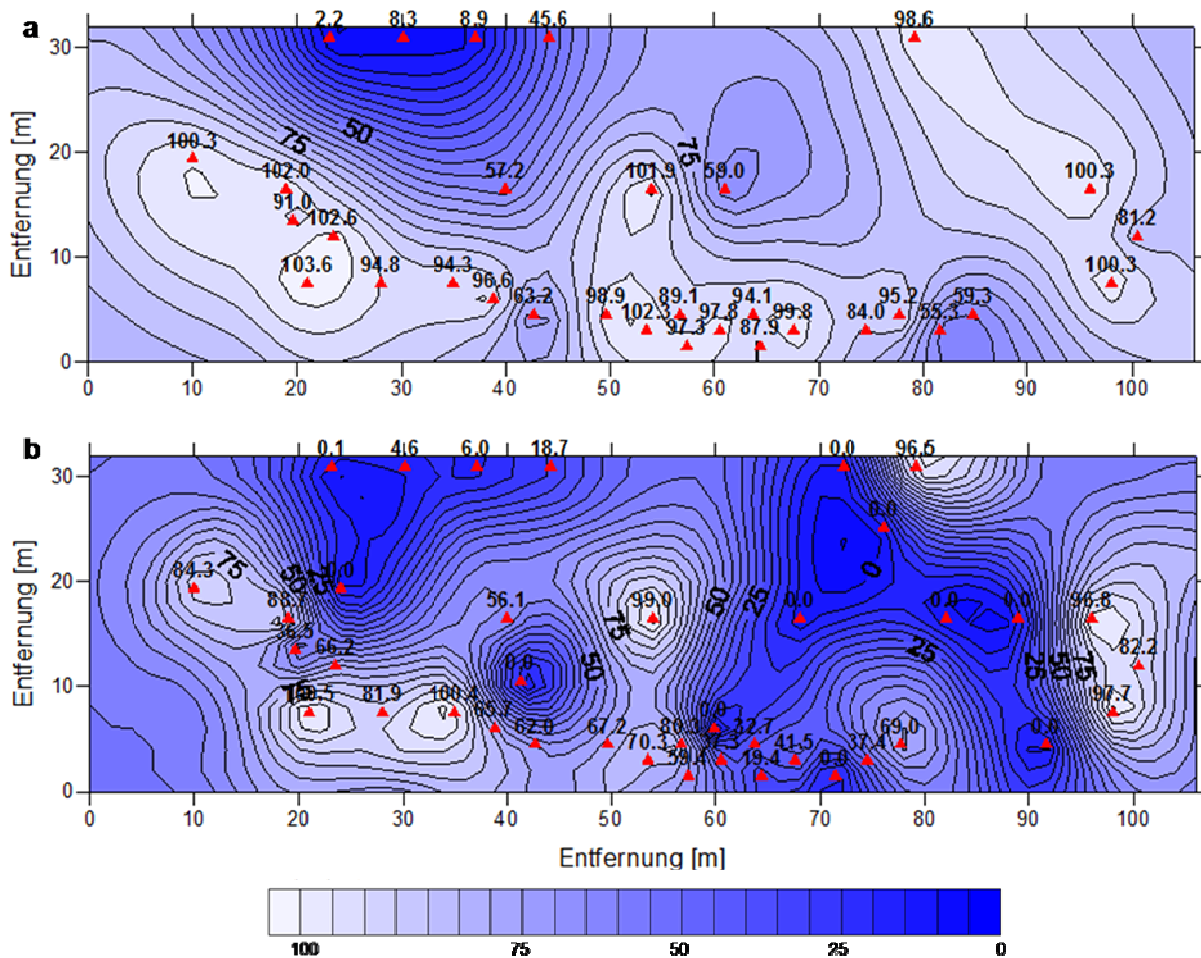


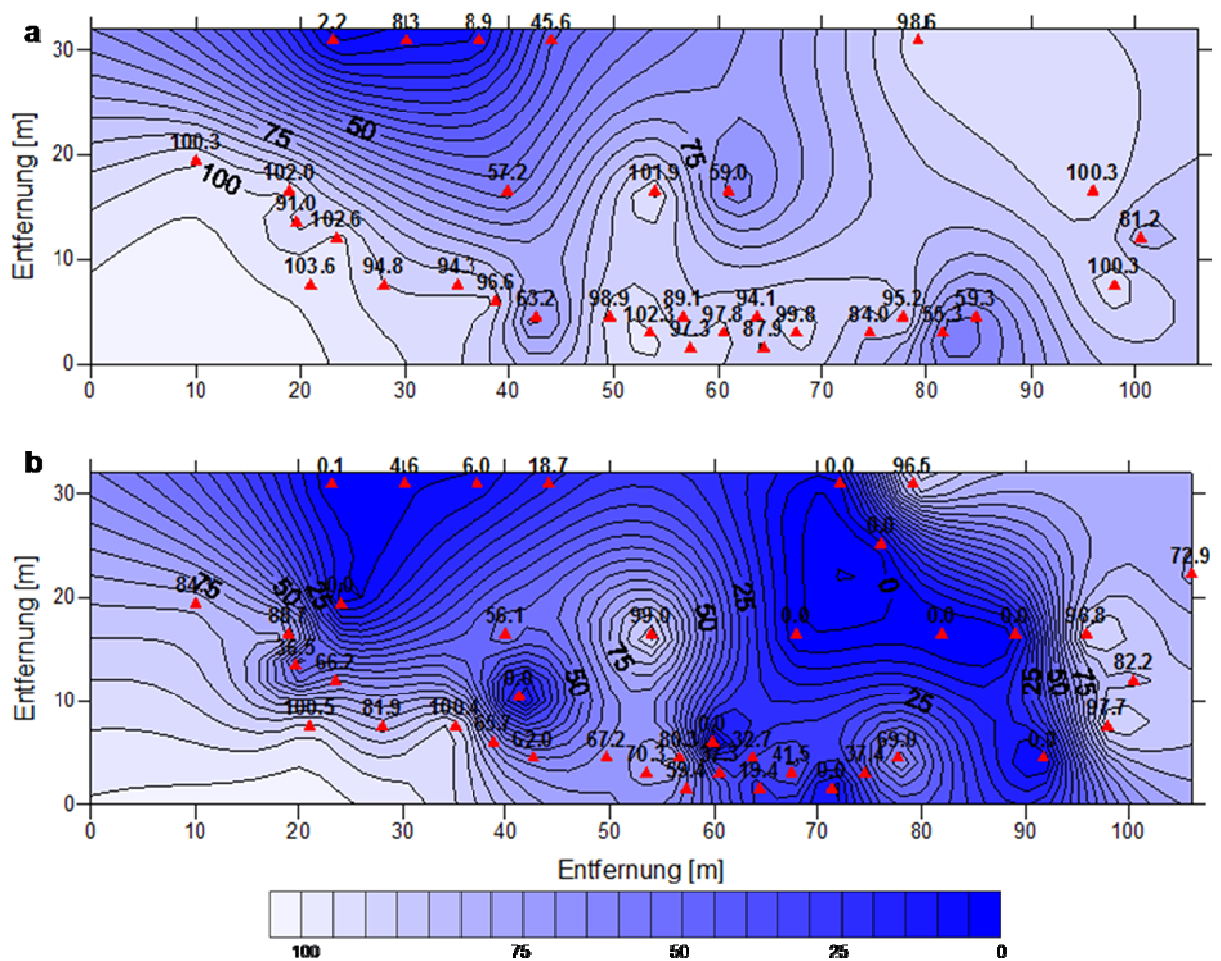
Abbildung 5.2

Varianz (gestrichelte Linie), experimentelles (schwarz) und theoretisches (blau) Variogramm der minimalen Flurabstände der Odyssey Rekorder des Niederschlagsereignisses vom 15.05.2009 (a) und vom 15.07.2009 (b)



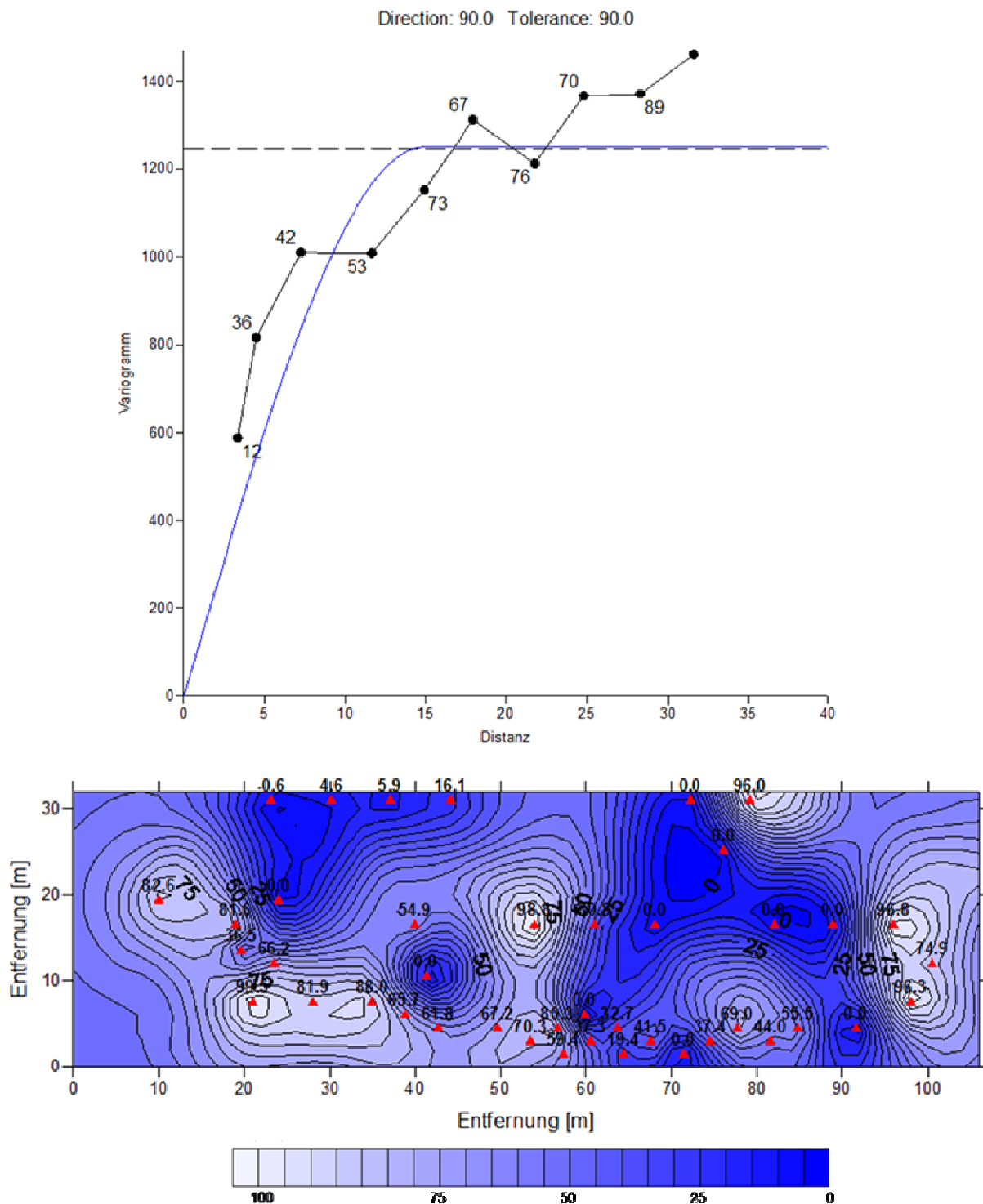
**Abbildung 5.3** Räumliche Interpolation mit Kriging des visuell angepassten Variogrammodells für die minimalen Flurabstände der Odysseys und der Flaschen für die Niederschlagsereignisse vom 15.05.2009 (a) und 15.07.2009 (b)

Als Vergleich wurde die räumliche Interpolation mit Kriging direkt für die gemessenen Daten der Niederschlagsereignisse vom 15. Mai und 15. Juli 2009 durchgeführt (siehe Abbildung 5.4). Die Darstellung ist gleich wie Abbildung 5.3. Der Unterschied zwischen den Niederschlagsereignissen in Bezug auf Flurabstand, ist deutlich anhand der Farbgebung (dunkler je geringer der Abstand zur GOK) und zusätzlich auch anhand der Absolutwerte des Minimalabstandes zur Geländeoberkante erkennbar. Im Vergleich zu Abbildung 5.3 zeigt Abbildung 5.4 ausgedehntere Verbindungen zwischen den Probestellen. Ansonsten sind keine größeren Unterschiede zwischen den beiden Abbildungen zu erkennen.



**Abbildung 5.4** Räumliche Interpolation mit Kriging der minimalen Flurabstände der Odysseys und Fläschchen für die Niederschlagsereignisse vom 15.05.2009 (a) und 15.07.2009 (b)

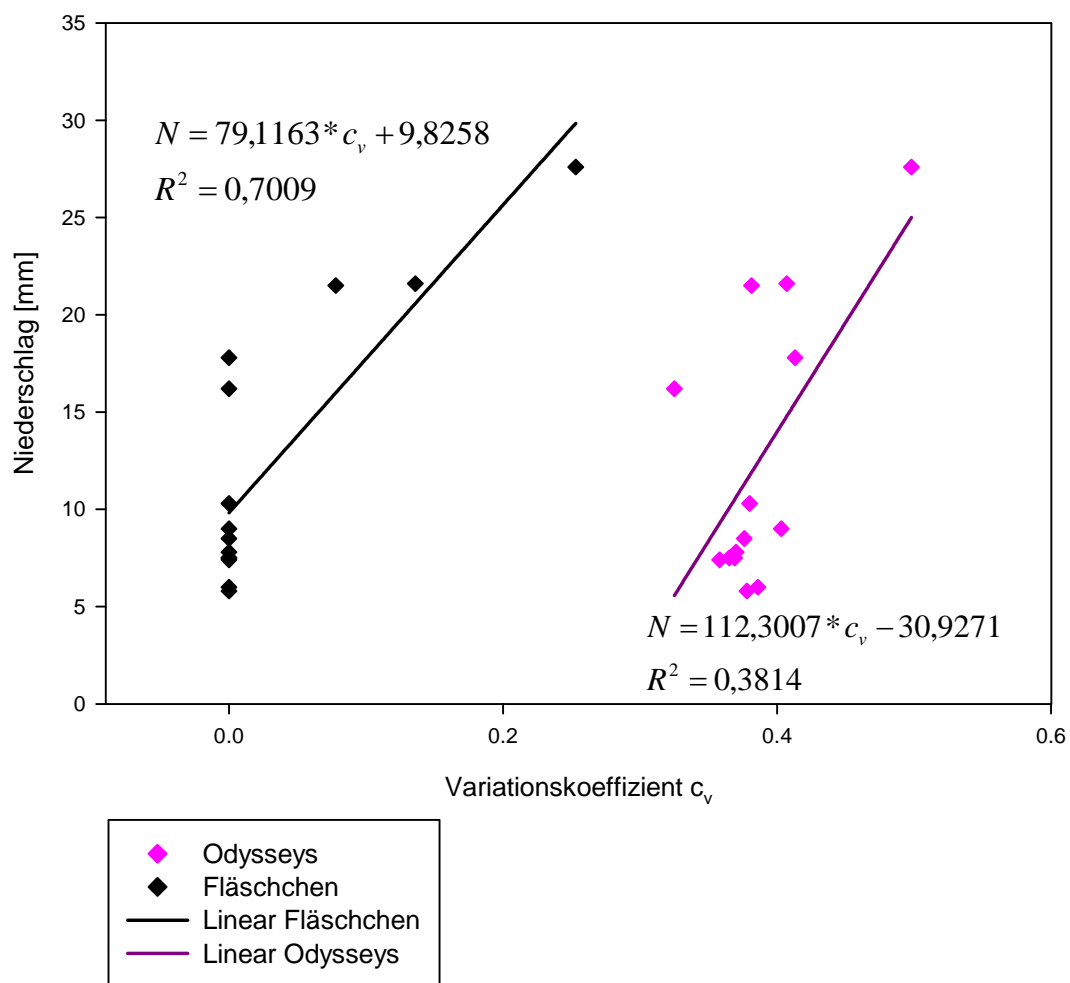
Zum Vergleich der Niederschlagsereignisse wurden auch die minimalsten Flurabstände über den Zeitraum vom 01.05.2009 bis 16.07.2009 betrachtet (Abbildung 5.5). Dabei ist zu erkennen, dass es keine wesentlichen, auffallenden Unterschiede zwischen den Darstellungen der räumlichen Interpolation mit Kriging gibt. Unterschiede sind vor allem bei den minimalsten Flurabstandswerten der Odyssey Rekorder zu sehen. Die Flurabstandswerte in der Abbildung 5.3 (b) und der Abbildung 5.5 zeigen auch, dass obwohl das Niederschlagsereignis vom 15.07.2009 das größte während des Untersuchungszeitraumes war, nicht alle Odyssey Probestellen während dieses Ereignisses den geringsten Flurabstand hatten. Dabei beträgt der mittlere minimalste Flurabstand der untersuchten Niederschlagsereignisse 44,8 cm und der Variationskoeffizient kommt auf einen Wert von 0,788 (vgl. Tabelle 5.3).



**Abbildung 5.5** Varianz (gestrichelt), experimentelles (schwarz) mit Paaren und theoretisches (blau) Variogramm (oben) und räumliche Interpolation mit Kriging (unten) des visuell angepassten Variogrammmodells der minimalsten Flurabstände über den Zeitraum vom 01.05.2009 bis 16.07.2009

In der Abbildung 5.6 sind die Variationskoeffizienten aus den ermittelten experimentellen Variogrammen für die PVC-Fläschchen und die Odysseys in Abhängigkeit des Niederschlags dargestellt. Ein Variationskoeffizient von Null für die Fläschchen bedeutet, dass diese nach

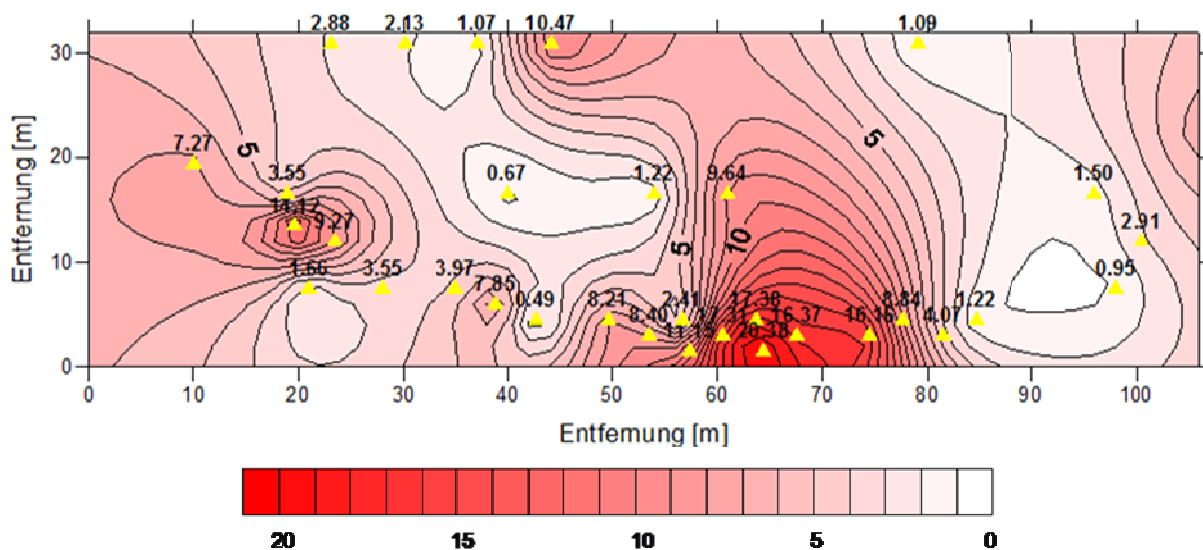
dem untersuchten Niederschlagsereignis nicht gefüllt waren. Bei den 14 untersuchten Ereignissen kam es nur nach drei Niederschlagsereignissen zur Füllung von installierten Fläschchen. Auch der minimale Flurabstand bei den Odyssey Rekordern ist größer bei einem niedrigeren Variationskoeffizienten. Bei zunehmender Niederschlagsmenge zeigt sich sowohl für die Fläschchen als auch für die Odysseys ein höherer Variationskoeffizient, so dass beide eine positive Steigung haben (vgl. Abbildung 5.6). Dabei ist das Bestimmtheitsmaß der linearen Regressionsgerade der PVC-Fläschchen etwa doppelt so groß wie das Bestimmtheitsmaß der Odyssey Rekorder.



**Abbildung 5.6** Darstellung des Variationskoeffizienten aus den experimentellen Variogrammen von den Fläschchen und den Odysseys gegenüber dem Niederschlag

### 5.1.2 Standardabweichung

Nachdem die Niederschlagsereignisse von bestimmten Tagen einzeln auf den minimalen Abstand zur Geländeoberkante der 33 Odyssey Data Rekorder untersucht waren, wurde die Standardabweichung dieser Werte berechnet und ebenfalls mit Hilfe eines Semivariogramms mit Kriging räumlich interpoliert (Abbildung 5.7). Deutlich wird, dass es vereinzelt Stellen mit einer höheren Standardabweichung gibt, wie etwa bei einer Entfernung von 60 m (horizontal). Dort kann die Standardabweichung einen Wert von bis zu 20 cm annehmen. Überwiegend zeigt sich aber ein Bild von eher geringeren Standardabweichungen von bis zu 5 bzw. 10 cm.



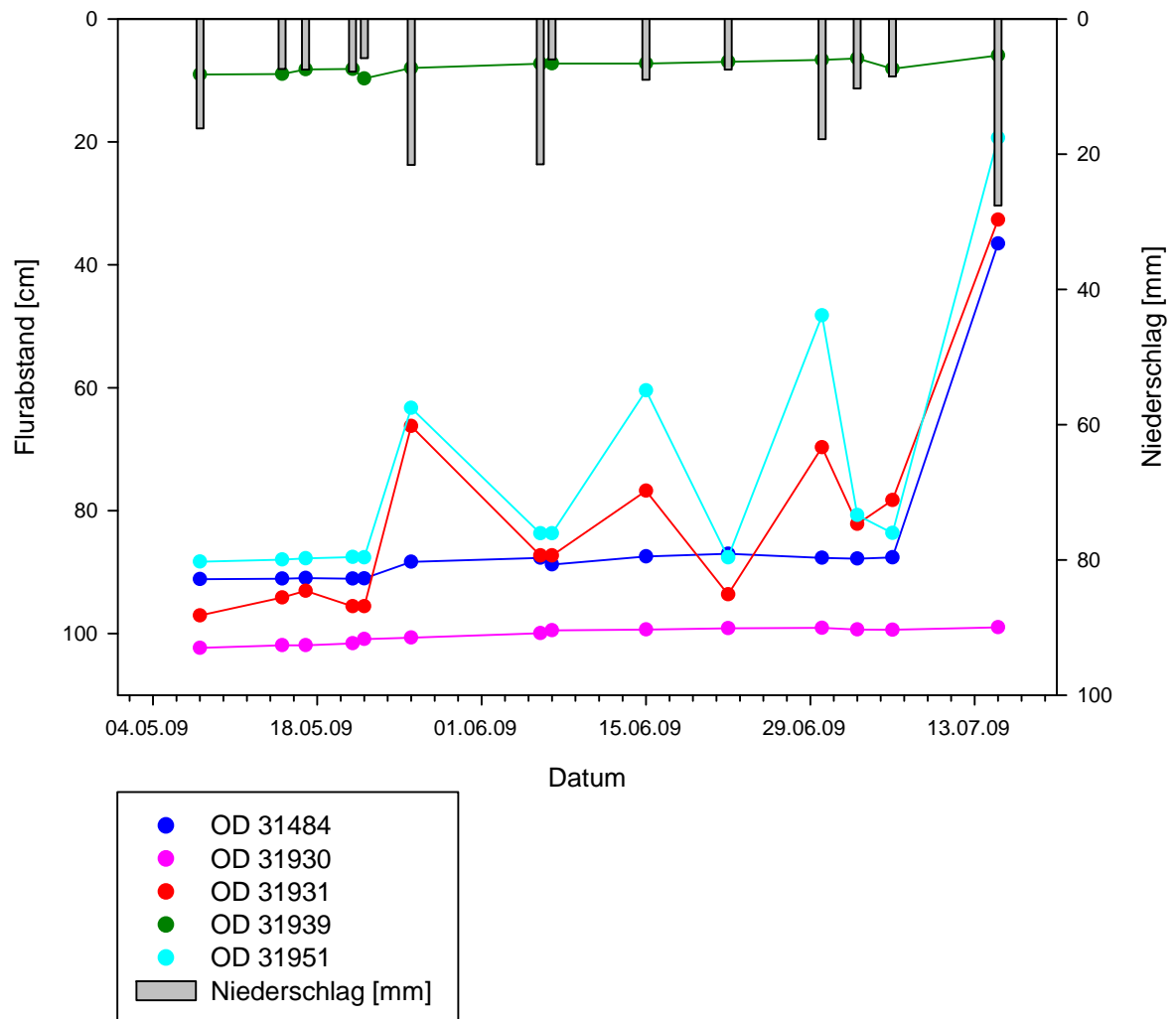
**Abbildung 5.7** Räumliche Interpolation mit Kriging der Standardabweichung der minimalen Flurabstände der Odysseys über die untersuchten Niederschlagsereignisse

In Tabelle 5.3 sind die statistischen Kenngrößen dieser Berechnung dargestellt. Mit einem Variationskoeffizienten von 0,846 und einer mittleren Standardabweichung von 5,769 cm für die Standardabweichung der minimalen Flurabstände der Odyssey Rekorder über die untersuchten Niederschlagsereignisse.

Zur genaueren Betrachtung der Unterschiede in der Standardabweichung in Bezug auf den minimalen Wasserspiegelabstand zur Geländeoberkante der untersuchten Niederschlagsereignisse sind in Abbildung 5.8 eine Auswahl an Odyssey Rekordern mit unterschiedlichen Standardabweichungen dargestellt. Zur Lage dieser Odyssey Rekorder vergleiche im Anhang Abbildung A. 1. Die Standardabweichung für die Odysseys 31930 und 31939 beträgt dabei etwa jeweils 1,2 cm und für die Odysseys 31484, 31931 und 31951 liegt sie zwischen 14 und 21 cm (vgl. Tabelle A. 9). In Abbildung 5.8 ist zu sehen, dass eine geringe Standardabweichung sowohl einen geringen aber auch einen hohen Flurabstand bedeuten kann. Die Odyssey Rekorder 31931 und 31951 zeigen einen ähnlichen



Kurvenverlauf und Odyssey 31484 zeigt nur einen minimalen Anstieg bis zum Niederschlagsereignis vom 15.07.2009, das höchste im Untersuchungszeitraum, dort kommt es zu einer größeren Änderung des Flurabstandes.

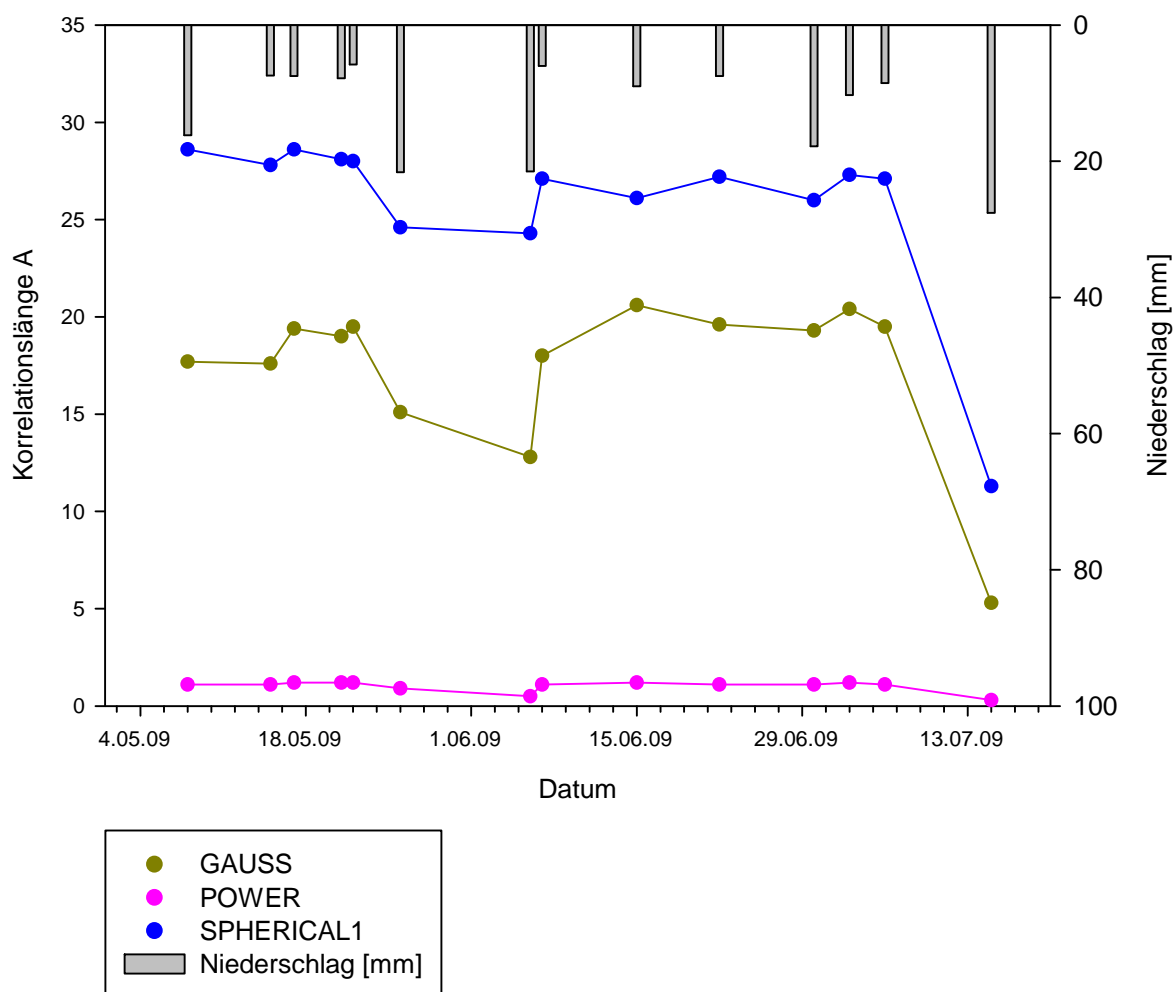


**Abbildung 5.8** Vergleich einer Auswahl von 5 Odyssey Rekorder (31484, 31930, 31931, 31939, 31951), die eine sehr unterschiedliche Standardabweichung aufweisen, über die Zeit und mit dem gefallenem Niederschlag

### 5.1.3 Berechnete Variogrammodelle

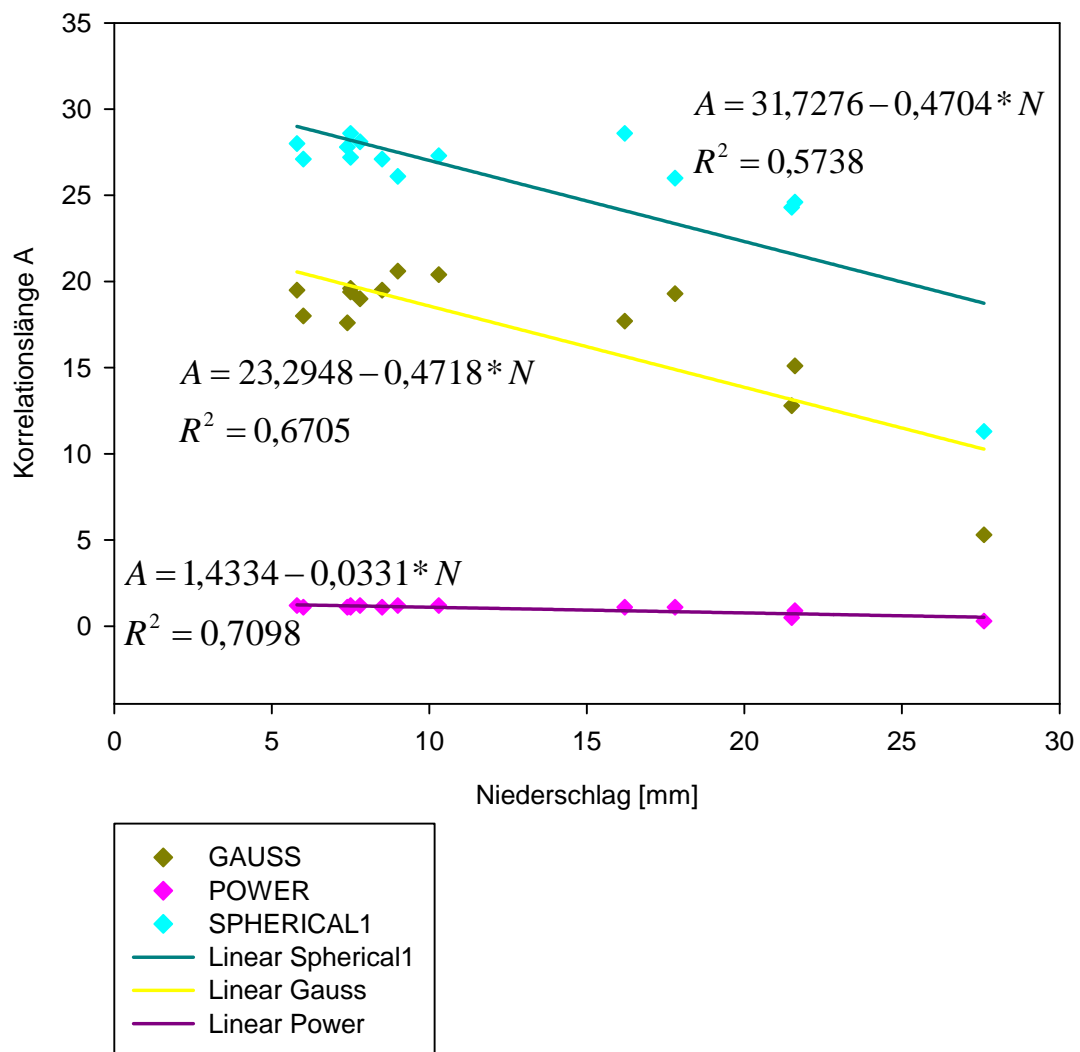
Da das theoretische Variogramm in dem Programm Surfer 8 visuell angepasst wird, wurden noch zusätzliche Variogrammodelle beziehungsweise deren Parameter Korrelationslänge und Varianz berechnet (vgl. Tabelle A. 10). Dies erfolgte über den Abstand der kleinsten Quadrate des experimentellen Variogramms zum jeweiligen Variogrammodell.

Bei der Darstellung der Korrelationslänge gegenüber der Zeit beziehungsweise den Niederschlagsereignissen im zeitlichen Verlauf ist ein ähnlicher Verlauf der Kurven von dem Modell Gauss (dunkelgelb) und Sphärisch1 (blau) zu sehen (vgl. Abbildung 5.9). Die Kurve des Power Modells dagegen hat sehr geringe Werte für die Korrelationslänge. Aber auch sie zeigt eine Abnahme der Korrelationslänge A für größere Niederschlagsereignisse wie vom 26.05., 06.06. und 15.07.2009 wie die anderen beiden Kurven, wobei die Abnahme bei den Variogrammodellen Gauss und Sphärisch1 deutlicher ist.



**Abbildung 5.9** Darstellung der Korrelationslängen von den Variogrammodellen Gauss, Power und Spherical1 gegen die Zeit und mit dem gefallenem Niederschlag

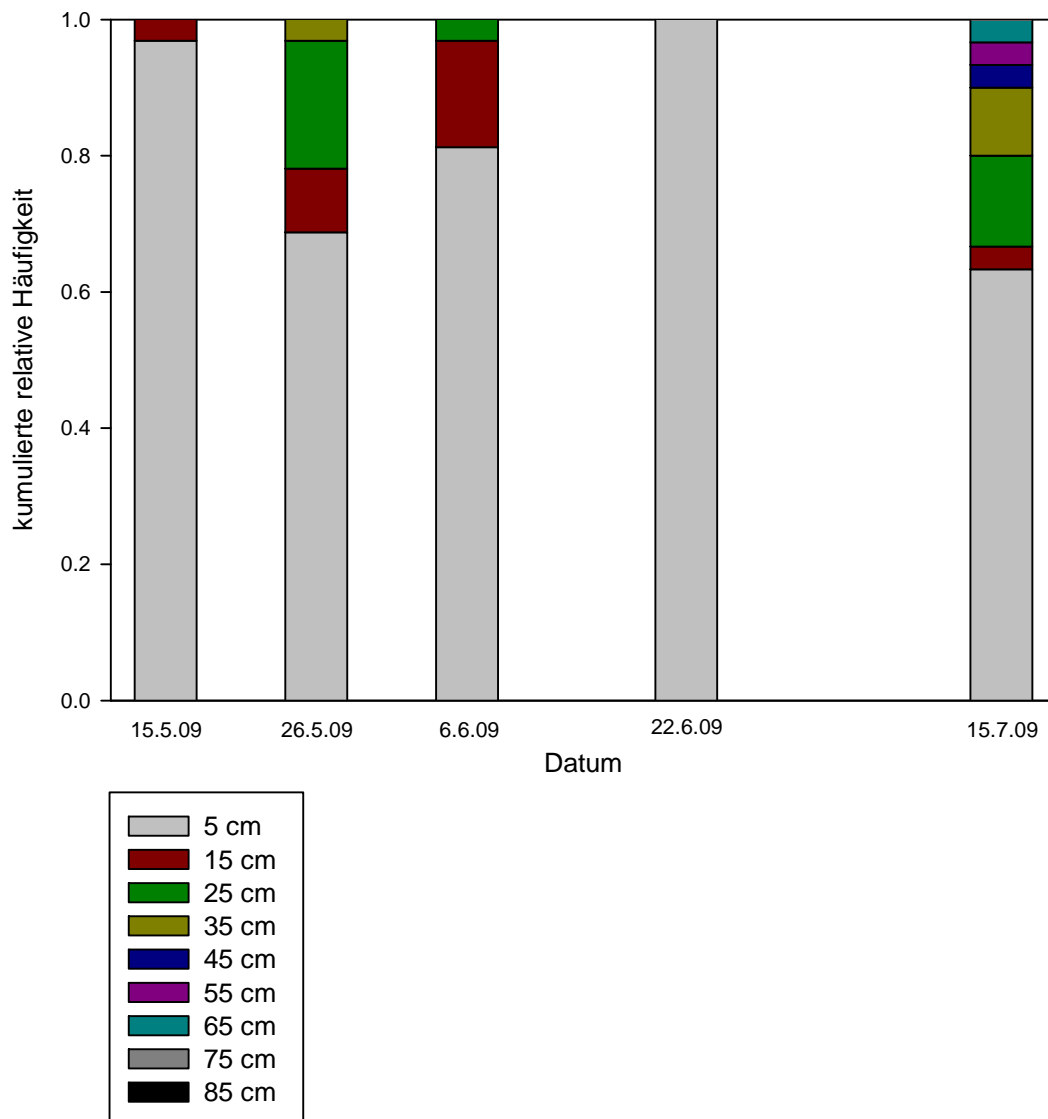
Beim Vergleich der Korrelationslänge A mit der Niederschlagsmenge (Abbildung 5.10) ist bei allen drei Graphen der negative Trend mit zunehmender Niederschlagsmenge zu sehen. Die Variogrammmodelle Sphärisch1 und Gauss zeigen dabei eine größere Abnahme der Korrelationslänge mit zunehmendem Niederschlag im Vergleich zu dem Modell Power und besitzen eine ähnliche Steigung bei der linearen Regressionsgerade durch die jeweilige Punktwolke. Aber dafür ist das Bestimmtheitsmaß des Variogrammmodells Power größer als bei Gauss und Sphärisch1, wobei das Bestimmtheitsmaß vom Gauss'schen Variogrammmodell in etwa derselben Größenordnung liegt wie das von Power um die 0,7.



**Abbildung 5.10** Darstellung der Korrelationslängen der Variogrammmodelle Gauss, Power und Spherical1 gegen den Niederschlagsmenge pro Tag für die untersuchten Ereignisse mit den jeweiligen Regressionsgeraden, -gleichungen und dem Bestimmtheitsmaß

## 5.2 Anstieg der Wasserstände

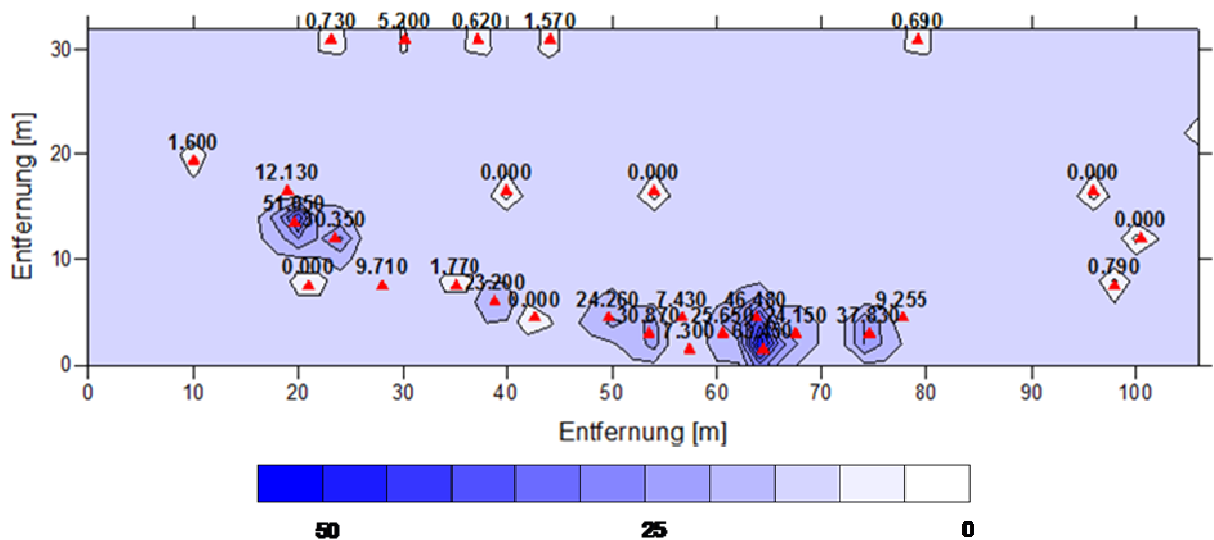
Die maximalen Anstiege der Odyssey Rekorder wurden in Klassen von 10 cm unterteilt. So konnte die sekundäre kumulative relative Häufigkeit für verschiedene Niederschlagsereignisse für die Mittelwerte dieser Klassen berechnet werden (Abbildung 5.11). Dabei wurden die drei höchsten (26.5.09, 6.6.09 und 15.7.09) und zwei niedrigere Ereignisse (17.5.09 und 22.6.09) des Untersuchungszeitraumes, wie auch schon für die kumulierte Häufigkeit der minimalen Flurabstände in Abbildung 5.1, ausgewählt. Der Unterschied zwischen den Anstiegen bei den niedrigen und hohen Niederschlagsereignissen ist deutlich zu sehen. Bei den niedrigen Niederschlagsmengen vom 15. Mai und 22. Juni überwiegen die Anstiege von 5 cm, wobei es sich am 22.06.2009 ausschließlich um Anstiege von 5 cm handelte. Bei den Ereignissen vom 26.05.2009 und 06.06.2009 kam es auch zu Anstiegen bis zu 35 cm, welche 20-25% der Gesamtanstiege ausmachen. Das größte Niederschlagsereignis zeigt sogar Anstiege bis zu 65 cm. Auffällig ist, dass die Anstiege von 15-65 cm beinahe 40% der Gesamtanstiege bei den Odyssey Rekordern ausmachen. Anstiege größer als 65 cm traten bei den untersuchten Niederschlagsereignissen während des Untersuchungszeitraumes nicht auf.



**Abbildung 5.11** Darstellung der kumulierten relativen Häufigkeit der maximalen Anstiege des Wasserstandes in den Odyssey Probestellen der für bestimmte Niederschlagsereignisse

Da auch ein Anstieg über den gesamten Untersuchungszeitraum in den Abbildung A. 2 bis Abbildung A. 34 zu erkennen war, wurde auch dieser mit Hilfe von Variogrammen und Kriging räumlich interpoliert (siehe Abbildung 5.12). Dabei fällt auf, dass es trotz der Mehrheit an positiven Anstiegen auch vereinzelt zu einem, wenn auch minimalen, Abfall des Flurabstandes kommt. Wie bei dem maximalen Wasserspiegelanstieg des Niederschlagsereignisses vom 15.07.2009 ist auch beim Gesamtanstieg die





**Abbildung 5.13** Räumliche Interpolation mit Kriging mit den Werten des maximalen Wasserspiegelanstiegs beim Niederschlagsereignis vom 15.07.2009

**Tabelle 5.3** Statistische Kenngrößen des Anstieges vom 15.07.2009, des Anstieges und dem minimalsten Flurabstand im Zeitraum vom 01.05.2009-16.07.2009 und der Standardabweichung der minimalen Flurabstände der Odysseey Rekorder für die untersuchten Ereignisse

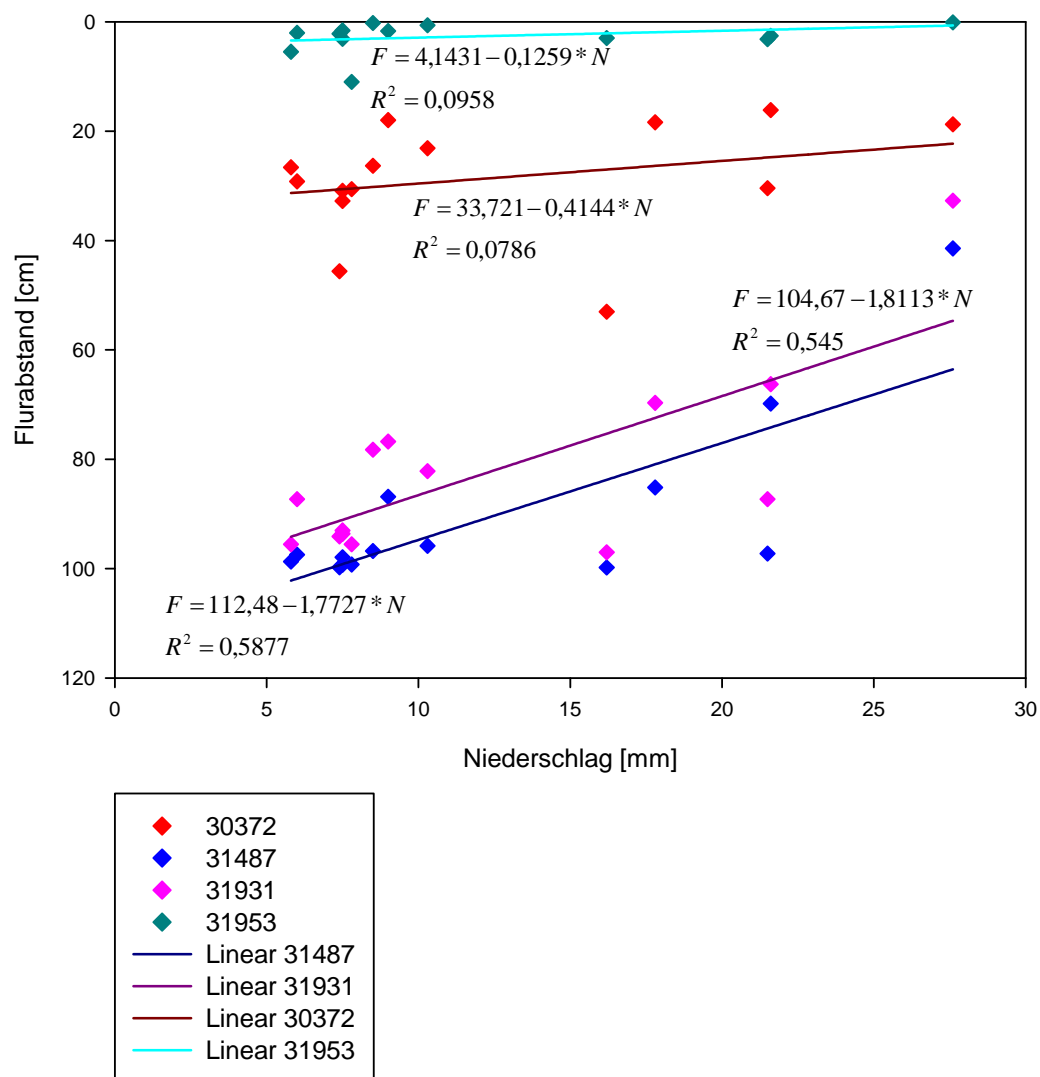
|                 | Anstieg<br>15.7.09 | Anstieg<br>1.5.-16.7. | MIN<br>1.5.-16.7. | Stdabw<br>unters.<br>Ereignisse |
|-----------------|--------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------|
| <b>MW</b>       | 13.979             | 14.956                | 44.779            | 6.815                           |
| <b>Varianz</b>  | 302.901            | 445.795               | 1243.94           | 33.276                          |
| <b>Stdabw</b>   | 17.404             | 21.114                | 35.27             | 5.769                           |
| <b>Varkoeff</b> | -                  | -                     | 0.788             | 0.846                           |

### 5.3 Konnektivität

Aufgrund des geringen Niederschlags wurde für die Odyssee Rekorder der Flurabstand der Odysseys gegen den Niederschlag (für 4 Odysseys siehe Abbildung 5.14) dargestellt, um Aussagen über das Sättigungsdefizit zu erhalten und die theoretisch notwendige Niederschlagsmenge für die Sättigung an dieser Stelle berechnet (Tabelle 5.4). Das heißt in Abbildung 5.14 ist zu erkennen, bei welcher Niederschlagshöhe der Flurabstand gleich Null (gesättigt) gewesen wäre. Man kann erkennen, dass zwei der Odysseys (31487, 31931) einen linearen Trend bei zunehmendem Niederschlag zeigen, während die anderen beiden (30372, 31953) einen eher gleichmäßigen Verlauf des Flurabstandes aufweisen. Diese reagieren zwar

auch auf Niederschlag, aber nicht mit so hohen Anstiegen wie die Odysseys 31487 und 31931.

Der mögliche Niederschlag, der für eine Sättigung notwendig gewesen wäre, konnte aus der linearen Regressionsgeradengleichung berechnet werden. Die so berechneten Niederschlagsmengen, die unter 100 mm lagen, sind in Tabelle 5.4 mit dem jeweiligen Odyssey Rekorder zusammengestellt.



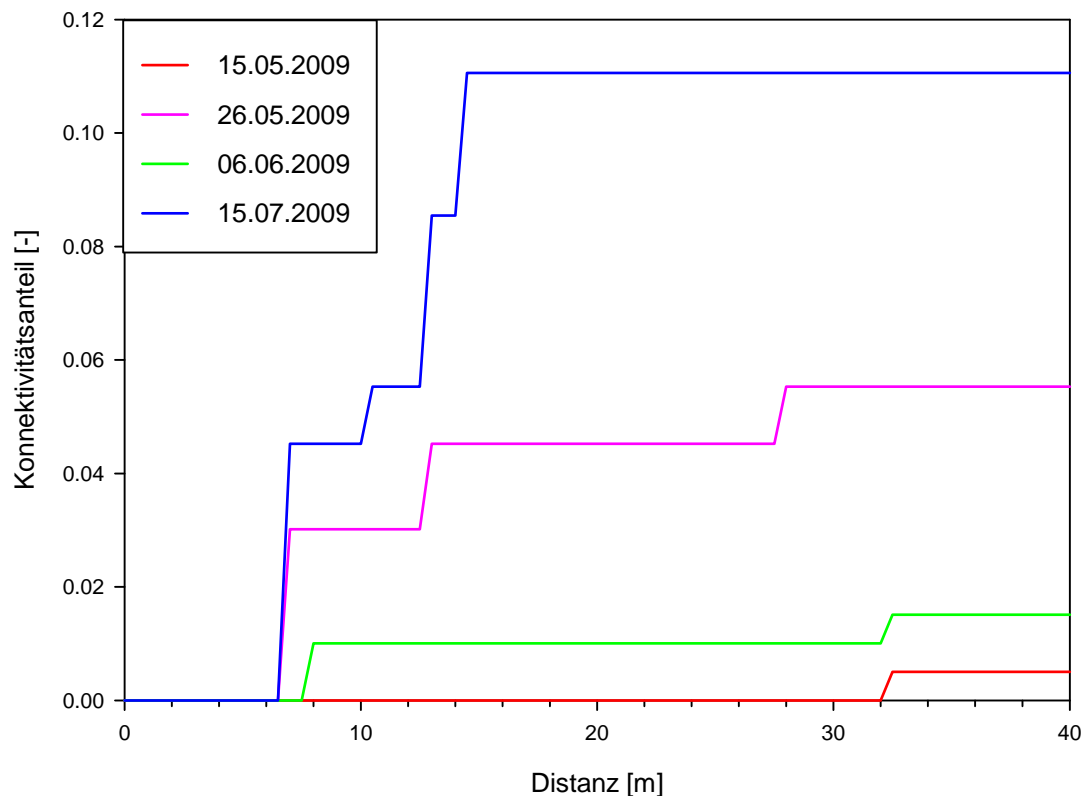
**Abbildung 5.14** Darstellung des Flurabstandes [cm] gegen den Niederschlag [mm] für vier Odyssey Rekorder



**Tabelle 5.4** Der notwendige Niederschlag damit der Boden gesättigt wäre, berechnet aus den linearen Regressionsgleichungen.

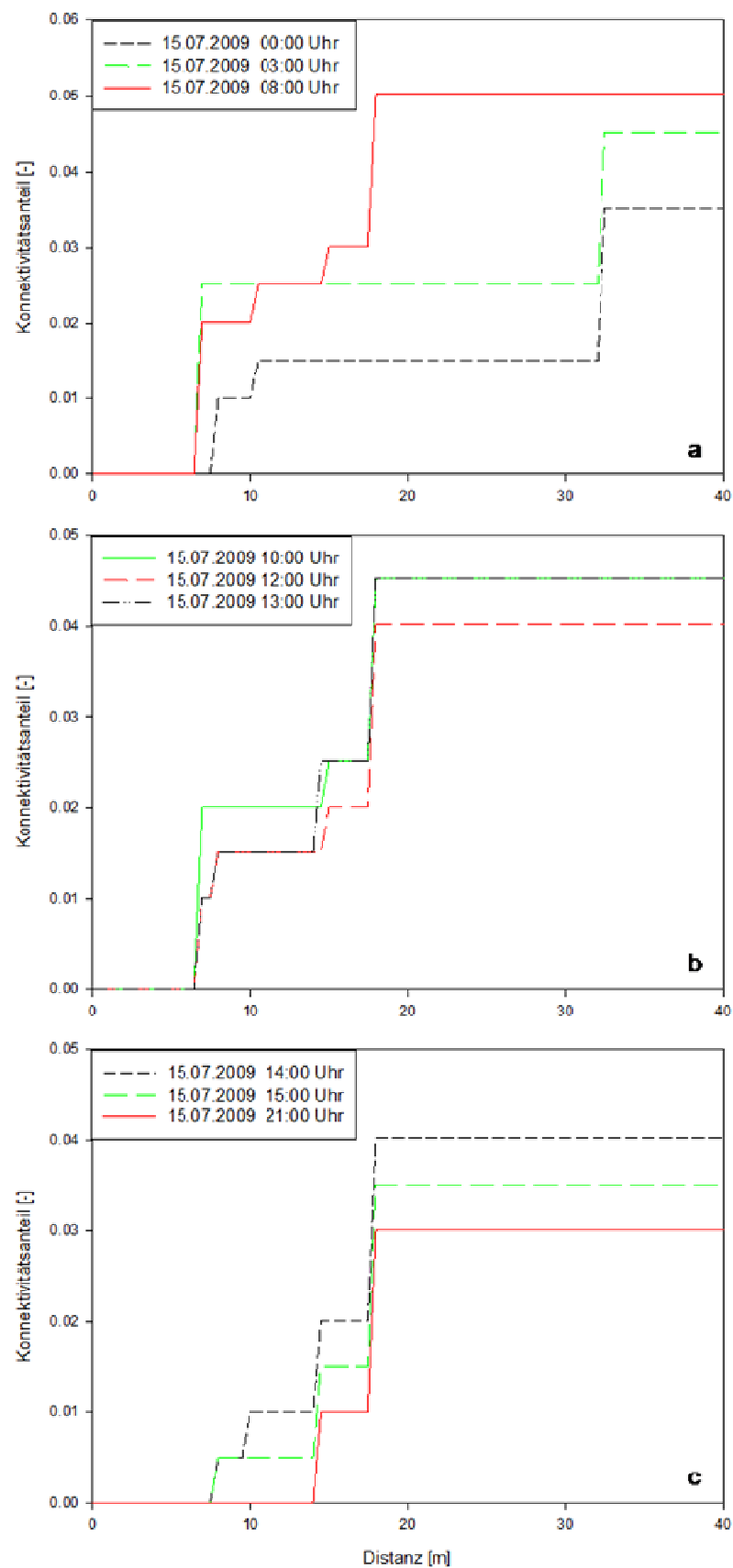
| OD           | N [mm]<br>für F = 0 |
|--------------|---------------------|
| <b>30372</b> | 81.4                |
| <b>31484</b> | 79.5                |
| <b>31487</b> | 63.5                |
| <b>31931</b> | 57.8                |
| <b>31935</b> | 59.3                |
| <b>31942</b> | 78.5                |
| <b>31951</b> | 48.7                |
| <b>31953</b> | 32.9                |

Der Konnektivitätsanteil steht hier für alle Zellen, welche mit dem Ausfluss verbunden sind, wurde für bestimmte Niederschlagsereignisse (15.05.2009, 26.05.2009, 06.06.2009, 15.07.2009) mit einer Clusteranalyse bestimmt. Die Bedingungen für die Annahme einer Sättigung der Probestelle wurde zuvor festgelegt (vgl. Kapitel 4.4 Datenauswertung). Der Konnektivitätsanteil wird hier als der Anteil aller Zellen, die mit dem Ausfluss verbunden sind, gegen die Distanz dargestellt (vgl. Abbildung 5.15). In Abbildung 5.15 ist der Unterschied der Anteile der verbundenen Zellen an den verschiedenen Ereignissen über die Distanz deutlich zu erkennen (für die Niederschlagsmenge siehe Tabelle A. 7). So erreicht der Konnektivitätsanteil bei dem höchsten Ereignis (15.07.2009) etwa 11%. Das bedeutet, dass das Wasser, das auf 11% aller Zellen fällt, bei einer Distanz von etwa 12 m in den Ausfluss gelangen könnte. Bei dem niedrigsten der vier abgebildeten Ereignisse erreicht der Konnektivitätsanteil kaum 1% bei einer Distanz von etwa 32 m. Der Konnektivitätsanteil beträgt bei einer Distanz von 7 m für den 15. Juli etwa 4,5%, für den 26. Mai etwa 3%, für den 6. Juni etwa 1% und 0% für den 15. Mai 2009.



**Abbildung 5.15** Darstellung des Anteils aller Zellen, die mit dem Ausfluss verbunden sind, in Abhängigkeit der Distanz für verschiedene Niederschlagsereignisse

Der Anteil aller Zellen, die mit dem Ausfluss verbunden sind, ist über die Distanz für den 15. Juli 2009 in Abbildung 5.16 dargestellt. Bei den für eine bestimmte Uhrzeit abgebildeten Kurven hat sich jeweils die Anzahl der unter den festgelegten Kriterien (vgl. Kapitel 4.4 Datenauswertung) gesättigten Odysseys geändert. In (a) ist die Erhöhung des Konnektivitätsanteils bis 8:00 Uhr (rote Kurve) zu erkennen. Dieser erreicht bei einer Distanz von 7 m 2% und bei 18 m etwa 5%. Dieser Anstieg ist mit der Dauer des Niederschlags (vgl. im Anhang, Tabelle A. 7) konform. Bei (b) ist ein Schwanken der Kurven zu erkennen. Es kommt zu einer Abnahme um 10:00 Uhr (grün) im Vergleich zu 8:00 Uhr, einhergehend mit dem Ende des Niederschlags um 10:00 Uhr. Aber ebenso zu einem erneuten geringen Anstieg um 13 Uhr (schwarz). Die Abnahme des Konnektivitätsanteils von 14:00 bis 21:00 Uhr ist in (c) zu ersichtlich, wobei sich bis 0:00 am 16. Juli keine Änderung mehr ergibt. Dabei beträgt der Anteil der angebundenen Zellen um 21:00 Uhr 0% bis zu einer Distanz von etwa 14 m.



**Abbildung 5.16** Darstellung des Anteils aller Zellen, die mit dem Ausfluss verbunden sind, in Abhängigkeit der Distanz für den 15.07.2009 zu verschiedenen Uhrzeiten



## 6 Diskussion

Um auf die Fragestellungen, die hinter dieser Arbeit stehen, Stellung nehmen zu können, wurden die erhobenen Daten unter verschiedenen Gesichtspunkten und Herangehensweisen ausgewertet. Im Folgenden werden diese Ergebnisse diskutiert.

Es sind Niederschläge mit einer Niederschlagsmenge größer als 5 mm pro Tag in die Untersuchung eingegangen (siehe Tabelle 5.1), da davon ausgegangen werden konnte, dass geringere Niederschlagsmengen für die Sättigung nur eine geringe Rolle spielen. Mit Experimenten zur Abflussbildung am Hang unter Verwendung verschiedener Niederschlagsintensitäten stellten YAIR & LAVEE (1985) fest, dass es nur bei Niederschlagsereignissen, die größer sind als 9 mm/h und mindestens 45 Minuten dauern, zu einer gleichmäßigen Abflussbildung am Hang kommt. PESCHKE & SAMBALE (1999) konnten bei ihren Untersuchungen feststellen, dass erst eine Niederschlagsmenge von etwa 20 mm kleinere Flächen in Gerinnenähe zur Bildung von Sättigungsflächenabfluss aktiviert. Die Auswertung der Anstiege der Odyssey Rekorder in Abbildung 5.13 bestätigte dies. Zum Beispiel bei dem Niederschlagsereignis vom 22. Juni 2009 mit einer Niederschlagsmenge von 7,5 mm kam es ausschließlich zu Anstiegen der Klasse 5 cm.

Bei Betrachtung der Niederschlagsintensität der untersuchten Ereignisse (Tabelle 5.2) haben nicht die größten Niederschläge die höchsten Intensitäten sondern überwiegend die Niederschläge mit einer geringeren Ereignisgröße. Für die Sommermonate in meinem Untersuchungsgebiet zeigt sich, dass Sättigungsflächenabfluss erst ab einer bestimmten Ereignisgröße unabhängig von einer hohen Niederschlagsintensität auftritt. Die Ereignisgröße und -dauer gehört nach BRACKEN & CROKE (2007) mit zu den Hauptkomponenten der Einzugsgebietskonnektivität. Die hangskalige hydrologische Konnektivität wird im Gegensatz zur einzugsgebietskaligen hydrologischen Konnektivität durch Ereignisse mit einer kürzeren Dauer oder mit einer niedrigeren Intensität ausgelöst.

Die Einzugsgebietsreaktion auf intensive Niederschläge, so NAEF et al. (2002), ist sowohl von den Flächen, auf denen einzelne Abflussprozesse auftreten, als auch von der räumlichen Verteilung der verschiedenen dominierenden Abflussbildungsprozesse abhängig. Das bedeutet, dass ein Gebiet mit einem hohen Anteil von Sättigungsabflussflächen stark auf Niederschlagsereignisse bei nassen Vorfeuchtebedingungen reagiert und ein Gebiet mit einem großen Flächenanteil von verzögertem Sättigungsflächenabfluss trägt nur zum Abfluss bei, wenn es zu hohen Niederschlagsereignissen auf feuchte Böden kommt. So ist die Entstehung von raschem, lateralem Bodenabfluss vom Auftreten gesättigter Gebiete, in denen sich das Wasser frei bewegen kann, abhängig (GUTKNECHT 1996).

## 6.1 Flurabstand der Probestellen

Über die Kenntnis der räumlichen Verteilung der dominierenden Abflussprozesse innerhalb eines Einzugsgebiets können die Abflussbildungsprozesse genauer verstanden werden (GUTKNECHT 1996). Dabei wird das Abflussverhalten in Waldökosystemen nach SCHÜLER (2003) vor allem von oberflächennahem Zwischenabfluss und Tiefenversickerung bestimmt. Hochwasserrelevante Situationen entstehen im Wald überwiegend nach Extremniederschlägen und dem Winterhalbjahr, wenn die Böden gesättigt sind und im zweiten Fall die Schneeschmelze auftritt. Die Baumartenzusammensetzung spielt dabei keine Rolle. Daher ist es unbedeutend, dass das Untersuchungsgebiet von Linden und Kirschen bestimmt wird im Gegensatz zum Großteil des südlichen Schwarzwaldes, der mit Misch- und Nadelwald bedeckt ist.

Bei der Darstellung der kumulierten Häufigkeit der minimalen Flurabstände für bestimmte Niederschlagsereignisse in Abbildung 5.1 zeigt sich ein klarer Trend zu einem höheren Anteil an niedrigeren Flurabständen bei höheren Ereignissen.

Bei einem Flurabstand von 5 cm sind über die abgebildeten Ereignisse kaum Unterschiede zu sehen. Daraus lässt sich schließen, dass es im gesamten Untersuchungsgebiet Probestellen mit einem niedrigeren Flurabstand, der kaum auf Niederschläge reagiert, gibt. Gleichzeitig ist aber auch auffallend, dass bis etwa 70% der Odyssey Rekorder auf Niederschlagsereignisse mit einer Zunahme von kleineren Flurabständen reagieren. Diese können in Abhängigkeit von der Ereignisgröße dann bis zu 40% beziehungsweise am 15. Juli sogar bis zu 60% ausmachen. Die Ereignisse mit einer geringeren Niederschlagsmenge (von etwa 5 - 10 mm) zeigen einen überwiegenden Anteil von höheren Flurabständen bis hin zu 75%, die im Bereich von 85-105 cm liegen. Wenn die Anstiege außer Acht gelassen werden, lässt sich daraus schließen, dass es sich um einen Grundwasserspiegelanstieg oder um die Entstehung eines schwebenden Grundwasserspiegels handeln könnte. Bei Betrachtung der einzelnen Anstiege der Odyssey Rekorder in den Wasserstandsaufzeichnungen (Abbildung A. 2 bis Abbildung A. 34) ist zu sehen, dass die Anstiege überwiegend schnell entstehen, so dass sie durch Sättigungsflächenbeziehungsweise durch Oberflächenabfluss verursacht werden müssen.

Mit der Darstellung des Variationskoeffizienten für die Odyssey Rekorder und die PVC-Fläschchen gegen den Niederschlag in Abbildung 5.6 wurde versucht, den möglichen Einfluss der Fläschchen auf die Daten der Odysseys bei der räumlichen Interpolation mit Kriging zu bestimmen. Ein höherer Variationskoeffizient steht bei den Fläschchen für das Gefülltsein von mehreren Probestellen und bei den Odysseys für einen minimaleren Flurabstand. Es zeigt sich sowohl für die Fläschchen als auch für die Odysseys ein höherer Variationskoeffizient mit zunehmender Niederschlagsmenge während des Untersuchungszeitraums. Beide besitzen einen positiven Zusammenhang mit zunehmender Ereignisgröße. Daher kann der Einfluss der Fläschchen auf die Odysseys bei der räumlichen Interpolation weitestgehend ausgeschlossen werden.

Wenn man die Werte der Standardabweichung der minimalen Flurabstände der Odyssey Rekorder über die untersuchten Ereignisse in Abbildung 5.7 betrachtet, zeigt sich, dass das Untersuchungsgebiet von Odysseys mit kleineren Standardabweichungen dominiert wird. Es überwiegen Odysseys mit geringeren Schwankungen beim Flurabstand im Untersuchungsgebiet. Die Ausnahme bilden zwei Bereiche. Der eine am östlichen Rand des Untersuchungsgebietes, der Standardabweichungen von bis zu 20 cm aufweist. Dies kann auf die Bildung eines Fließweges oder einer Sättigungsfläche bei größeren Niederschlagsmengen zurückgeführt werden. Der andere Bereich liegt im vorderen Teil des Gebietes, dieser tritt aber sehr lokal begrenzt auf. Man kann daraus schließen, dass es sich hier um die Bildung einer lokalen Sättigungsfläche handelt. Mit einem Variationskoeffizienten von 0,846 (vgl. Tabelle 5.3) für das experimentelle Variogramm zeigt sich die hohe Variabilität der Flurabstandsänderung bei den Probestellen der Odysseys. In Abbildung 5.8 ist eine Auswahl an Odyssey Rekorder mit unterschiedlichen Standardabweichungen gegen die Zeit dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Standardabweichung zwar Auskunft über die Variabilität der Flurabstände gibt, aber keine Aussagen zu den tatsächlichen Flurabständen abzulesen sind (OD 31930 und 31939). Es gibt sowohl Odyssey Rekorder (OD 31931 und OD 31951) mit einer höheren Standardabweichung (etwa 20 cm), die schon auf kleinere Ereignisse mit einem abnehmendem Flurabstand reagieren, als auch Odyssey Rekorder (OD 31484) mit einer etwas niedrigeren Standardabweichung (etwa 15 cm), die erst auf hohe Ereignisse, wie zum Beispiel am 15. Juli 2009, mit einem abnehmendem Flurabstand reagieren. So kann auch nicht von hohen Standardabweichungen direkt auf die Reaktionen der Odyssey Rekorder bei verschiedenen Ereignisgrößen rückgeschlossen werden.

In der Auswertung wurde auch die Korrelationslänge der Semivariogramme untersucht. Bei der Darstellung der experimentellen Variogramme und des visuell angepassten Variogrammmodells in Abbildung 5.2 für zwei ausgewählte Niederschlagsereignisse (15.05.2009 und 15.07.2009) ist deutlich der Unterschied der Korrelationslängen zu sehen. Bei einer höheren Niederschlagsmenge ist die Korrelationslänge niedriger, somit besteht eine geringere Korrelation bei den Flurabständen der Probestellen. Dies deutet auf eine höhere Heterogenität im Untersuchungsgebiet bei höheren Niederschlägen hin, wozu vermutlich auch die entstehenden Sättigungsflächen beitragen. Der Beitrag der Sättigungsflächen wird durch gefüllte PVC-Fläschchen nach höheren Niederschlagsereignissen bestätigt. Zu dem visuell angepassten Variogrammmodell wurden auch noch zusätzliche Variogrammmodelle berechnet. Von drei berechneten Modellen ist die Korrelationslänge in Abbildung 5.9 gegen die Zeit aufgetragen. Dabei ist auffällig, dass bei allen drei Variogrammmodellen bei größeren Niederschlagsmengen die Korrelationslänge kleiner wird. Somit besteht ein größerer Zusammenhang bei kleineren Niederschlägen. Daraus folgt, dass die Heterogenität mit zunehmender Niederschlagsmenge zunimmt. Dies wird auch deutlich bei der Darstellung der Korrelationslänge der berechneten Variogrammmodelle gegen den Niederschlag in Abbildung 5.10. Für alle drei abgebildeten Modelle ist eine negative Korrelation zu erkennen. Das heißt, dass je mehr Niederschlag fällt desto geringer die Korrelationslänge wird. Somit besteht eine primäre Abhängigkeit des Flurabstandes vom Niederschlag. Was die Schlussfolgerung aus

Abbildung 5.2 und Abbildung 5.9 je größer das Ereignis desto größer die Heterogenität im Untersuchungsgebiet unterstützt.

Bei ihrer Untersuchung zu den Dynamiken der Ereignisabflussbildung an einem Hang in Pennsylvania haben auch SRINIVASAN et al. (2002) die Daten ihrer Sensoren mit Hilfe von Kriging im Programm Surfer räumlich interpoliert. Auch bei der vorliegenden Arbeit wurde diese Methode angewendet. Bei der räumlichen Interpolation mit Kriging des visuell angepassten Variogrammodells ist der Unterschied bei verschiedenen Niederschlagsmengen zu erkennen (vgl. Abbildung 5.3). Zu erwähnen ist, dass sich während des Ereignisses vom 15. Juli 2009 Sättigungsflächen (dunkelblaue Farbe) gebildet haben, da mehrere der installierten Fläschchen gefüllt waren. Es ist zu sehen, dass sich bei höheren Niederschlägen mögliche Fließwege beziehungsweise Fließrichtungen ebenso abzeichnen wie Stellen, die gar nicht oder kaum reagieren auf den Niederschlag. Im Vergleich zu Abbildung 5.3 zeigt Abbildung 5.4 die räumliche Interpolation mit Kriging für die Absolutwerte des Flurabstandes der Odyssey Rekorder und PVC-Fläschchen. Die gebildeten Sättigungsflächen beim Niederschlagsereignis vom 15. Juli 2009 sind auch in dieser Abbildung deutlich anhand der dunklen blauen Farbe zu erkennen – ebenso wie die möglichen Fließwege und die eher kaum reagierenden Stellen. Dabei ist auffallend, dass es Probestellen mit einem niedrigen Flurabstand bei geringen Niederschlagsmengen gibt, die bei höheren Niederschlägen auch für die Ausbildung möglicher neuer Fließwege verantwortlich sein können.

Bei Abbildung 5.5 sollte unter Verwendung der minimalsten Flurabstände über den gesamten Untersuchungszeitraum, unabhängig von der Niederschlagsmenge unter der sich diese eingestellt haben, weitere mögliche Fließrichtungen ausfindig gemacht werden. Es stellte sich heraus, dass dem Variogrammodell wie bei einem höheren Niederschlagsereignis eine geringe Korrelationslänge zugrunde liegt. Das Ergebnis der räumlichen Interpolation ähnelte dem des Ereignisses vom 15. Juli 2009. Dies unterstützt auch das Ergebnis für die Korrelationslängen aus den untersuchten Ereignissen, dass nämlich mit zunehmender Niederschlagsmenge die Korrelationslänge kleiner wird und somit der Zusammenhang zwischen der Niederschlagsmenge und der Distanz, bei der noch ein Einfluss besteht, abnimmt.

## 6.2 Anstieg der Wasserstände der Probestellen

Bei den Wasserstandskurven der Odyssey Rekorder (Abbildung A. 2 bis Abbildung A. 34) waren Anstiege während eines Ereignisses, aber auch ein Anstieg über den gesamten Untersuchungszeitraum bei einem Großteil der Odysseys zu erkennen. Dieser ist räumlich interpoliert in Abbildung 5.11 dargestellt. Die Anstiege sind jedoch räumlich sehr unterschiedlich. Diese Anstiege über den gesamten Untersuchungszeitraum könnten zum einen durch einen stetigen Grundwasserspiegelanstieg oder zum anderen durch den Wasserstand vom größten Niederschlagsereignis während des Untersuchungszeitraums am 15. Juli 2009, da die Odysseys am 16. Juli ausgelesen wurden, verursacht worden sein. Bei



Betrachtung der Wasserstandskurven können beide Fälle zutreffen, da noch nicht alle Anstiege des Niederschlagsereignisses vom Tag zuvor auf den Ausgangswert beim Auslesen abgeklungen waren.

Bei der ausschließlichen Betrachtung der maximalen Anstiege während eines Niederschlagsereignisses (15. Juli 2009) wird deutlich, dass es bis zu Anstiegen von 60 cm kommen kann (vgl. Abbildung 5.13). Gleichzeitig treten auch Stellen mit keinem bis geringem Niederschlag auf. Die hohen Anstiege sind ausschließlich auf Sättigungsflächen durch einen schwebenden Grundwasserspiegel beziehungsweise auf Oberflächenabfluss zurückzuführen, da dieser Anstieg für einen Grundwasserspiegelanstieg zu rasch von statten ging. Auch bei GODSEY et al. (2004) kam es durch die Bildung eines schwebenden Grundwasserspiegels etwa 30 cm unter der Geländeoberkante bei etwa 20% aller Ereignisse im Lutz Creek Einzugsgebiet, Panama, zum Auftreten von Sättigungsflächenabfluss. Sie untersuchten in Einzugsgebieten im Regenwald, ob sich gegensätzliches Abflussverhalten von Bodeneigenschaften, welche die Oberflächenabflussbildung kontrollieren, herleiten. Wenn der Untergrund heterogen aufgebaut ist oder das System Boden von nichtkapillaren Wasserwegen bestimmt wird, kann es dazu kommen, dass lateraler Abfluss im Boden auftritt, sich gesättigte Zonen und temporäre Grundwasserhorizonte über stauenden Schichten ausbilden, Ereignisniederschlag schnell in größere Tiefen in den Boden eindringt und Sättigungsflächenabfluss am Hangfuß schnell reagiert (GUTKNECHT 1996).

Bei der Darstellung der kumulierten Häufigkeit der maximalen Anstiege in Abbildung 5.11 für die gleichen Ereignisse wie in Abbildung 5.1 zeigt sich wiederum ein Unterschied zwischen niedrigeren und höheren Niederschlagsmengen. Höhere Anstiege sind ausschließlich bei den größeren Ereignissen vorzufinden. Dies zeigt, dass im Untersuchungsgebiet in den Sommermonaten hauptsächlich die hohen Niederschlagsereignisse zu Wasserstandsanstiegen führen und dies vermutlich ausschließlich durch Sättigungsflächenabfluss.

Laut SCHÜLER (2003) entstehen große Hochwässer im Wald überwiegend aufgrund von schnellem Oberflächenabfluss auf wassergesättigten Böden. Potentiell vorhandener zusätzlicher Speicherraum kann sich auf kleine bis mittlere Ereignisse lokal gedämpft auswirken. Wenn man die zum Teil raschen Anstiege und Abnahmen des Wasserstandes während eines Ereignisses betrachtet, scheint es, dass es zu keinem größeren Oberflächenabfluss kam, da noch zusätzlicher Speicherraum vorhanden war. Dieser zusätzliche Speicherraum des Bodens ist vermutlich auf die im Vergleich zur Referenzperiode eher trocken ausgefallenen Monate Mai und Juni (vgl. Abbildung 3.4) zurückzuführen. Dies zeigt die Bedeutung des Bodens für die Abflussbildungsprozesse. Schon GUTKNECHT (1996) verwies auf die große Bedeutung des Bodens für die Infiltration. Dabei bestimmt die Horizontaufteilung die Unterschiede in der Tiefenverteilung der Durchlässigkeiten und das Auftreten von möglichen Stauwirkungen. So können über die Bestimmung des Bodentyps mögliche Fließwege abgeschätzt werden. Auch für GODSEY et al. (2004) ist es offensichtlich, dass mikrotopographische Eigenschaften, wie konzentrierte Fließlinien, zur Bestimmung des

Standortes und der Häufigkeit der Oberflächenabflussbildung genauso wichtig sind wie die Bodencharakteristika. Da die trockeneren Monate Mai und Juni auch in die Vegetationsperiode fallen, hatte dies natürlich noch einen verstärkten Einfluss auf das Abflussbildungsverhalten.

### 6.3 Konnektivität

Über die Darstellung des minimalen Flurabstandes der Odyssey Rekorder für die untersuchten Ereignisse gegen den Niederschlag können Aussagen über das Sättigungsdefizit durch die Berechnung der theoretisch notwendigen Niederschlagsmenge für die Sättigung an dieser Stelle gemacht werden. In Tabelle 5.4 sind die Odyssey Rekorder, deren so berechneten Niederschlagsmengen unter 100 mm lagen, zusammengestellt. In Abbildung 5.14 ist eine Auswahl dieser Odyssey Rekorder mit dem Flurabstand gegenüber der Niederschlagsmenge dargestellt. Es ist der Unterschied zwischen den einzelnen Odysseys beim Flurabstand und der Reaktion auf den Niederschlag in Abbildung 5.14 deutlich zu erkennen. Dies gilt vor allem für die Abhängigkeit des Flurabstandes von der Niederschlagsmenge. Fünf der Odyssey Rekorder (31487, 31931, 31935, 31942, 31951) liegen innerhalb eines Abstandes von 21 m zueinander am unteren Rand des Untersuchungsgebietes. Sie befinden sich an der Stelle, an der zu Beginn der Feldarbeit schon die Entstehung einer Sättigungsfläche vermutet wurde. Realistische Werte des zur Sättigung notwendigen Niederschlags gibt nur Odyssey 31953 wieder. Dies könnte bei einem Fortsetzen der Messreihe durch weitere Messwerte möglicherweise bei einer entsprechenden Vorfeuchte des Bodens aufgrund von Aufsättigung durch mehrere Ereignisse verbessert werden. Die große Bedeutung der Vorfeuchte Bedingungen hinsichtlich der dynamischen Variation der Konnektivität in allen Skalen und der daraus resultierenden Ausdehnung der Sättigungsflächen vor einem Niederschlagsereignis haben schon BRACKEN & CROKE (2007) aufgezeigt. Dies liegt auch begründet in dem starken Einfluss auf die räumliche Struktur der Infiltration und Abflussbildung und somit auch auf die Konnektivität. In der Untersuchung von PESCHKE & SAMBALE (1999) ist die Abflussbildung von schnellen Abflusskomponenten insbesondere dem Sättigungsflächenabfluss gekennzeichnet. Dieser tritt nicht sofort auf, sondern benötigt für einen maximalen Beitrag zum Abfluss ebenso eine beträchtliche Vorfeuchte des Bodens. Auch TETZLAFF et al. (2007) stellten bei ihren Untersuchungen im Girnock Einzugsgebiet in Schottland fest, dass sich in nassen Jahren, wenn Vorfeuchtebedingungen vorherrschen, es ausgedehnte Sättigungsflächen gibt, welche für einen hohen Grad an Konnektivität zwischen den Hangfließwegen und dem Gerinnenetz sorgen.

Bei der Betrachtung des Konnektivitätsanteils gegen die Distanz für eine Auswahl von Niederschlagsereignissen (15.05.2009, 26.05.2009, 06.06.2009, 15.07.2009) in Abbildung 5.15 ist der Unterschied zwischen den einzelnen Ereignissen deutlich zu erkennen. Die Erhöhung des Konnektivitätsanteils, also des Anteils aller Zellen, die mit dem Ausfluss verbunden sind, geht einher mit den höheren Niederschlagsmengen der einzelnen Ereignisse. Gleichzeitig beginnt der Konnektivitätsanteil bei einer kürzeren Distanz bei höheren

Ereignissen zu steigen. Konnektivitätsanteile zeigen sich ab einer Distanz von etwa 6 m, was auf den Versuchsaufbau zurückzuführen ist: Abstände der Probestellen in einer Reihe 3,5 m, zwischen den einzelnen Reihen 7 m. Dies bestätigt wiederum, dass die Bildung von Sättigungsflächen und deren Verbindungen sowohl zum Ausfluss als auch untereinander abhängig sind von der Niederschlagsmenge. Diese Abhängigkeit des Konnektivitätsanteils vom Niederschlag zeigt sich auch deutlich in Abbildung 5.16 (a) und (c) für das Ereignis vom 15. Juli 2009. In Abbildung 5.16 (a) steigt der Anteil aller Zellen, die mit dem Ausfluss verbunden sind von 0:00 bis 8:00 Uhr. Der Niederschlag fiel entsprechend von 23:00 des Vortages (erste Aufzeichnung 0:00 Uhr) bis 9:00 Uhr über einen Zeitraum von zehn Stunden. Dahingegen ist in Abbildung 5.16 (c) die Abnahme des Konnektivitätsanteils von 14:00 bis 21:00 Uhr zu erkennen. In dieser Zeit fiel kein Niederschlag mehr mit Ausnahme eines kleinen Ereignisses von 0,2 mm von 19:00 bis 20:00 Uhr, das keine Auswirkungen auf den Konnektivitätsanteil hatte. Der Anteil aller Zellen, die mit dem Ausfluss verbunden sind, ist bis zu einer Distanz von etwa 10-12 m als realistisch anzusehen, da wie schon zuvor erwähnt die Abstände zwischen den einzelnen Probestellen zwischen 3,5 und 7 m liegen. Die Konnektivitätsanteile, die über eine Distanz von 12 m hinausgehen, sind rein theoretische Werte, da die Entfernung für eine direkte Verbindung mit dem Ausfluss zu groß ist. Durch die Flurabstände und die Anstiege sind auch Sättigungsflächen am oberen Rand des Einzugsgebietes bekannt. Diese können aufgrund der großen Distanz und da keine weiteren Sättigungsflächen zwischen dieser und dem Ausfluss bekannt sind, nicht mehr mit dem Ausfluss verbunden sein. Das Wasser ist hier dann vermutlich wieder in den Boden zurückinfiltriert.

Die Auswirkungen der Heterogenität auf hydrologische Reaktionen zeigen sich, so MCDONNELL et al. (2007), anhand der Wasserfließwege und dem Grad an Konnektivität dieser Fließwege, wie auch anhand der Änderung der Konnektivität mit der Zeit als Folge der Interaktionen von Klima- und Landschaftselementen. JENSCO et al. (2009) untersuchten die Beziehung zwischen der akkumulierten hangaufwärts liegenden Fläche und dem Auftreten und der Dauer der Konnektivität des flachen Grundwassers der Hang-Ufer-Gerinne-Einheit. Sie stellten fest, dass die hydrologische Konnektivität zwischen den Hang-Ufer-Gerinne-Landschaftselementen räumlich heterogen und oft temporär instationär ist. Bei ihrer Untersuchung stellten MAYOR et al. (2008) fest, dass die Konnektivität der Abflussbildungsgebiete überwiegend durch die räumliche Verteilung der Vegetationsstellen beeinflusst wird. Dies konnte in diesem Untersuchungsgebiet nicht festgestellt werden, was aber vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass die Untersuchungen von MAYOR et al. (2008) im semiariden Südostspanien stattfanden, während es sich hier um ein Waldgebiet im humiden Klima handelt.



## 7 Fazit und Ausblick

Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass im Untersuchungsgebiet die Variabilität aufgrund des negativen Zusammenhangs von Korrelationslänge und Niederschlagsmenge mit zunehmendem Niederschlag steigt. Dies weist auf eine höhere Heterogenität bei zunehmender Ereignisgröße hin.

Die Oberflächenabflussbildung stammt im Untersuchungsgebiet überwiegend von Sättigungsflächen, welche aufgrund eines angestiegenen Grundwasserspiegels oder der Ausbildung eines schwebenden Grundwasserspiegels entstehen. Bei ausreichendem Niederschlag kommt hinzu, dass am östlichen (unteren) Rand des Untersuchungsgebietes ein kleines Gerinne entstehen kann. Es zweigt sich dann von einem zu Beginn aus dem Gebiet fließenden Gerinne ab. Die Verbindungen zwischen den sehr lokalen möglichen Sättigungsflächen lassen nur Vermutungen zu, da die meisten der gemessenen Niederschläge dafür zu gering waren. Wahrscheinlich ist daher eher, dass sich eine Sättigungsfläche gebildet hat und das Wasser dann größtenteils beim Oberflächenabfluss in Richtung Ausfluss versickert ist. Somit ist es schwierig Aussagen über die Konnektivität im Untersuchungsgebiet zu treffen. Sowohl in ihren Simulationen als auch in ihren Beobachtungen stellten STIEGLITZ et al. (2003) fest, dass beide den Beweis für das Vorhandensein von variabler hydrologischer Konnektivität in verschiedenen großen Einzugsgebieten erbringen. Daher fordern sie noch weitere Versuche zum besseren Verständnis der Mechanismen, die zu hydrologischer Konnektivität und zur Abwärtsbewegung von Wasser und Nährstoffen entlang eines Hanges führen.

Bei der Frage, ob sich Sättigungsflächen mit den angewandten Methoden bestimmen lassen, kann dies bejaht werden. Sowohl bei den PVC-Fläschchen, als auch bei den Odyssey Rekordern konnten die Sättigungsflächen eindeutig als solche identifiziert werden. Bei den Fläschchen gelang dies anhand der Füllung der Fläschchen. Das Niederschlagsereignis vom 15. Juli 2009 zeigte auch, dass bei entsprechender Niederschlagsmenge die Fläschchen ohne Probleme randvoll laufen können. Auch die Odyssey Rekorder konnten Sättigung aufzeichnen, auch zeitlich aufgelöst. Da die Vorfeuchtebedingungen durch den Mai und den Juni relativ trocken waren, muss hier teilweise anhand der Anstiege auf Sättigungsflächen geschlossen werden.

Die Daten einiger Odyssey Rekorder konnten für Mai und Anfang Juni nicht vollständig verwendet werden, da sich nach dem ersten Auslesen der Odyssey Data Logger Anfang Juni herausstellte, dass ein bedeutender Teil der neuen Logger nicht richtig aufgezeichnet hatten. Dies obwohl im Vorfeld getestet wurde, ob sie aufzeichnen und dies auch bestätigt wurde.

Aus diesem Grund konnten für die Auswertung nur die für 0:00 Uhr aufgezeichneten Werte verwendet werden. Die falsch aufzeichnende Hälfte der Data Logger zeichnete nicht wie der Rest die Uhrzeit auf, zu der der Wasserstand aufgezeichnet wurde, sondern die Zeitspanne, in der der Wasserstand auf Änderung überprüft und bei mindestens 5 mm Änderung aufgezeichnet wird. So dass im Nachhinein nicht nachzuvollziehen war, wann die Aufzeichnung während des Tages stattgefunden hat. Das Problem konnte durch die Kontaktaufnahme mit der Herstellerfirma *Dataflow Systems Pty Ltd.* behoben werden, die sich umgehend mit dem Problem befasste und uns eine überarbeitete Software zur Neuprogrammierung der betroffenen Odyssey Water Capacitive Rekorder zuschickte. Die Art der Datenaufzeichnung der Odyssey Data Logger während des Untersuchungszeitraumes ist im Anhang in Tabelle A. 8 dargestellt.

Weitere kleinere Probleme standen im Zusammenhang mit den tierischen Waldbewohnern. Im Mai kam es noch gelegentlich zu ausgegrabenen Fläschchen, wofür vermutlich Wildschweine verantwortlich waren. Desweiteren kam es mehrfach zu Ameisennestbildung unter dem Schutz einer halben PET-Flasche, welche über dem Odyssey Logger und dem PVC-Rohr hing, so dass der Odyssey Rekorder nicht direkt dem Regen ausgesetzt war. Dadurch konnte die PET-Flasche für ein paar Tage nicht mehr auf den Odyssey Rekorder gesetzt werden. Die Probleme mit den tierischen Waldbewohnern konnten aber ohne große Schwierigkeiten und Datenverlust behoben werden.

SRINIVASAN et al. (2002) fanden heraus, dass es auch zu dynamischen unterirdischen Fließprozessen zwischen den Niederschlagsereignissen kommt. So bietet das einfache Abschätzen der Bedingungen eines Einzugsgebietes nach einem Ereignis nicht unbedingt eine vollständige Darstellung der Dynamiken, die mit hydrologischen Bedingungen verbunden sind. Daher sind zur besseren Bestimmung der Konnektivität Messungen während eines Niederschlagsereignisses erforderlich, da dann auch die Fläschchen zeitlich aufgelöst erfasst werden können. Dementsprechend war es auch vorgesehen über den Untersuchungszeitraum bei größeren Niederschlagsereignissen die PVC-Flaschen in einem Zeitabstand von 30 Minuten vor Ort zu entleeren und festzuhalten, ob sich in dieser Zeit Wasser in den Flaschen angesammelt hat. Dies würde eine höhere Auflösung in Bezug auf das Fortschreiten der Sättigung ermöglichen, was anschließend auf Konnektivität hinweisen kann. Dies war aber aufgrund der Verteilung des Niederschlags und der Ereignisgröße während des Untersuchungszeitraumes nicht durchführbar.

Auch die Messung von dem tatsächlich aus dem Gebiet fließenden Abfluss ist ein Faktor der zukünftig nicht unberücksichtigt gelassen werden sollte, da so auch Aussagen über das Niederschlag-Abfluss Verhalten getroffen werden könnten.

So sollten neue Ansätze nach MCDONNELL et al. (2007) nicht auf der Kalibrierung beruhen, sondern auf einem systematische Lernen aus beobachteten Daten und einem gewachsenen Verständnis und Suchen nach neuen hydrologischen Theorien durch umfassende neu ausgerichtete Grundsätze hinter dem Einzugsgebietsverhalten.

## 8 Literatur

- AICHELE D. & GOLTE-BECHTLE M. (1993) Was blüht denn da?. 55. Aufl., Franck-Kosmosverlag Stuttgart, 427 S.
- ARMSTRONG M. (1998) Basic linear geostatistics. 1. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 154 S.
- BADDELEY A. & TURNER R. (2005) spatstat: An R package for analyzing spatial point patterns. *Journal of Statistical Software*, 12(6), S. 1-42
- BEST C., GRIEPENKERL K., HOFMANN C., HARTNACK C. & ANDREEF A. (2000) Taschenbuch der Physik. (Hrsg.) Stöcker H., 4., korrigierte Aufl., Verlag Harri Deutsch, 1088 S.
- BETSON R.P. (1964) What is watershed runoff?. *Journal of Geophysical Research*, 69(8), S. 1541-1552
- BETSON R.P. & MARIUS J.B. (1969) Source areas of storm runoff. *Water Resources Research*, 5(3), S. 574-582
- BEVEN K.J. & KIRKBY M.J. (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69S.
- BLÖSCHL G. (2006) Geostatistische Methoden bei der hydrologischen Regionalisierung. *Wiener Mitteilungen – Wasser Abwasser Gewässer*, Band 197, S. 21-39
- BLUM W.E.H. (2007) Bodenkunde in Stichworten. 6., völlig neu bearbeitete Aufl., Gebr. Borntraeger Verlag, 179 S.
- BRACKEN L.J. & CROKE J. (2007) The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes*, 21(13), S. 1749-1763
- CRESSIE N.A.C. (1991) Statistics for spatial data. A Wiley Interscience Publ., John Wiley & Sons, Inc., 900 S.
- DATAFLOW SYSTEMS PTY LTD (2009) PC Software & Technical Handbook for Odyssey Data Recorders. Christchurch, New Zealand, 79S.

- DEUTSCHER WETTERDIENST (2009) Niederschlags- und Temperaturdaten der Referenzperiode 1961-90 für ausgewählte Freiburg Stationen.  
[http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=\\_dwdwww\\_klima\\_umwelt\\_klimadaten\\_deutschland&T82002gsbDocumentPath=NavigatiNa%2FOeffentlichkeit%2FKlima\\_\\_Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten\\_\\_kostenfrei%2FaFausga\\_\\_mittelwerte\\_\\_node.html\\_\\_nnn%3Dtrue](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=NavigatiNa%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten__kostenfrei%2FaFausga__mittelwerte__node.html__nnn%3Dtrue) 09.08.2009 13:34 Uhr
- DUNNE T. & BLACK R.D. (1970) Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research*, 6(5), S. 1296-1311
- DUNNE T., MOORE T.R. & TAYLOR C.H. (1975) Recognition of runoff-producing zones in humid regions. *Hydrological Sciences Bulletin*, 20(3), S. 305-327
- ELLENBERG H., WEBER H.E., DÜLL R., WIRTH V., WERNER W. & PAULIßEN D. (1991) Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica*, Band 18, 248 S.
- FORTIN M.-J. & DALE M.R.T. (2005) *Spatial analysis – a guide for ecologists*. Cambridge University Press, 1. Aufl., 365 S.
- FREEMAN M.C., PRINGLE C.M. & JACKSON C.R. (2007) Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales. *J. American Water Resources Association*, 43(1), S. 5-14
- FRIEG B. (1987) *Hydrogeologie und Grundwasserhydraulik des Einzugsgebiets des Wasserwerkes Freiburg – Ebnet*. Inaugural-Dissertation, Naturwissenschaftlich-Mathematische Gesamtfakultät, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 143S.
- GOLDEN SOFTWARE INC. (2002) *Surfer user's guide*. Colorado, USA, 640 S.
- GEOLOGISCHE KARTE VON BADEN-WÜRTTEMBERG (1996) Blatt Freiburg i. Br. und Umgebung 1:50000. 3., ergänzte Aufl., Freiburg i. Br.
- GODSEY S., ELSENBEER H. & STALLARD R. (2004) Overland flow generation in two lithologically distinct rainforest catchments. *Journal of Hydrology*, 295(1-4), S. 276-290
- GROSCHOPF R., KESSLER G., LEIBER J., MAUS H., OHMERT W., SCHREINER A. & WIMMENAUER W. (1996) *Geol. Karte von Baden-Württemberg 1:50000 – Erläuterungen zum Blatt Freiburg i. Br.* (Hrsg.) Geol. Landesamt Baden-Württemberg, 3., ergänzte Aufl., 364 S.
- GÜNTNER A. (1997) *Anwendung des Niederschlag-Abfluss-Modells TOPMODEL im Brugga-Einzugsgebiet*. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., 119 S.
- GÜNTNER A., UHLENBROOK S., LEIBUNDGUT C. & SEIBERT J. (1999) Estimation of saturation excess overland flow areas: comparison of topographic index calculations with field mapping. In: *Regionalization in Hydrology*. (Hrsg.) Leibundgut C., McDonnell J. & Schultz G., IAHS Publ. 254, S. 203-210



- GUTKNECHT D. (1996) Abflussentstehung an Hängen – Beobachtungen und Konzeptionen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 48(5/6), S. 134-144
- HÄDRICH F. & STAHR K. (2001) Die Böden des Breisgaus und angrenzender Gebiete. Berichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. Br., Band 91, 143 S.
- HEWLETT J.D. & HIBBERT A.R. (1966) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. Reprint from Proc. Int. Symp. Forst. Hydrol., Penn. State Univ. 1965, Pergamon Press – Oxford & N.Y., S. 275-290
- HORTON R.E. (1933) The role of infiltration in the hydrologic cycle. In: BEVEN K. & IAHS (2006) Streamflow generation processes. Benchmark Papers in Hydrology, Band 1, S. 13-27
- INSTITUT FÜR BODENKUNDE UND WALDERNÄHRUNG (2004) Beurteilung des Bodens im Gelände. Albert-Ludwigs Universität Freiburg i. Br., 28 S.
- ISAACS E.H. & SRIVASTAVA R.M. (1989) An introduction to applied Geostatistics. Oxford University Press, 561 S.
- JENSCO K.G., MCGLYNN B.L., GOOSEFF M.N., WONDZELL S.M., BENCALA, K.E. & MARSHALL L.A. (2009) Hydrologic connectivity between landscapes and streams: Transferring reach- and plot-scale understanding to the catchment scale. Water Resources Research, 45(4), W04428, doi:10.1029/2008WR007225
- KREYSZIG E. (1970) Statistische Methoden und ihre Anwendungen. 3. Nachdruck der 3. Aufl., Vandenhoeck & Ruprecht Göttingen, 422 S.
- KUBIĚNA W.L. (1953) Bestimmungsbuch und Systematik der Böden Europas. 1. Ausgabe, Enke Verlag Stuttgart, 392 S.
- MANIAK U. (1993) Hydrologie und Wasserwirtschaft – Eine Einführung für Ingenieure. 3. Aufl., Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 568 S.
- MAYOR A.G., BAUTISTA S., SMALL E.E., DIXON M. & BELLOT J. (2008) Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands. Water Resources Research, 44(10), W10423, doi:10.1029/2007WR006367
- MCDONNELL J.J. (2003) Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. Hydrological Processes, 17(9), S. 1869-1875
- MCDONNELL J.J., SIVAPALAN M., VACHÉ K., DUNN S., GRANT G., HAGGERTY R., HINZ C., HOOPER R., KIRCHNER J., RODERICK M.L., SELKER J. & WEILER M. (2007) Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology. Water Resources Research, 43(7), W07301, doi:10.1029/2006WR005467

- METEOMEDIA GMBH (2009) Niederschlagsdaten der Station Freiburg-Ebnet für die Monate Mai, Juni und Juli 2009
- NAEF F., SCHERRER S. & WEILER M. (2002) A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. *Journal of Hydrology*, 267(1-2), S. 74-79
- PARLOW E. & ROSNER H.-J. (1992) Klima am südlichen Oberrhein. In: Schwarzwald und Oberrheintiefland – Eine Einführung in das Exkursionsgebiet um Freiburg i. Br.. *Freiburger Geographische Hefte*, Heft 36, S. 105-116
- PESCHKE G. & SAMBALE C. (1999) Hydrometric approaches to gain a better understanding of saturation excess overland flow. In: *Integrated Methods in Catchment Hydrology – Tracer, Remote Sensing and New Hydrometric Techniques*. IAHS Publ. 258, S. 13-21
- PETRAHN G. (1999) Taschenbuch Vermessung – Grundlagen der Vermessungstechnik. 1. Aufl., Cornelsen Verlag Berlin, 327 S.
- PRINGLE C. (2001) Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: A global perspective. *Ecological Applications*, 11(4), S. 981-998
- PRINGLE C.M. (2003) What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important?. *Hydrological Processes*, 17(13), S. 2685-2689
- ROSIN K. (2009a) Fit Semivariogram Models. R-Code
- ROSIN K. (2009b) Connectivity: Cluster for xyz-data. R-Code
- RUSHFORTH K.D. (2005) Die Bäume Europas. 1. Aufl., Kosmos Verlag Stuttgart, 192 S.
- SCHÜLER G. (2003) Hochwasservorsorge in Waldgebieten Südwestdeutschlands. In: *Boden- und Wasservorsorge*. *Freiburger Forstliche Forschung*, Heft 49, S. 177-194
- SRINIVASAN M.S., GBUREK W.J. & HAMLETT J.M. (2002) Dynamics of stormflow generation – a hillslope-scale field study in east-central Pennsylvania, USA. *Hydrological Processes*, 16(3), S. 649-665
- STAHR K. (1979) Die Bedeutung periglazialer Deckschichten für die Bodenbildung und Standortseigenschaften im Südschwarzwald. (Hrsg.) Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., *Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen*, Heft 9, 273 S.
- STIEGLITZ M., SHAMAN J., MCNAMARA J., ENGEL V., SHANLEY J. & KLING G.W. (2003) An approach to understanding hydrologic connectivity on the hillslope and the implications for nutrient transport. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), S. 16-1 - 16-15
- TARBOTON D.G. (1997) A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319 S.
- TETZLAFF D., SOULSBY C., BACON P.J., YOUNGSON A.F., GIBBINS C. & MALCOLM I.A. (2007) Connectivity between landscapes and riverscapes – a unifying theme in integrating

- hydrology and ecology in catchment science?. *Hydrological Processes*, 21(10), S. 1385-1389
- THE OXFORD ENGLISH DICTIONARY (1989) 2. Aufl., Band 3 cham-creeky, Clarendon Press Oxford, 1143 S.
- VERBIST K., CORNELIS W.M., SCHIETTECATTE W., OLTENFREITER G., VAN MEIRVENNE M. & GABRIELS D. (2007) The influence of a compacted plow sole on saturation excess runoff. *Soil & Tillage Research*, 96(1-2), S. 292-302
- WESTERN A.W., BLÖSCHL G. & GRAYSON R.B. (1998) How well do indicator variograms capture the spatial connectivity of soil moisture?. *Hydrological Processes*, 12(12), S. 1851-1868
- WESTERN A.W., BLÖSCHL G. & GRAYSON R.B. (2001) Toward capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns. *Water Resources Research*, 37(1), S. 83-97
- WESTERN A.W., ZHOU S.-L., GRAYSON R.B., MCMAHON T.A., BLÖSCHL G. & WILSON D.J. (2004) Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 286(1-4), S. 113-134
- YAIR A. & LAVEE H. (1985) Runoff generation in arid and semiarid zones. In: *Hydrological Forecasting*. (Hrsg.) Anderson G.M. & Burt T.P., A Wiley Interscience Publ., John Wiley & Sons, Inc., S. 183-220



# Anhang A

## A.1 Untersuchungsgebiet

**Tabelle A. 1** Gauß-Krüger Koordinaten zur Begrenzung des Untersuchungsgebietes in Freiburg-Ebnet

| Rechtswert  | Hochwert    |
|-------------|-------------|
| 3419758,33  | 5317596,061 |
| 3419759,928 | 5317611,981 |
| 3419762,953 | 5317589,795 |
| 3419802,069 | 5317614,616 |
| 3419815,81  | 5317675,235 |
| 3419834,674 | 5317633,079 |
| 3419845,4   | 5317642,728 |
| 3419853,749 | 5317655,844 |

## Pedologie

Datum: 29.07.2009

Gemarkung: Ebnet

Forstbezirk: Staatswald (Betreuung vom Forstbezirk Freiburg-Schauinsland)

Höhe ü. NN: 340 m

Mittlere Jahrestemperatur: 8-9 °C

Mittlerer Jahresniederschlag: 1000-1200 mm

Heutige Vegetation: Mischwald

Baumschicht: Linde, Kirsche

Strauchschicht: Holunder, Brombeere

Krautschicht: Brennessel, Gräser, Springkraut

**Tabelle A. 2** Bodenbestimmung am Standort N4 des Untersuchungsgebietes

| Horizont         | Tiefe [cm] | Farbe                                       | Textur | Skelett [%] | CaCO <sub>3</sub> | pH |
|------------------|------------|---|--------|-------------|-------------------|----|
| Ah               | -10        | dunkelgraubraun                             | Lu     | < 5         | c0                | 6  |
| Bv               | -33        | braun                                       | Lu     | 10-15       | c0                | 6  |
| Bv-C<br>Übergang |            | ocker, hellbraun<br>rötl. & graul. Pigmente | Ut4    | 10-15       | c0                | 6  |

Entwicklungstiefe: > 77 cm

Humusform: L - Mull

Braunerde

**Tabelle A. 3** Bodenbestimmung am Standort G1 des Untersuchungsgebietes

| Horizont | Tiefe [cm] | Farbe           | Textur | Skelett [%] | CaCO <sub>3</sub> | pH |
|----------|------------|-----------------|--------|-------------|-------------------|----|
| Ah       | -17        | dunkelbraungrau | Ut4    | < 5         | c0                | 6  |
| Bv       | -38        | graubraun       | Lt2    | 10-15       | c0                | 6  |
| Bv-C     |            | ocker, grau     | Lt2    | 10-15       | c0                | 6  |

Entwicklungstiefe: > 80 cm

Humusform: L - Mull

Braunerde evtl. Pseudogley (Bodenaufschluss nötig um es genauer sagen zu können)

**Tabelle A. 4** Bodenbestimmung am Standort G8 des Untersuchungsgebietes

| Horizont | Tiefe [cm] | Farbe                                     | Textur | Skelett [%] | CaCO <sub>3</sub> | pH |
|----------|------------|---|--------|-------------|-------------------|----|
| Ah       | -18        | Graubraun                                 | Ls2    | < 5         | c0                | 6  |
| Bv       | -67        | braun, ocker                              | Slu    | 10-15       | c0                | 6  |
| Bv-C     |            | ocker, braun, rotbraun,<br>rötl. Pigmente | Ut3    | 10-15       | c0                | 6  |

Entwicklungstiefe: > 80 cm

Humusform: L - Mull

Braunerde

**Tabelle A. 5** Bodenbestimmung am Standort 31487 des Untersuchungsgebietes

| Horizont | Tiefe [cm] | Farbe       | Textur | Skelett [%] | CaCO <sub>3</sub> | pH |
|----------|------------|-------------|--------|-------------|-------------------|----|
| Ah       | -19        | graubraun   | Lu     | < 5         | c0                | 6  |
| Bv       | -67        | grau, rötl. | Su2    | 5-10        | c0                | 6  |
| Bv-C     |            | rotbraun    | Su2    | 5-10        | c0                | 6  |

Entwicklungstiefe: > 82 cm

Humusform: L - Mull

Braunerde

## A.2 Messplan im Untersuchungsgebiet Ebnet

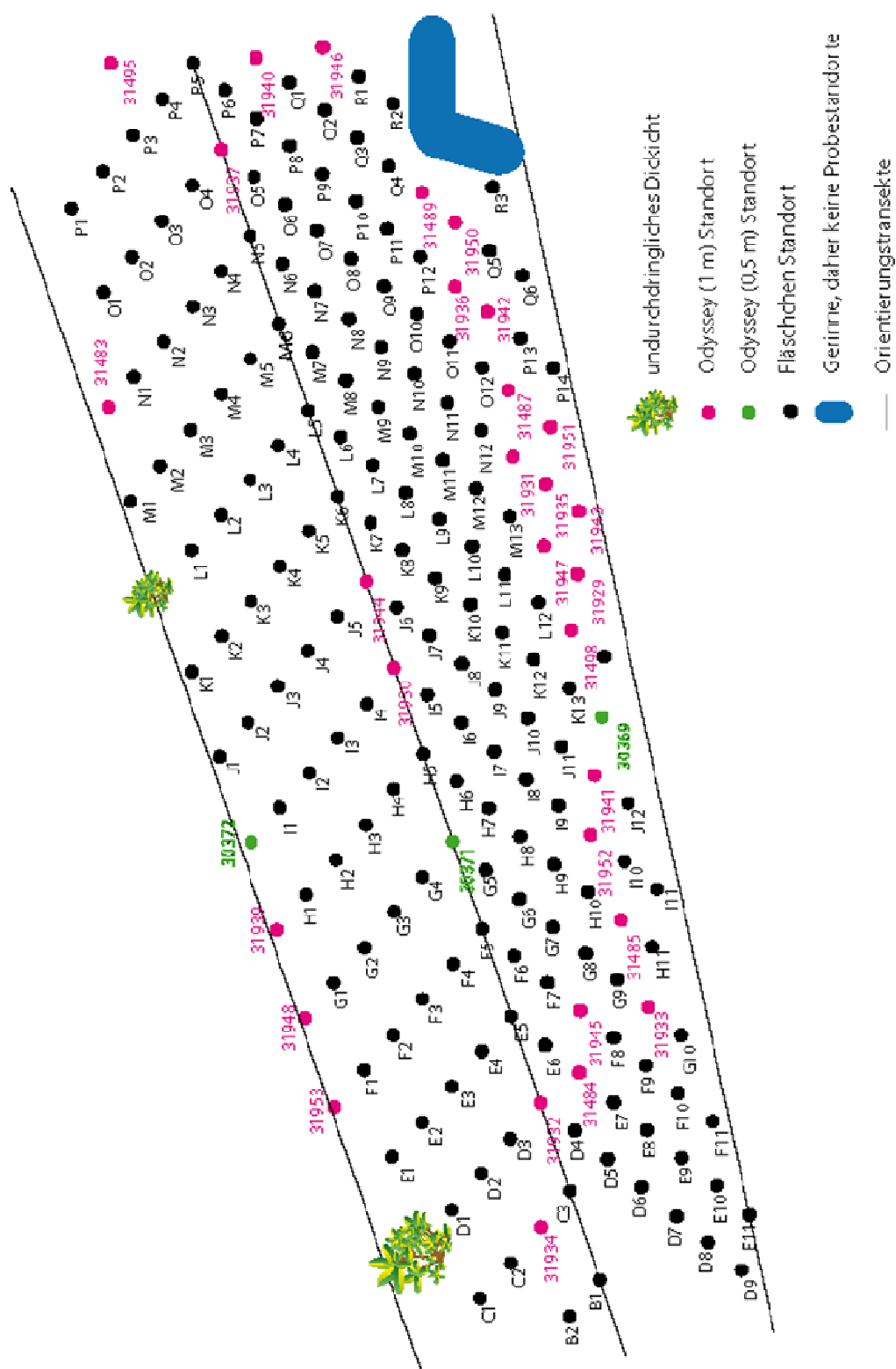


Abbildung A. 1 Messplan des Untersuchungsgebietes Ebnet



Tabelle A. 6      Gauß-Krüger Koordinaten der Probestellen im Untersuchungsgebiet

|                          |              | Rechtswert  | Hochwert    |  | Fläschchen | Rechtswert  | Hochwert    |
|--------------------------|--------------|-------------|-------------|--|------------|-------------|-------------|
| <b>Odyssey<br/>0.5 m</b> | <b>30369</b> | 3419764.828 | 5317664.187 |  | <b>B1</b>  | 3419727.131 | 5317676.176 |
|                          | <b>30371</b> | 3419762.131 | 5317676.176 |  | <b>B2</b>  | 3419725.162 | 5317679.07  |
|                          | <b>30372</b> | 3419766.288 | 5317690.646 |  | <b>C1</b>  | 3419728.225 | 5317684.858 |
| <b>Odyssey<br/>1.0 m</b> | <b>31483</b> | 3419801.288 | 5317690.646 |  | <b>C2</b>  | 3419730.194 | 5317681.964 |
|                          | <b>31484</b> | 3419741.805 | 5317673.179 |  | <b>C3</b>  | 3419734.131 | 5317676.176 |
|                          | <b>31485</b> | 3419750.153 | 5317667.184 |  | <b>D1</b>  | 3419735.225 | 5317684.858 |
|                          | <b>31487</b> | 3419789.665 | 5317662.688 |  | <b>D2</b>  | 3419737.194 | 5317681.964 |
|                          | <b>31489</b> | 3419806.828 | 5317664.187 |  | <b>D3</b>  | 3419739.162 | 5317679.07  |
|                          | <b>31495</b> | 3419828.194 | 5317681.964 |  | <b>D4</b>  | 3419737.968 | 5317674.677 |
|                          | <b>31498</b> | 3419771.828 | 5317664.187 |  | <b>D5</b>  | 3419734.805 | 5317673.179 |
|                          | <b>31929</b> | 3419775.665 | 5317662.688 |  | <b>D6</b>  | 3419731.642 | 5317671.68  |
|                          | <b>31930</b> | 3419776.131 | 5317676.176 |  | <b>D7</b>  | 3419728.479 | 5317670.181 |
|                          | <b>31931</b> | 3419785.828 | 5317664.187 |  | <b>D8</b>  | 3419725.316 | 5317668.683 |
|                          | <b>31932</b> | 3419741.131 | 5317676.176 |  | <b>D9</b>  | 3419722.153 | 5317667.184 |
|                          | <b>31933</b> | 3419743.153 | 5317667.184 |  | <b>E1</b>  | 3419740.257 | 5317687.752 |
|                          | <b>31934</b> | 3419732.162 | 5317679.07  |  | <b>E2</b>  | 3419742.225 | 5317684.858 |
|                          | <b>31935</b> | 3419782.665 | 5317662.688 |  | <b>E3</b>  | 3419744.194 | 5317681.964 |
|                          | <b>31936</b> | 3419799.828 | 5317664.187 |  | <b>E4</b>  | 3419746.162 | 5317679.07  |
|                          | <b>31937</b> | 3419818.131 | 5317676.176 |  | <b>E5</b>  | 3419748.131 | 5317676.176 |
|                          | <b>31939</b> | 3419759.288 | 5317690.646 |  | <b>E6</b>  | 3419744.968 | 5317674.677 |
|                          | <b>31940</b> | 3419822.642 | 5317671.68  |  | <b>E7</b>  | 3419738.642 | 5317671.68  |
|                          | <b>31941</b> | 3419760.991 | 5317665.686 |  | <b>E8</b>  | 3419735.479 | 5317670.181 |
|                          | <b>31942</b> | 3419796.665 | 5317662.688 |  | <b>E9</b>  | 3419732.316 | 5317668.683 |
|                          | <b>31943</b> | 3419779.502 | 5317661.19  |  | <b>E10</b> | 3419729.153 | 5317667.184 |
|                          | <b>31944</b> | 3419783.131 | 5317676.176 |  | <b>E11</b> | 3419725.991 | 5317665.686 |
|                          | <b>31945</b> | 3419745.642 | 5317671.68  |  | <b>F1</b>  | 3419747.257 | 5317687.752 |
|                          | <b>31946</b> | 3419820.153 | 5317667.184 |  | <b>F2</b>  | 3419749.225 | 5317684.858 |
|                          | <b>31947</b> | 3419778.828 | 5317664.187 |  | <b>F3</b>  | 3419751.194 | 5317681.964 |
|                          | <b>31948</b> | 3419752.288 | 5317690.646 |  | <b>F4</b>  | 3419753.162 | 5317679.07  |
|                          | <b>31950</b> | 3419803.665 | 5317662.688 |  | <b>F5</b>  | 3419755.131 | 5317676.176 |
|                          | <b>31951</b> | 3419786.502 | 5317661.19  |  | <b>F6</b>  | 3419751.968 | 5317674.677 |
|                          | <b>31952</b> | 3419757.153 | 5317667.184 |  | <b>F7</b>  | 3419748.805 | 5317673.179 |
|                          | <b>31953</b> | 3419745.288 | 5317690.646 |  | <b>F8</b>  | 3419742.479 | 5317670.181 |

| Fläschchen | Rechtswert  | Hochwert    |
|------------|-------------|-------------|
| <b>F9</b>  | 3419739.316 | 5317668.683 |
| <b>F10</b> | 3419736.153 | 5317667.184 |
| <b>F11</b> | 3419732.991 | 5317665.686 |
| <b>G1</b>  | 3419754.257 | 5317687.752 |
| <b>G10</b> | 3419739.991 | 5317665.686 |
| <b>G2</b>  | 3419756.225 | 5317684.858 |
| <b>G3</b>  | 3419758.194 | 5317681.964 |
| <b>G4</b>  | 3419760.162 | 5317679.07  |
| <b>G5</b>  | 3419758.968 | 5317674.677 |
| <b>G6</b>  | 3419755.805 | 5317673.179 |
| <b>G7</b>  | 3419752.642 | 5317671.68  |
| <b>G8</b>  | 3419749.479 | 5317670.181 |
| <b>G9</b>  | 3419746.316 | 5317668.683 |
| <b>H1</b>  | 3419761.257 | 5317687.752 |
| <b>H10</b> | 3419753.316 | 5317668.683 |
| <b>H11</b> | 3419746.991 | 5317665.686 |
| <b>H2</b>  | 3419763.225 | 5317684.858 |
| <b>H3</b>  | 3419765.194 | 5317681.964 |
| <b>H4</b>  | 3419767.162 | 5317679.07  |
| <b>H5</b>  | 3419769.131 | 5317676.176 |
| <b>H6</b>  | 3419765.968 | 5317674.677 |
| <b>H7</b>  | 3419762.805 | 5317673.179 |
| <b>H8</b>  | 3419759.642 | 5317671.68  |
| <b>H9</b>  | 3419756.479 | 5317670.181 |
| <b>I1</b>  | 3419768.257 | 5317687.752 |
| <b>I2</b>  | 3419770.225 | 5317684.858 |
| <b>I3</b>  | 3419772.194 | 5317681.964 |
| <b>I4</b>  | 3419774.162 | 5317679.07  |
| <b>I5</b>  | 3419772.968 | 5317674.677 |
| <b>I6</b>  | 3419769.805 | 5317673.179 |
| <b>I7</b>  | 3419766.642 | 5317671.68  |
| <b>I8</b>  | 3419763.479 | 5317670.181 |
| <b>I9</b>  | 3419760.316 | 5317668.683 |
| <b>I10</b> | 3419753.991 | 5317665.686 |
| <b>I11</b> | 3419750.828 | 5317664.187 |
| <b>J1</b>  | 3419773.288 | 5317690.646 |
| <b>J2</b>  | 3419775.257 | 5317687.752 |

| Fläschchen | Rechtswert  | Hochwert   |
|------------|-------------|------------|
| <b>L8</b>  | 3419787.642 | 5317671.68 |
| <b>L9</b>  | 3419784.479 | 5317670.18 |
| <b>L10</b> | 3419781.316 | 5317668.68 |
| <b>L11</b> | 3419778.153 | 5317667.18 |
| <b>L12</b> | 3419774.991 | 5317665.69 |
| <b>L13</b> | 3419768.665 | 5317662.69 |
| <b>M1</b>  | 3419794.288 | 5317690.65 |
| <b>M2</b>  | 3419796.257 | 5317687.75 |
| <b>M3</b>  | 3419798.225 | 5317684.86 |
| <b>M4</b>  | 3419800.194 | 5317681.96 |
| <b>M5</b>  | 3419802.162 | 5317679.07 |
| <b>M6</b>  | 3419804.131 | 5317676.18 |
| <b>M7</b>  | 3419800.968 | 5317674.68 |
| <b>M8</b>  | 3419797.805 | 5317673.18 |
| <b>M9</b>  | 3419794.642 | 5317671.68 |
| <b>M10</b> | 3419791.479 | 5317670.18 |
| <b>M11</b> | 3419788.316 | 5317668.68 |
| <b>M12</b> | 3419785.153 | 5317667.18 |
| <b>M13</b> | 3419781.991 | 5317665.69 |
| <b>N1</b>  | 3419803.257 | 5317687.75 |
| <b>N2</b>  | 3419805.225 | 5317684.86 |
| <b>N3</b>  | 3419807.194 | 5317681.96 |
| <b>N4</b>  | 3419809.162 | 5317679.07 |
| <b>N5</b>  | 3419811.131 | 5317676.18 |
| <b>N6</b>  | 3419807.968 | 5317674.68 |
| <b>N7</b>  | 3419804.805 | 5317673.18 |
| <b>N8</b>  | 3419801.642 | 5317671.68 |
| <b>N9</b>  | 3419798.479 | 5317670.18 |
| <b>N10</b> | 3419795.316 | 5317668.68 |
| <b>N11</b> | 3419792.153 | 5317667.18 |
| <b>N12</b> | 3419788.991 | 5317665.69 |
| <b>O1</b>  | 3419810.257 | 5317687.75 |
| <b>O2</b>  | 3419812.225 | 5317684.86 |
| <b>O3</b>  | 3419814.194 | 5317681.96 |
| <b>O4</b>  | 3419816.162 | 5317679.07 |
| <b>O5</b>  | 3419814.968 | 5317674.68 |
| <b>O6</b>  | 3419811.805 | 5317673.18 |

|            |             |             |
|------------|-------------|-------------|
| <b>J3</b>  | 3419777.225 | 5317684.858 |
| <b>J4</b>  | 3419779.194 | 5317681.964 |
| <b>J5</b>  | 3419781.162 | 5317679.07  |
| <b>J6</b>  | 3419779.968 | 5317674.677 |
| <b>J7</b>  | 3419776.805 | 5317673.179 |
| <b>J8</b>  | 3419773.642 | 5317671.68  |
| <b>J9</b>  | 3419770.479 | 5317670.181 |
| <b>J10</b> | 3419767.316 | 5317668.683 |
| <b>J11</b> | 3419764.153 | 5317667.184 |
| <b>J12</b> | 3419757.828 | 5317664.187 |
| <b>K1</b>  | 3419780.288 | 5317690.646 |
| <b>K2</b>  | 3419782.257 | 5317687.752 |
| <b>K3</b>  | 3419784.225 | 5317684.858 |
| <b>K4</b>  | 3419786.194 | 5317681.964 |
| <b>K5</b>  | 3419788.162 | 5317679.07  |
| <b>K6</b>  | 3419790.131 | 5317676.176 |
| <b>K7</b>  | 3419786.968 | 5317674.677 |
| <b>K8</b>  | 3419783.805 | 5317673.179 |
| <b>K9</b>  | 3419780.642 | 5317671.68  |
| <b>K10</b> | 3419777.479 | 5317670.181 |
| <b>K11</b> | 3419774.316 | 5317668.683 |
| <b>K12</b> | 3419771.153 | 5317667.184 |
| <b>K13</b> | 3419767.991 | 5317665.686 |
| <b>L1</b>  | 3419789.257 | 5317687.752 |
| <b>L2</b>  | 3419791.225 | 5317684.858 |
| <b>L3</b>  | 3419793.194 | 5317681.964 |
| <b>L4</b>  | 3419795.162 | 5317679.07  |
| <b>L5</b>  | 3419797.131 | 5317676.176 |
| <b>L6</b>  | 3419793.968 | 5317674.677 |
| <b>L7</b>  | 3419790.805 | 5317673.179 |

|            |             |            |
|------------|-------------|------------|
| <b>O7</b>  | 3419808.642 | 5317671.68 |
| <b>O8</b>  | 3419805.479 | 5317670.18 |
| <b>O9</b>  | 3419802.316 | 5317668.68 |
| <b>O10</b> | 3419799.153 | 5317667.18 |
| <b>O11</b> | 3419795.991 | 5317665.69 |
| <b>O12</b> | 3419792.828 | 5317664.19 |
| <b>P1</b>  | 3419817.257 | 5317687.75 |
| <b>P2</b>  | 3419819.225 | 5317684.86 |
| <b>P3</b>  | 3419821.194 | 5317681.96 |
| <b>P4</b>  | 3419823.162 | 5317679.07 |
| <b>P5</b>  | 3419825.131 | 5317676.18 |
| <b>P6</b>  | 3419821.968 | 5317674.68 |
| <b>P7</b>  | 3419818.805 | 5317673.18 |
| <b>P8</b>  | 3419815.642 | 5317671.68 |
| <b>P9</b>  | 3419812.479 | 5317670.18 |
| <b>P10</b> | 3419809.316 | 5317668.68 |
| <b>P11</b> | 3419806.153 | 5317667.18 |
| <b>P12</b> | 3419802.991 | 5317665.69 |
| <b>P13</b> | 3419793.502 | 5317661.19 |
| <b>P14</b> | 3419790.339 | 5317659.69 |
| <b>Q1</b>  | 3419819.479 | 5317670.18 |
| <b>Q2</b>  | 3419816.316 | 5317668.68 |
| <b>Q3</b>  | 3419813.153 | 5317667.18 |
| <b>Q4</b>  | 3419809.991 | 5317665.69 |
| <b>Q5</b>  | 3419800.502 | 5317661.19 |
| <b>Q6</b>  | 3419797.339 | 5317659.69 |
| <b>R1</b>  | 3419816.991 | 5317665.69 |
| <b>R2</b>  | 3419813.828 | 5317664.19 |
| <b>R3</b>  | 3419804.339 | 5317659.69 |

**Tabelle A. 7**      Gefallener Niederschlag pro Stunde an der Station Freiburg-Ebnet für den  
15.07.2009

| <b>15.07.2009</b> | <b>N [mm]</b> |
|-------------------|---------------|
| 00:00             | 0.2           |
| 01:00             | 7.9           |
| 02:00             | 5.6           |
| 03:00             | 0.3           |
| 04:00             | 2.5           |
| 05:00             | 2.8           |
| 06:00             | 3.2           |
| 07:00             | 2.5           |
| 08:00             | 1             |
| 09:00             | 1.4           |
| 10:00             | 0             |
| 11:00             | 0             |
| 12:00             | 0             |
| 13:00             | 0             |
| 14:00             | 0             |
| 15:00             | 0             |
| 16:00             | 0             |
| 17:00             | 0             |
| 18:00             | 0             |
| 19:00             | 0             |
| 20:00             | 0.2           |
| 21:00             | 0             |
| 22:00             | 0             |
| 23:00             | 0             |
| 00:00             | 0             |

### A.3 Wasserstandsaufzeichnungen der Odyssey Water Capacitive Logger

Die Odyssey Water Capacitive Rekorder haben den Wasserstand über die Zeit aufgezeichnet und bei Auslesen selbiger konnte dann eine Kurve für jeden der 33 Rekorder mit dem Auslese- und Programmierprogramm ODYSSEY erstellt werden. Diese Kurven sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Sie stellen den Wasserstand in mm gegenüber dem Aufzeichnungszeitpunkt dar.

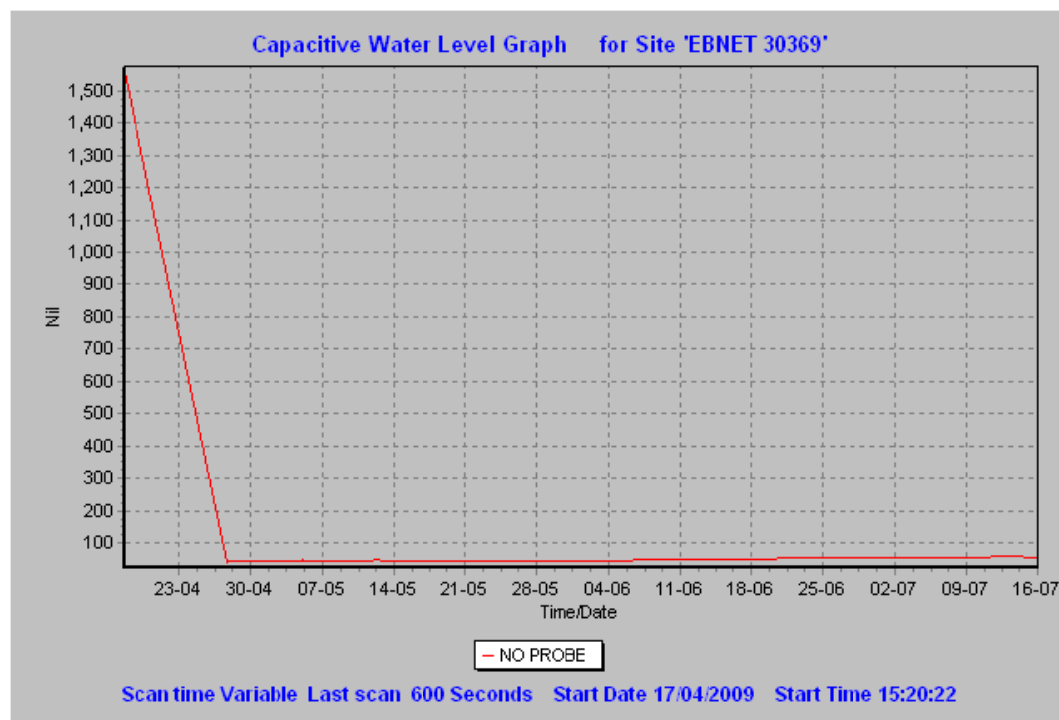


Abbildung A. 2 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "30369"

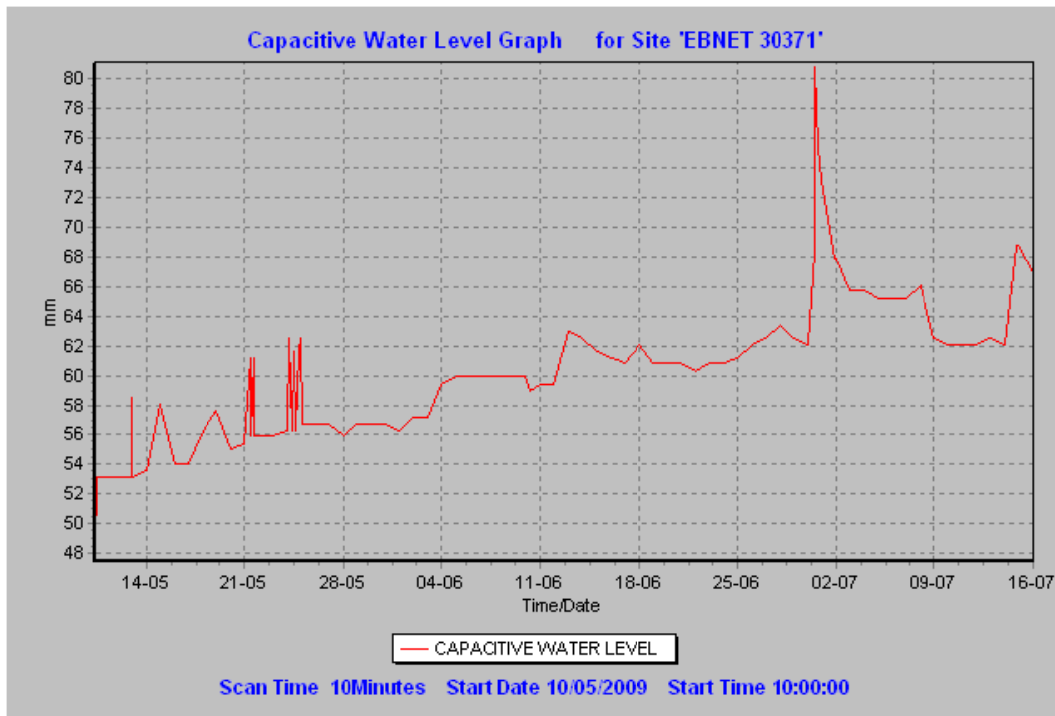


Abbildung A. 3 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "30371"

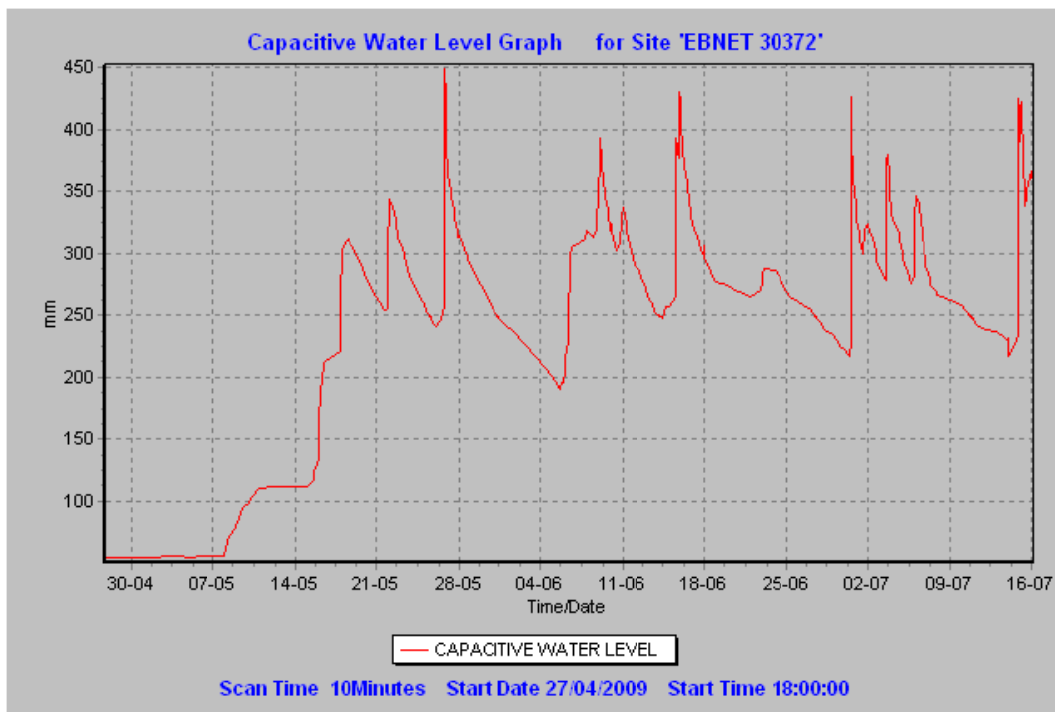


Abbildung A. 4 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "30372"

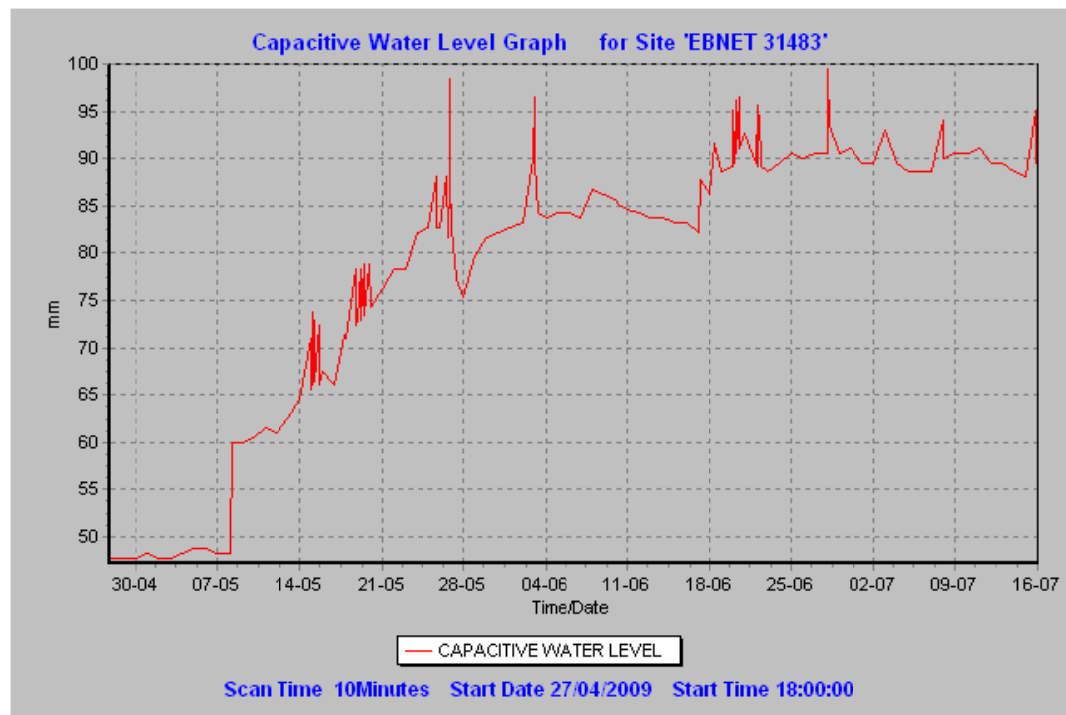


Abbildung A. 5 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31483"

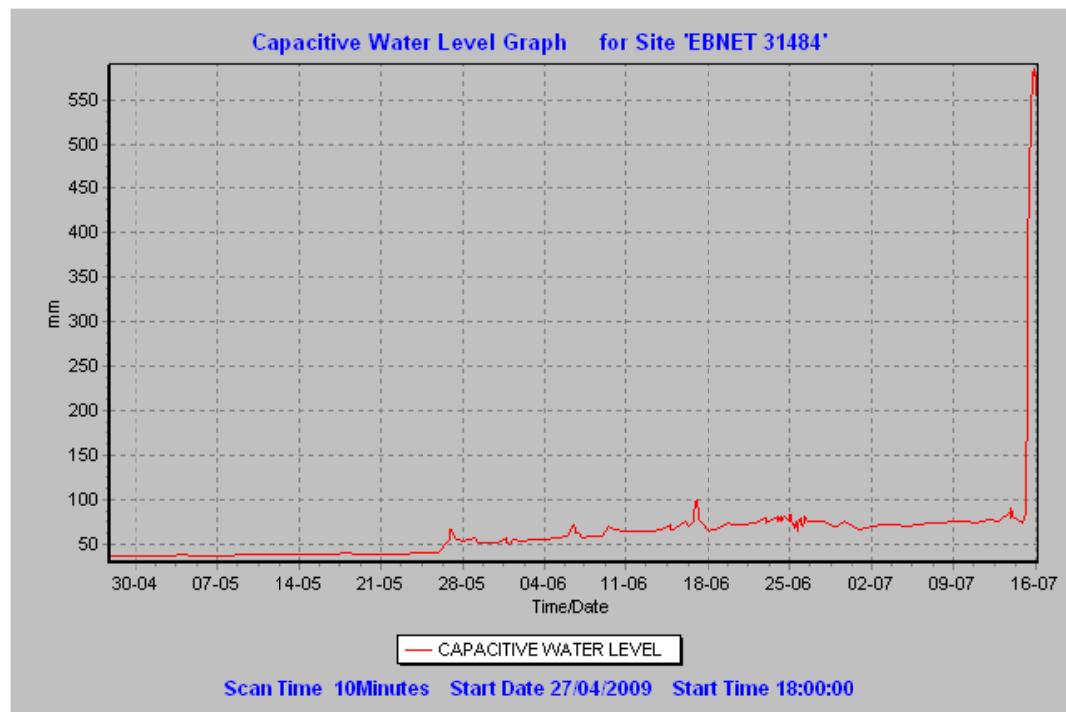


Abbildung A. 6 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31484"

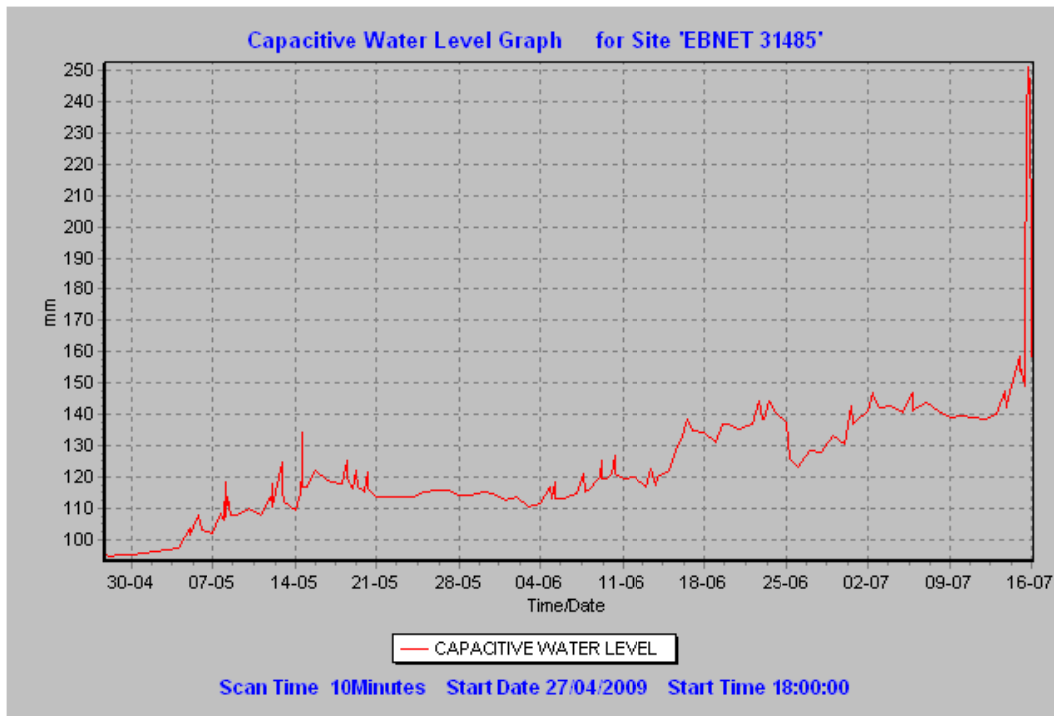


Abbildung A. 7 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31485"

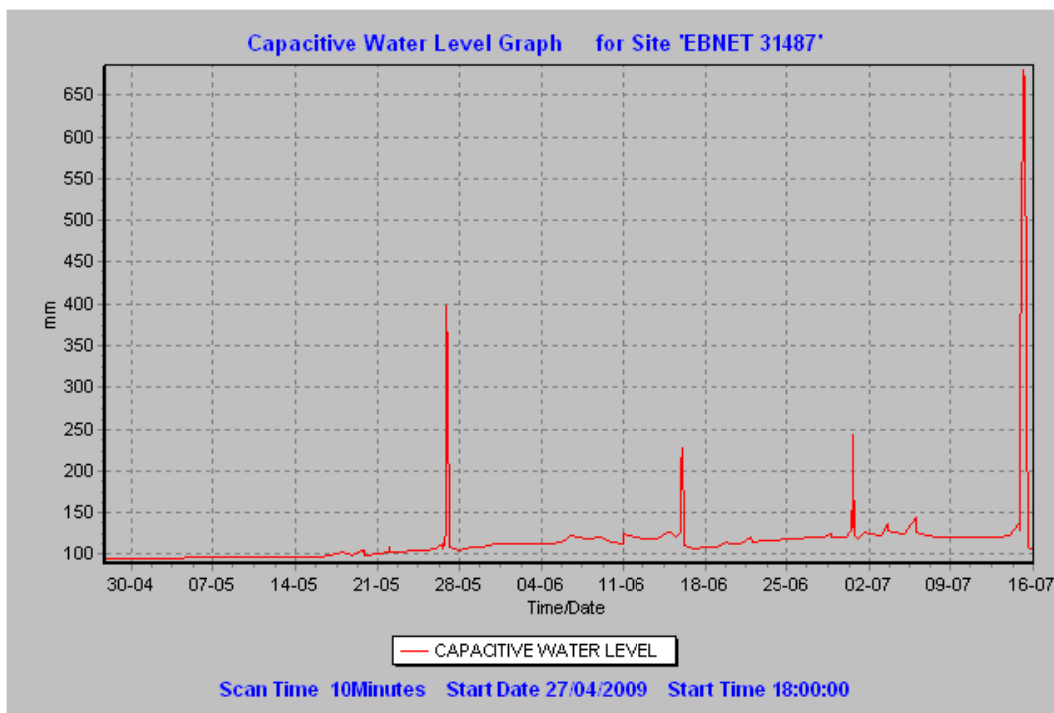
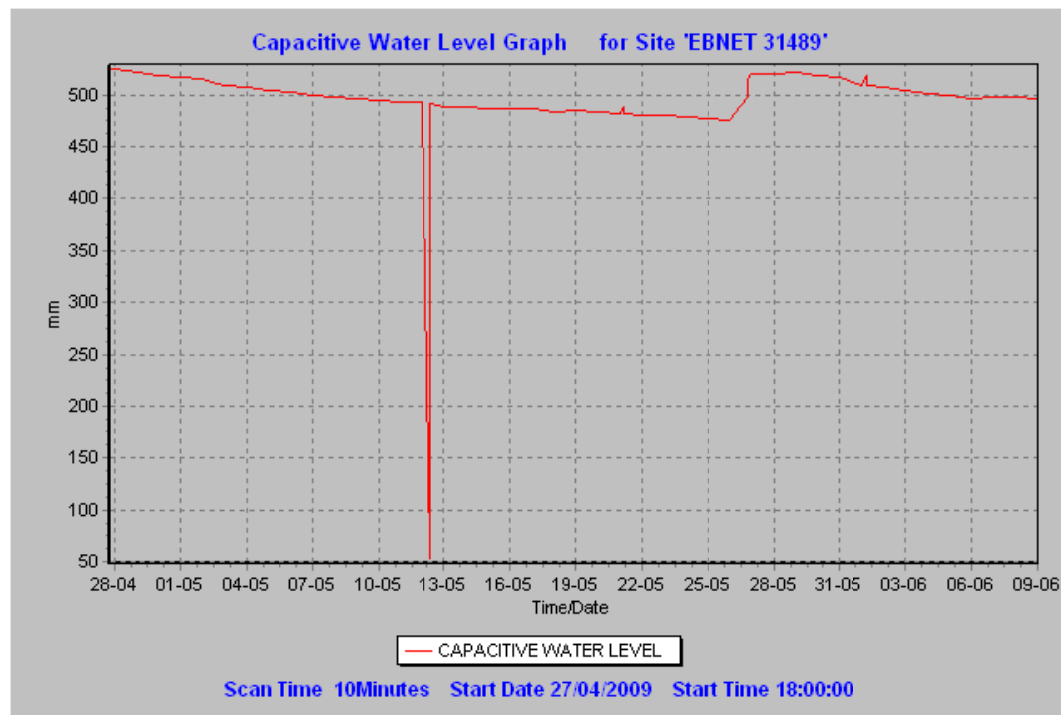


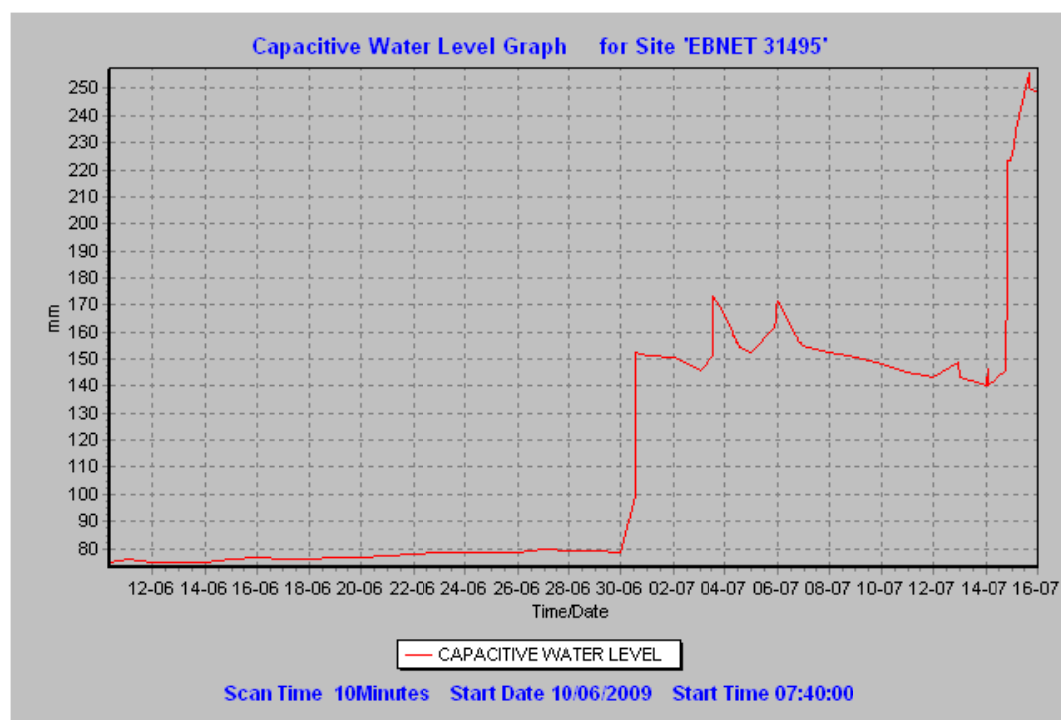
Abbildung A. 8 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31487"





**Abbildung A. 9** Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31489"

Der Ausreißer vom 12. Mai 2009 erklärt sich durch das Herausnehmen des Odyssey Rekorders zur Anschauung im Rahmen einer Exkursion von Prof. Dr. Markus Weiler.



**Abbildung A. 10** Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31495"

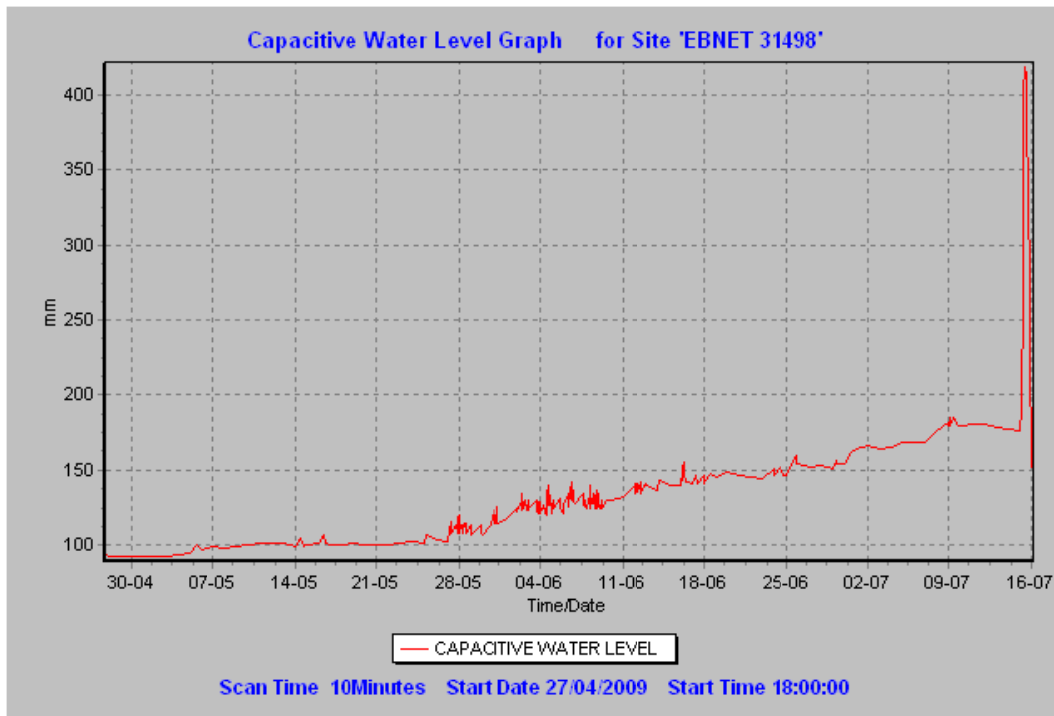


Abbildung A. 11 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31498"

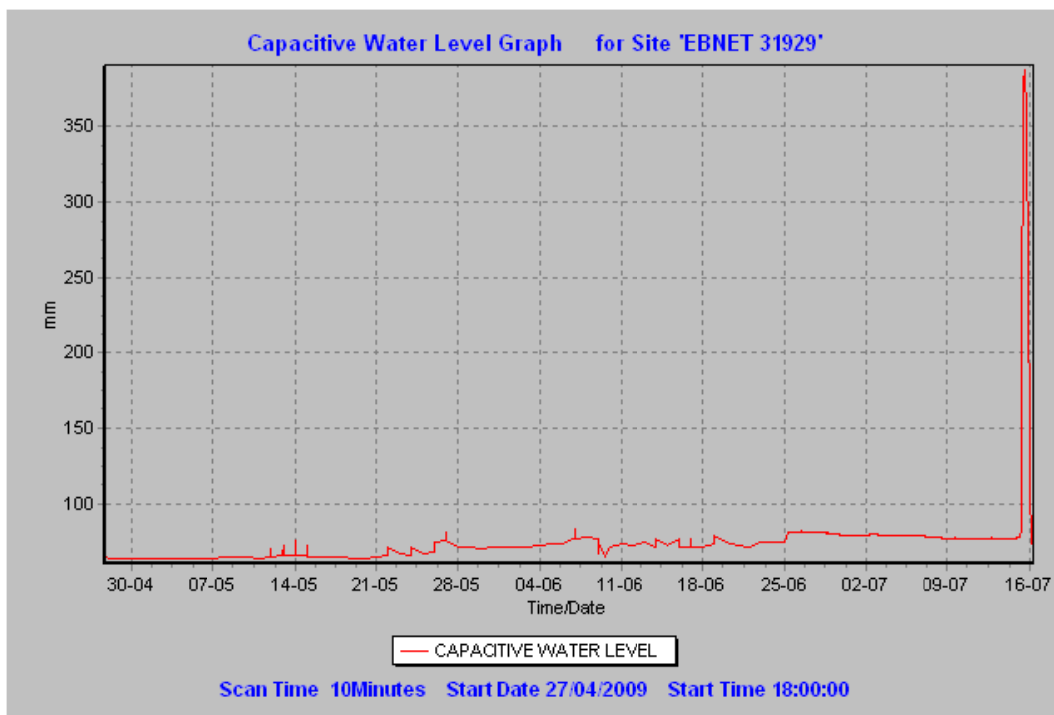


Abbildung A. 12 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31929"

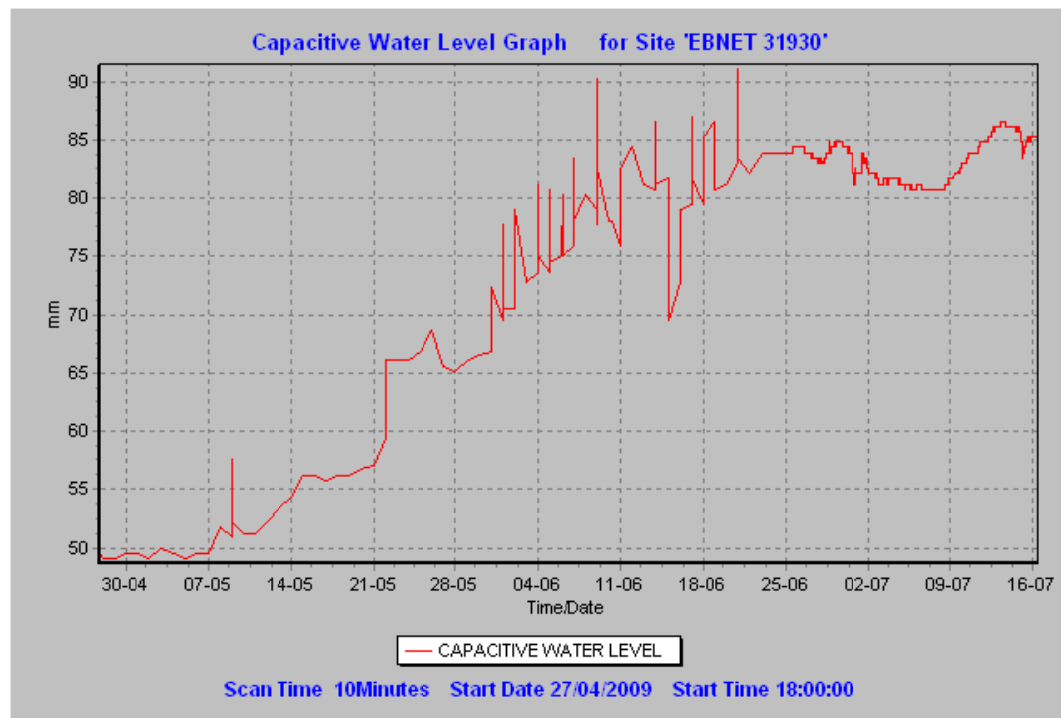


Abbildung A. 13 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31930"

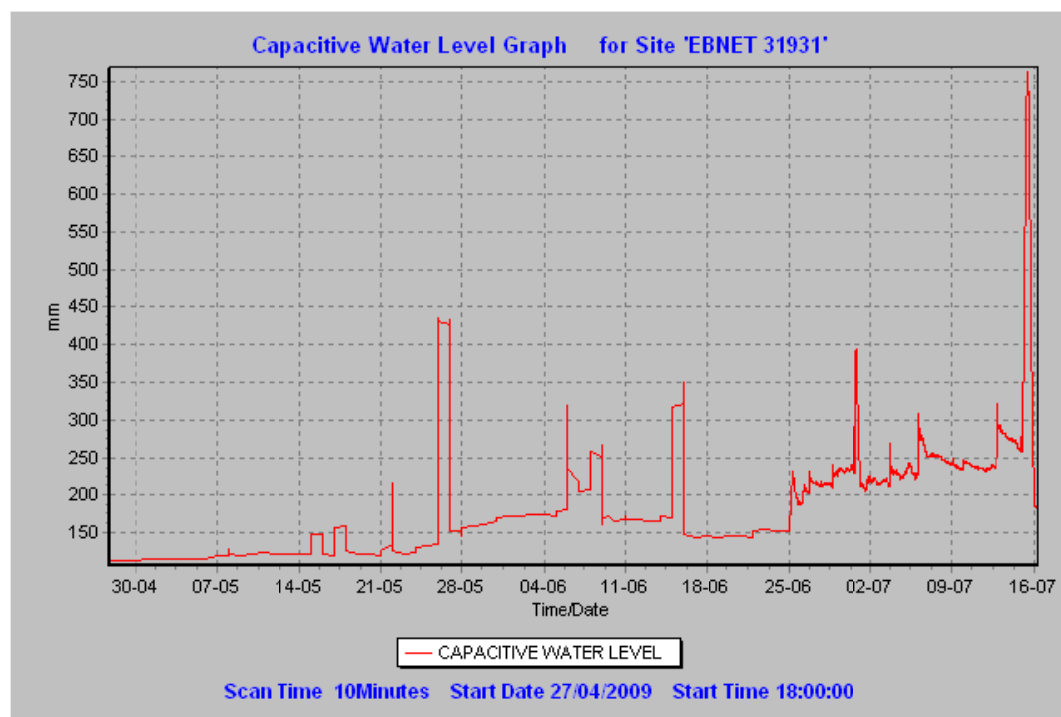


Abbildung A. 14 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31931"

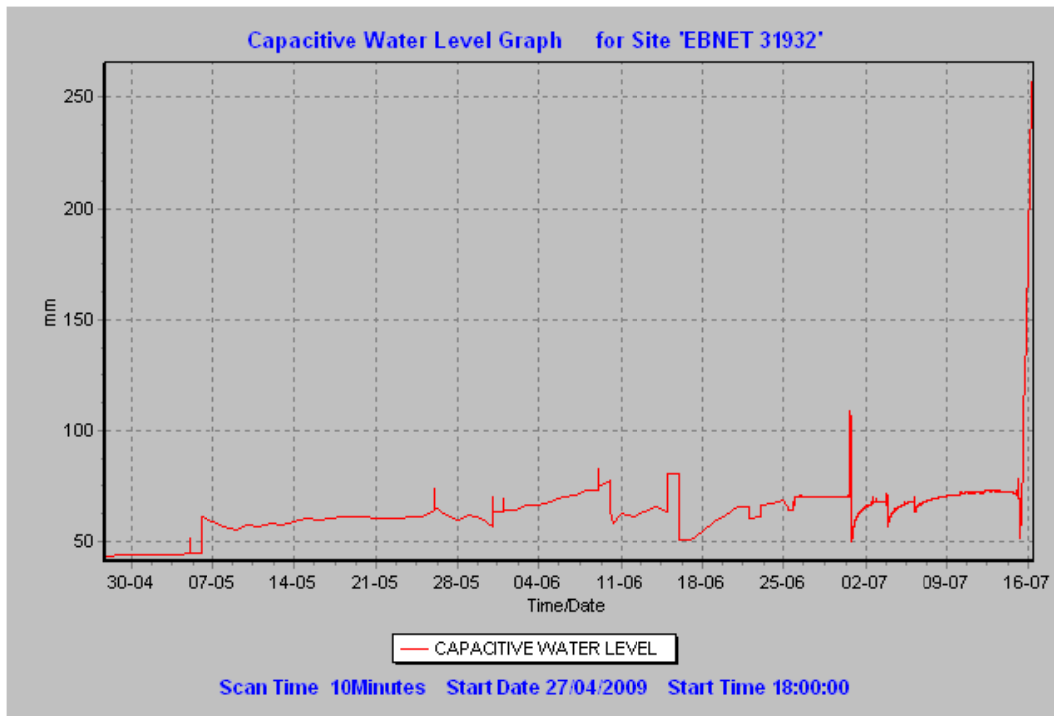


Abbildung A. 15 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31932"

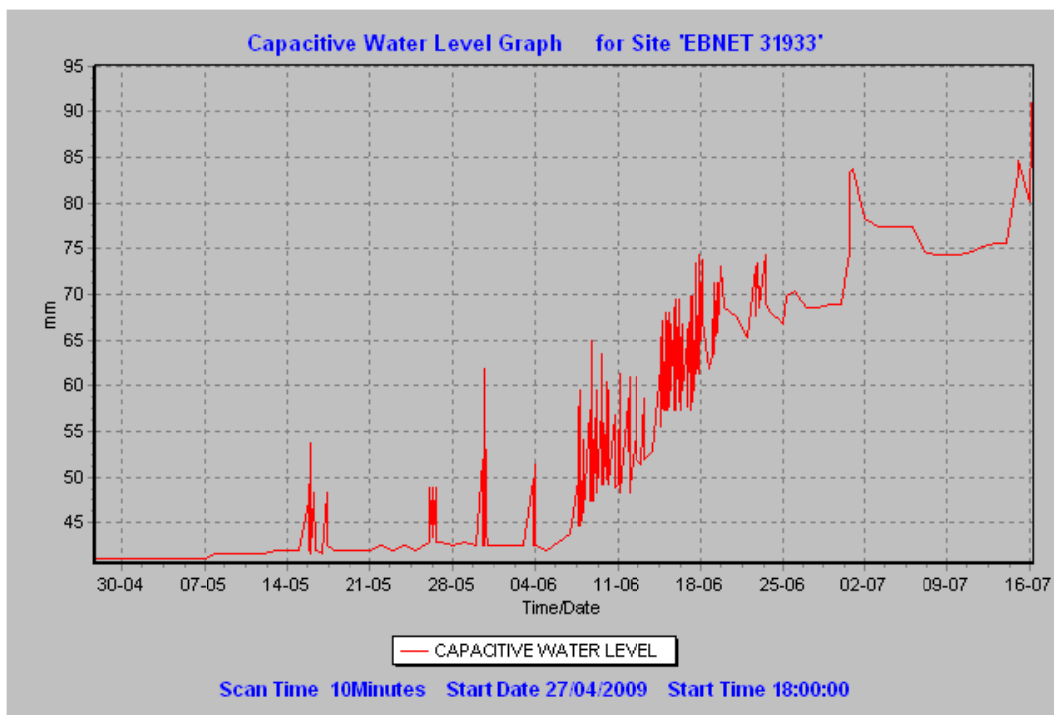


Abbildung A. 16 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31933"

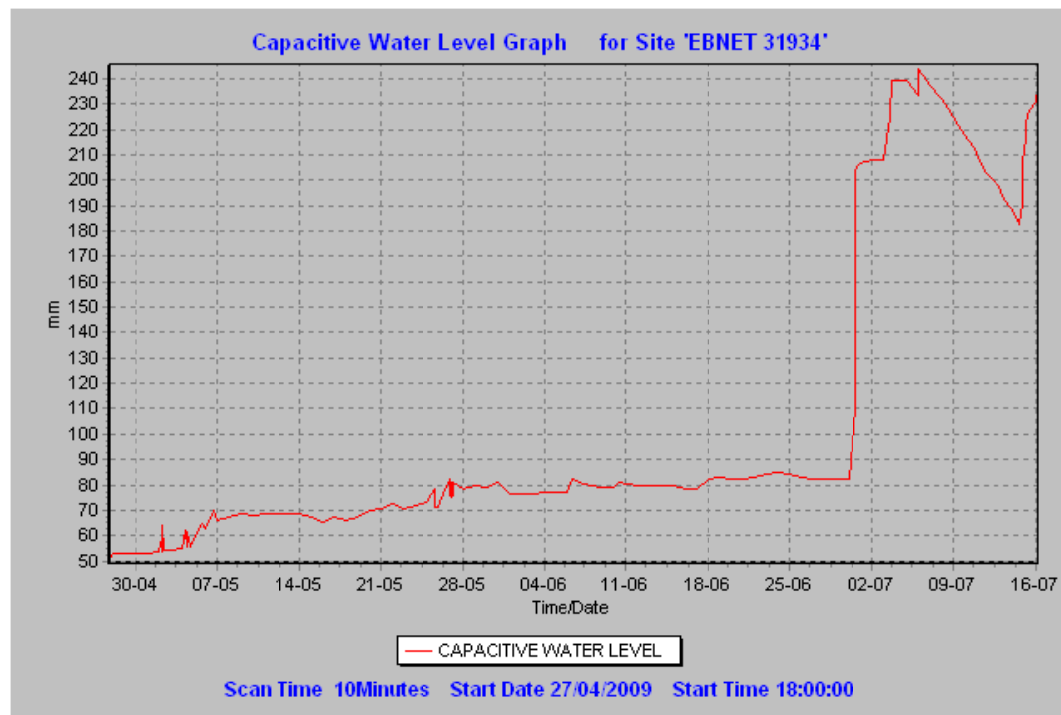


Abbildung A. 17 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31934"

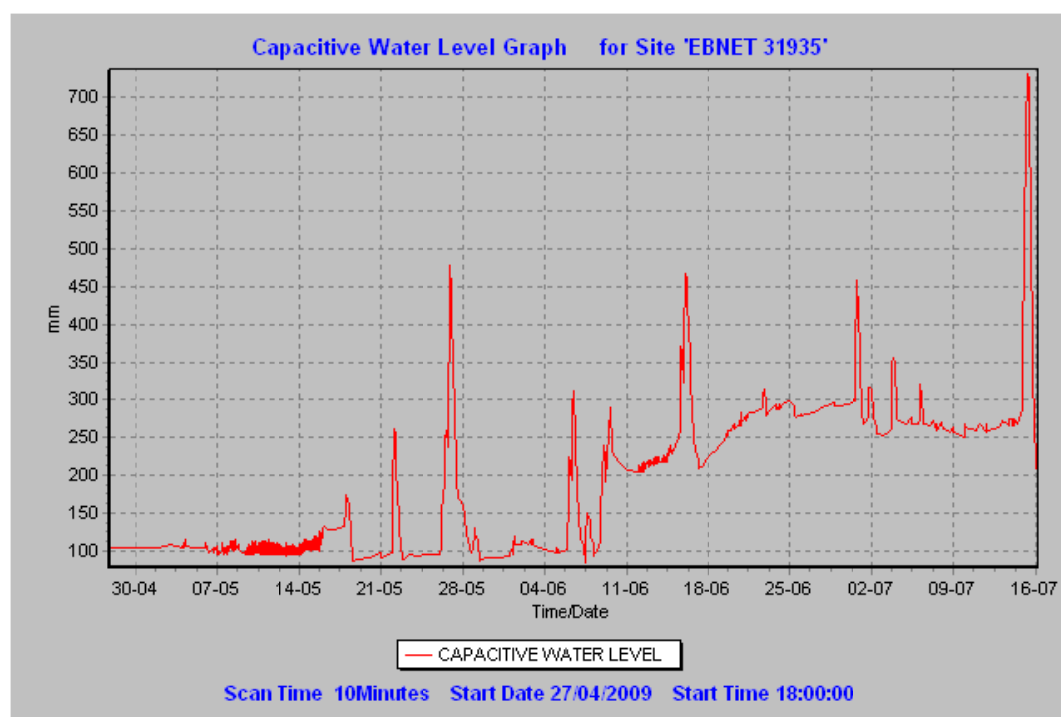


Abbildung A. 18 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31935"

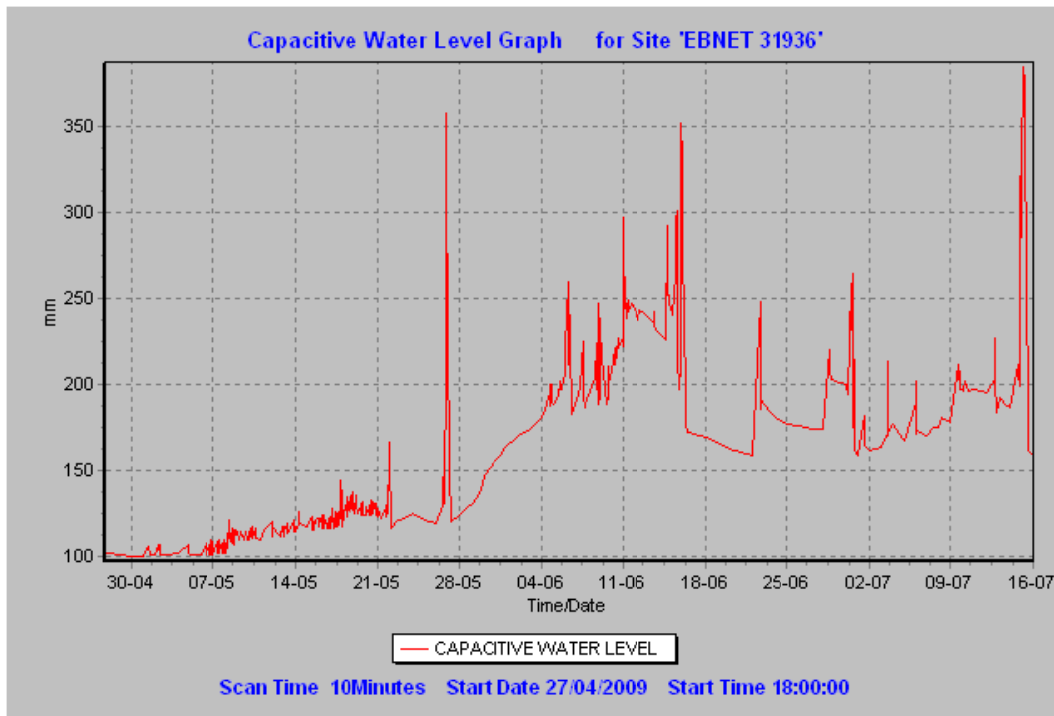


Abbildung A. 19 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31936"

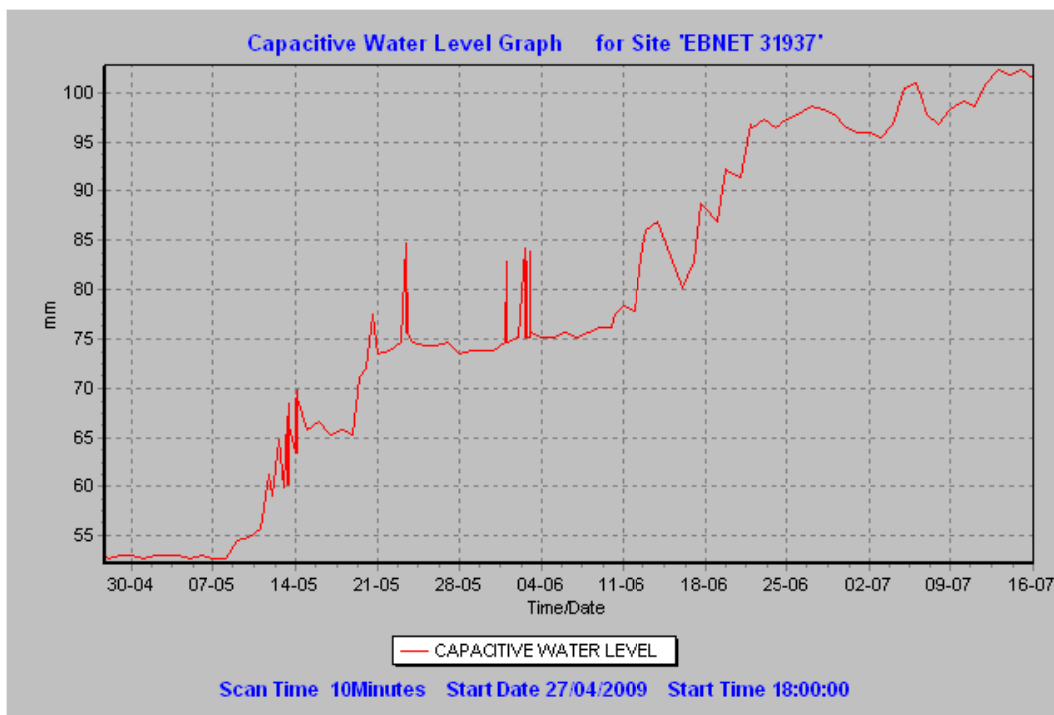


Abbildung A. 20 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31937"

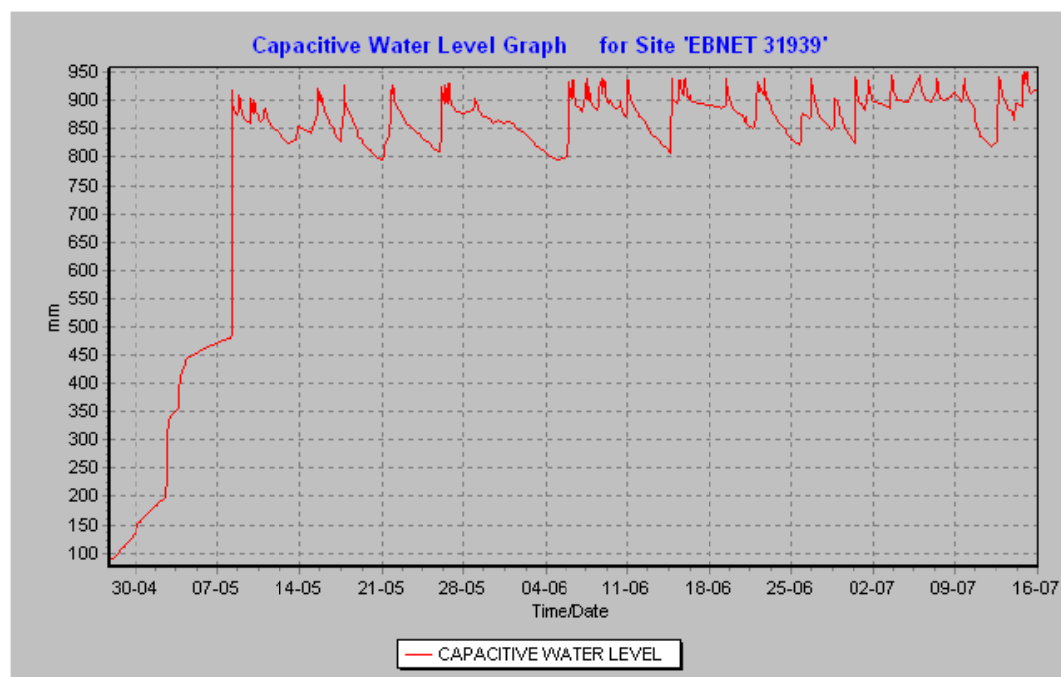


Abbildung A. 21 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31939"

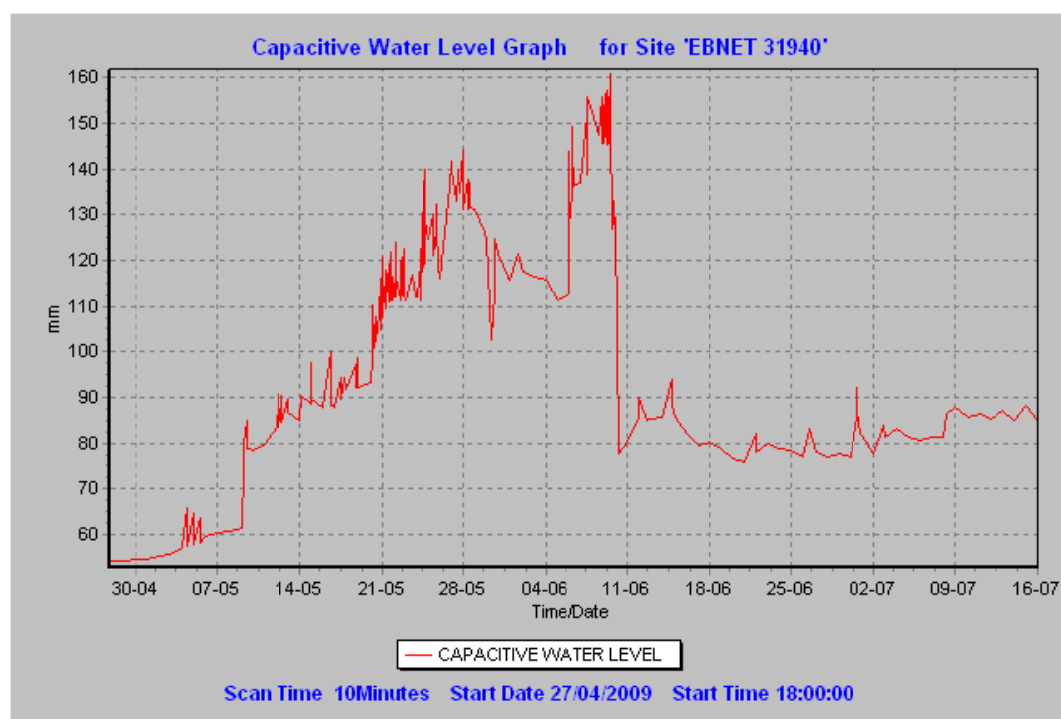


Abbildung A. 22 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31940"

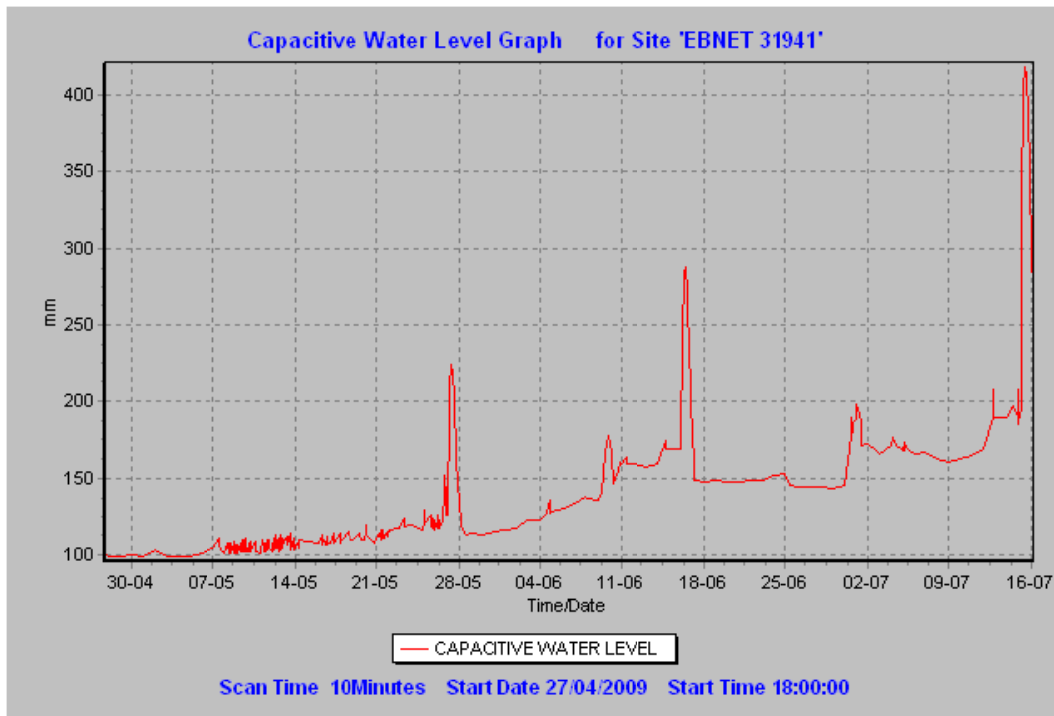


Abbildung A. 23 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31941"

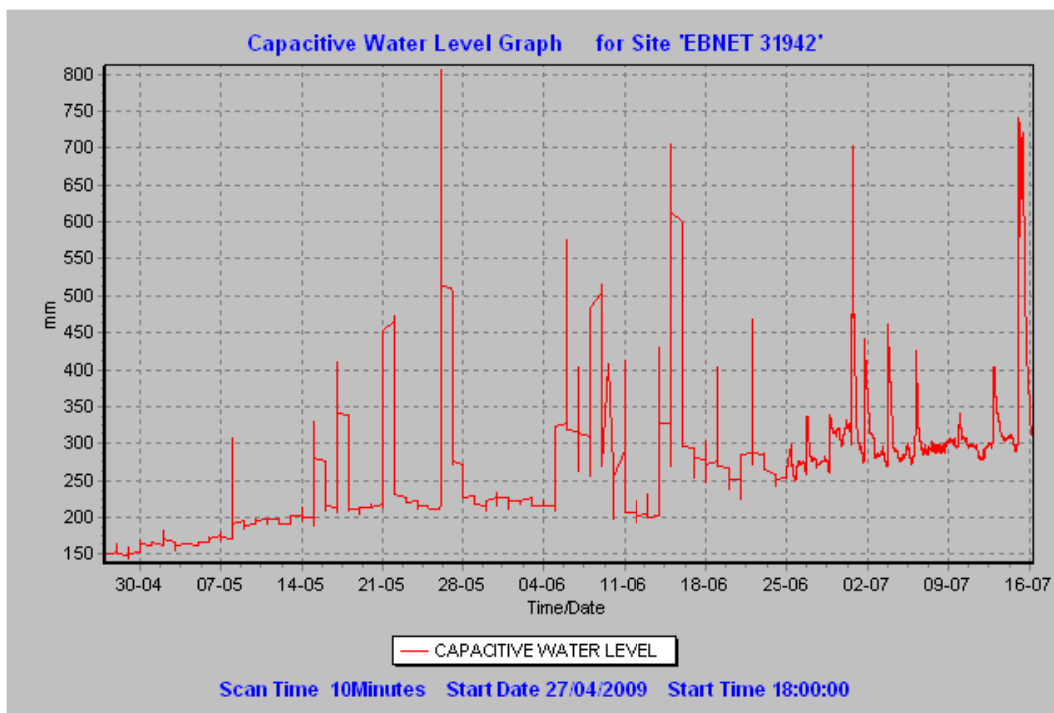


Abbildung A. 24 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31942"



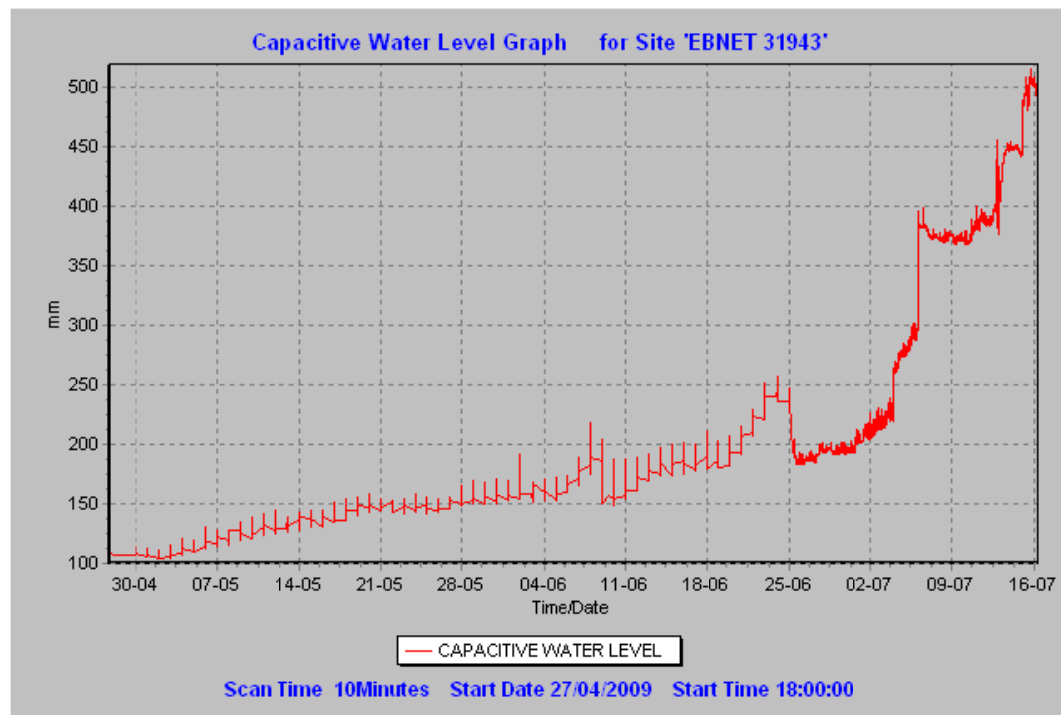


Abbildung A. 25 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31943"

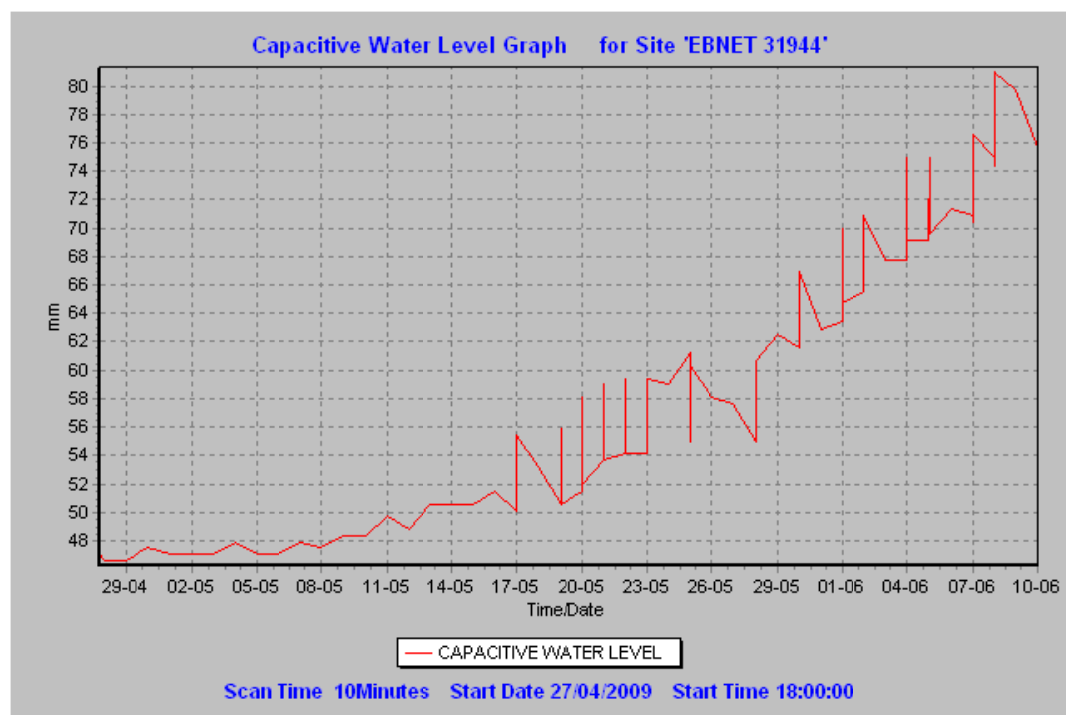


Abbildung A. 26 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31944"

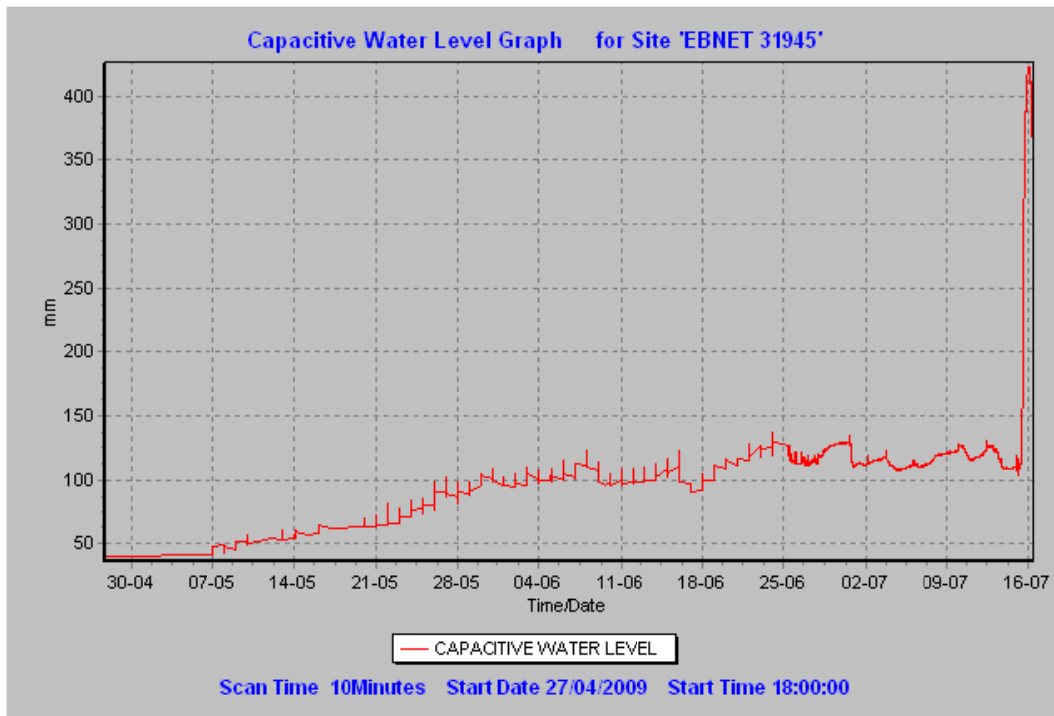


Abbildung A. 27 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31945"

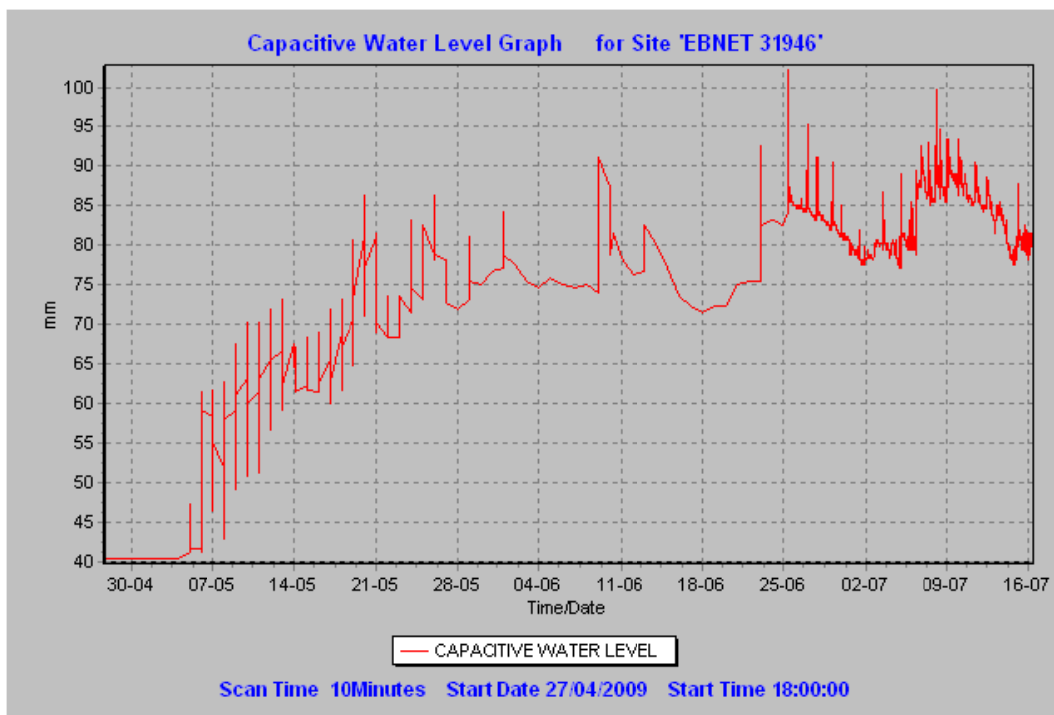


Abbildung A. 28 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31946"

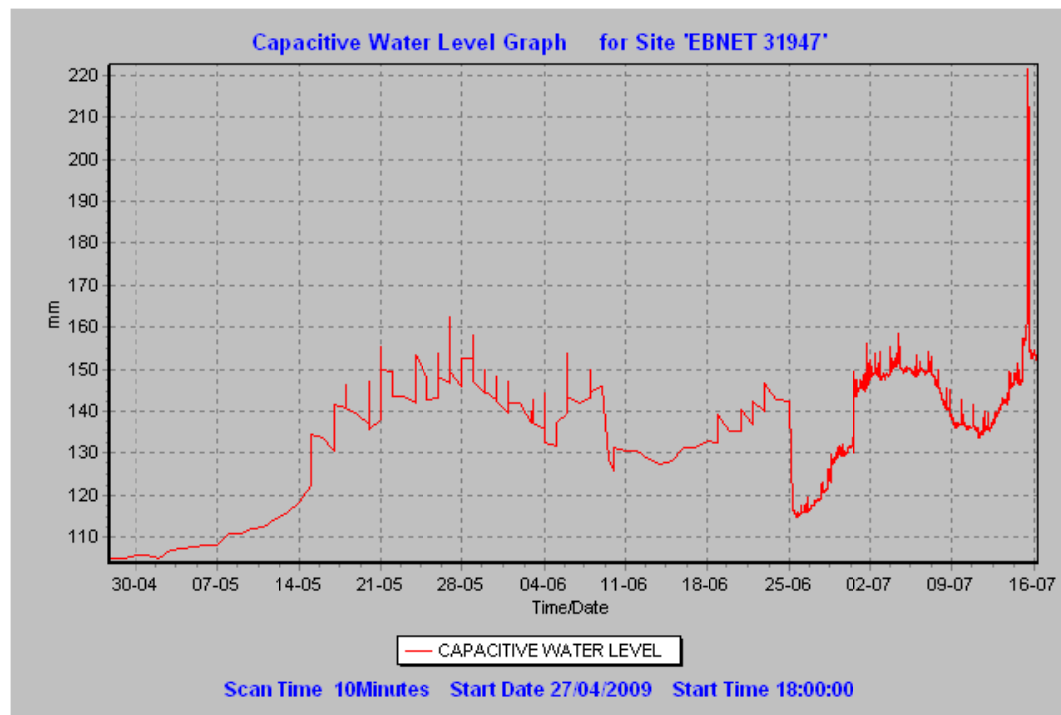


Abbildung A. 29 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31947"

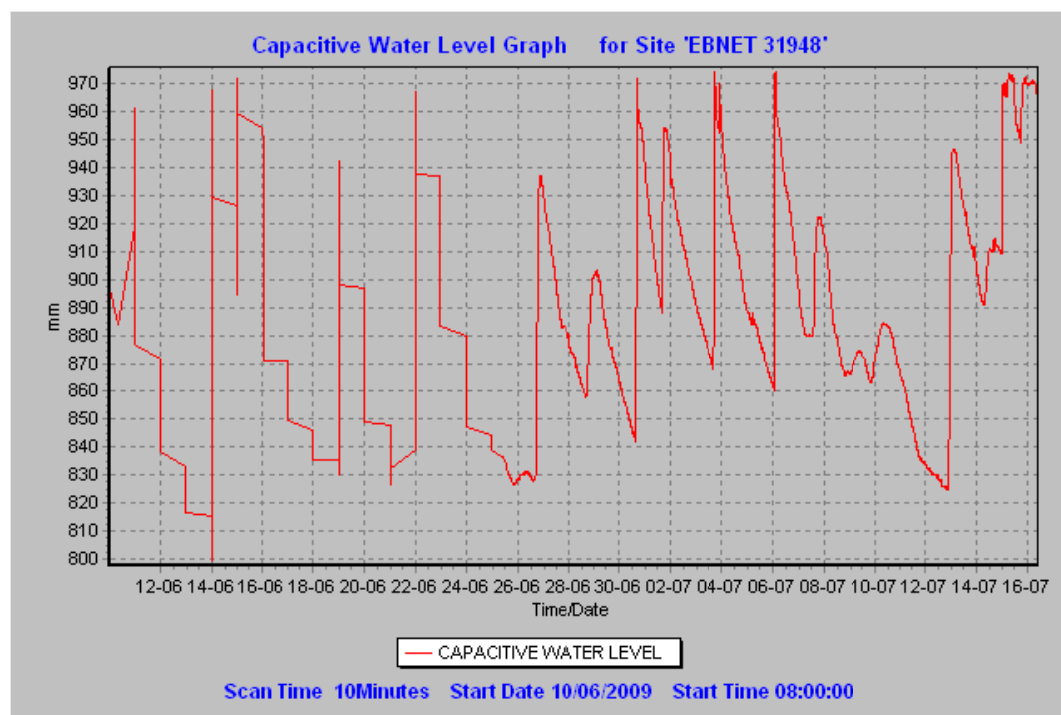


Abbildung A. 30 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31948"

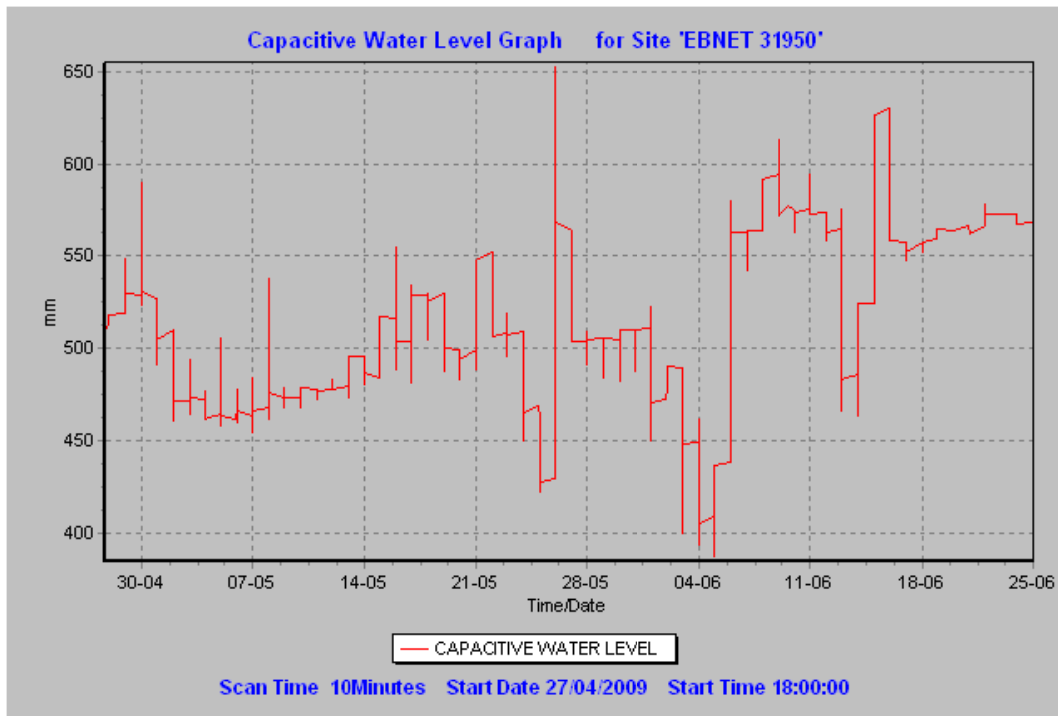


Abbildung A. 31 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31950"

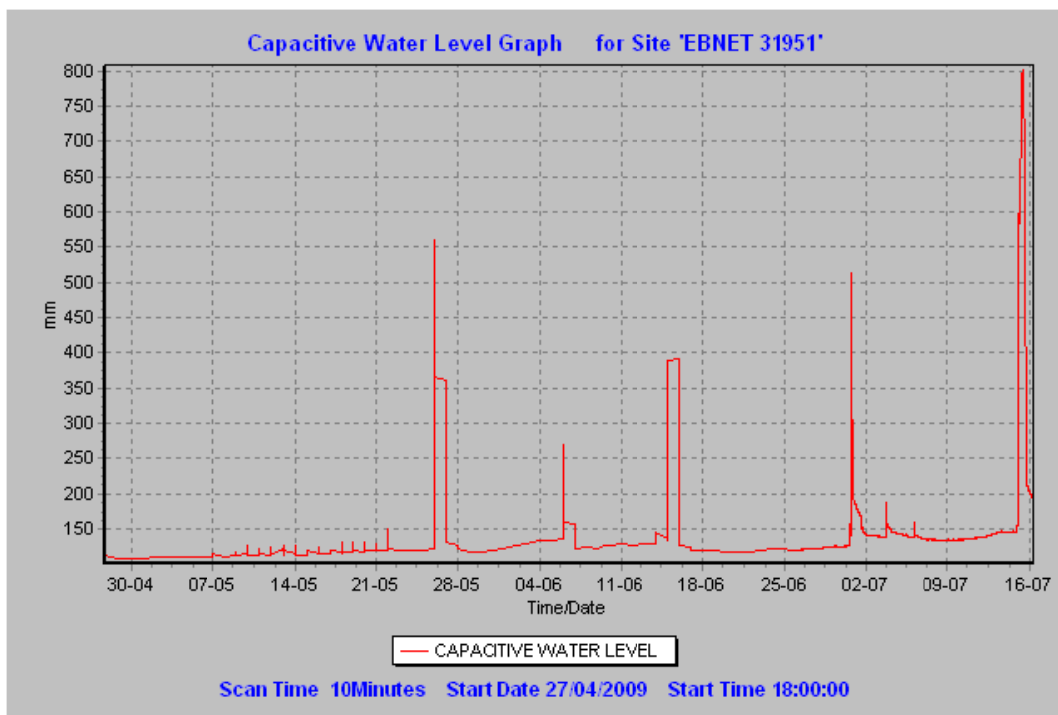


Abbildung A. 32 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31951"

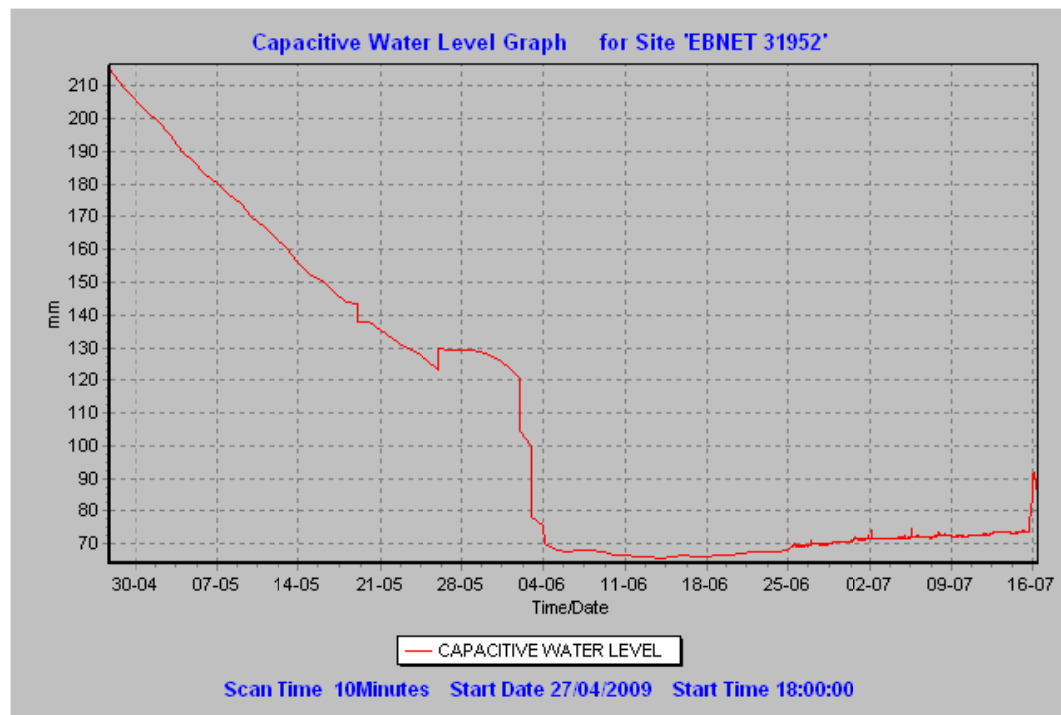


Abbildung A. 33 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31952"

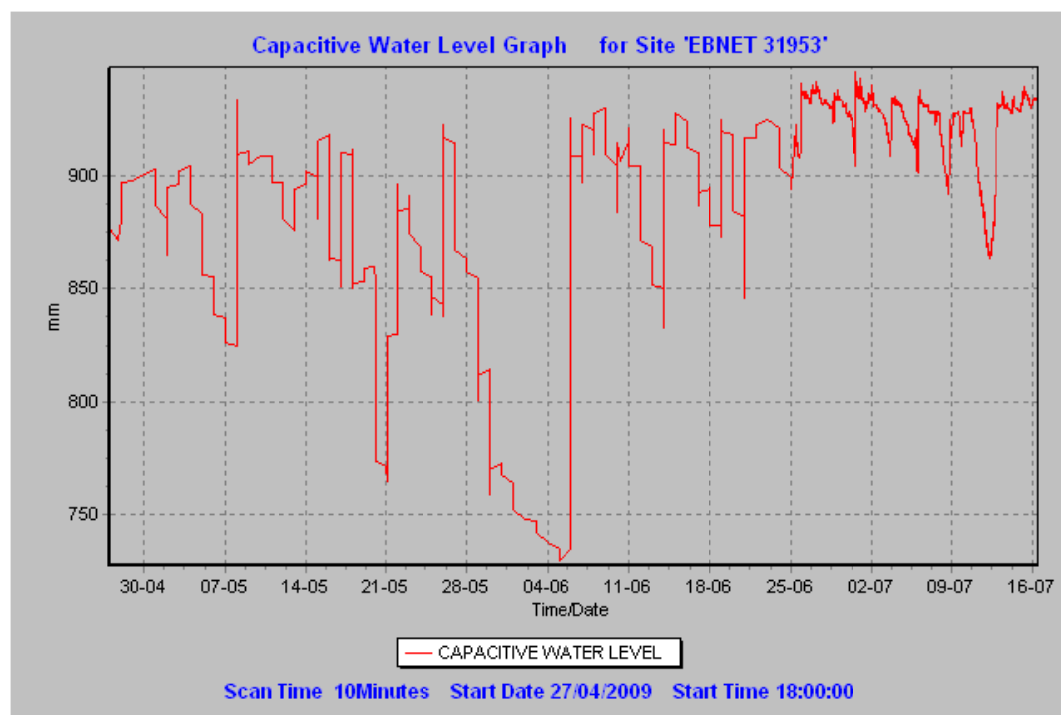


Abbildung A. 34 Wasserstandsaufzeichnung der Odyssey Sonde "31953"

Tabelle A. 8 Datenaufzeichnung der Odyssey Rekorder über den Untersuchungszeitraum

| OD Nr. | 27.04.09<br>18:00                                  | 10.05.09 | 09.06.09 | 10.06.09 | 25.06.09 | 16.07.09 |
|--------|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30369  |  |          |          |          |          |          |
| 30371  |  |          |          |          |          |          |
| 30372  |  |          |          |          |          |          |
| 31483  |  |          |          |          |          |          |
| 31484  |  |          |          |          |          |          |
| 31485  |  |          |          |          |          |          |
| 31487  |  |          |          |          |          |          |
| 31489  |  |          |          |          |          |          |
| 31495  |  |          |          |          |          |          |
| 31498  |  |          |          |          |          |          |
| 31929  |  |          |          |          |          |          |
| 31930  |  |          |          |          |          |          |
| 31931  |  |          |          |          |          |          |
| 31932  |  |          |          |          |          |          |
| 31933  |  |          |          |          |          |          |
| 31934  |  |          |          |          |          |          |
| 31935  |  |          |          |          |          |          |
| 31936  |  |          |          |          |          |          |
| 31937  |  |          |          |          |          |          |
| 31939  |  |          |          |          |          |          |
| 31940  |  |          |          |          |          |          |
| 31941  |  |          |          |          |          |          |
| 31942  |  |          |          |          |          |          |
| 31943  |  |          |          |          |          |          |
| 31944  |  |          |          |          |          |          |
| 31945  |  |          |          |          |          |          |
| 31946  |  |          |          |          |          |          |
| 31947  |  |          |          |          |          |          |
| 31948  |  |          |          |          |          |          |
| 31950  |  |          |          |          |          |          |
| 31951  |  |          |          |          |          |          |
| 31952  |  |          |          |          |          |          |
| 31953  |  |          |          |          |          |          |
|        | Datenaufzeichnung in Ordnung im „Compressed Mode“  |          |          |          |          |          |
|        | Problem bei Datenaufzeichnung im „Compressed Mode“ |          |          |          |          |          |
|        | Datenaufzeichnung in Ordnung im „Linear Mode“      |          |          |          |          |          |
|        | Keine Datenaufzeichnung                            |          |          |          |          |          |

## A.4 Auswertung

Tabelle A. 9

Zusammenfassung der Ergebnisse der einzelnen Odyssey Rekorder in Bezug auf den Wasserspiegelanstieg vom 01.05.-16.07.2009, den minimalsten Flurabstand über den Zeitraum vom 01.05.-16.07.2009 und der Standardabweichung der minimalen Flurabstände der untersuchten Ereignisse

| OD    |       | Anstieg<br>1.5.-16.7. | MIN<br>1.5.-16.7. | STABW<br>unters.<br>Ereignisse |
|-------|-------|-----------------------|-------------------|--------------------------------|
| 0.5 m | 30369 | 1.74                  | 61.8              | 0.493                          |
|       | 30371 | 1.92                  | 54.92             | 0.674                          |
|       | 30372 | 30.23                 | 16.13             | 10.471                         |
| 1.0 m | 31483 | 4.24                  | 96.05             | 1.087                          |
|       | 31484 | 49.8                  | 36.55             | 14.121                         |
|       | 31485 | 4.56                  | 81.89             | 3.548                          |
|       | 31487 | 0.94                  | 41.45             | 16.374                         |
|       | 31489 | -2.92                 | 55.52             | 1.224                          |
|       | 31495 | 17.36                 | 72.92             | 6.737                          |
|       | 31498 | 4.54                  | 67.15             | 8.212                          |
|       | 31929 | 0.81                  | 70.29             | 8.403                          |
|       | 31930 | 3.58                  | 98.84             | 1.221                          |
|       | 31931 | 6.86                  | 32.69             | 17.375                         |
|       | 31932 | 22.02                 | 81.63             | 3.552                          |
|       | 31933 | 5.35                  | 99.54             | 1.658                          |
|       | 31934 | 18.53                 | 82.61             | 7.268                          |
|       | 31935 | 9.25                  | 37.34             | 17.311                         |
|       | 31936 | 5.65                  | 69.03             | 8.836                          |
|       | 31937 | 4.83                  | 96.77             | 1.503                          |
|       | 31939 | 83.54                 | 5.92              | 1.068                          |
|       | 31940 | 3.1                   | 74.92             | 2.914                          |
|       | 31941 | 15.88                 | 65.7              | 7.855                          |
|       | 31942 | 15.6                  | 37.43             | 16.155                         |
|       | 31943 | 38.57                 | 59.4              | 11.148                         |
|       | 31944 | 28.6                  | 30.8              | 9.637                          |
|       | 31945 | 31.19                 | 66.2              | 9.271                          |
|       | 31946 | 4.07                  | 96.28             | 0.949                          |
|       | 31947 | 4.81                  | 80.35             | 2.410                          |
|       | 31948 | 78.67                 | 4.6               | 2.126                          |
|       | 31950 | -0.82                 | 44.02             | 4.065                          |
|       | 31951 | 7.86                  | 19.36             | 20.383                         |
|       | 31952 | -13.07                | 87.97             | 3.967                          |
|       | 31953 | 6.25                  | -0.56             | 2.879                          |

**Tabelle A. 10**      Statistische Kenngrößen des experimentellen Variogramms und Varianz und Korrelationslänge des visuell und der berechneten angepassten Variogrammmodelle

| Datum      | N [mm] | Experimentelles Variogramm |             |            |             | Variogrammodell Sinter8 |            |
|------------|--------|----------------------------|-------------|------------|-------------|-------------------------|------------|
|            |        | Mittelwert (Z)             | Varianz (Z) | Stdabw (Z) | Koeffiz (Z) | Scale/Varianz           | Length (A) |
| 08.05.2009 | 16.2   | 88.405                     | 825.061     | 28.724     | 0.325       | 850                     | 25         |
| 15.05.2009 | 7.4    | 80.405                     | 830.72      | 28.822     | 0.358       | 850                     | 28         |
| 17.05.2009 | 7.5    | 79.431                     | 860.411     | 29.333     | 0.369       | 900                     | 25         |
| 21.05.2009 | 7.8    | 78.88                      | 854.016     | 29.223     | 0.37        | 900                     | 25         |
| 22.05.2009 | 5.8    | 78.308                     | 874.295     | 29.568     | 0.378       | 900                     | 28         |
| 26.05.2009 | 21.6   | 66.87                      | 1230.817    | 35.083     | 0.525       | 1250                    | 20         |
| 06.06.2009 | 21.5   | 74.5424                    | 1007.3061   | 31.7381    | 0.4258      | 1020                    | 23         |
| 07.06.2009 | 6      | 77.172                     | 887.676     | 29.794     | 0.386       | 900                     | 28         |
| 15.06.2009 | 9      | 75.119                     | 918.229     | 30.302     | 0.403       | 950                     | 25         |
| 22.06.2009 | 7.5    | 79.141                     | 833.355     | 28.868     | 0.365       | 850                     | 28         |
| 30.06.2009 | 17.8   | 73.814                     | 927.138     | 30.449     | 0.413       | 950                     | 25         |
| 03.07.2009 | 10.3   | 77.184                     | 858.824     | 29.306     | 0.38        | 880                     | 28         |
| 06.07.2009 | 8.5    | 77.183                     | 841.95      | 29.016     | 0.376       | 860                     | 25         |
| 15.07.2009 | 27.6   | 45.783                     | 1382.46     | 37.316     | 0.815       | 1400                    | 15         |

| Datum      | N [mm] | Spherical |       | EXPO    |       | Gauss   |      | Power   |     | Spherical |      |
|------------|--------|-----------|-------|---------|-------|---------|------|---------|-----|-----------|------|
|            |        | Varianz   | A     | Varianz | A     | Varianz | A    | Varianz | A   | Varianz   | A    |
| 08.05.2009 | 16.2   | 1329.7    | 49.3  | 9970.6  | 256.7 | 1128    | 17.7 | 26.4    | 1.1 | 850       | 28.6 |
| 15.05.2009 | 7.4    | 7032.9    | 273   | 10000   | 247.4 | 1163.6  | 17.6 | 29.6    | 1.1 | 850       | 27.8 |
| 17.05.2009 | 7.5    | 7126.8    | 257.8 | 9526.3  | 218.5 | 1349.1  | 19.4 | 21.4    | 1.2 | 900       | 28.6 |
| 21.05.2009 | 7.8    | 9044.3    | 322.7 | 9991.1  | 225.1 | 1342.1  | 19   | 24.5    | 1.2 | 900       | 28.1 |
| 22.05.2009 | 5.8    | 8133.5    | 283.4 | 9999.4  | 221   | 1406.1  | 19.5 | 22.5    | 1.2 | 900       | 28   |
| 26.05.2009 | 21.6   | 1751.3    | 36    | 4076.3  | 53.6  | 1681    | 15.1 | 85.5    | 0.9 | 1250      | 24.6 |
| 06.06.2009 | 21.5   | 1161.1    | 27.1  | 1434.6  | 16.5  | 1172.1  | 12.8 | 191.5   | 0.5 | 1020      | 24.3 |
| 07.06.2009 | 6      | 1998.8    | 66.3  | 9506.1  | 208.8 | 1320.3  | 18   | 31.1    | 1.1 | 900       | 27.1 |
| 15.06.2009 | 9      | 9732.5    | 283.2 | 9999.9  | 181.6 | 1780    | 20.6 | 29.3    | 1.2 | 950       | 26.1 |
| 22.06.2009 | 7.5    | 8775.2    | 311.5 | 9996.1  | 223.9 | 1414.9  | 19.6 | 27.2    | 1.1 | 850       | 27.2 |
| 30.06.2009 | 17.8   | 2378      | 66.8  | 9774.6  | 180.6 | 1673.2  | 19.3 | 40.5    | 1.1 | 950       | 26   |
| 03.07.2009 | 10.3   | 5497      | 180   | 9990.5  | 205.2 | 1577    | 20.4 | 25.4    | 1.2 | 880       | 27.3 |
| 06.07.2009 | 8.5    | 2206      | 72.2  | 9999.3  | 216   | 1466.1  | 19.5 | 28.9    | 1.1 | 860       | 27.1 |
| 15.07.2009 | 27.6   | 1472.5    | 14.3  | 1553.9  | 6.6   | 1438.4  | 5.3  | 578.8   | 0.3 | 1400      | 11.3 |



# Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit „Untersuchungen zur Konnektivität von Sättigungsflächen“ selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift