

Sandra Wintrich

vom Fachbereich VI
Geographie/Geowissenschaften
der Universität Trier
zur Verleihung des akademischen Grades
'Doktor der Naturwissenschaften' (Dr. rer. nat.)
genehmigte Dissertation

**Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten
als Beitrag zum Hochwasserschutz –
Untersuchungen zur Effizienz eines Retentionssystems
am Beispiel des Neubaugebietes Trier-Petrisberg**

Betreuender:

Prof. Dr. J. B. Ries

Berichterstattende:

Prof. Dr. J. B. Ries

Juniorprof. Dr.-Ing. M. Casper

Datum der wissenschaftlichen Aussprache:

11. Februar 2008

Trier 2009

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Theorie.....	1
1.2 Aufgabenstellung und Arbeitshypothesen.....	4
1.3 Begriffe.....	5
2 Grundlagen.....	7
2.1 Siedlungswasserwirtschaft.....	7
2.1.1 Entwicklung der Siedlungsentwässerung.....	7
2.1.2 Konventionelle und naturnahe Entwässerungsformen.....	8
2.2 Stand der Forschung.....	13
2.2.1 Untersuchungen auf der Mikroskala.....	13
2.2.2 Untersuchungen auf der Meso- und Makroskala.....	15
2.3 Hydrologische Modelle.....	25
2.3.1 Modellklassifikation.....	26
2.3.2 Modellkalibrierung und -validierung.....	27
2.4 Modellrelevante Prozesse.....	29
2.4.1 Niederschlag, Interzeption, Transpiration und Evaporation.....	30
2.4.2 Oberflächenabflussprozesse.....	31
2.4.3 Infiltration und Fließprozesse im Boden.....	31
3 Petrisberg Trier – das Untersuchungsgebiet.....	32
3.1 Lage und naturräumliche Gliederung.....	32
3.2 Geologie.....	33
3.3 Geomorphologie.....	33
3.4 Hydrographie.....	36
3.5 Böden.....	37
3.6 Klima.....	42
3.7 Vegetation und Landnutzung.....	45
3.8 Konzept der Regenwasserretention im Untersuchungsgebiet Petrisberg.....	45
3.9 Quellmulden.....	48
4 Material und Methoden.....	50
4.1 Messaufbau, Datenerhebung, -aufbereitung und -auswertung.....	51
4.1.1 Abflussdaten.....	51
4.1.2 Grundwassermesspegel.....	54
4.1.3 Tomogramme.....	56
4.1.4 Akzeptanzbefragung.....	59
4.2 Verwendetes Karten- und Datenmaterial.....	59
4.2.1 Niederschlagsdaten.....	59
4.2.2 Karten- und Bildmaterial.....	63
4.3 Niederschlag-Abfluss-Simulation.....	63
4.3.1 Erwin 4.0.....	64
4.3.2 Erstellte Modelle.....	67
4.3.3 Kalibrierung, Modellgüte.....	70

5 Ergebnisse	72
5.1 Kaskadenfüllstände	72
5.2 Profilschnitte	73
5.3 Grundwasserganglinien	75
5.4 Feuchteverteilung	77
5.5 Abfluss und Niederschlag im Zeitraum 01.01.2005 - 30.04.2007	80
5.6 N-A-Simulation mit erwin 4.0.....	83
5.6.1 Versiegelungsgrad des Untersuchungsgebietes	83
5.6.2 Prüfung der Modellgüte	85
5.6.3 Simulationsergebnisse.....	91
6 Interpretation	98
6.1 Kaskadenfüllstände	98
6.2 Profilschnitte	99
6.3 Grundwasserganglinien	100
6.4 Feuchteverteilung	106
6.5 Abfluss und Niederschlag im Zeitraum 01.01.2005 - 30.04.2007	108
Zusammenfassung – Geländeuntersuchungen	109
6.6 N-A-Simulation mit erwin 4.0.....	111
6.6.1 Aussagekraft des Modells	111
6.6.2 Simulationsergebnisse.....	115
Zusammenfassung – Simulationen	122
7 Diskussion	125
7.1 Unsicherheiten – Problem jeder Modellierung.....	125
7.2 Fehlerquellen	125
7.3 Messzeitraum und Messintervalle	129
7.4 Retentionswirkung	130
7.5 Ausblick und weitere Forschungsthemen.....	132
8 Handlungsempfehlungen zur Akzeptanzbildung	134
8.1 Planungsphase	135
8.2 Bauphase	137
8.3 Betriebsphase	139
9 Zusammenfassung	140
Literatur	142
Karten	157
Anhang	158

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Schotterrasen als Beispiel für die Flächenversickerung (MAHABADI 2001: 67).	10
Abb. 2-2:	Querschnitt einer Versickerungsmulde (MAHABADI 2001: 92).	10
Abb. 2-3:	Rohr-Rigolen-Versickerung im Querschnitt (MAHABADI 2001: 114).	11
Abb. 2-4:	Mulden-Rigolen-Versickerung im Querschnitt ohne Überlauf und ohne Drosselabfluss (MAHABADI 2001: 128).	12
Abb. 2-5:	Schachtversickerung mit durchgehend seitlicher Versickerung (MAHABADI 2001: 142).	12
Abb. 2-6:	Schachtversickerung mit Versickerung unterhalb der Filterschicht (MAHABADI 2001: 144).	13
Abb. 2-7:	Anzahl der Veröffentlichungen über Untersuchungen zur Wirkung dezentraler Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten auf Hochwasserabflüsse seit 1990.	16
Abb. 2-8:	Einfluss von Siedlungsabflüssen auf die Scheitelabflüsse eines Gebietes bei verschiedenen Niederschlagshäufigkeiten (KA 1999: 577, leicht verändert).	22
Abb. 2-9:	Vereinfachte Darstellung der Abflussbildung im Hangmaßstab (BRONSTERT 2005: 8).	30
Abb. 3-1:	BRD und Bundesland Rheinland-Pfalz mit der Stadt Trier und das Untersuchungsgebiet auf dem Petrisberg. (Foto: KNEISEL 2006; Karte: http://www.kcid.de/phpwcms/index.php?id=33,63,0,0,1,0 , leicht verändert)	32
Abb. 3-2:	Geologie des Trierer Raums (MÜLLER 1976: 13, leicht verändert).	33
Abb. 3-3:	Die Moselterrassen östlich der Stadt Trier (NEGENDANK et al. 1983, Ausschnitt), rot umrandet = Untersuchungsgebiet, HÖH = Höhenterrasse, HT = Hauptterrasse, uMT = untere Mittelterrasse, NT = Niederterrasse.	35
Abb. 3-4:	Bodenprofil einer Braunerde westlich des Untersuchungsgebietes im Wald gelegen (SCHNEIDER, TRESSEL & SCHRÖDER 2005: 93).	38
Abb. 3-5:	Bodenprofil eines Pseudogleys westlich des Untersuchungsgebietes im Wald gelegen (SCHNEIDER, TRESSEL & SCHRÖDER 2005: 94).	39
Abb. 3-6:	Lage der in Tab. 3-2 aufgelisteten Messstandorte (n. HEYER 2001 und SPOO & PITTNER 1999a).	42
Abb. 3-7:	Klimadiagramm für die Station Trier-Petrisberg nach Daten des DWD (DWD 2003: o. S.).	44
Abb. 3-8:	Das Untersuchungsgebiet, seine Retentionsanlagen (hellblau), daran angeschlossene Teil-EZG sowie Grünflächen (grün).	46
Abb. 3-9:	Fließschema Rückhaltung im Einzugsgebiet Brettenbach mit Privatrückhaltungen und Direkteinleitung (nach BGHPLAN 2005).	48
Abb. 3-10:	Schnitt durch zwei Versickerungsterrassen und eine Gabionenmauer im Maßstab 1:50 (BÜRO ERNST 2003, leicht verändert)	49
Abb. 4-1:	Untersuchungsgebiet Petrisberg und Lage der Messstellen (im Zoom links unten: Quellmulden = nördliche Retentionsfläche, Sportplatzmulde = östliche Retentionsfläche; Orthophoto: Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz).	50
Abb. 4-2:	Schematische Darstellung eines Rechteckwehres (links) und eines Dreieckswehres (rechts) (NÜTZMANN o. J.: 46).	51

Abb. 4-3:	Übersicht über die Lage der Grundwasser-Messstellen P1 - P9 in den Quellmulden sowie P10 und P11 im Zustrom bzw. P12 und P13 im Abstrom (EGP 2005, Ausschnitt, verändert).....	54
Abb. 4-4:	Prinzip der Widerstandsmessung mit der Vierpunktanordnung (KNEISEL 2002: 9).....	57
Abb. 4-5:	Differenzen zwischen Niederschlags-Tagessummen der Messstation der Umweltmeteorologie, Universität Trier und des DWD, Station Trier-Petrisberg (grau hinterlegt: Frosttage; Lücke: Messausfall, Erläuterung s. Text).....	60
Abb. 4-6:	Einzeldarstellungen der gelöschten Niederschlagswerte (blau: Niederschlag, rot: Temperatur).....	61
Abb. 4-7:	Differenzen zwischen den 10-Minuten-Niederschlagsdaten des DWD und der Umweltmeteorologie, Universität Trier im Zeitraum 01.06.2006 - 23.08.2006.....	62
Abb. 4-8:	Jahresgang der mittleren potentiellen Verdunstung im Modell erwin 4.0 (IFS 2002: 25).....	65
Abb. 4-9:	Aufbau des Modells BB_RWB.....	68
Abb. 4-10:	Aufbau des Modells BB_konv.....	68
Abb. 5-1:	Darstellung der Veränderungen der Kaskadenfüllstände zu sechs ausgewählten Ereignissen.....	72
Abb. 5-2:	Lage der Quartärbasis an den Pegeln P1 bis P9 sowie P12 und P13, die Grundwassermächtigkeit (beispielhaft nach Niederschlag am 05.09.06 und während der Trockenphase am 29.09.06) und die darüber liegende ungesättigte Zone bis zur Geländeoberkante in m ü. NN.....	73
Abb. 5-3:	Darstellung der Grundwassermächtigkeit mittels boxplots.....	74
Abb. 5-4:	Über die Monatsmittel der Pegel P1 - P8 gemittelter Grundwassergang von November 2005 bis Januar 2007 sowie monatliche Temperaturmittel und Niederschlagssummen.....	75
Abb. 5-5:	Wasserganglinien der Pegel P1-P8 und Tagessummen des Niederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr 01.11.2005 - 30.04.2006.....	76
Abb. 5-6:	Wasserganglinien der Pegel P1 - P13 und Tagessummen des Niederschlags im hydrologischen Sommerhalbjahr 01.05.2006 - 31.10.2006.....	76
Abb. 5-7:	Übersichtsplan der Quellmulden mit den Auslagen der Sondierungen und den entsprechenden Profilnummern (Kartengrundlage: SWT-AÖR).....	78
Abb. 5-8:	2D-Widerstandstomogramme aus der mittleren Versickerungsmulde (Profil 6); identische Auslage gemessen am 23.03.2006 mit a) Wenner-Schlumberger Konfiguration und b) Dipol-Dipol Konfiguration; gestrichelte Linie: geoelektrisch ermittelter Verlauf des Wasserspiegels; senkrechte hellblaue Linie: Lage des Pegels P4.....	78
Abb. 5-9:	2D-Widerstandstomogramm von der mittleren Versickerungsmulde zur unteren (Profil 7); identische Auslage gemessen am 05.05.2006 mit a) Wenner-Schlumberger Konfiguration und b) Dipol-Dipol Konfiguration; gestrichelte Linie: geoelektrisch ermittelter Verlauf des Wasserspiegels; senkrechte hellblaue Linie: Lage des Pegels P4; schwarzer Kreis: durch Gabione bedingte Inversionsartefakte.....	79
Abb. 5-10:	2D-Widerstandstomogramm aus der unteren Versickerungsmulde(nrigole) (Profil 3); gemessen am 23.03.2006 mit der Dipol-Dipol Konfiguration; gestrichelte Linie: geoelektrisch ermittelter Verlauf des Wasserspiegels; senkrechte hellblaue Linie: Lage des Pegels.....	79
Abb. 5-11:	2D-Widerstandstomogramm aus der oberen Versickerungsmulde (Profil 8); gemessen am 05.05.2006 mit der Wenner-Schlumberger-Konfiguration.....	80

Abb. 5-12:	Abflussganglinie des Brettenbaches und aufsummierter Niederschlag des Klimamessfeldes der Universität Trier.	80
Abb. 5-13:	Niederschlag und Drosselabflüsse an den Messstellen PBD1 (rot) und PBD2 (grün) während der hydrologischen Halbjahre vom 01.05.2005 bis zum 30.04.2007.....	82
Abb. 5-14:	Versiegelungskarte für das untersuchte Neubaugebiet Trier-Petrisberg.	84
Abb. 5-15:	Gemessene und simulierte Abflussganglinien bei PBD1 (oben) und PBD2 (unten) im hydrologischen Sommerhalbjahr 2005. (schwarz: gemessener Abfluss, rot: simulierter Abfluss bei PBD1, grün: simulierter Abfluss bei PBD2, blau: Niederschlag, schwarze Kreuze: fehlende Niederschlagsdaten).	85
Abb. 5-16:	Gemessene und simulierte Abflussganglinien bei PBD1 (oben) und PBD2 (unten) vom 01.08. bis 15.09.2006.....	86
Abb. 5-17:	Überschätzung und Unterschätzung der simulierten Abflussspitzen mit der Zeit bei PBD1 (a und b) und bei PBD2 (c und d).	87
Abb. 5-18:	Abweichungen der simulierten Abflussspitzen von den gemessenen in Abhängigkeit von den gemessenen Abflussspitzen: Über- und Unterschätzung bei PBD1 (a und b) und bei PBD2 (c und d).	88
Abb. 5-19:	Abweichungen der simulierten Abflussspitzen von den gemessenen in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe [mm] bei PBD1 (a) und PBD2 (b).....	89
Abb. 5-20:	Änderung der Abweichungen der simulierten Abflussvolumina von den gemessenen während des Messzeitraumes: Über- und Unterschätzung bei PBD1 (a und b) und bei PBD2 (c und d).	90
Abb. 5-21:	Abweichung der simulierten Werte von den gemessenen in Abhängigkeit vom gemessenen Abflussvolumen: Über- und Unterschätzung bei PBD1 (a und b) und bei PBD2 (c und d).	91
Abb. 5-22:	Verteilung der Niederschlagshöhen > 10 mm im Zeitraum 1967 - 1997.	92
Abb. 5-23:	Rückhalt des Retentionssystems gegenüber konventioneller Entwässerung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (Simulationszeitraum 1967 - 1997).	93
Abb. 5-24:	Scheitel abmindernde Wirkung des Retentionssystems im Vergleich zu einer konventionellen Entwässerung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (Simulationszeitraum 1967 - 1997).	94
Abb. 5-25:	Rückhalt bei Ereignissen mit > 30 mm N sowie je fünf ausgewählten Ereignissen der Sommerhalbjahre (rote Kreise) und der Winterhalbjahre (blaue Kreise) (Simulationszeitraum 1967 - 1997).	94
Abb. 5-26:	Rückhalt des Retentionssystems gegenüber konventioneller Entwässerung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (Simulationszeitraum 2005 - 2006).	96
Abb. 5-27:	Scheitel abmindernde Wirkung des Retentionssystems im Vergleich zu einer konventionellen Entwässerung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (Simulationszeitraum 2005 - 2006).	97
Abb. 6-1:	Ereignisse mit unterirdischer Wasserabgabe in tiefer liegende Kaskadenmulden.	99
Abb. 6-2:	Grundwasserstände der Pegel P1 - P8 vom 20.10.2005 bis 20.06.2007.....	102
Abb. 6-3:	Grundwasserganglinien der Pegel P1, P3, P5, P9 und P12.	104
Abb. 6-4:	Änderungen des Wasserspiegels bei P13 in Abhängigkeit des Füllstands im Verteilergraben (VG).....	105
Abb. 6-5:	Gemessene und simulierte Abflussspitzen (Q_{\max}) in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe für PBD1 (a und b) und PBD2 (c und d).	112

Abb. 6-6:	Gemessene und simulierte Abflussganglinie bei PBD1 vom 01.08. - 15.09.2006.....	113
Abb. 6-7:	Trend des Winterniederschlags in Trier-Petrisberg (HELBIG 2004: 17).....	116
Abb. 7-1:	Quellen der Unsicherheit (nach SCHWANDT 2004: 10).....	125
Abb. 7-2:	Fließschema der Teilprozesse des Wasserkreislaufs. Hervorgehoben: Prozesse, die im Modell erwin 4.0 berücksichtigt werden: dunkelgrau: Input und Output, gestrichelt umrandet: berechnete Größen (BRONSTERT 2005: 10, leicht verändert).	128
Abb. 7-3:	Schematische Zeichnung eines Maximumpegels nach ASSMANN (1999: 61), leicht verändert.	130

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Übersicht über bisherige Untersuchungen zur Wirkung dezentraler Maßnahmen in Siedlungsgebieten.....	24
Tab. 2-2:	Bewertung des Korrelationskoeffizienten nach CHADDOCK (zit. in MANIAK 2005: 200).....	29
Tab. 3-1:	Bezeichnung und Lage der Moselterrassen (nach MÜLLER 1979: 346).....	34
Tab. 3-2:	Während der Planungsphase im Untersuchungsgebiet ermittelte bodenhydraulische Kennwerte (in Anlehnung an SCHEID 2007: 118).	41
Tab. 3-3:	Beschreibung der Retentionsanlagen im Untersuchungsgebiet Petrisberg (BGHPLAN 2002: 12, aktualisiert nach Fließschema BGHPLAN 2005).....	47
Tab. 4-1:	Lage der Messwehre sowie Auflösung und Messbeginn der Abflussdaten.	52
Tab. 4-2:	Korrekturfaktor in Abhängigkeit der Überfallhöhe und resultierende Abflussmenge.	53
Tab. 4-3:	Lage der Pegel in den Quellmulden sowie Auflösung und Messbeginn.	55
Tab. 4-4:	Einige Höhenangaben zu den Bohrungen.....	56
Tab. 4-5:	Spezifische elektrische Widerstände ausgewählter Materialien (nach KNÖDEL et al. 2005: 98, VOGELSANG 1998: 89).....	57
Tab. 4-6:	Herkunft und Auflösung der verwendeten Niederschlagsdaten.	60
Tab. 4-7:	Verwendetes Karten- und Bildmaterial.	63
Tab. 5-1:	Empfohlene mittlere Abflussbeiwerte ψ_m von Einzugsgebietsflächen nach ATV-DVWK-M 153 (2000: 10) und Zuordnung der kartierten Flächenarten (bei Wertebereichen wurde der Mittelwert oder der fett markierte Wert gewählt).	83
Tab. 5-2:	Gesamtbilanzen der N-A-Modelle mit Regenwasserbewirtschaftung (RWB) und konventioneller Entwässerung (konv) über den Zeitraum 1967 - 1997.	92
Tab. 5-3:	Angaben zu Niederschlag, Rückhalt und Dauer von je fünf ausgewählten Ereignissen der Sommer- und Winterhalbjahre.....	95
Tab. 5-4:	Gesamtbilanzen der N-A-Modelle mit Regenwasserbewirtschaftung (RWB) und konventioneller Entwässerung (konv) über den Zeitraum 2005 - 2006.	95
Tab. 6-1:	Gegenüberstellung der langjährigen Niederschlags-Monatsmittel (DWD 2005: o. S.) und der Monatssummen der Jahre 2005 und 2006.	101

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis**A**

α	halber Öffnungswinkel des Dreieckswehres [°]
a	Jahr
Abb.	Abbildung
Abs.	Absatz
AbwAG	Abwasserabgabengesetz
Ah	mineralischer Oberbodenhorizont mit bis zu 30 Masse-% akkumuliertem Humus
AK	Arbeitskreis
ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
Ap	durch regelmäßige ackerbauliche Bearbeitung geprägter mineralischer Oberbodenhorizont
ATV	Abwassertechnischen Vereinigung e.V.
ATV-DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef

B

b	Überfallbreite [m]
BauGB	Baugesetzbuch
BAW	Bundesamt für Wasserwirtschaft
BB	Brettenbach
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
b_G	Breite des Gerinnes [m]
BGHplan	Bielefeld – Gillich – Heckel, Landschaftsarchitekten BDLA, Beratender Ingenieur IKRP, Kaiserstraße 15, 54290 Trier
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
BRD	Bundesrepublik Deutschland
bzw.	beziehungsweise

C

cm	Zentimeter
°C	Grad Celsius

D

d	Tag
D	Dauer
d. h.	das heißt
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt gGmbH
DN	Durchmesser-Nennweite [-]; ungefähr dem Innendurchmesser von Rohren in Millimeter entsprechende, dimensionslose Zahl
DV	Volumenabweichung
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Bonn
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
DWD	Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
2D	zweidimensional
ΔQ_{\max}	prozentuale Scheitelabminderung [%]
ΔV_{MN}	Potentialdifferenz [V]

E

E	Osten (engl. east)
---	--------------------

EG	Europäische Gemeinschaft, Vorläufer und Teil der Europäischen Union (EU)
EGP	Entwicklungsgesellschaft Petrisberg GmbH
et al.	et alii (und andere)
etc.	et cetera (und so weiter)
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
EZG	Einzugsgebiet
F	
f	und folgende Seite
fbr	Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung e.V., Darmstadt
ff	und folgende Seiten
G	
g	Erdbeschleunigung
gem	gemessener Wert
$\overline{\text{gem}}$	Mittelwert der gemessenen Werte
ggf.	gegebenenfalls
GOK	Geländeoberkante
griech.	griechisch
H	
h	Stunde/n (lat.: hora) oder Überfallhöhe [m]
ha	Hektar
HQ _T	Hochwasserscheitelabfluss, der statistisch alle T _n Jahre auftritt [m ³ /s]
I	
I	Stromstärke [V/Ω]
i. d. R.	in der Regel
ID	Identifikationsbezeichnung
ifs	Ingenieurgesellschaft für Stadthydrologie
II	Schichtwechsel im Bodenausgangssubstrat anzeigende römische Zahl
IKT	Institut für Unterirdische Infrastruktur
K	
k	Korrekturfaktor [-] oder Konfigurationsfaktor [m]
K	Kaskadenmulde
k. A.	keine Angaben
KA	Korrespondenz Abwasser
k _f	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
KHR	Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes
KLIWA	Kooperationsvorhaben "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft"
km ²	Quadratkilometer
konv	konventionelle Entwässerung im Trennsystem
KOSTRA	Koordinierte Starkniederschlags – Regionalisierungs – Auswertungen, Starkregenhöhen in Abhängigkeit von Jährlichkeit und Dauerstufe
L	
l	Liter
l/s	Liter pro Sekunde
l/s·m ²	Liter pro Sekunde und Quadratmeter
lat.	lateinisch
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser

LPfIG	Landespflegegesetz
LWG	Landeswassergesetz
M	
μ	Überfallbeiwert [-]
m	Meter
m u. GOK	Meter unter Geländeoberkante
m ü. NN	Meter über Normalnull
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
m ³ /s	Kubikmeter pro Sekunde
MD	Massendaten
min	Minuten
mm	Millimeter
mm/d	Millimeter pro Tag
MoMNOQ- Verfahren	Verfahren zur Ermittlung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung aus langjährigen mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüssen (nach Wundt, 1953)
MRS	Mulden-Rigolen-System
MUF RLP	Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, Mainz
mWS	Meter Wassersäule
N	
N	Norden (engl. north) oder Niederschlag [mm]
n.	nach
N_Sum	Niederschlagssumme [mm]
N-A	Niederschlag-Abfluss (z. B. N-A-Modell)
N _{eff}	Effektiver Niederschlag [mm]
N _{max}	maximale Niederschlagsmenge [mm]
Nr.	Nummer
O	
Ω	Ohm
Ω m	Ohmmeter, Einheit des spezifischen elektrischen Widerstands
o. ä.	oder ähnliches
o. J.	ohne Jahresangabe
o. S.	ohne Seitenangabe
P	
ψ	Abflussbeiwert [-]
ψ _m	mittlerer Abflussbeiwert [-]
P	Grundwasserpegel
PBA	Messwehrbezeichnung: Petrisberg, Absturzschart
PBD1, PBD2	Messwehrbezeichnung: Petrisberg, Drosselschart 1 und 2
Q	
Q	Abfluss
Q _{max}	maximaler Abflussmenge [l/s]
Q _ü	Überlaufmenge [m ³]
Q _{zu}	Zulaufmenge [m ³]
R	
ρ	wahrer spezifischer Widerstand [Ω m]
r	Korrelationskoeffizient

R^2	Bestimmtheitsmaß
rBt	nicht begrabener reliktyischer, durch Einwaschung mit Ton angereicherter mineralischer Unterbodenhorizont (Illuvialhorizont)
RKS	Rammkernsondierung
RMS	root-mean-square
RWB	Regenwasserbewirtschaftung
S	
s	Sekunde
S	Süden (engl. south)
s.	siehe
s. a.	siehe auch
Sd	wasserstauer mineralischer Unterbodenhorizont
SDF	Sustainable Development of Floodplains
SIA	Schweizer Ingenieur- und Architektenverein
$\overline{\text{sim}}$	simulierter Wert
sim	Mittelwert der simulierten Werte
SOF	Saturated Overland Flow
sog.	so genannte/r/s
Sw	stauwasserleitender, zeitweise stauwasserführender mineralischer Unterbodenhorizont
SWT-AÖR	Stadtwerke Trier - Anstalt des öffentlichen Rechts
T	
T_n	statistisches Wiederkehrintervall [a]
Tab.	Tabelle
TDR	Time-Domain-Reflectometry, Verfahren zur Ermittlung und Analyse von Lauf- längen und Reflektionscharakteristika von elektromagnetischen Wellen und Signalen
U	
UBA	Umweltbundesamt, Berlin
V	
V	Volt
v. a.	vor allem
VG	Verteilergraben
V_{gem}	gemessenes Abflussvolumen [m ³]
vgl.	vergleiche
V_{sim}	simuliertes Abflussvolumen [m ³]
W	
w	Höhe der Wehrkante [m]
W	Westen (engl. west)
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WMO	World Meteorological Organization
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
WSP	Wasserspiegel
Z	
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
zit.	zitiert

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Projektes WaReLa, ein Projekt des INTERREG IIIB-Programmes der EU, an dem die Universität Trier neben zehn weiteren Projektpartnern beteiligt ist. WaReLa steht für „Water Retention by Landuse“ – die Optimierung des Wasserrückhaltes in der Fläche durch angepasste Landnutzung. Übergeordnetes Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Decision Support Systems, welches Maßnahmen zur Hochwasservorsorge in Einzugsgebieten mittlerer Größe bewerten und mögliche Handlungsalternativen zum technischen Hochwasserschutz aufzeigen soll. Solche Maßnahmen sind nicht nur auf forst- und landwirtschaftlich genutzten Flächen, sondern auch in dem hier behandelten Siedlungsbereich möglich.

1.1 Theorie

Hinsichtlich der Entstehung von Hochwasser liegt die Vorstellung zugrunde, dass der fortwährende Bau von Häusern und Straßen und die damit zunehmende Flächenversiegelung infolge des dadurch zusätzlich generierten und beschleunigten Oberflächenabflusses einen deutlichen Einfluss auf die Hochwasserentstehung haben und zur Erhöhung der Hochwasserscheitel beitragen. Forciert wird dieser Prozess durch Ableitungssysteme (Kanalisation), über die die versiegelten Flächen mit den natürlichen Gewässern „kurzgeschlossen“ sind (ASSMANN 1999: 15, DWA 2006a: 16f, GANTNER 2002: 205, GUJER 2007: 5, LAWA 1995: 5, PATT 2001: 11, REMBIERZ 2000: 11, SIEKER 2000: 70, TOURBIER 2001: 310, SIEKER, SIEKER, ZIMMERMAN & SOMMER 2004: 185).

Als direkte Folge der Versiegelung in Kombination mit der Einebnung von Flächen innerhalb von Ortschaften, mangelnder Vegetation und der verkürzten Fließwege zum Vorfluter steigt das Abflussvolumen einer Hochwasserwelle laut JACOBITZ (1995: 13f, vgl. auch VERWORN & HARMS 1984 zit. in WINZIG 1997: 5) bei einem Versiegelungsanteil von 10 % im Vergleich zu unversiegelten Gebieten um 50 - 70 %. In Berlin ist der Abfluss sogar 2 bis 3 Mal so hoch wie der des unversiegelten Umlandes (GANTNER 2002: 204). Im Gebiet der Emscher haben sich die Hochwasserabflüsse nach Anstieg der Bebauung von 25 % auf 50 % ebenfalls nahezu verdoppelt (BOLD & SPENGLER 2006: 77). Weitere Angaben jüngerer Untersuchungen zur Abflusserhöhung infolge zunehmender Versiegelung finden sich u. a. in NIEHOFF (2002: 83ff) und BRONSTERT (2005: 62). Zurzeit nimmt die Flächenversiegelung in Deutschland pro Tag um 130 ha zu. Hierzu tragen die Erweiterung von Siedlungsflächen und die dabei erfolgende Verkehrserschließung zu 90 % bei (UBA 2004: 4). In diesem Zusammenhang sei jedoch auch auf das Prinzip der Vorentlastung hingewiesen, wonach ein beschleunigtes Abführen von Oberflächenwasser zur Minderung des Hochwassers beitragen kann, falls es den Vorfluter vor Eintreffen der eigentlichen Hochwasserwelle erreicht (BRONSTERT, BÁRDOSSY, BISMUTH,

BUITEVELD, BUSCH, DISSE, ENGEL, FRITSCH, HUNDECHA, LAMMERSEN, NIEHOFF & RITTER 2003, zit. als KHR in SIEKER & WILCKE 2006: 22, VISCHER 1993, zit. in MENDEL 1996: 15).

Hinzu kommt, dass aufgrund des Klimawandels Hochwasserereignisse in immer kürzeren Zeitabständen auftreten (werden). Die Erwärmung der bodennahen Luft führt zur Erhöhung der Verdunstung, zur Zunahme der Niederschlagsmengen und zur Veränderung des Niederschlagsregimes. Großwetterlagen, die extreme Niederschlagsereignisse hervorrufen können, werden zunehmen (BÁRDOSSY 2005: 57, BARTELS, KOLOKOTRONIS & ZIMMERMANN 2006: 33, HILLENBRAND & HIESSL 2006: 1268, LAWA 2003: 14, PATT 2001: 12, REMBIERZ 2000: 5, vgl. RIPL & WOLTER 2003: 18).

Auch in der Region Trier wird dies laut HELBIG, LICHT, JUNK, BAREISS & LÜERS (2002: 78, s. a. HELBIG 2004: 17f) „zu einer Veränderung bei der Hochwassergenese mit Konsequenzen für die Hochwasserwahrscheinlichkeit im Moseleinzugsgebiet“ führen. Extreme Hochwasserereignisse wie sie in der Region Trier in den Wintern 1993 und 1995 auftraten, wurden vor Mitte der 70er Jahre statistisch gesehen nur alle 100 Jahre registriert. Inzwischen wird mit einer Verkürzung der Wiederkehrzeit gerechnet (CASPARY 1998, zit. in LICHT 2005: 162). Die zudem beobachtete Zunahme an Starkregenereignissen im Winter und die sich hieraus ergebende Intensivierung des Oberflächenabflusses untermauern das steigende Hochwasserrisiko der Region Trier (LICHT 2005: 162). Die Bezeichnung „Jahrhunderthochwasser“ wird also neu zu definieren sein. Folglich werden auch bisherige wasserwirtschaftliche Berechnungsformeln, beispielsweise zur Dimensionierung kommunaler Entwässerungssysteme um einen regionalspezifischen Klimaänderungsfaktor zu erweitern sein (BARTELS, KOLOKOTRONIS & ZIMMERMANN 2006: 42, KLIWA 2006: 16, ROTHER 2006: 45). Insbesondere die vom DWD (2007: o. S.) festgestellte Zunahme von Starkniederschlägen im Sommer zulasten des Landregens wird sich zunehmend als ein Problem für die städtischen Abwassersysteme erweisen. Lokal können diese Ereignisse auch zu starken Überschwemmungen führen.

In jüngster Zeit veröffentlichte Untersuchungen, welche die zu erwartenden klimatischen Veränderungen und möglichen Folgen für die Wasserwirtschaft untersuchen und Tagungen zu dieser Thematik sowie die aufgrund der sich ändernden Starkniederschlagsereignisse überarbeitete Neufassung des KOSTRA-Atlas (DWD 2005) spiegeln die Aktualität und Bedeutung dieses Aspektes wider (vgl. HILLENBRAND & HIESSL 2006: 1266, KLIWA 2006: 8, 14f, SCHMITT 2006: 211f, ATV-DVWK-Seminar „Klimaveränderungen – neue Bemessungsanforderungen an Wasserbau und Stadtentwässerung“ 2004, KLIWA-Symposium 2006).

Sowohl anthropogene Eingriffe in die Landschaft als auch klimatische Veränderungen führen also zu häufiger wiederkehrenden und stärkeren Hochwasserereignissen (GUTSCH 2001: 9). Der klimatisch bedingten Zunahme von Hochwasserereignissen kann nur langfristig und durch weltweite Maßnahmen entgegengewirkt werden. Die vermehrte und beschleunigte Abgabe von Oberflächenwasser in die Gewässer infolge Versiegelung und Ableitung jedoch

kann flächendeckend durch dessen Rückhalt (im Folgenden auch „Retention“) am Ort des Entstehens ausgeglichen werden. Der oben genannten Schlussfolgerung „Flächenversiegelung + Kanalanschluss = Abflussverschärfung“ entsprechend wird davon ausgegangen, dass das Vermeiden und Zurückhalten von Oberflächenabfluss dazu führt, dass trotz Bebauung der Wasserkreislauf dem natürlichen Zustand weitestgehend angenähert werden kann. Ein auslösender oder verstärkender anthropogener Beitrag zu Hochwasserwellen bliebe somit aus.

Da die Diskussion zur Wirkung dezentraler Maßnahmen in Siedlungsgebieten auf das Hochwassergeschehen recht jung ist, folgt in Kapitel 2.2.2 eine Literaturstudie hierzu.

Neben diesen den Wasserkreislauf ausgleichenden Maßnahmen besteht auch die Möglichkeit, den Flächenverbrauch selbst einzuschränken. Das UMWELTBUNDESAMT (UBA 2004: 4ff) fordert eine Reduzierung des Flächenverbrauchs auf 30 ha/d bis zum Jahre 2020. Ein nicht unrealistisches Ziel, da England schon heute nahe an diesen Wert herankommt. Hinsichtlich der klimatischen Veränderungen und deren Auswirkungen auf die Siedlungsentwässerung spricht SCHMITT (2006: 213) dezentralen Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung eine höhere Flexibilität und Anpassungsfähigkeit zu als konventionellen Ableitungssystemen.

Generell gilt, dass Hochwasser ein Teil des natürlichen Wasserkreislaufes ist und als solcher als natürliches Ereignis anzusehen ist. Die infolge der letzten „Jahrhundertfluten“ wie z. B. an Rhein und Mosel (1993, 1995), Oder (1997) und Elbe (2002, 2006) entfachten Diskussionen über Hochwasser und Hochwasserschutz sind zu begrüßen. Neben der Forderung und Umsetzung besserer Schutzkonzepte gilt es jedoch auch, das Bewusstsein der Bevölkerung zu schärfen und zu verdeutlichen, dass Hochwasserschutz lediglich das Schadensrisiko mindern kann. Einen 100 %-igen Schutz wird es jedoch nicht geben.

Informationsbedarf besteht ebenso im Hinblick auf die Umsetzung relativ neuer ökologischer Bauvorhaben, zu denen hier auch Retentionsanlagen gezählt werden. Die Meinungen in der Öffentlichkeit hierzu sind vielfältig und oft gespalten. In diesem Zusammenhang definiert WITTKÉ (1991 zit. in ZAHN 1993: 42) Akzeptanz „als das Ergebnis eines Abwägungsprozess, bei dem jeder Bürger für sich – also sehr individuell – aber dennoch den bekannten Gruppenphänomenen unterworfen, einer persönlichen Risiko- bzw. Kosten- und Unbequemlichkeitsbeurteilung seine individuelle Nutzeinschätzung gegenüberstellt. Dabei wird die Akzeptanz einer Standortentscheidung bei einer Person um so eher erreicht, je mehr sie mit ihren individuellen Interessen übereinstimmt“. Hieraus lässt sich schließen, dass die Umsetzung naturnaher Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung dann akzeptiert wird, wenn damit verbundenes Risiko, Kosten und persönlicher Arbeitsaufwand möglichst gering bleiben und die individuellen Interessen befriedigt werden.

1.2 Aufgabenstellung und Arbeitshypothesen

Naturnahe Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung im besiedelten Raum dienen in erster Linie der Siedlungsentwässerung (DWA 2006a: 24). Aufgrund ihrer positiven „Nebenwirkungen“ zählen sie aber auch zu den so genannten dezentralen Maßnahmen, die der Hochwasservorsorge dienen. Als dezentrale Maßnahmen werden solche Maßnahmen bezeichnet, die der Rückhaltung von Niederschlagswasser in den Teileinzugsgebieten vorzugsweise der Flussoberläufe und Nebengewässer dienen. Im Gegensatz zu den vergleichsweise großen technischen Maßnahmen an hochwassergefährdeten Standorten handelt es sich um viele verschiedene, im Einzugsgebiet verteilte kleinere Maßnahmen, die auf unterschiedlichen Maßstabsebenen wirken (DWA 2006b: 1, KOEHLER 2005: 117, s. a. KOEHLER 2006: 6). Neben Maßnahmen im Siedlungsbereich sowie auf forst- und landwirtschaftlich genutzten Flächen zählen ASSMANN, FRIEDEL, GÜNDRA, SCHUKRAFT & SCHULTE (1996: 61) dazu das Anlegen von Retentionsflächen in Auen, Laufverlängerungen der Fließgewässer sowie Maßnahmen zur Rauigkeitserhöhung. Bei optimaler Einbindung der Maßnahmen in das Landschaftsbild und in ein übergeordnetes Planungskonzept sowie der Beteiligung unterschiedlicher Interessengruppen spricht er von „dezentralem, integriertem Hochwasserschutz“ (ASSMANN & KEMPF 2005: 73f). Die Leistungsfähigkeit solcher Maßnahmen, insbesondere im Siedlungsbereich, in Bezug auf die Abminderung von Hochwasserscheiteln wird generell kontrovers diskutiert (ASSMANN & KEMPF 2005: 74, DWA 2006a: 3, 107, GIESELER 2001: 91, MARENBACH & KOEHLER 2003: 26, RÖTTCHER 2005: 11, SIEKER 2004: 137, SIEKER, SIEKER, ZIMMERMAN & SOMMER 2004: 185, SIEKER, ZIMMERMAN & SOMMER 2005: 12).

Die vorliegende Arbeit untersucht daher die Rückhaltewirkung der Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung im Neubaugebiet des Trierer Ortsteiles Petrisberg und versucht, diese zu quantifizieren. Hierzu wurde ein als Langzeitmonitoring geplantes Messnetz aufgebaut. Zum einen wurden die gedrosselten Ableitungen des Oberflächenwassers, das dem Brettenbach zugeführt wird und der Abfluss im Brettenbach selbst aufgezeichnet. Zum anderen sollten die Füllstände und Grundwasserpegel einzelner Elemente des Retentionssystems (Muldenkaskade und Versickerungsmulden) Aufschluss über deren hydraulische Belastung und Reaktion sowie die zeitliche Dimension der Prozessabläufe geben. Über die Abflussspende des urbanen Brettenbach-Kopfeinzugsgebietes werden Abflussverhalten und Speichereigenschaften des untersuchten Gebietes kurz charakterisiert.

Zur Ermittlung der Effizienz des Bewirtschaftungssystems soll mit Hilfe des N-A-Modells erwin 4.0 eine Gegenüberstellung der Systeme „Regenwasserbewirtschaftung mit Retentionsanlagen“ und „Oberflächenentwässerung über einen Regenwasserkanal“ zeigen, wie viel Oberflächenwasser durch das Bewirtschaftungssystem im Gebiet zurückgehalten wird. Zuvor wird das Modell durch einen Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Drosselabläufen daraufhin geprüft, wie genau es die Wirklichkeit abbildet.

Hinsichtlich der Effizienz des naturnahen Konzeptes der Regenwasserbewirtschaftung wird davon ausgegangen, dass ein höherer Rückhalt erzielbar ist, als in der Literatur bisher angegeben wird, da das System auf ein 100-jährliches Ereignis ausgerichtet ist. Eine Bewirtschaftung von Hochwasser verursachenden Starkniederschlägen wäre demnach auch bei niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten von zumeist $k_f < 10^{-6}$ m/s möglich.

Neben der Frage nach dem Nutzen dezentraler Maßnahmen für den Hochwasserschutz wird immer wieder deutlich, dass die Umsetzung naturnaher Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung auf Widerstände stößt, sowohl bei manchen Entscheidungsträgern als auch in der Bevölkerung. Solche Maßnahmen können sich jedoch nur dann langfristig etablieren, wenn sie in der Öffentlichkeit auf Zustimmung treffen. Deshalb zielten Befragungen in unterschiedlichen Gebieten darauf ab, herauszufinden, welche Faktoren die Akzeptanz der Regenwasserbewirtschaftung in der Bevölkerung positiv bzw. negativ beeinflussen. Hieraus entstanden Handlungsempfehlungen, die helfen sollen, eine Verbreitung naturnaher Entwässerungskonzepte zu fördern.

1.3 Begriffe

Um Klarheit bei der Verwendung bestimmter Begriffe zu schaffen, sollen im Folgenden einige näher definiert werden.

Mit **Einzugsgebiet** ist hier das auf Regenwasserabflüsse bezogene Einzugsgebiet einer Einleitung gemeint, welches im vorliegenden Fall mit der oberirdischen Wasserscheide des untersuchten Gebietes identisch ist. Ort der Einleitung ist ein Schachtbauwerk in einem gefassten Rückhalteraum unterhalb der Brettenbachquelle (auch als „altes Becken“ bezeichnet).

Die Begriffe **Regenwasser** und **Niederschlag** sowie deren Komposita werden in der verwendeten Literatur meist nicht unterschieden und werden daher auch in der vorliegenden Arbeit synonym gebraucht (SCHMITT 2002: 22/1). Korrekterweise bezeichnet „Niederschlagswasser“ sämtliches aus der Atmosphäre auf die Erdoberfläche gelangendes Wasser, während „Regen“ nur die flüssige Form des Niederschlags beschreibt. Der Teil des Niederschlags, der an der Bodenoberfläche im Boden als Direktabfluss wirksam wird und somit zum Anschwellen einer Hochwasserwelle führt, wird als Effektivniederschlag bezeichnet (MENDEL 2000: 21).

Auch die Begriffe **Versickerung** und **Retention** sind nicht bedeutungsgleich, werden jedoch sowohl in der verwendeten Literatur als auch in der vorliegenden Arbeit synonym verwendet. Während Versickerung lediglich das Eindringen des Wassers in Boden und Untergrund meint, bedeutet Retention das Zurückhalten von Wasser in der Pflanzendecke, in Mulden, im Boden und im Untergrund und beinhaltet somit Interzeption, Evapotranspiration, Versickerung und Speicherung.

Die Wasserrahmenrichtlinie definiert **Grundwasser** in Art. 2 Satz 2 als „alles unterirdische Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht.“ Nach DIN 4049 (zit. in HÖLTING 1996: 12) wird jenes Wasser als Grundwasser bezeichnet, welches „die Hohlräume im Untergrund zusammenhängend ausfüllt und nur der Schwere (hydrostatischer Druck) unterliegt.“ Bei vorhandenem Gefälle fließt es entsprechend der Gefällerrichtung ab. Hier findet oft die Bezeichnung **Hangschichtwasser** Gebrauch. Wasser, das sich schwerkraftbedingt vorzugsweise nach unten bewegt und Teile der wasserungesättigten Zone mehr oder weniger unregelmäßig erfüllt, wird dagegen als **Sickerwasser** bezeichnet (MATTHEß & UBELL 2003: 34). Dieses trägt zur Grundwasserneubildung bei. In der aufgeführten Bedeutung werden die Begriffe „Grundwasser“ und „Sickerwasser“ auch in der vorliegenden Arbeit verwendet.

Der **Abflussbeiwert ψ** gibt das Verhältnis der Oberflächenabflusshöhe zur Niederschlagsmenge an und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen (PATT 2001: 21). Da ein Abflussbeiwert von 1 nur auf einer vollversiegelten Fläche zu erwarten ist, kann dieser einem **Versiegelungsgrad** von 100 % gleichgesetzt werden.

Als **Möglichkeiten der Regenwasserbewirtschaftung** in Siedlungsgebieten werden allgemein das Vermeiden von Oberflächenabfluss, die Versickerung, das Speichern und das verzögerte Ableiten von Regenwasser sowie die Regenwassernutzung und das Behandeln von verschmutztem Regenwasser gesehen (SCHMITT 2001: 80). Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die ersten vier Aspekte. Maßnahmen, die im gesamten Einzugsgebiet umsetzbar sind, werden im Folgenden **dezentrale Maßnahmen zum Hochwasserschutz** genannt.

2 Grundlagen

2.1 Siedlungswasserwirtschaft

In diesem Kapitel wird kurz auf den historischen Hintergrund von Retentionsmaßnahmen im Siedlungsbereich eingegangen. Anschließend folgt eine kurze Darstellung der verschiedenen Entwässerungsformen.

2.1.1 Entwicklung der Siedlungsentwässerung

Als oberstes Ziel der Siedlungsentwässerung galt lange Zeit die schnelle Ableitung allen Abwassers. Hierunter fallen per Definition des Abwasserabgabengesetzes (§ 2 Abs. 1 AbwAG) sowie des Landeswassergesetzes von Rheinland-Pfalz (§ 51 Abs. 1 LWG) sowohl das häusliche Schmutzwasser als auch das „von bebauten oder befestigten Flächen abfließende und gesammelte“ Niederschlagswasser. Die Einbeziehung von Niederschlagswasser ist vor allem historisch bedingt.

Lange bevor es Abfallentsorgung und Abwasserkanäle für häusliches Schmutzwasser gab, durchzog in den meisten Orten ein fauliger Schlamm aus Kehrlicht und Fäkalien die mittelalterlichen Straßen. Ursprünglich sauberes Niederschlagswasser konnte – einmal auf derart verschmutzten Wegen und Plätzen gelandet – nur noch als Abwasser bezeichnet werden. Zudem konnte es kaum abfließen. Unter solch unhygienischen und feuchten Bedingungen entwickelten sich insbesondere die Städte zu Brutstädten von Krankheiten und Seuchen. Der Zusammenhang zwischen Hygiene und Gesundheit wurde erst im 19. Jahrhundert erkannt. Nach einer Choleraepidemie in England führte London 1830 mit dem Wasserklosett die Schwemmkanalisation ein. Es wurden Kanäle gebaut, die das Abwasser in die Themse ableiteten. In Deutschland folgte diesem Beispiel 1842 zunächst Hamburg, später dann 1852 Berlin, 1860 Chemnitz und Leipzig, 1867 Frankfurt, 1881 Köln und München (ATV 1983: 1f, GUJER 2007: 2f). Der Beginn einer flächendeckenden Siedlungsentwässerung in Deutschland geht somit auf die Mitte des 19. Jahrhunderts zurück.

Mit der ständigen Zunahme der Bevölkerung wuchsen auch die Ortschaften und Städte. Der Anteil versiegelter Flächen stieg und ließ den Oberflächenabfluss zunehmen. Hinzu kamen Fließgewässerbegradigungen sowie Oberflächenabfluss verschärfende Maßnahmen wie Bebauung und Nutzung der Auenbereiche, Umbruch von Wald- und Wiesenflächen hin zu Ackerflächen und Zusammenlegung landwirtschaftlich genutzter Flächen mit Beseitigung Struktur schaffender Elemente wie Gehölz- und Ackerrandstreifen. Die resultierenden negativen Folgen wurden erst wahrgenommen als Hochwasser hohe Schäden verursachten. Ein Umdenken fand daher erst mehr als ein Jahrhundert nach dem Bau der ersten Kanalisationen statt und nahm schließlich auch Einfluss auf die Gesetzgebung.

Auf nationaler Ebene fordert § 1a Abs. 2 WHG von jedem, Verunreinigungen und negative Veränderungen des Wassers zu vermeiden, es sparsam zu verwenden, die Leistungsfähigkeit des Wasserhaushaltes zu erhalten und die Vergrößerung als auch die Beschleunigung des Wasserabflusses zu vermeiden. Dies ist eine klare Ablehnung der Niederschlagsentwässerung über die Kanalisation. Zum alternativen Umgang mit Niederschlagswasser heißt es ferner in § 33 Abs. 2 Nr. 3 WHG: „Die Länder können allgemein oder für einzelne Gebiete bestimmen, dass [...] für das Einleiten von Niederschlagswasser in das Grundwasser zum Zweck seiner schadlosen Versickerung eine Erlaubnis nicht erforderlich ist.“ In den meisten Ländern ist die Versickerung von Niederschlagswasser erlaubnisfrei (UBA 2006: o. S.).

Nach der vorausgegangenen Novelle des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) schreibt beispielsweise das Landeswassergesetz von Rheinland-Pfalz in § 2 Abs. 2 LWG seit 1995 vor, Niederschlagswasser möglichst an Ort und Stelle zu verwerten, zu versickern oder in ein oberirdisches Gewässer zu leiten. Damit treibt der Gesetzgeber eine flächendeckende Umsetzung eines naturnahen Regenwasserbewirtschaftungs-Konzeptes insbesondere in Neubaugebieten voran. Als heutiges vorrangiges Ziel der Siedlungswasserwirtschaft gilt demnach nicht mehr das schnelle Ableiten von Niederschlagswasser, sondern das Vermeiden der Entstehung von Niederschlagsabfluss sowie dessen Rückhalt am Ort des Entstehens (GROTEHUSMANN & UHL 2006: 1).

Die ersten Projekte, die sich dem Thema Regenwasserbewirtschaftung widmeten, waren 1982 die Documenta Urbana in Kassel und 1983 das Baugebiet Hamburg Neugraben-Fischbek. Den Durchbruch schaffte laut LOHAUS (2006: 1) die Internationale Bauausstellung in Berlin 1987. SCHMITT (2002: 22/1) sieht eine merkbare Umsetzung ab dem Jahr 1992 (vgl. MICHALSKI 2005: 1), doch laut SIEKER¹ (2007) waren dezentrale Rückhaltmaßnahmen Mitte der 90er Jahre immer noch „neu“. GANTNER (2002: 73) schreibt 2002, dass seit etwa zehn Jahren „in wasserwirtschaftlichen Rahmenplänen und verschiedenen Vorworten der Regelblätter“ eine Abkehr von der Regenwasser-Ableitung hin zur Regenwasserbewirtschaftung propagiert wird, eine Trendwende bis dato jedoch nicht stattgefunden hat.

Mit der Abkehr vom Ableitungsprinzip hin zur naturnahen Bewirtschaftung von Regenwasser verbunden ist ein langjähriger Änderungsprozess, während dem auch Aspekte wie Umweltverträglichkeit und Akzeptanz der Öffentlichkeit innerhalb wasserwirtschaftlicher Projekte an Bedeutung gewonnen haben (HOFFMANN 2001: o. S.).

2.1.2 Konventionelle und naturnahe Entwässerungsformen

Unter den konventionellen Formen der Regenwasserableitung werden das Mischsystem und das Trennsystem unterschieden. Ziel der ersten Kanalisationen des 19. Jahrhunderts war, die Fäkalien und das häusliche Schmutzwasser zu entsorgen und die Verschmutzungen auf

¹ Vortrag durch Herrn Prof. Dr. H. Sieker am 24.01.2007 in der Handwerkskammer Trier

Straßen und Hofflächen durch Regenabflüsse fortzuspülen. Diese Abwässer wurden in einem Ableitungssystem, dem so genannten *Mischsystem* abgeleitet. Dieses System wirkte auch Überschwemmungen und Vernässungen in den Siedlungsgebieten entgegen. Das gesammelte Abwasser wurde auf kürzestem Wege in das nächste Fließgewässer eingeleitet. Mit dem Bau der ersten Kläranlagen wurden die Nachteile des Mischsystems offensichtlich. Das hoch verschmutzte Abwasser wird bei maximalen Starkregeneignissen in einem Verhältnis von 1:100 bis 1:200 verdünnt. Es entstehen große Abwasservolumina, für deren Behandlung große Anlagen nötig wären. Wegen entsprechend hoher Kosten werden beim Bau von Kläranlagen bewusst Überlastungen und damit Abgaben ungereinigten Abwassers in die Fließgewässer in Kauf genommen. Um eine zunehmende Verdünnung des Abwassers mit Regenwasser zu reduzieren, wurde das *Trennsystem* eingeführt. Hierbei werden Abwasser und Regenwasser jeweils in einem eigenen Kanalsystem abgeleitet. Das Abwasser wird zur Kläranlage geleitet, während das Regenwasser teilweise ohne vorhergehende Reinigung in ein Fließgewässer abgegeben wird. Die Kläranlagen werden deutlich entlastet, doch im Gewässer sind derart hohe Stoßbelastungen möglich, dass es zu Erosion und Abdrift sessiler Lebewesen kommen kann (SIEKER, KAISER & SIEKER 2006: 14ff).

Naturnahe Maßnahmen zur Bewirtschaftung von Niederschlagswasser bestehen aus den Komponenten Rückhalt, Versickerung, Verdunstung und verzögerte Ableitung. Die Reduzierung des Oberflächenabflusses entlastet Kanalisation und Kläranlagen, unterstützt die Grundwasserneubildung und fördert ein gesundes Kleinklima. Der natürliche Wasserkreislauf soll so weitestgehend erhalten bleiben.

Die Vorgabe des § 2 Abs. 2 LWG von Rheinland-Pfalz lautet, Niederschlagswasser zurückzuhalten. Hilfestellung zu „Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser“ findet der Planer z. B. im gleichnamigen Arbeitsblatt „DWA-A 138“ (DWA 2005) (vormals „ATV-DVWK-A 138“), auf welchem die nachfolgenden Angaben zu den unterschiedlichen Arten der Regenwasserretention, sofern nicht anders vermerkt, beruhen. Die folgenden Ausführungen sollen nur einen kurzen Überblick über die einzelnen Maßnahmen geben. Ausführlichere Beschreibungen der Maßnahmen sowie deren Vorteile und Anforderungen an deren Umsetzung finden sich u. a. in GANTNER (2002), MAHABADI (2001), SIEKER, KAISER & SIEKER (2006) und SIEKER, SIEKER, BANDERMANN, HUHN & STECKER (2003).

Bei der *Flächenversickerung* (s. Abb. 2-1) erfolgt die Versickerung über begrünte Freiflächen in den Untergrund. Da dem Boden ein Vielfaches der natürlichen Niederschlagsmengen zugeführt wird, muss dieser gut durchlässig sein. Die bereitzustellende Flächengröße sollte in etwa der angeschlossenen Fläche entsprechen. Durchlässig befestigte Oberflächen zählen nicht zur Flächenversickerung, stellen aber eine begrüßenswerte Begleitmaßnahme dar.

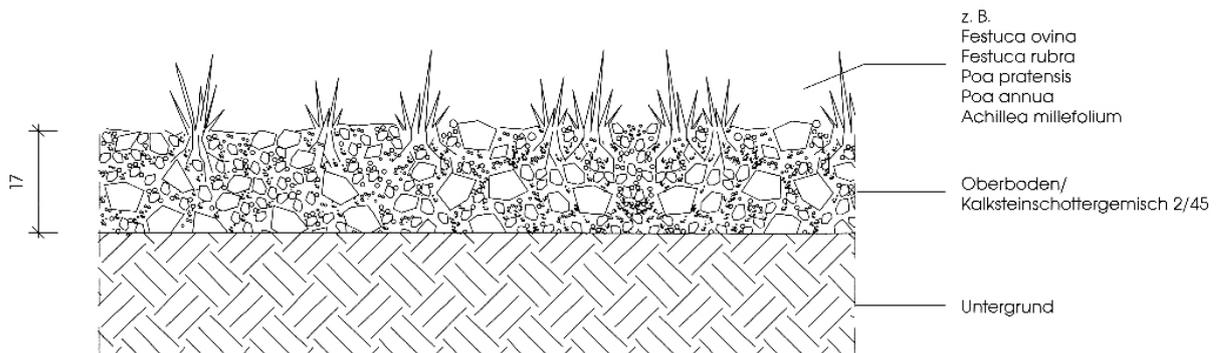


Abb. 2-1: Schotterrasen als Beispiel für die Flächenversickerung (MAHABADI 2001: 67).

Platzsparender ist die *Muldenversickerung* (Abb. 2-2). Hierfür werden begrünte maximal 10 - 40 cm tiefe mulden- oder grabenförmige Bodenvertiefungen angelegt, in die das Niederschlagswasser vorzugsweise oberirdisch eingeleitet wird (GROTEHUSMANN & UHL 2006: 9). In der oberen belebten Bodenzone wird dieses gereinigt und versickert weiter in den Untergrund. Die Mulde dient als oberirdischer Zwischenspeicher, der nach maximal zwei Tagen leer laufen soll. Mulden lassen sich gut in Privatgärten integrieren. Der Platzbedarf beträgt 10 - 25 % der angeschlossenen vollversiegelten Fläche.

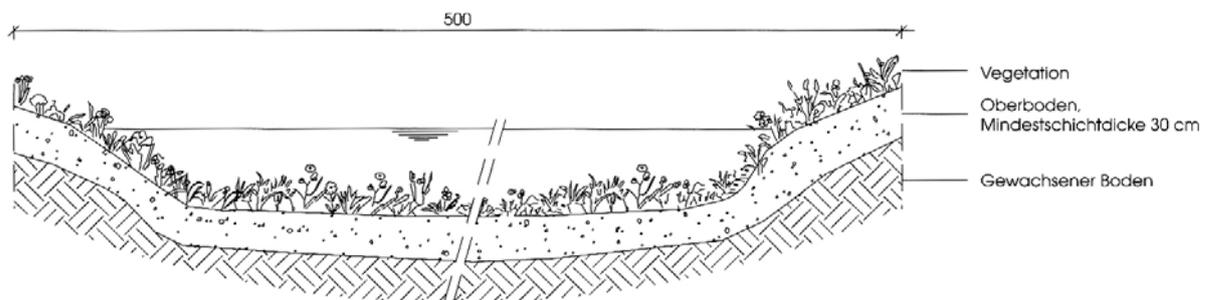


Abb. 2-2: Querschnitt einer Versickerungsmulde (MAHABADI 2001: 92).

Einen unterirdischen Speicherraum nutzen *Rigolen-* und *Rohr-Rigolen-Versickerung* (Abb. 2-3). Hierfür wird ein Graben ausgehoben, der anschließend mit einem Filtervlies ausgelegt, mit Kies oder Splitt befüllt und mit Mutterboden bedeckt wird. Bei der Rohr-Rigole führt zusätzlich ein perforiertes Rohr durch die Rigole. Das Wasser kann so besser verteilt oder ggf. auch verzögert abgeleitet werden. Der Hohlraum des Füllmaterials dient als Speicherraum für das Niederschlagswasser, das von dort verzögert in den Untergrund versickern kann. Rigolen eignen sich für schlecht durchlässige Böden und geringes Flächenangebot.

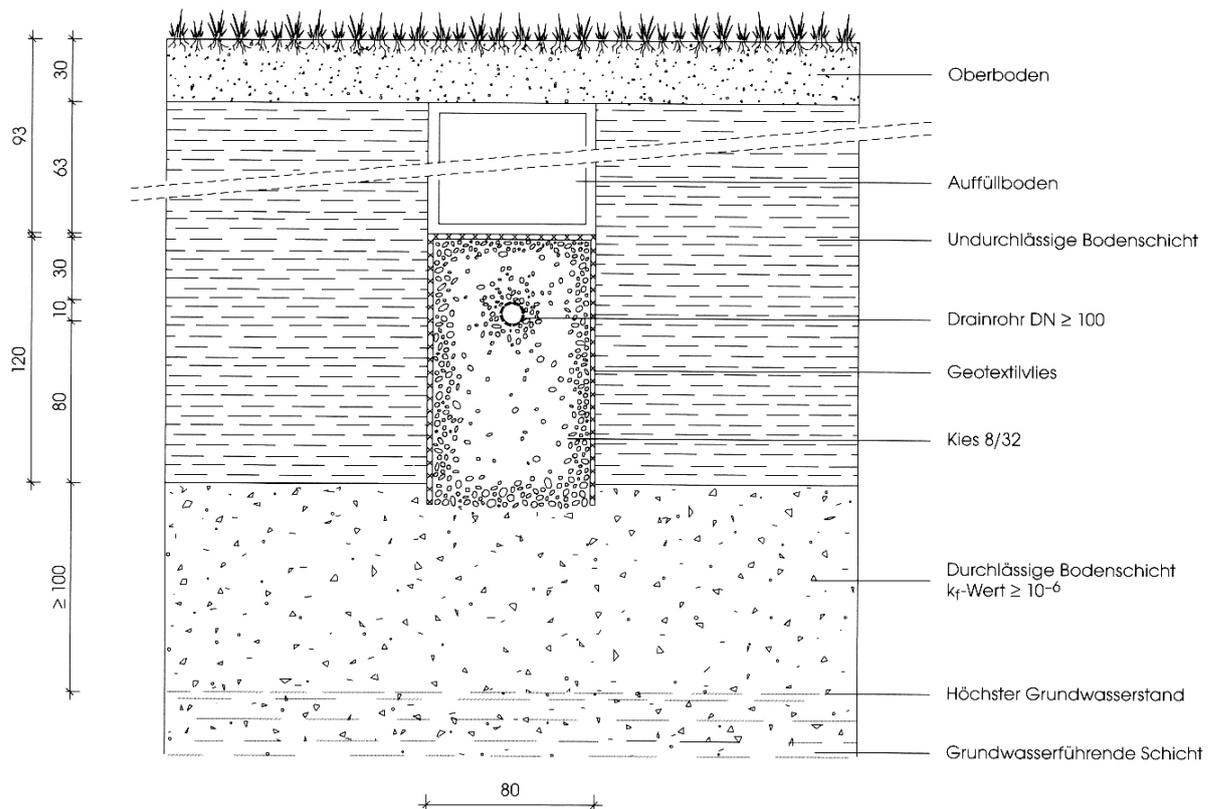


Abb. 2-3: Rohr-Rigolen-Versickerung im Querschnitt (MAHABADI 2001: 114).

Bei der *Mulden-Rigolen-Versickerung*, handelt es sich um eine Kombination aus Versickerungsmulde und Rigole (s. Abb. 2-4). Die Rigole sorgt für einen zusätzlichen Speicherraum unterhalb der Mulde, sichert gleichzeitig das rechtzeitige Leerlaufen der Mulde und ermöglicht das Einsparen von Fläche. Mulden-Rigolen können auch miteinander zu einem Mulden-Rigolen-System vernetzt werden. Gerade bei geringen (bis zu $k_f \leq 1 \cdot 10^{-6}$ m/s) und stark wechselnden Bodendurchlässigkeiten ist die Mulden-Rigole das Mittel der Wahl. Der Platzbedarf lässt sich auf 10 - 15 % der angeschlossenen vollversiegelten Fläche verringern.

Ein *Versickerungsschacht* besteht aus aufeinander gesetzten Betonschachtringen, die den Speicherraum bilden. Deren Mindestdurchmesser beträgt DN 1000. Zwei Bauarten werden unterschieden. Entweder weisen die Schachtringe, die oberhalb der Filterschicht der Sohle liegen seitliche Durchtrittsöffnungen auf, durch die das Wasser nach Passieren eines Filtersacks versickern kann (s. Abb. 2-5). Oder die seitlichen Durchtrittsöffnungen liegen unterhalb der Filterschicht, dem hierbei einzigen Filtermedium, durch welche das Wasser nach unten versickert (s. Abb. 2-6). Es ist die Maßnahme mit dem geringsten Flächenverbrauch. Klarer Nachteil ist jedoch die fehlende Reinigung durch eine Mutterbodenschicht. Daher ist diese Variante nur bei unverschmutztem Niederschlagswasser zu wählen, wenn vor Ort keine anderen Möglichkeiten bestehen.

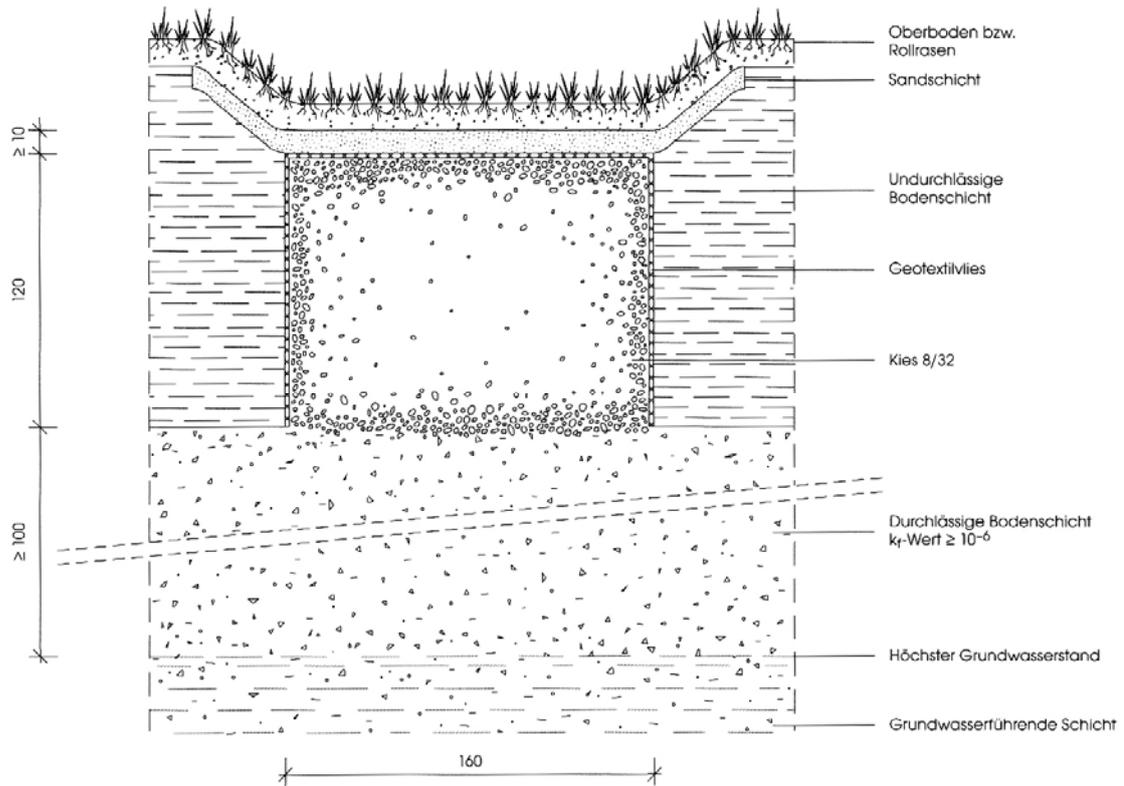


Abb. 2-4: Mulden-Rigolen-Versickerung im Querschnitt ohne Überlauf und ohne Drosselabfluss (MAHABADI 2001: 128).

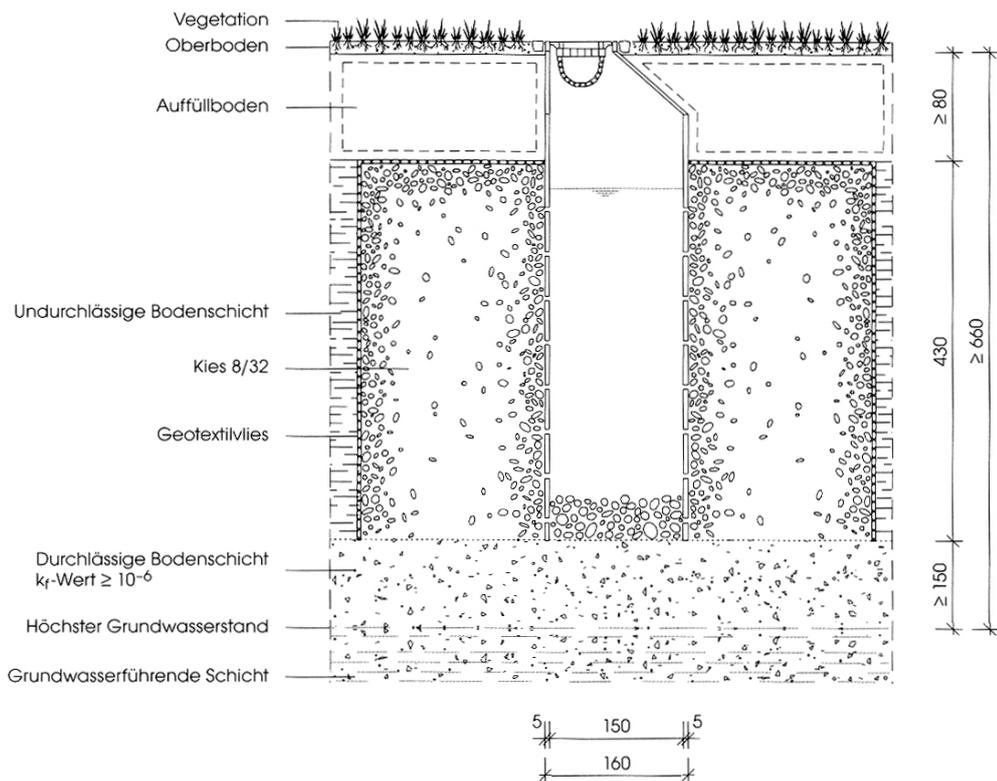


Abb. 2-5: Schachtversickerung mit durchgehend seitlicher Versickerung (MAHABADI 2001: 142).

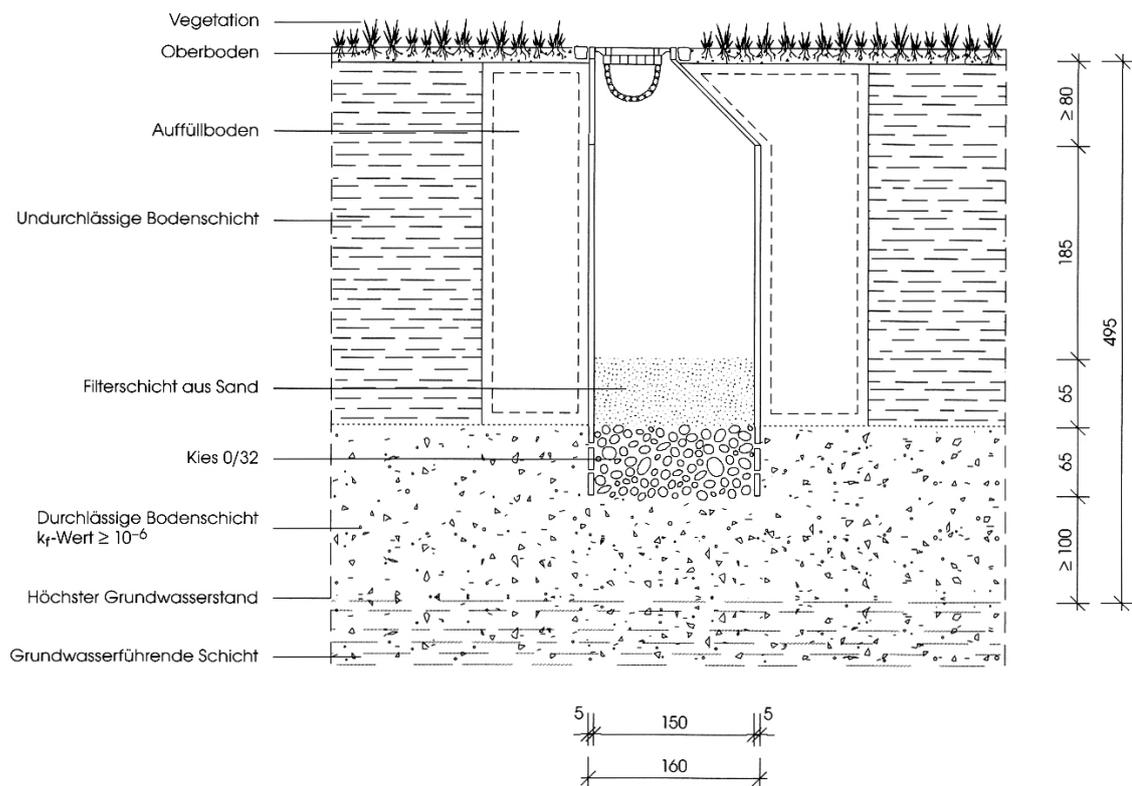


Abb. 2-6: Schachtversickerung mit Versickerung unterhalb der Filterschicht (MAHABADI 2001: 144).

Als letzte Möglichkeit nennt das Arbeitsblatt A 138 das *Versickerungsbecken*, dem in der Regel ein Absetzbecken vorgeschaltet ist, um einer Selbstdichtung durch mitgeführte Feinstoffe vorzubeugen. Denkbar ist auch ein Versickerungsteich, bei dem das Wasser im ringförmigen Böschungsbereich versickern kann.

2.2 Stand der Forschung

Dieses Kapitel gliedert sich in zwei Teile. Zuerst folgen Untersuchungen, die sich einzelnen Retentionsanlagen und den dort ablaufenden Prozessen auf Grundlage von Felduntersuchungen und N-A-Modellierung widmen. Ziel dieser Untersuchungen auf der Mikroskala war die Optimierung von Retentionsanlagen. Danach werden Arbeiten vorgestellt, deren Gegenstand die Wirkung dezentraler Regenwasserbewirtschaftung in urbanen Gebieten auf Hochwasserabflüsse ist. Diese Arbeiten betrachten die Meso- und die Makroskala.

2.2.1 Untersuchungen auf der Mikroskala

Die wenigen bekannten Untersuchungen im Zusammenhang mit Retentionsanlagen beschränken sich auf die Jahre 1995 - 2002. Während die ersten Arbeiten einzelne Retentionselemente wie Mulden-Rigolen insbesondere auf bodenphysikalische Prozesse und das Abflussverhalten hin untersuchen, widmen sich die späteren Arbeiten verstärkt der Anpassung von Modellen

wie MURISIM und MURITEST, welche der Bemessung von Retentionsanlagen dienen. Im Folgenden wird kurz auf Inhalt und Ziel der Arbeiten eingegangen.

MILKE (1995) beschreibt Versuchsreihen an Mulden-Rigolen-Abschnitten mit integrierten Versickerungsschächten und Anschluss an einen Regenwasserkanal. Um Versickerungs- und Abflussverhalten zu messen, wurde im Regenwasserkanal ein Messwehr installiert. Gemessen wurde der Abfluss a) nach ausschließlichem Muldenzufluss, um Versickerungsleistung, Speichervermögen und Abflussverzögerung zu ermitteln, b) nach ausschließlichem Zufluss zum Versickerungsschacht, um dessen maximale Aufnahmeleistung und Retentionswirkung zu erhalten und c) nach gleichzeitigem Zufluss in Mulde und Versickerungsschacht, um hierüber Aufschluss über maximale Zuflussleistung und Gesamtreentionswirkung des Systems zu erlangen.

Eine Literaturrecherche durch WINZIG (1997) ergab, dass bis dato niemand außer MILKE (1995) detaillierte Untersuchungen an Mulden-Rigolen-Systemen vorgenommen hat. WINZIG untersuchte Mulden-Rigolen hinsichtlich Funktion und Leistungsfähigkeit und dem Einfluss auf die Grundwasserneubildung in der Schüngelbergsiedlung (Gelsenkirchen). Er testete das Verhalten von Mulden-Rigolen bei unterschiedlichen hydraulischen Belastungen, die Leistungsfähigkeit des Speichervolumens, das Verhalten bei Änderung von Durchmesser und Tiefenlage des Dränrohrs, die Veränderung der Versickerungsleistung während des Versuchszeitraumes, er untersuchte den kleinräumigen Wasserhaushalt, den Einfluss bodenphysikalischer Parameter bei Überstauversuchen und schließt seine Arbeit mit Empfehlungen und Vorschlägen zum Bau von Mulden-Rigolen. Untersuchungsobjekt waren eine Mulden-Rigole innerhalb eines Entwässerungsstranges, eine eigens für Versuche angelegte Mulden-Rigole, die er mit TDR-Sonden, Tensiometern und Wasserstandsrohren ausstattete und ein Mulden-Rigolen-Strang, an dem er Überstauversuche durchführte.

Im Folgenden werden die Arbeiten chronologisch vorgestellt: REMMLER, HÜTTER & STECKER (1998) beschreiben die Simulation künstlicher Regenereignisse an einem Mulden-Rigolen-System einer Kindertagesstätte in Dortmund. Die gewählten Häufigkeiten betragen $n = 1,0 (r_{60,1})$ mit 42 l/s·ha und $n = 1,0 (r_{240,1})$ mit ca. 15 l/s·ha Dies entspricht 15 mm Niederschlag in 60 Minuten bzw. 22 mm in 240 Minuten. Ausgangszustand waren eine trockene Rigole und ein trockener Oberboden der Mulde. Neben der erfolgreichen Kalibrierung und Verifizierung des Simulationsprogrammes RHBSIM konnten einige Erkenntnisse zum Speichervermögen und der Wasserbilanz des Systems gewonnen werden. Überraschend hoch war der berechnete sommerliche Verdunstungsanteil, welcher 42 % des betrachteten Gesamtniederschlags ausmacht.

LEONHARDT (1998) erstellte mit Hilfe des Programms MURISIM 3.0 ein Modell des von ihm untersuchten 3 ha großen UPS-Geländes im Gewerbegebiet Dahlwitz-Hoppegarten (Brandenburg) und kalibrierte dieses anhand von Niederschlags- und Wasserstandsmessungen in einer 165 m langen Mulden-Rigole. Er weist darauf hin, dass per Computersimulation generell

keine 100%ige Übereinstimmung von simulierten und realen Werten erreicht wird. Deutliche Abweichungen ergaben sich sowohl bei den Ganglinien des Muldenwasserstandes als auch bei denen des Rigolenwasserstandes. In der Realität läuft die untersuchte Mulde schneller aus und die Rigole wird höher und länger eingestaut. Er verweist auf das von SCHNEIDER, HOLTZ & MASBERG (1998) beschriebene Problem der Modellierung der Muldenwasserstandsganglinie und nennt Makroporen als beeinflussenden Faktor und mögliche Lösung des Problems. Weitere mögliche Störgrößen werden aufgezählt, die die Modellierungsergebnisse negativ beeinflussen können.

SCHNEIDER (1999) untersuchte das Speicher- und Abflussverhalten von Mulden-Rigolen-Systemen (MRS). An einem 2 m³ großen Mulden-Rigolen-Modell ermittelte er Drossel- und Überlaufleistungen der Rigole anhand verschiedener Drosselorgane. Vier Lysimeter mit einer Oberfläche von 4 m² und einem Muldenbettauflauf von 30 cm Oberboden über 10 cm mächtiger Sandschicht dienten der Erfassung des Wasserhaushalts im Muldenbett unter definierten Zulaufbedingungen mittels Tensiometern und TDR-Sonden. An unterschiedlich alten Mulden-Rigolen-Systemen in der Schüngelbergsiedlung (Gelsenkirchen) wurde die langfristige Entwicklung der Infiltrationsrate mittels Versickerungsversuchen dokumentiert. Schließlich hielt er nach natürlichen Niederschlagsereignissen und Flutungsversuchen an einem Test-MRS und einem weiteren MRS die Wasserstände in der Mulde und am Drosselorgan der Rigole fest, um Speicher- und Entleerungsverhalten zu ermitteln. Sämtliche Untersuchungen dienten über die modelltechnische Beschreibung des Speicher- und Abflussverhaltens von MRS der Verifizierung und Modifizierung des Simulationsprogramms MURITEST.

SOMMER, ENGEL, REHFELD-KLEIN & SIEKER (2002) untersuchten in einem Zeitraum von zwei Jahren die Funktionsfähigkeit eines straßenbegleitenden Mulden-Rigolen-Elementes. Neben der Aufzeichnung natürlicher Ereignisse, wurden zwei künstliche Flutungsversuche durchgeführt. Gemessen wurden der Niederschlag und der Überlauf aus der Mulde in die Rigole. Mit dem Modell MURISIM 4.0 wurde anhand der Niederschlagsdaten das Niederschlags-Abfluss-Geschehen simuliert und die so berechneten Ergebnisse für den Überlauf aus der Mulde in die Rigole mit den gemessenen Werten verglichen.

2.2.2 Untersuchungen auf der Meso- und Makroskala

Erste Veröffentlichungen zur Wirkung dezentraler Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten auf Hochwasserabflüsse sind der Autorin erst ab 1992 bekannt. Die Anzahl der Untersuchungen und Veröffentlichungen hat ab 2001 spürbar zugenommen (s. Abb. 2-7), ein Indiz für die Aktualität der Thematik und den bestehenden Forschungsbedarf.

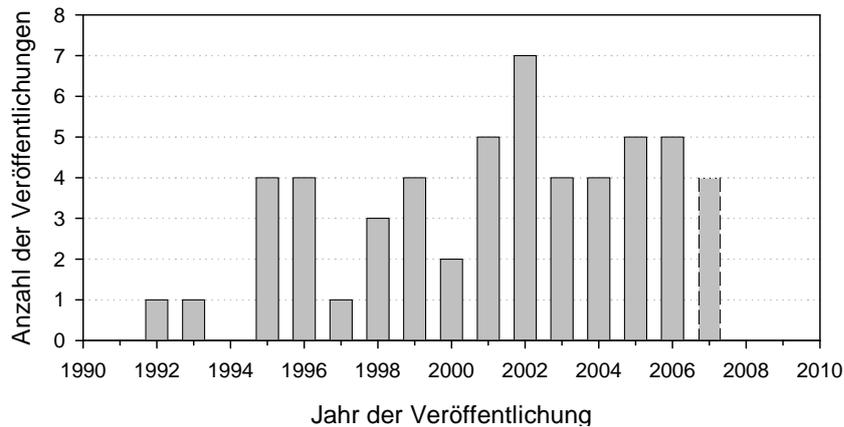


Abb. 2-7: Anzahl der Veröffentlichungen über Untersuchungen zur Wirkung dezentraler Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten auf Hochwasserabflüsse seit 1990.

Hintergrund mag einerseits die Zunahme an Hochwasserereignissen in der Vergangenheit sein mit der damit verbundenen Forderung nach Schutzmaßnahmen, die sich nicht auf technische Maßnahmen in Gewässernähe beschränken, sondern den Rückhalt des Oberflächenwassers am Ort des Entstehens einbeziehen. Andererseits zielt ein Teil der vorliegenden Literatur auch darauf ab, bestehende Vorbehalte gegenüber der Rückhalte-Wirkung dezentraler Maßnahmen in Siedlungsgebieten im Allgemeinen abzubauen und den diesbezüglichen Kenntnisstand zu erweitern.

Bevor die Wirksamkeit dezentraler Regenwasserbewirtschaftung untersucht wurde, beschäftigten sich Forscher zunächst mit der Frage, welchen Einfluss eine Zunahme der Flächenversiegelung infolge fortschreitender Bebauung auf das Abflussgeschehen nimmt. Einen Überblick über die Ergebnisse von zwölf Untersuchungen gibt MENDEL (1996, s. a. KOEHLER 1992 und MEIJERING 1995 zit. in MENDEL 2000: 223f). Die Arbeiten stammen aus dem Zeitraum 1971 - 1995. Untersucht wurde die Auswirkung der Flächenversiegelung auf Scheitelabfluss und Laufzeit von Fließgewässern kleiner Einzugsgebiete ($< 1000 \text{ km}^2$) mit einer Größe von $6,2 \text{ km}^2$ bis 770 km^2 . Die Schlussfolgerung der Ergebnisse lautet, dass zunehmende Flächenversiegelung in kleinen Einzugsgebieten Hochwasser verschärfend wirkt, d. h. die Abflussscheitel werden stark erhöht und die Laufzeiten deutlich verkürzt (z. T. um das 2- bis 5fache laut DEUTSCHER BUNDESTAG 1989 zit. in MENDEL 1996: 11).

Im Umkehrschluss gilt: Die Entsiegelung von Flächen sowie eine Versickerung von Oberflächenwasser in unmittelbarer Nähe versiegelter Flächen wirkt in kleinen Einzugsgebieten Hochwasser mindernd. Schon 1989 stellt der DEUTSCHE BUNDESTAG (1989, zit. in TOURBIER 2001: 310) fest, dass das Zusammenwirken von „vielfältigen kleinen und kleinsten Maßnahmen, die zum Rückhalt, zur Versickerung und zur Verzögerung des Abflusses von Niederschlagswasser [...] beitragen, [...] insbesondere in kleinen Gewässern Hochwasser abschwächen können“.

Das weitere Forschungsinteresse entwickelte sich u. a. in Richtung der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf große Einzugsgebiete. Daher zitiert MENDEL (1996: 13) zur Wirkung dezentraler Maßnahmen lediglich LONDONG (1993), wonach sich Ereignisse ab HQ_{50} an der Emscher (858,3 km²) nur durch ein Hochwasserrückhaltebecken merklich reduzieren lassen und SIEKER (1996a), der für große Einzugsgebiete eine Dämpfung extremer Hochwasserereignisse durch dezentrale Regenwasserbewirtschaftung von 3 - 10 % für möglich hält.

WEGNER (1992: 7f) beziffert den Rückhalt einzelner Versickerungsmulden auf 60 - 80 % des Jahresniederschlags, betont jedoch, dass urbane Maßnahmen bei Ereignissen hoher Jährlichkeit nur noch eine sehr geringe Wirkung zeigen. So werden die Spitzenabflüsse am Oberlauf eines kleinen Gewässers (4 km²) bei einem HQ_{100} um bis zu 10 % gemindert, die eines weiteren kleinen Gewässers (ca. 55 km²) um 6 % bis maximal 9 % – Werte, die bei späteren Untersuchungen nicht mehr erreicht wurden.

In den 90er Jahren und zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurden weitere Untersuchungen an Mulden-Rigolen-Elementen und Mulden-Rigolen-Systemen durchgeführt, die sich auf deren Abfluss- und Speicherverhalten konzentrieren:

MILKE (1995: 919) spricht Mulden-Rigolen-Systemen einen gewissen Beitrag zum Hochwasserschutz zu. WINZIG (1996: 145) konnte für einen Mulden-Rigolen-Strang feststellen, dass hohe und kurze Zuflussraten um 40 - 60 % gedämpft und die Laufzeit auf das 5fache der Zulaufzeit gestreckt wird. Ähnlich hoch ist der Rückhalt einer von REMMLER, HÜTTER & STECKER (1998: 668) untersuchten Mulden-Rigole. Hier sind über ein Jahr gemittelt 53 % des Rigolenzulaufs versickert und somit wurden 27 % der Jahresniederschlagsmenge zurückgehalten. SCHNEIDER (1999: 213f) ermittelte eine Verlängerung der Zulaufdauer im Vergleich zur Einstaudauer in der Rigole um mindestens das 1,7fache und im Mittel um das 7,5fache. GANTNER (2003a: 242) listet die von SIEKER (2001c) gemachten Angaben zum Retentionsvermögen verschiedener Regenwasserbewirtschaftungsmethoden (hierunter auch Flächen-, Rohr-/Rigolen- und Schachtversickerung) auf. Bei konvektiven Niederschlagsereignissen halten die Anlagen 11 - 100 % des Oberflächenwassers zurück, bei advektiven Hochwasser erzeugenden Ereignissen 1 - 100 %. GÖBEL, STUBBE, WEINERT, ZIMMERMANN, FACH, DIERKES, KORIES, MESSER, MERTSCH, GEIGER & COLDEWEY (2004: 270f) schließlich weisen nach, dass 60 - 77 % des Jahresniederschlags in Versickerungsmulden versickern können, in Rigolen sind es 68 - 80 %. Die Retentionswirkung dieser Anlagen auf den Niederschlagsabfluss scheint somit erheblich. Aussagen über die Einflüsse auf den Abfluss eines Einzugsgebietes zu treffen, war nicht Gegenstand der genannten Untersuchungen.

Daher folgen nun einige Aussagen aus dem gleichen Zeitraum, die sich zunächst auf dezentrale Maßnahmen im Allgemeinen und deren Einfluss auf Hochwasser beziehen:

Laut TÖNSMANN (1995, zit. in ASSMANN 1999: 13f) kann ein kleines Einzugsgebiet wie das der Bauna (49,1 km²) bei Umsetzung aller möglichen dezentralen Maßnahmen vor einem Jahrhunderthochwasser geschützt werden. Entsprechend sehen ASSMANN, FRIEDEL, GÜNDRA,

SCHUKRAFT & SCHULTE (1996: 63) nur in der Summe mehrerer Retentionsflächen und -areale die Möglichkeit, Hochwasserwellen zu dämpfen und effektiven Hochwasserschutz in kleinen Einzugsgebieten zu leisten. Vier Jahre nach TÖNSMANN weist ASSMANN (1999: 91f) für das Einzugsgebiet der Oberen Elsenz (77,5 km²) nach, dass eine Maßnahmenkombination vor einem Jahrhunderthochwasser schützen kann. Er hebt hervor, dass er dabei den Einfluss der Siedlung mit einem Flächenanteil von 9 % an Gesamt-Einzugsgebiet und einem Versiegelungsgrad von 50 - 60 % unterschätzt hat.

Einzig SIEKER (1996b) konzentriert sich auf Maßnahmen im Siedlungsbereich. Im Einzugsgebiet Kirchhörder Bach (7,14 km²), in dem 16,1 % der Fläche mit einem Versiegelungsgrad von 43 % bebaut sind, verursacht die Bebauung im Vergleich zum unbebauten Zustand eine Abflussscheitelerhöhung um das 5fache, bei dezentraler Bewirtschaftung des Regenwassers im Siedlungsbereich wird der Abflussscheitel dagegen nur verdoppelt. Zwei Hochwasserereignisse betrachtend, wäre der Abflussscheitel von 1993, hervorgerufen durch 227 mm Niederschlag in 18 Tagen, um 7,5 % und jener von 1995 nach 85 mm Niederschlag in 5 Tagen um 25 % reduziert worden (vgl. WEGNER 1992). SIEKER sieht damit bestätigt, dass Retentionsmaßnahmen in der Siedlung einen wesentlichen Beitrag zur Dämpfung extremer Hochwasser leisten. Ihre Stärke läge darin, bei lang anhaltenden Niederschlägen schwacher Intensität die Abflussspenden unbebauter Flächen unterbieten zu können.

Große Einzugsgebiete betreffend sprechen UHLENBROOK & LEIBUNDGUT (1997: 20) dezentralen Maßnahmen eine Hochwasser reduzierende Wirkung ab. Für Maßnahmen in der Fläche in kleinen, stark landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten sehen sie dagegen ein hohes Potential zur Hochwasser-Reduzierung.

Im Jahr 2000 veröffentlicht MENDEL im Auftrag der BFG eine kommentierte Bibliographie, die auch Untersuchungen und den Kenntnisstand zum anthropogenen Einfluss auf das Hochwassergeschehen enthält. MENDEL (2000: 221, 238) bemerkt, dass nur wenige verwertbare Aussagen über Hochwasserverschärfung infolge Urbanisierung vorliegen. Dies spiegelt sich in der geringen Seitenzahl wieder, die dem Bereich Siedlung gewidmet ist. Die Frage nach einer möglichen Abflussverschärfung in großen Einzugsgebieten wie dem des Rheins durch bebaute Flächen sei zentral, jedoch gäbe es hierzu bislang nur „Bemerkungen und Antwortversuche“ (MENDEL 2000: 225). Als Probleme der Modellierung großer Einzugsgebiete gelten bis dato der unsichere Modell-Output, der durch den geringen Siedlungsanteil (meist < 10 %) hervorgerufen wird, die Wellenüberlagerungsmöglichkeiten der Teileinzugsgebiete, unbefriedigende Rechengenauigkeit und eine ebensolche Datenbasis. Zur Beendigung kontroverser Diskussionen empfiehlt MENDEL (2000: 238), die Wirkung des Speicherpotentials auf den Hochwasserabfluss weiterhin zu untersuchen.

Ein Jahr später wurden im Auftrag der DEUTSCHEN BUNDESSTIFTUNG UMWELT die Beiträge zum Workshop „Vorbeugender Hochwasserschutz – Neue Wege der Regenwasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet der Saar“ vom 15./16.06.2000 in Saarlouis in einem Buch zu-

sammengefasst (HEIDEN, ERB & SIEKER 2001). Der folgende Überblick konzentriert sich auf die bis dato aktuellen Erkenntnisse zur Wirkung dezentraler Maßnahmen im Siedlungsbereich zum Hochwasserschutz.

Einstimmigkeit herrscht bis dato immer noch darüber, dass dezentrale Maßnahmen in kleinen Einzugsgebieten Hochwasser dämpfen können. Pauschalaussagen können jedoch nicht getroffen werden. So hat ASSMANN (2001: 203f) am Einzugsgebiet der Oberen Moldau erkannt, dass aufgrund des steileren Reliefs das Schutzziel HQ₁₀₀ anders als an der Oberen Elsenz mit dezentralem, integrierten Hochwasserschutz nicht erreichbar ist.

Ähnlich sieht es für dezentrale Maßnahmen im Siedlungsbereich aus. OSTROWSKI (2001: 195) weist Einzugsgebietsgrößen von 50 - 500 km² als Skalenbereich aus, in dem dezentrale Maßnahmen in Siedlungen einen erheblichen Einfluss auf den Hochwasserabfluss haben können aber nicht per se haben müssen. Auch SARTOR (2001: 292) hält „generelle Aussagen zur quantitativen Veränderung der Scheitelabflüsse [für] sehr schwierig“. Entscheidend seien insbesondere die Lage der Siedlungsflächen am Gewässer und das Verhältnis bebauter Fläche zum Gesamteinzugsgebiet. Siedlungsflächen, die, wie es oft der Fall ist, in Gewässernähe lägen, seien hydraulisch an den Vorfluter angeschlossen. In Retentionsanlagen versickerndes Wasser trifft dann auf im Boden gespeichertes Altwasser und verdrängt dieses mittels Druckimpuls. Von einer Hochwasser dämpfenden Wirkung bleibt dann nicht mehr viel übrig. KATZENMAIER, FRITSCH & BRONSTERT (2001: 346) nennen als weitere Gründe gegen Pauschalaussagen den Einfluss des Sättigungsgrades vor Ereignisbeginn sowie der jeweiligen Niederschlagscharakteristik und in großen Einzugsgebieten das oft ungünstige Zusammentreffen kleinerer Hochwasser in vielen Teileinzugsgebieten.

Eine große Wirksamkeit spricht SIEKER (2001a: 52) dezentralen Maßnahmen in Siedlungen vor Ort zu. Demnach können diese in kleinen Einzugsgebieten die gleiche Hochwasserminde rung bewirken wie großtechnische Maßnahmen (Polder, Deichrückverlegung, ...). ZIMMERMANN (2001) liefert mit Simulationen am Einzugsgebiet der Oberen Blies (316 km²) mit 24 % Siedlungsfläche in Ansätzen den Beweis dafür. So können beim Hochwasser von 1995 nach 294 mm Niederschlag in 10 Tagen in den Versickerungsmulden 56 - 100 % zurückgehalten werden und in den Mulden-Rigolen 21 - 93 %. Die k_f -Werte des Bodens lagen zwischen $1 \cdot 10^{-5}$ m/s und $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Selbst bei niedrigen Infiltrationsraten konnten 20 - 90 % des Niederschlagswassers zurückgehalten werden. Aussagen zur Wirkung auf den Gewässerabfluss trifft er leider nicht.

Für den Holzbach (29 km²) konnte SIEKER (2001b: 87) nachweisen, dass bei Abkopplung von 35 % der Siedlungsfläche die Kanalnetzabflüsse um maximal etwas mehr als 50 % gemindert werden. Der maximale Scheitelabfluss des Holzbaches kann dadurch jedoch nur um 1,5 - 2,4 % reduziert werden (SIEKER 2001b: 188).

Im Blickpunkt des Interesses stand weiterhin die Frage, ob dezentrale Maßnahmen im Siedlungsbereich alleine oder gemeinsam mit weiteren im Einzugsgebiet verteilten dezentralen

Maßnahmen extreme Hochwasserereignisse in großen Einzugsgebieten mindern können (KOEHLER & MARENBACH 2001: 359, SIEKER 2001a: 52, ZIMMERMANN 2001: 284). Als wichtigen Aspekt heben zwei Autoren die Bedeutung der Verdunstung hervor. So sollte neben der Aufrechterhaltung der Grundwasserneubildung im Vergleich zum unbebauten Zustand eines Gebietes durch Versickerung auch versucht werden, die Verdunstung zu erhalten (TOURBIER 2001: 311). In Trier verdunsten in unbebauten Gebieten etwa 66 % des Niederschlags (HELBIG 2002: 27f). Bei oberirdischen Versickerungsanlagen sinkt dieser Betrag bis auf 7 - 14 % im Gegensatz zur Versickerung, die mit bis zu über 90 % ins Gewicht fällt. Bei unterirdischen Versickerungsanlagen entfällt die Verdunstung und es kann sogar zu problematischen Erhöhungen des Grundwasserspiegels kommen (GANTNER 2002: 176). SIEKER, KAISER & SIEKER (2006: 184) geben für Versickerungsmulden einen Verdunstungsanteil von 8,7 % bis 29,8 % und für Mulden-Rigolen Werte zwischen 6,5 % und 8,1 % an. Ein bebautes Gebiet mit Regenwasserbewirtschaftung betrachtend, hat die Verdunstung an der Wasserbilanz einen durchschnittlichen Anteil von 35 % (20 - 49 %) und erreicht damit nur maximal 2 - 3 % mehr als ein konventionell entwässertes Gebiet (SIEKER, KAISER & SIEKER 2006: 190ff). Eine weitestgehende Erhaltung der natürlichen Wasserbilanz erzielt laut SARTOR (2001: 307) am ehesten die Dachbegrünung mit nachgeschalteter Muldenversickerung.

Den aktuellen Stand des Wissens über die Wirksamkeit dezentraler Maßnahmen zur Hochwasserminderung gibt die gleichnamige Veröffentlichung der DWA (2006b) wieder. Noch immer ist von kontroversen Diskussionen über Wirksamkeit dezentraler Maßnahmen, der Größe ihres Beitrags zur Abflussminderung und deren Umsetzungspotential die Rede. Diese beruhen nicht zuletzt darauf, dass erst wenige konkrete und gesicherte Erkenntnisse vorliegen und begründen die aktuellen Forschungen zu dieser Thematik (DWA 2006b: 3, KOEHLER 2005: 117, RÖTTCHER 2005: 11, SIEKER, SIEKER, BANDERMANN, HUHN & STECKER 2003: 137). Einstimmigkeit herrscht hinsichtlich folgender Aussagen (DWA 2006b: 107, sofern nicht anders vermerkt):

Bei der Bewertung der Wirkung dezentraler Maßnahmen im Siedlungsbereich auf Hochwasserabflüsse ist zu berücksichtigen, dass sie in der Regel für Wiederkehrzeiten von 5 Jahren konzipiert sind. Sie dienen in erster Linie zur Regenwasserbewirtschaftung, nicht zum Hochwasserschutz. Niederschlagsereignisse > 50 mm bzw. generell große bis extreme Hochwasser verursachende Ereignisse sind daher nicht Grundlage der Bemessung.

Da sich ihr Rückhaltepotential nicht allein aus ihrem baubedingten Speichervolumen ergibt, sondern aufgrund der Versickerungsleistung ein zusätzliches Rückhaltevolumen zur Verfügung steht, können sie je nach naturräumlicher Ausstattung des Einzugsgebietes einen mehr oder weniger deutlichen Beitrag zum Hochwasserschutz leisten (WILCKE, SIEKER, ZHENG YUE & SIEKER 2007: 249). Manchmal kann auch eine Scheitelabminderung von 10 % in großen

Einzugsgebieten ein sinnvolles Ziel sein. Ein 50-jährliches Ereignis tritt dann nur noch alle 100 Jahre ein.

Die Wirkung dezentraler Maßnahmen im Siedlungsbereich ist umso größer, je größer der Anteil der bewirtschafteten Siedlungsfläche am Gesamtgebiet ist und je größer deren Anteil am Gesamtabfluss ist. Während kleine Einzugsgebiete (bis 1.000 km²) einen Siedlungsanteil von bis zu 32 % aufweisen, sind es in einem Einzugsgebiet wie dem des Rheins (ca. 100.600 km²) nur noch ca. 2 %. Retentionsanlagen können selbst bei winterlichen Hochwasserereignissen bis zu 100 % des effektiven Niederschlags zurückhalten, bei geringen Durchlässigkeiten zwischen 20 % und 90 % und auch hochurbane Einzugsgebiete betrachtend ist die Wirkung besonders hoch, so dass die Abflussspitzen in kleinen Gewässern stark reduziert werden können, sie nimmt jedoch mit zunehmender Größe des Einzugsgebietes tendenziell ab. (SIEKER, KAISER & SIEKER 2006: 182, SIEKER & WILCKE 2006: 22, OSTROWSKI 2001: 181, ZIMMERMANN 2001: 280)

ASSMANN (2001: 203) fügt hinzu, dass Retentionsmaßnahmen in natürlicherweise abflussarmen Gebieten (durchlässige Böden, geringes Gefälle, hoher Waldanteil) besonders positiv zu Buche schlagen, da der Anteil des Siedlungsabfluss am Gesamtabfluss dann relativ groß ist. Laut DWA (2006b: 12) nimmt die Wirkung bei flächenhafter Umsetzung gewässerabwärts zu und laut RÖTTCHER (2006: 105) ist sie dann auch überregional bemerkbar, anders als beispielsweise Hochwasserrückhaltebecken, die lokal besonders effektiv sind, deren Wirkung flussabwärts jedoch bis auf Null sinken kann. ASSMANN & KEMPF (2005: 74) betonen jedoch, dass Aussagen zur überregionalen Wirkung aufgrund ungelöster Probleme des up- und downscalings hydrologischer Prozesse nicht möglich sind.

Neben der Aussage, dass die Wirkung in kleinen Einzugsgebieten am größten ist, ist hervorzuheben, dass etwa die Hälfte aller Hochwasserschäden in diesen Gebieten entsteht (ASSMANN & KEMPF 2005: 82). Hier besteht also ein bedeutendes Potential zur Verhinderung finanzieller Schäden.

Hinsichtlich der Lage der bewirtschafteten Flächen betonen RÖTTCHER, KLEEBERG & KOEHLER (2006: 1) u. a. die große Wirkung dezentraler Maßnahmen, die im Gewässeroblauf umgesetzt werden. Dies begründet die KA (1999: 576f) damit, dass sich der Abfluss der Siedlungsfläche und die Hochwasserwelle des natürlichen Einzugsgebietes zunehmend ungünstig überlagern, je weiter die Siedlungsfläche gewässeraufwärts liegt. Eine Verlangsamung von Abflüssen entschärft daher die Gefahr der Wellenüberlagerung (RÖTTCHER 2006: 104). Liegt die Siedlungsfläche jedoch direkt oberhalb der am Gewässer betrachteten Stelle, so eilt ihr Abfluss der Hochwasserwelle aus dem natürlichen Gebiet voraus (Prinzip der Vor-entlastung).

Hinsichtlich Häufigkeit und Höhe eines Niederschlagsereignisses ist die Wirkung dezentraler Maßnahmen im Siedlungsbereich bei häufiger auftretenden Ereignissen am größten und nimmt zu selteneren hin ab. Begründet wird dies damit, dass bei großen Hochwasserereig-

nissen sowohl die natürlichen Speicherräume (Böden, Talaue etc.) als auch die künstlichen (z. B. Rückhaltebecken) weitgehend gefüllt sind bevor der Hochwasserscheitel eintrifft. Das gesamte Einzugsgebiet produziert dann Oberflächenabfluss. Der dazu im Verhältnis stehende Anteil, der im Siedlungsgebiet zurückgehalten werden kann, ist sehr gering. So nähern sich die Abflussmengen bebauter Flächen denen unbebauter Flächen laut SIEKER (1996b: 532) bereits ab einer Wiederkehrzeit von zehn Jahren an (s. Abb. 2-8).

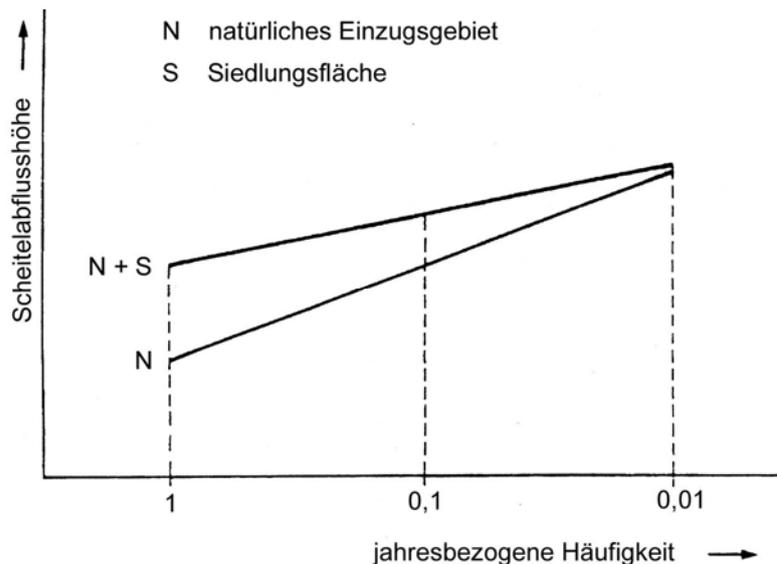


Abb. 2-8: Einfluss von Siedlungsabflüssen auf die Scheitelabflüsse eines Gebietes bei verschiedenen Niederschlagshäufigkeiten (KA 1999: 577, leicht verändert).

So lässt sich auch erklären, dass Siedlungsabflüsse insbesondere zur Zunahme kleinerer Hochwasserereignisse beitragen (KA 1999: 577). Auch hierbei spielt die Größe des betrachteten Gebietes eine maßgebliche Rolle. Der Scheitelabfluss einer bewirtschafteten Siedlungsfläche kann wieder auf ihren Ausgangszustand gebracht werden. Auch Hochwasser erzeugende Niederschläge können bewirtschaftet werden (s. ZIMMERMANN 2001), d. h. dass lokal der Schutz vor einem 100-jährlichen Ereignis nach Reduzierung der Siedlungsabflüsse mit geringem Aufwand hergestellt oder darauf verzichtet werden kann (ØVERLAND 2005: 59).

In kleinen Einzugsgebieten sind nach ASSMANN & KEMPF (2005: 82) Ereignisse hoher Jährlichkeit bewirtschaftbar, jedoch nur bei gleichzeitig kurzen Dauerstufen (konvektiv). Eine überregionale Wirkung schließen sie aus. SIEKER, ZIMMERMAN & SOMMER (2005: 12) halten der oben getroffenen allgemeinen Aussage entgegen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Wiederkehrzeit von Niederschlagsereignissen und der Reduzierbarkeit von Scheitelabflüssen nicht vorliegt. Dies zeigen sie (2005: 10) an einer nach Größe der Ereignisse geordneten Liste aller Hochwasserereignisse an der Glems (195 km²) von 1966 - 1995 der sie die simulierten Scheitelabminderungen gegenüberstellen. Dabei verteilen sich die Scheitelabminderungen unregelmäßig ohne erkennbare Tendenz. Die größte Abminderung von

7,54 % wird beim fünftgrößten Ereignis erreicht. Selbst das viertgrößte Ereignis übersteigt mit 5,32 % Scheitelabminderung das kleinste Ereignis mit 5,25 % Abminderung. SIEKER, ZIMMERMAN & SOMMER (2005: 12) erklären dies durch die örtlich ungleichmäßige Verteilung der Retentionsanlagen im Gebiet und der ungleichmäßigen Überregnung des Gebietes. SIEKER (2005: 8) spricht dezentralen Maßnahmen in Siedlungsgebieten eine signifikante Wirkung auf extreme Hochwasser zu, die hinsichtlich der Rückhaltekapazität flussbaulichen Maßnahmen wie Polder oder Deichrückverlegungen in nichts nachstehen. Nach Untersuchungen im Gebiet der Mulde (6200 km², 10 % Siedlung) kommen WILCKE, SIEKER, ZHENG YUE & SIEKER (2007: 259) zu dem Schluss, dass bei der Möglichkeit, den Abfluss un bebauter Flächen mittels Retentionsanlagen zu unterschreiten, auch in großen Einzugsgebieten Hochwasser reduziert werden können und darüber hinaus „vorbeugend auch [ein] Beitrag zur Kompensation der Folgen eines mutmaßlichen Klimawandels und den damit verbundenen Verschärfungen der Regenabflüsse“ geleistet werden kann.

Von den neun in DWA (2006b: 53 - 100) aufgeführten Fallbeispielen untersuchen fünf den Einfluss zunehmender Versiegelung und/oder Abkopplungsmaßnahmen auf den Hochwasserabfluss. Zwei Untersuchungen setzen dabei Abkopplung mit Entsiegelung gleich. Die dabei nicht beachteten Effekte von Mulden- und Rigolenspeicherung sowie Versickerung führen vermutlich zu abweichenden Angaben zur Scheitelabminderung. Drei Untersuchungen widmen sich kleinen Einzugsgebieten, die übrigen zwei Untersuchungen fokussieren große Einzugsgebiete. Darüber hinaus sind der Autorin jeweils zwei weitere Untersuchungen die Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten betreffend in kleinen und großen Einzugsgebieten bekannt.

Tabelle 2-1 listet sämtliche vorliegenden Untersuchungen auf, welche sich auf Retentionsmaßnahmen im Siedlungsbereich und deren Auswirkung auf den Abfluss im Vorfluter beziehen. Sechs Untersuchungsgebiete sind < 500 km², nur die sächsische Mulde mit 6200 km² und einige Teil-Einzugsgebiete des Rheins repräsentieren große Einzugsgebiete. Die wichtigsten Ergebnisse und Aussagen werden im Folgenden kurz zusammengefasst:

Die untersuchten kleinen Einzugsgebiete weisen einen Siedlungsanteil von 7,4 % bis 32 % auf. KOEHLER (2005: 120 und zit. in DWA 2006b: 93) konnte bei Abkopplung von 20 % der Siedlungsfläche für Ereignisse geringer Jährlichkeit (HQ_{≤1}) Scheitelabminderungen zwischen 15 % und 25 % nachweisen. NIEHOFF (2002: 108) simulierte 54 % Entsiegelung und unterschied dabei advective Ereignisse mit 0 - 8 % Abminderung und konvektive Ereignisse mit einer höheren Abminderung von 15 - 25 %, die auf der geringeren Vorfeuchte der Böden und den meist geringeren Niederschlagsmengen beruhen. Des Weiteren wurden in kleinen Einzugsgebieten (26,5 - 583 km²) Ereignisse mittlerer bis hoher Jährlichkeit (HQ₂₀₋₁₀₀) untersucht. Die Scheitelabminderung sinkt hier merklich auf Werte zwischen 1,5 - 7,54 %, wobei die Werte bei einem Jahrhunderthochwasser deutlich unter 5 % bleiben.

Tab. 2-1: Übersicht über bisherige Untersuchungen zur Wirkung dezentraler Maßnahmen in Siedlungsgebieten.

Gebiet	Größe [km ²]	Siedlungsanteil / Versiegelungsgrad [%] / [%]	Maßnahme	HQ	Wirkung (Scheitelabminderung in %)	Modell	Quelle
Hengstbach	26,5	32 / 65	11 % Abkopplung (5 - 35 %)	50	3	HYBNAT	DWA 2006b
Holzbach	29	9 / 35	35 % Abkopplung	~20 ¹ ~100 ²	1,5 - 2,4 2,3	STORM + NASIM	Sieker 2001b in: DWA 2006b
Lein	115	7,4 / 35	54% Entsiegelung	2-8	konvektiv: 15 - 25 advektiv: 0 - 8	WASIM-ETH	Niehoff 2002
Glems	195	16 / k. A.	15 % Abkopplung 27 % Abkopplung	20	3,31 7,54	STORM	Sieker, Zimmerman & Sommer 2005
Teil-EZG des Oberrheins	rund 200	20 / 10	15 % Abkopplung 27 % Abkopplung	50	3,4 4,8	STORM + NASIM	Sieker, Sieker, Zimmerman & Sommer 2004
Rems	583	15,8 / k. A.	20 % Abkopplung ³	10 - 100 ≤ 1	<5 1 - 3 15 - 25	FGMOD	Koehler 2005 und Koehler 1998 in: DWA 2006b
Teil-EZGe des Rheins:	600-27100	12 - 19 / 27	1,32 % Abkopplung	1, (2-10)	Sommer : 2,5 Winter: <1	HBV-Modell	Bárdossy & Hundecha 2002 in: Bronstert et al. 2001 und DWA 2006b
Mulde	6200	10 / 60	15 % Abkopplung	k. A.	Speichervolumen: 3,16 Mio m ³ = 363 m ³ /ha dezentral bewirtschaftete Siedlung, nicht unerhebliches Rückhaltepotential	STORM	Sieker & Wilcke 2006
Rhein	190000	20 / 35	1,3 % Entsiegelung	k. A.	k. A.	k. A.	Bronstert et al. 2001

¹ 75 mm in 24h² >230 mm³ 50 % Abkopplung von 40 % der Siedlungsfläche

Nur für ein großes Teil-Einzugsgebiet des Rheins (Gebiet und Größe nicht benannt) mit einem Siedlungsanteil zwischen 12 % und 19 % wurde die Auswirkung von Abkopplungs-

maßnahmen für Ereignisse geringer Jährlichkeit (HQ_{1-10}) untersucht. Hier berechneten BÁRDOSY & HUNDECHA (2002, zit. in DWA 2006b: 80f) Scheitelabminderungen von etwa 2,5 % im Sommer und weniger als 1 % im Winter.

SIEKER & WILCKE (2006) untersuchen zwar das 6200 km² große Gebiet der Mulde und attestieren dezentralen Maßnahmen „ein nicht unerhebliches Potential“ (SIEKER & WILCKE 2006: 31), geben aber nicht an wie sich eine Abkopplung von 15 % auf den Scheitelabfluss auswirkt.

Naturnahe Maßnahmen zur Bewirtschaftung von Niederschlagswasser in Siedlungsgebieten gelten auch als Maßnahmen zur Hochwasservorsorge. Pauschale Aussagen darüber, ob dezentrale Maßnahmen (auch solche in land- oder forstwirtschaftlich genutzten Gebieten) ausreichenden Schutz vor einem Hochwasserereignis bieten, sind jedoch nicht möglich. Der individuell spezifischen naturräumlichen Ausstattung eines Gebietes ist nach wie vor durch eine detaillierte Untersuchung Rechnung zu tragen. Die KA (1999: 577) fordert, hierzu ein mathematisches Simulationsmodell zu verwenden, das die Abflusskomponenten der Siedlungsflächen und die des natürlichen Gebietes hinreichend detailliert wiedergibt. Im Sinne der Nachhaltigkeit sind bei der Entscheidungsfindung neben der Schutzwirkung einer Maßnahme und finanziellen Aspekten auch positive und negative Auswirkungen auf den Naturhaushalt gegeneinander abzuwägen. Zentrale Maßnahmen sind dabei nicht generell auszuschließen. Jeder Maßnahmentyp hat seine Stärken und Schwächen, die es gezielt einzusetzen gilt.

Die Literaturstudie spricht für ein relativ junges Forschungsthema und zeigt, dass bislang erst wenige Untersuchungen zur Wirkung dezentraler Maßnahmen in Siedlungsgebieten auf das Abflussgeschehen im Vorfluter vorliegen und weiterer Forschungsbedarf besteht. Zwecks besserer Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse sollten künftige Veröffentlichungen folgende Angaben enthalten: Gebietsbezeichnung, Größe, Lage zum Vorfluter, Gelände-neigung, Geologie, Durchlässigkeit der Böden, Anteil der Siedlung, Versiegelungsgrad, betrachtete Maßnahme, zur Dimensionierung gewählter Bemessungsregen, betrachtete Wiederkehrzeit (HQ_x) und insbesondere die Wirkung der Maßnahme auf die Abflussganglinie als Scheitelabminderung ($\Delta HQ/HQ$) und Volumenverringerung, jeweils in %. Gerade bei der Angabe der im Vordergrund stehenden Wirkung dezentraler Maßnahmen sind die betrachteten Parameter bisher sehr unterschiedlich und meist nicht miteinander vergleichbar. Da bei der Planung Hochwasser reduzierender Maßnahmen meist ein bestimmtes Schutzziel angestrebt wird, ist die Angabe des jeweils erreichbaren Schutzzieles (z. B. HQ_{50}) wünschenswert.

2.3 Hydrologische Modelle

Natürliche Systeme sind zu komplex, als dass sie in ihrer Gesamtheit dargestellt werden können. Daher finden durch Abstraktion vereinfachte Darstellungen der Wirklichkeit Verwendung. Diese so genannten konzeptionellen Modelle dienen dem Erklären von Sachverhalten

sowie dem Ermitteln und Überprüfen von Hypothesen. Bei der Erstellung eines Modells werden für wesentlich erachtete Eigenschaften hervorgehoben und als nebensächlich angesehene Aspekte außer Acht gelassen (BROCKHAUS 1998, zit. in BUCHHOLZ 2001: 1). N-A-Modelle beschränken sich daher auf eine Auswahl von Objekten, Parametern und Beziehungen, die als relevant für den Abflussbildungsprozess angesehen werden, wobei unterschiedliche Modelle in ihrem Aufbau von einfach bis sehr komplex variieren können, je nachdem wie viele Parameter berücksichtigt werden. REFSGAARD (1997: 91ff) warnt jedoch davor, der Genauigkeit des Modells wegen so viele Parameter wie möglich zu verwenden, da dies zu einem enormen Aufwand hinsichtlich der Datenbeschaffung und hohem Zeitbedarf führt. Die Kalibrierung eines solchen Modells kann dann zu einer never-ending-story führen, da Verbesserungen immer möglich sind. Besser ist es, sich für ein Modell zu entscheiden, das auf die Fragestellung des Nutzers ausgerichtet ist und die dafür relevanten Prozesse hinreichend genau beschreibt. Eine vollkommene Darstellung auch nur eines einzelnen Modellbausteins ist ohnehin nicht möglich. Auch sehr komplexe Modelle bilden die Realität nicht vollständig ab, weshalb Modelle die in der Natur beobachteten Prozesse nie vollständig wiedergeben können (vgl. REFSGAARD & STORM 1996: 53).

Als Modell werden in der Literatur sowie in der vorliegenden Arbeit sowohl die in einem Programm bereitgestellte Modellstruktur als auch die mittels dieser Struktur nachgebildete Darstellung eines Einzugsgebietes bezeichnet.

2.3.1 Modellklassifikation

Hydrologische Simulationsmodelle können hinsichtlich mehrerer Merkmale unterschieden werden, die im Folgenden in einer Übersicht kurz dargestellt werden sollen. Eine ausführlichere Beschreibung findet sich z. B. in BRONSTERT (2000), BUCHHOLZ (2001: 180ff) und REFSGAARD (1996).

- **Deterministische, statistische oder deterministisch-stochastische Modellgrundlage:** Während bei der deterministischen Grundlage ein eindeutiges Ursache-Wirkungs-Prinzip (Niederschlag verursacht Abfluss, Input – Output) vorausgesetzt wird, bleibt eine Prozessbeschreibung beim zweiten Ansatz aus. Hier wird anhand statistischer Merkmale der betrachteten Prozesse ein Zusammenhang hergestellt, der eine zufällige Komponente beinhaltet. Bei gleichen Inputdaten können dann unterschiedliche Outputdaten erzeugt werden. Die deterministisch-stochastische Modellgrundlage kombiniert beide Ansätze.
- **Konzeptioneller Hintergrund:** Hier werden empirische, system-theoretische und physikalisch begründete Modellansätze unterschieden. Während der empirische Ansatz auf Erfahrungen und/oder Messungen beruht, müssen für den system-theoretischen Ansatz Messdaten von Input und Output vorliegen oder die Modellparameter müssen für vergleichbare Bedingungen übertragbar sein. Physikalisch begründete Ansätze erheben den Anspruch, auf physikalischen Gesetzen zu beruhen. Die Prozessfunktionen basieren

demnach auf physikalischen Erhaltungs- und Gleichgewichtsbedingungen (BUCHHOLZ 2001: 182). Insbesondere räumliche Variabilitäten können auf diese Art jedoch nicht erfasst werden, weshalb solche Ansätze nicht als streng physikalisch begründet anzusehen sind.

- **Räumliche Betrachtungsweise:** Bei flächenaggregierten Modellen (lumped models) wird das betrachtete Gebiet nicht unterteilt, während flächendetaillierte Modelle (distributed models) eine räumliche Unterteilung naturräumlicher Art (z. B. Teileinzugsgebiete, Flächennutzung etc.) oder Raster basiert ermöglichen, um so der räumlichen Variabilität von Gebietsmerkmalen gerecht zu werden (REFSGAARD 1997: 70). Enthält ein Modell horizontale und vertikale Komponenten, erlaubt es eine mehrdimensionale Darstellung hydrologischer Prozesse.
- **Black-Box Modelle** sind empirische Modelle, die auf der Zeitreihenanalyse von Input und Output basieren. **White-Box Modelle** sind dagegen physikalisch basiert. Die Parameter können durch Messungen bestimmt werden. Konzeptionelle Modelle liegen zwischen diesen beiden Modellen und werden daher **Grey-Box Modelle** genannt.

2.3.2 Modellkalibrierung und -validierung

Zur *Kalibrierung* eines Modells werden freie Parameter solange verändert bis die gemessenen Werte mit den erhobenen Daten am besten übereinstimmen. Dabei handelt es sich um Parameter, die vom Anwender frei festgelegt werden können, da keine oder nur ungenaue Messwerte existieren (BUCHHOLZ 2001: 185). Dies sind also unbekannte unabhängige Größen wie der k_f -Wert. Dieser ist zwar messbar aber unabhängig vom gewählten Verfahren zur Messung der hydraulischen Leitfähigkeit ist es aufgrund der den Böden eigenen Heterogenität nicht möglich, einer Untersuchungsfläche einen einzigen k_f -Wert zuzuordnen (WINZIG, TÜSELMANN & BURGHARDT 1999: 1151). Aus praktischen und methodischen Gründen sollte die Anzahl der Kalibrierungsparameter klein gehalten werden (BUCHHOLZ 2001: 86 und REFSGAARD & STORM 1996: 46). Diese Anpassung des Modells kann manuell nach der Trial-and-Error-Methode oder automatisiert auf Grundlage numerischer Algorithmen erfolgen, wobei erstere das am häufigsten angewandte und empfohlene Mittel der Wahl ist. Als Hilfsmittel zur Beurteilung der Modellanpassung wird die graphische Visualisierung gemessener und simulierter Daten empfohlen (REFSGAARD & STORM 1996: 47f).

Bei der *Modellvalidierung* wird dann überprüft, ob die Prozesse des Realsystems auch für Zeiträume oder Gebiete, für die das Modell nicht kalibriert wurde, richtig wiedergegeben werden. Üblicherweise wird daher nicht der komplette Datensatz zur Kalibrierung verwendet, sondern geteilt. Ein Teil dient der Kalibrierung, der andere der Validierung. KLEMEŠ (1986: 18ff) unterscheidet vier Verfahren:

- **split-sample test:** Bei diesem Verfahren wird ein Datensatz in zwei Teile aufgeteilt. Für den ersten Teil wird das Modell kalibriert, an dem zweiten validiert. Hierfür ist eine ausreichend lange Datenreihe erforderlich. REFSGAARD & STORM (1996: 50) nennen hier 6 - 10 Jahre. In neu instrumentierten Untersuchungsgebieten liegt solch eine Zeitreihe jedoch nicht vor. Außerdem eignet sich der Test nicht für Gebiete, die während des Messzeitraumes Veränderungen (z. B. Landnutzungswandel) unterlagen.
- **differential split-sample test:** Unterliegt das Untersuchungsgebiet einer bestimmten Veränderung, so muss das Modell den Abfluss auch unter diesen Bedingungen hinreichend genau wiedergeben können. Stehen beispielsweise klimatische Änderungen im Mittelpunkt der Fragestellung, so wird das Modell anhand einer feuchten Periode kalibriert und anhand einer Trockenperiode validiert (oder umgekehrt).
- **proxy-basin test:** Sollen für ein Gebiet ohne Messdaten Vorhersagen gestellt werden, kommt dieses Verfahren zum Einsatz. Dazu muss ein Modell für ein Einzugsgebiet kalibriert und an einem anderen erfolgreich validiert sein.
- **proxy-basin differential split-sample test:** Bei diesem Verfahren wird das Modell zunächst für eine Periode eines beliebigen Gebietes kalibriert. Die Validierung erfolgt dann an einer Periode mit anderen Bedingungen eines anderen Gebietes.

Die genannten Verfahren unterscheiden sich von Simulationen, die für das gleiche Gebiet durchgeführt werden, das zur Kalibrierung diente von solchen, die auf Einzugsgebiete übertragen werden, für die keine Messdaten vorliegen (ungauged catchments). Zum anderen wird differenziert nach Gebieten mit stationären und veränderlichen Standorteigenschaften. In der aufgeführten Reihenfolge nehmen die Verfahren in ihrer Komplexität zu (REFSGAARD & STORM 1996: 50).

Zur *Bewertung der Modellgüte* existieren mehrere statistische Prüfgrößen. In der vorliegenden Arbeit wird zum einen der Korrelationskoeffizient r verwendet. Dieser zeigt den linearen Zusammenhang zwischen den simulierten und gemessenen Werten an unter der Annahme, dass die Daten normal verteilt sind.

$$r = \frac{\sum (gem - \overline{gem}) \cdot (sim - \overline{sim})}{\sqrt{\sum (gem - \overline{gem})^2 \cdot \sum (sim - \overline{sim})^2}} \quad [-] \quad (2-1)$$

mit

gem = gemessener Wert
 sim = simulierter Wert

\overline{gem} = Mittelwert der gemessenen Werte
 \overline{sim} = Mittelwert der simulierten Werte

Nach CHADDOCK (zit. in MANIAK 2005: 200) lässt sich der Grad der Korrelation wie folgt bewerten (s. Tab. 2-2):

Tab. 2-2: Bewertung des Korrelationskoeffizienten nach Chaddock (zit. in MANIAK 2005: 200).

$r < 0,3$	sehr gering
$0,3 < r < 0,5$	mäßig
$0,5 < r < 0,7$	deutlich
$0,7 < r < 0,9$	eng
$0,9 < r < 1,0$	sehr eng
$r = 1,0$	funktional

Zum anderen wird das am häufigsten verwendete Bestimmtheitsmaß R^2 angewendet. Es handelt sich um das Quadrat des Korrelationskoeffizienten und stellt ein Maß für den Anteil der erklärten Varianz eines Zusammenhangs dar (DYCK & PESCHKE 1995: 511f, GIERTZ 2004: 133). Das Bestimmtheitsmaß sagt also aus, wie viel Prozent der simulierten Werte sich auf einen linearen Zusammenhang mit den gemessenen Werten zurückführen lassen. Während r einen Wert zwischen -1 bis 1 annehmen kann, beträgt der Wertebereich für R^2 lediglich 0 bis 1, wobei 1 die vollkommene Übereinstimmung der simulierten Werte mit den erhobenen Daten bedeutet.

Als weiteres Kriterium nennt BUCHHOLZ (2001: 84) die Volumenabweichung DV :

$$DV = \frac{V_{sim} - V_{gem}}{V_{gem}} \quad [\%] \quad (2-2)$$

mit

DV = Volumenabweichung [%]

V_{sim} = gemessenes Abflussvolumen [m^3]

V_{gem} = simuliertes Abflussvolumen [m^3]

Die Modellgüte ist umso besser, je kleiner DV ist. Die gleiche Berechnung wurde in der vorliegenden Arbeit auf die Abflussspitzen angewandt, da neben dem Rückhalt des Oberflächenwassers (als Volumen in m^3) auch die Abminderung der Scheitelabflüsse untersucht wird.

2.4 Modellrelevante Prozesse

Als modellrelevant gelten sämtliche Prozesse und Größen, die an der Abflussbildung beteiligt sind. Zusammenfassend sind dies die Prozesse des lokalen Wasserkreislaufs, welche in der Literatur vielfach beschrieben sind. Als deutschsprachige Quellen sei an dieser Stelle auf die Literaturstudie zu den Abflussbildungsprozessen bei Hochwasser durch LEIBUNDGUT & UHLENBROOK (1997), die Beschreibung der Abflussbildungsprozesse durch BRONSTERT

(2005) und die kommentierte Bibliographie zur Abflussbildung von MENDEL (2000) hingewiesen. Sie dienen, soweit nicht anders vermerkt, als Grundlage für die folgende kurze Beschreibung der modellrelevanten Parameter und Prozesse. In Abb. 2-9 werden die genannten Prozesse am Beispiel eines Hangs dargestellt (BRONSTERT 2005: 8).

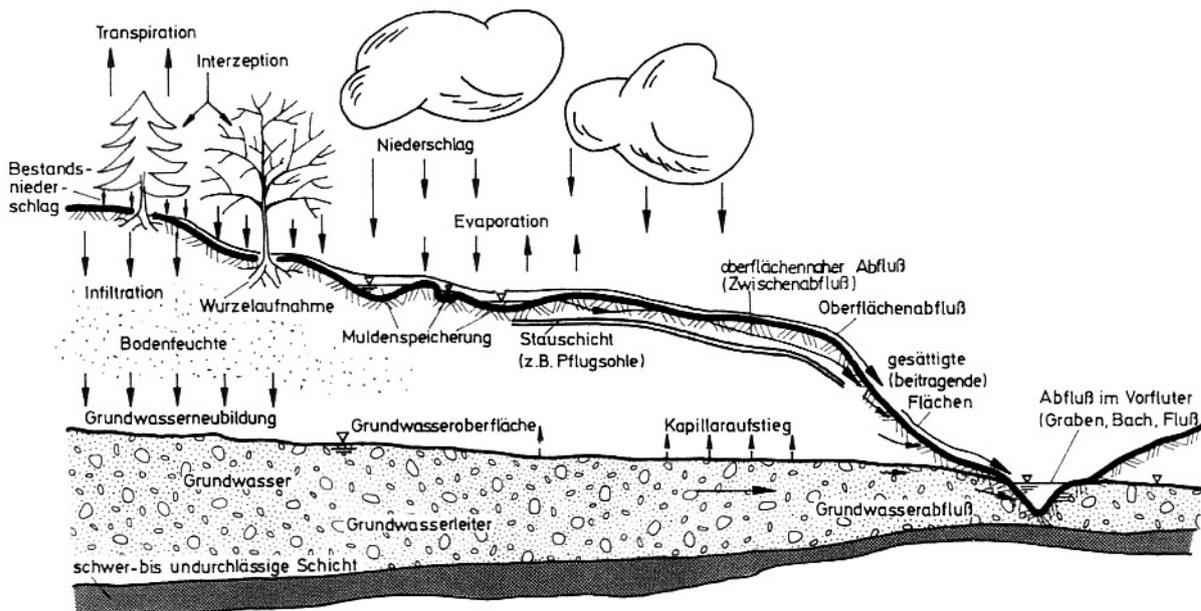


Abb. 2-9: Vereinfachte Darstellung der Abflussbildung im Hangmaßstab (BRONSTERT 2005: 8).

2.4.1 Niederschlag, Interzeption, Transpiration und Evaporation

Am Anfang der Abflussbildung steht der Niederschlag, der insbesondere in Form von Regen oder Schnee auf Vegetation und Boden fällt. Niederschlag, der an der Oberfläche der Pflanzen haften bleibt (*Interzeption*), verdunstet mit der Zeit (*Interzeptionsverdunstung*). Der Teil, der den Boden erreicht, wird *Bestandsniederschlag* genannt. Wasser, das die Pflanzen aufnehmen, gelangt aufgrund deren Atmung (*Transpiration*) ebenfalls wieder in die Atmosphäre. Die Größe der Verluste durch Interzeption und Transpiration ist abhängig von der Pflanzengesellschaft, der Bestandsdichte und insbesondere bei Waldgesellschaften von deren Alter. Auch von Boden- und freien Wasseroberflächen kann Wasser verdunsten (*Evaporation*). Die Summe dieser Prozesse wird als *Evapotranspiration* bezeichnet. Laut HELBIG (2002: 26ff) sind es im Raum Trier 66 % des Niederschlags, die aufgrund der genannten Prozesse hydrologisch nicht wirksam werden. Der Rest kann versickern oder oberflächlich abfließen. Eine Sonderstellung nimmt Schnee ein. Er wird zunächst an Pflanzen- und Bodenoberfläche gespeichert. Auch hier kann ein Teil verdunsten. Zu Versickerung und/oder Abfluss kommt es erst bei Eintritt der Schneeschmelze und/oder einsetzendem Niederschlag.

2.4.2 Oberflächenabflussprozesse

Der Teil des Niederschlags, der auf die Bodenoberfläche gelangt, versickert oder sammelt sich oberflächlich in Mulden, in denen das Wasser ebenfalls mit der Zeit versickern oder verdunsten kann. Übersteigt die Regenintensität die Infiltrationskapazität oder ist die obere Bodenzone wassergesättigt, dann fließt das Wasser dem Gefälle des Geländes folgend an der Oberfläche ab. Im ersten Fall ist von *HORTON'schem Abfluss* die Rede, im zweiten von gesättigtem Oberflächenabfluss oder *Sättigungsflächenabfluss* (saturated overland flow) infolge Sättigungsüberschuss. HORTON'scher Abfluss tritt ein, wenn der Boden wenig durchlässig ist. Dies kann Folge von Verschlammung, Verkrustung und Verdichtung sein. Im Extremfall handelt es sich um eine vollständig versiegelte Oberfläche. Doch auch der Benetzungswiderstand der Bodenpartikel einer ausgetrockneten Bodenoberfläche oder die Hydrophobizität von Moos und Wurzelfilz kann v. a. zu Beginn eines Niederschlagsereignisses Infiltrationshemmnisse verursachen (MENDEL 2000: 24, SCHOBEL, ALTMEIER, SCHNEIDER & SCHRÖDER 2002: 119). Sättigungsflächenabfluss wird insbesondere in Talauen und an Hangfüßen beobachtet und tritt umso schneller ein, je höher die Vorfeuchte des Bodens vor Ereignisbeginn ist (MENDEL 2000: 24).

2.4.3 Infiltration und Fließprozesse im Boden

Aufgrund der Struktur und der Schichtung von Böden werden im Boden selbst weitere Fließprozesse beschrieben. Versickert das Wasser in den Boden (*Infiltration*), werden zunächst die Feinporen gefüllt. Dort wird das Wasser gespeichert, es versickert langsam (*Matrixfluss*) oder verdunstet wieder. Während starken Niederschlagsereignissen werden auch die Makroporen gefüllt. Übersteigt die Regenintensität die Matrixleitfähigkeit, welche abhängig ist von deren Durchlässigkeit und Feuchte, kann das Wasser in den Makroporen der Gravitation folgend schnell abfließen (*Makroporenabfluss*). Es trägt zur Grundwasserneubildung bei oder tritt hangabwärts wieder an der Oberfläche aus (*return flow*). Letzteres kann an großen Bodenröhren wie Mauselöchern oder Wurzelbahnen oder entlang ausstreichender Verdichtungshorizonte beobachtet werden. Ein ähnlicher Prozess ist der *pipe flow*, das Fließen durch große Bodenröhren. Als Unterscheidungskriterium gilt allein der Durchmesser der Röhren (> 10 mm). Oft werden die pipes aber auch den Makroporen zugeordnet. Großen Anteil am Abflussvolumen eines Fließgewässers hat der *Grundwasserabfluss*. Das Grundwasser tritt dem Gefälle folgend durch Ufer und Gewässersohle in das Fließgewässer ein. Von *piston flow* ist dann die Rede, wenn vorfluterfern versickerndes Wasser einen derartigen Druckimpuls auf vorfluternahes altes Wasser ausübt, dass dieses aus der Matrix gedrückt wird. Ein ähnlicher Prozess ist das *groundwater ridging*, welches auf Talauen beschränkt ist und von LEIBUNDGUT & UHLENBROOK (1997: 30ff) näher beschrieben wird.

3 Petrisberg Trier – das Untersuchungsgebiet

3.1 Lage und naturräumliche Gliederung

Das Neubaugebiet Petrisberg ist der jüngste Stadtteil Triers, östlich des Zentrums (s. Abb. 3-3). Mit Höhen von 240 - 270 m ü. NN liegt der Petrisberg etwa 120 m über der Altstadt. Er wird daher auch als Höhenstadtteil bezeichnet. Das Untersuchungsgebiet beschränkt sich auf den ersten Bauabschnitt des Neubaugebietes und ist in Abb. 3-1 rot umrandet abgebildet. Es handelt sich um das Kopfgebiet des Brettenbachs und ist somit ein Teil-Einzugsgebiet desselben. Dieses umfasst das etwa 35 ha große oberirdische Einzugsgebiet bis zu dem mit einem Messwehr versehenen Rückhalteraum. Jener liegt unterhalb des Quellbereiches des Brettenbachs, über den die Entwässerung erfolgt. Naturräumlich betrachtet ist der Petrisberg Teil der naturräumlichen Haupteinheit „Mittleres Moseltal“ (250) und wird dem „Tarforster Plateau“ (250.02) zugeordnet (RICHTER 1984: 19, WERLE 1979: 339).

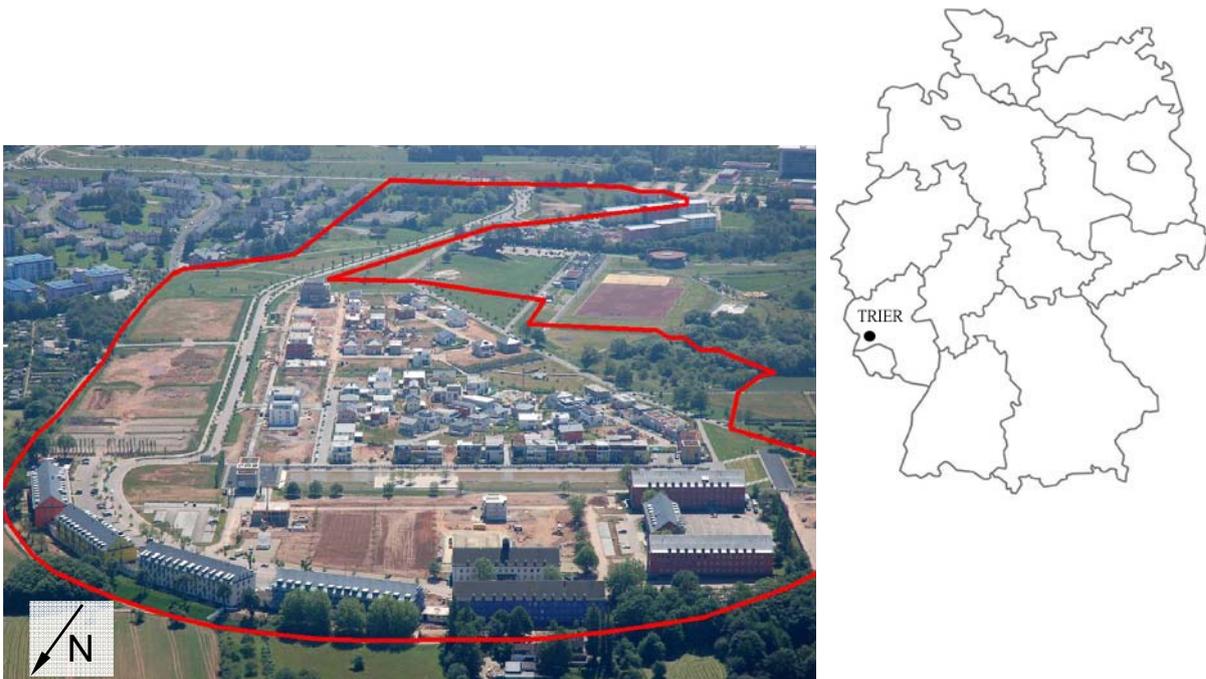


Abb. 3-1: BRD und Bundesland Rheinland-Pfalz mit der Stadt Trier und das Untersuchungsgebiet auf dem Petrisberg. (Foto: KNEISEL 2006; Karte: <http://www.kcid.de/phpwcms/index.php?id=33,63,0,0,1,0>, leicht verändert)

3.2 Geologie

Grob betrachtet, bildet die Trierer Talweite die Grenze, an der sich zwei naturräumliche Großregionen begegnen: das Rheinische Schiefergebirge und das Lothringische Stufenland (RICHTER 1984: 11). Der Verlauf von SW nach NE entspricht der variszischen Streich-

richtung. Südlich der Mosel gelegen bildet unterdevonischer Tonschiefer den Untergrund des Untersuchungsgebietes, der so genannte Hunsrückschiefer (s. Abb. 3-2).

Dieser wird stratigraphisch eingeordnet in die Ulmen-Unterstufe der Unterems-Stufe und weist milde bis schwach sandige Tonschiefer auf (NEGENDANK 1983: 14).

Das Schiefermaterial wird ab einer Höhe von etwa 235 – 240 m ü. NN von altpleistozänen Mosel-sedimenten der unteren Hauptterrasse [tmm5] überlagert. „[Sie] sind bis zu 20 m mächtig, bestehen aus geröllführendem Lehm, Sand und Kies und sind zu einem großen Teil mit Lößlehm überdeckt.“ (BGHPLAN 2002: 3) Bis zum Ende der 50er Jahre wurde im SW des Arbeitsgebietes Kies abgebaut (mündliche Mitteilung von Herrn Kaipinger, SWT Trier am 12.08.2005).

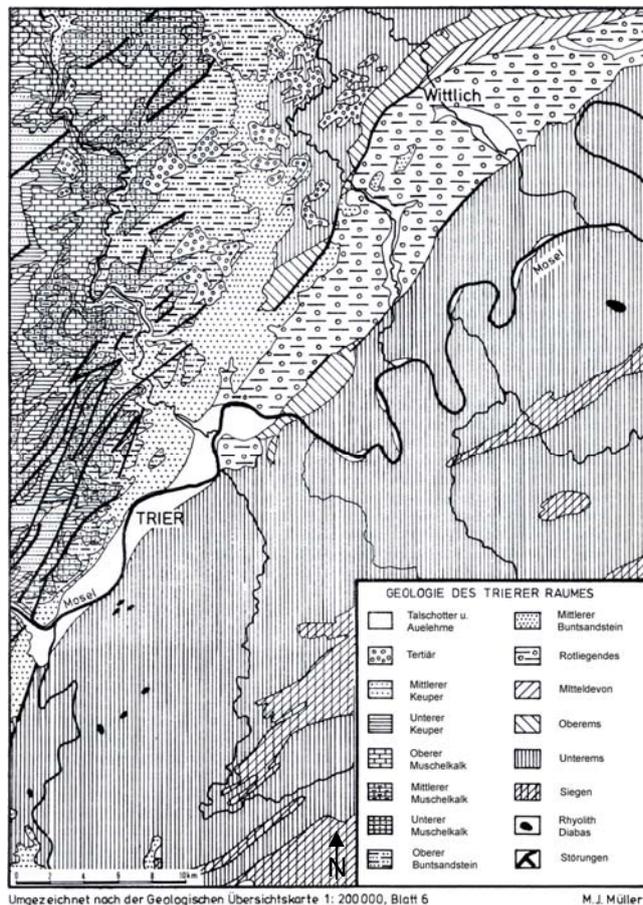


Abb. 3-2: Geologie des Trierer Raumes (MÜLLER 1976: 13, leicht verändert).

3.3 Geomorphologie

Die Mosel ist die Erosionsbasis des Oewiger Baches, in den der Brettenbach mündet. Aufgrund der Nähe des Untersuchungsgebietes zum Moseltal ist dessen Geschichte für die Morphologie des Petrisberges von Bedeutung. Im Folgenden soll daher die Morphogenese des Moseltals und seiner näheren Umgebung seit dem Quartär betrachtet werden.

Das Gebiet ist geprägt durch die Hebung des Rheinischen Schiefergebirges und die Oberflächenformung in Abhängigkeit vom Gesteinswiderstand. Charakteristisch für die Eiszeiten waren Frostverwitterung einerseits und Solifluktion in Auftauphasen andererseits. Das Abtragungsmaterial führte zur Aufschotterung des Flusstals während winterlichem Niedrigwasser. Aus diesen, während der Wintermonate der Kaltzeiten trockenen und vegetationslosen Schotterflächen, wurde Löß ausgeweht und auf den benachbarten Höhen

abgelagert, so dass er dort die Mosersedimente älterer Terrassenniveaus bedeckte (LÖHR 1998: 11, SCHNEIDER, TRESSEL & SCHRÖDER 2005: 92, SCHRÖDER 1983: 163).

Die sommerlichen Hochwasser hatten nicht genügend Transportenergie, um das breite Flussbett leer zu räumen. Die Mosel verlief daher noch wild verästelt und veränderte im Schotter ständig ihren Lauf (braided river) (MÜLLER 1979: 346). Während der Warmzeiten erhöhten Schmelzwässer die Transportkraft stark. Daher war die weitere Entwicklung des Mosellaufes und der Seitenbäche durch Tiefenerosion und rückschreitende Erosion der Talhänge geprägt.

Phasenhafte Eintiefung und Zerschneidung während des Quartärs (Pleistozän) haben ihre Spuren in Form unterschiedlicher Terrassen(-niveaus) hinterlassen. Tab. 3-1 gibt die Gliederung der Moselterrassen nach MÜLLER (1979: 346) wieder, deren Verbreitung Abb. 3-3 zeigt. Das Tarforster Plateau und damit der Petrisberg ist ein Rest der ursprünglich weiträumigen Mosel-Hauptterrasse (s. Abb. 3-3), die östlich in die Höhenzüge des Hunsrücks übergeht.

Laut NEGENDANK (1983: 112) handelt es sich um die untergeordnet auftretende Untere Moselhauptterrasse tMM 5, welche auf einem Niveau von ± 240 (235) - 260 m NN zu liegen kommt. Am Petrisberg überlagern die altpleistozänen Mosersedimente der unteren Hauptterrasse [tmm5] das Schiefermaterial ab einer Höhe von etwa 235 - 240 m ü. NN. Durch das Einschneiden der Hunsrückbäche wie Olewiger Bach, Brettenbach, Retzgrubenbach und Geisbach wurde die Hauptterrasse später aufgezehrt. Die durchschnittliche Mächtigkeit der Terrassensedimente beträgt etwa 6 bis 12 m und kann in Abhängigkeit vom präquartären Relief zum Teil sehr stark schwanken (BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG SPOO & PITTNER GMBH 1999: 8). Bedeckt sind diese von Hochflutlehm und v. a. von Lößlehm. Bei letzterem können zwei Zeitstufen unterschieden werden. Der die Terrassenkiese bedeckende, kleinflächig verbreitete Lößlehm wird dem Riß zugeordnet. SCHRÖDER (1983: 163) beschreibt diesen als rotbraun, tonig-lehmig, dicht und kryoturbar überformt. Darüber lagert eine mächtigere lößreiche Fließerde aus vorwiegend braunem Lößlehm, der dem Würm entstammt. Aus dem Vorkommen von Minette-Ooiden im Löß schließt NEGENDANK (1978: 76), dass dieser überwiegend aus dem Moselbett ausgeweht wurde (s. a. KAUSCH 2006: 58, LÖHR 1998: 11, SCHNEIDER, TRESSEL & SCHRÖDER 2005: 92, SCHRÖDER 1983: 162, vgl. WEIDENFELLER, LÖHR & ZÖLLER 1994). Aus diesem entstand erst im Zuge der Bodenbildung durch Verbraunung und Verlehmung der heutige Lößlehm. Ältere Löße sind nicht erhalten, da sie vermutlich in den vorausgegangenen Kaltzeiten abgetragen wurden.

Tab. 3-1: Bezeichnung und Lage der Moselterrassen (nach MÜLLER 1979: 346).

Bezeichnung	Höhe
	[m ü. NN]
Höhenterrasse	ca. 320
Hauptterrasse	ca. 250 - 280
Obere Mittelterrasse	ca. 170 - 200
Untere Mittelterrasse	ca. 160 - 180
Niederterrasse	ca. 125 - 140

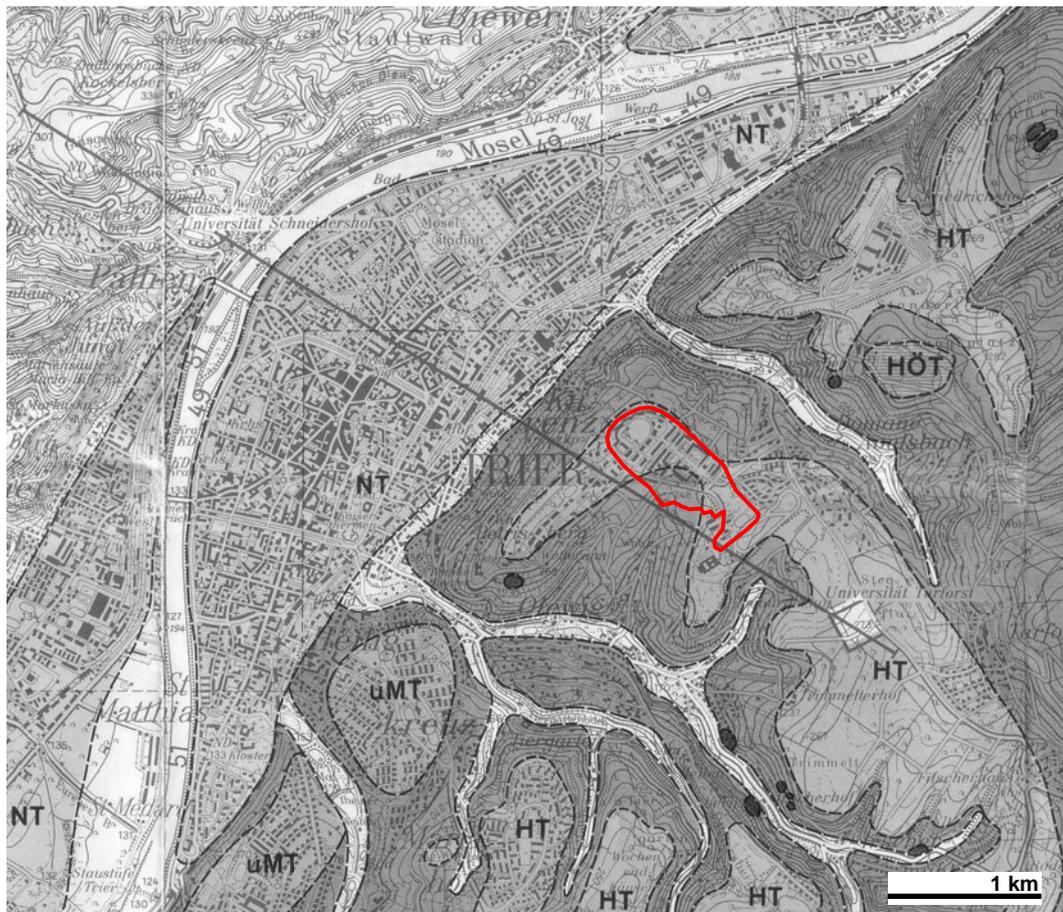


Abb. 3-3: Die Moselterrassen östlich der Stadt Trier (NEGENDANK et al. 1983, Ausschnitt), rot umrandet = Untersuchungsgebiet, HÖH = Höhenterrasse, HT = Hauptterrasse, uMT = untere Mittelterrasse, NT = Niederterrasse.

Heute bildet die Mosel in dem breiten Sohllental der Trierer Talweite sehr große Mäander aus. Gleit- und Prallhänge fehlen, da der im NW anstehende Sandstein leichter erodiert wird als Tonschiefer. Auf den heutigen Resten der Hauptterrasse liegen die Stadtteile Mariahof, Kernscheid, Irsch, Tarforst und Petrisberg (SCHNEIDER, TRESSEL & SCHRÖDER 2005: 83).

Die Hänge des Petrisbergs fallen nach NW zur Altstadt, nach N zum Aveler Tal und nach S zum Olewiger Tal hin mit Neigungen bis über 40 % steil ab, nach Tarforst (W) und zum Brettenbachtal (NE) hin sind die Hänge dagegen mit 12 % nur mäßig geneigt (BGHPLAN 2002: 2f).

Zum Untersuchungsgebiet im Bereich der heutigen Versickerungsmulden (auch als Quellmulden bezeichnet) lässt sich Folgendes anfügen: Während des Holozäns unterlag es nachweislich sowohl erosiven als auch akkumulativen Prozessen². So erfolgte z. B. die Anlage bereits hauptterraszenzeitlich, als ein Seitenarm des braided river (KONZ 2003) eine von N nach S verlaufende Erosionsrinne schuf. Diese wurde im Zuge von Profilgrabungen

² Soweit nicht anders gekennzeichnet beruhen die im Folgenden gemachten Angaben auf Informationen von Herrn Dr. H. Löhr (Rheinisches Landesmuseum Trier). (Gespräche im Dezember 2006 und Januar 2007)

durch das Rheinische Landesmuseum Trier im Jahr 2002 teilweise erfasst. Sie enthält bronzezeitliche Kulturgerölle, die aus einer Auffüllungsphase entsprechender Zeitstellung stammen. Eine weitere, spät- oder nachrömische Erosionskante schließt südwestlich an die Reste eines römischen Fundamentes an (s. a. Kapitel 3.6) und erklärt das ab hier fehlende Mauerwerk. Östlich des Fundamentes findet sich ebenfalls eine Erosionsböschung, die nach KONZ (2003: 58) durch ein extremes Erosionsereignis geschaffen wurde, da sie in den Ablagerungen Steine mit einem Durchmesser von mehr als 7 cm fand. Als dominierendes Liefermaterial für die Auffüllung kommt nordwestlich anstehender Lößlehm in Frage. Dieses Gebiet weist noch heute das deutlich höchste Gefälle zum Bereich der Quellmulden auf. Mehrere kolluviale Schichten verfüllten die Erosions-Hohlformen. Spuren der Bronze- und Römerzeit lassen auf eine ackerbauliche und somit erosionsfördernde Nutzung des Gebietes schließen. Ein erhaltener, leicht nach Osten abfallender Ap-Horizont zeigt, dass hier auch vor 1938 noch Landwirtschaft betrieben wurde. Im Zuge des Kasernenbaus wurde der Muldenbereich meterhoch aufgefüllt und planiert. Das heutige Niveau der unteren Versickerungsterrasse der so genannten Quellmulden liegt etwa 25 cm unter der römischen GOK, die der mittleren 60 - 70 cm unter dem Ap-Horizont der Zeit vor 1938.

3.4 Hydrographie

„Im Übergangsbereich der wasserdurchlässigen Sande und Kiese zu den wasserstauenden Verwitterungsprodukten des Hunsrückschiefers treten häufig Hangschichtquellen auf. Dadurch bedingte typische Vernässungsbereiche sind in der Quellmulde des Brettenbaches, in der Quellmulde des Geisbaches [...] sowie im Wald südlich vom Franzensknüppchen anzutreffen.“ (BGHPLAN 2002: 3) Letztere befinden sich am SW-NE-verlaufenden Westrand des Petrisbergs zwischen 180 - 230 m ü. NN (BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG SPOO & PITTNER GMBH 1999b: 8).

Der gering durchlässige Untergrund und die teils hohen Hangneigungen lassen auf einen raschen Oberflächenabfluss schließen. Die unausgeglichene Wasserführung der drei den Petrisberg entwässernden Bäche ist durch zeitweise sommerliches Austrocknen und kurzzeitige Spitzenabflüsse bei Starkniederschlägen gekennzeichnet.

Der Brettenbach zeigt sich am Oberlauf außer an Wegequerungen naturnah. Unterhalb des Quellbereichs befindet sich ein Regenrückhaltebecken, das aufgrund angeschwemmter Sedimente als solches nicht mehr zu erkennen ist. Der Auslass des Beckens ist als Schachtbauwerk (sog. Mönchsbauwerk) gestaltet, ein senkrecht eingebautes Betonrohr (DN 1000) von 1,80 m Tiefe, mit elf kreisrunden Bohrungen, durch die das Wasser seitlich einströmen kann. Ab hier fließt der Brettenbach ins Tal. Der Quellbereich ist nach §24 LPflG geschützt.

Im Zuge von Renaturierungsmaßnahmen im Sommer 2001 wurde der Brettenbach auf einer Strecke von 300 m von Halbschalen befreit und das Bachbett aufgeweitet. Vor der Mündung

in den Olewiger Bach ist der Brettenbach auf 250 m verrohrt. Die Mündung selbst liegt unterhalb des hochwassergefährdeten Teiles der Ortschaft Olewig. Mittels Driftkörpermethode wurde im März 2002 oberhalb der Brettenbachsiedlung ein mittlerer Abfluss von 18 l/s ermittelt (BGHPLAN 2002: 7).

Grundwasser konnte bei Bohrungen bis in 4 m Tiefe nicht festgestellt werden. „Geringe nutzbare Grundwasservorkommen sind in Quellfassungen im Brettenbachtal vorhanden sowie in einem Tiefbrunnen unter dem ehemaligen französischen Militärhospital. (BGHPLAN 2002: 3)“ Teilweise wurden im verwitterten Tonschiefer Kluftgrundwasserleiter gefunden. Bis in 23,5 m Tiefe traten keine reichen Grundwasservorkommen auf (BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG SPOO & PITTNER GMBH 1999b: 8, 21).

Die in den Quellmulden und jene unterhalb davon gelegenen Grundwassermesspegel sind während des Untersuchungszeitraums (August 2005 - April 2006) nicht trocken gefallen. Der Grundwasserleiter ist gering mächtig, jedoch in der Lage, die Quelle des Brettenbachs zu speisen, welcher im beobachteten Zeitraum (Dezember 2004 bis April 2006) ebenfalls stets Wasser führte.

3.5 Böden

Auf Hunsrückschiefer vorherrschende Bodentypen sind steinige, lehmige Braunerden. Typisch für Unterhänge sind Schieferschutt-Hanglehm-Decken über Tonschiefer. Dort, wo Kiese und Sande der Hauptterrasse den Tonschiefer überlagern, sind diese in der Regel mit Lößlehm bedeckt und zum Teil vermischt. Staunässebeeinflusste Parabraunerden haben sich zumeist zu Pseudogleyen entwickelt.

Zwei zugängliche Bodenprofile im nordwestlich gelegenen Wäldchen des Petrisberges können näher beschrieben werden. Beide spiegeln die wechselvolle Entwicklungsgeschichte der Böden auf devonischem Hunsrück im Trierer Raum wider. Der anstehende Schiefer wird flächendeckend von Schieferschuttdecken überzogen. Diese führen in der Basislage nur Schieferschutt oder Reste des Graulehms und enthalten in der Mittel- und Hauptlage Lößlehm. Der eingeregelte Skelettanteil kennzeichnet sie als Ergebnis pleistozäner Solifluktion. Des Weiteren sind die Böden sehr dicht (SCHNEIDER, TRESSEL & SCHRÖDER 2005: 87). Aus diesen meist löblehmhaltigen Tonschiefer-Fließerden mit wechselnden Anteilen von Grauwacken- und Quarzitverwitterungsmaterial gingen Ranker, Braunerden und Pseudogleye hervor.

Ah: 0-7 cm, schluffiger Lehm, schwach kiesig-grusig (2-10 Vol.-%), Krümelgefüge, mittel humos (2-5 M.-%), sehr geringe Lagerungsdichte ($< 1,4 \text{ g/cm}^3$), stark durchwurzelt (11-20 Feinwurzeln/cm²), 7,5 YR 4/3

rAp: 7-23 cm, schluffiger Lehm, schwach kiesig-grusig (2-10 Vol.-%), Subpolyederggefüge, mittel humos (2-5 M.-%), geringe Lagerungsdichte ($1,4\text{-}1,6 \text{ g/cm}^3$), stark durchwurzelt (11-20 Feinwurzeln/cm²), 7,5 YR 4/3

Bv: 23-47 cm, schluffiger Lehm, mittel kiesig-grusig (10-25 Vol.-%), Subpolyederggefüge, sehr schwach humos ($< 1 \text{ M.-%}$), mittlere Lagerungsdichte ($1,6\text{-}1,8 \text{ g/cm}^3$), mittel durchwurzelt (6-10 Feinwurzeln/cm²), 7,5 YR 4/6

II Cv: 47-100 cm, schwach schluffiger Ton, stark steinig (25-50 Vol.-%), Polyederggefüge, hohe Lagerungsdichte ($1,8\text{-}2,0 \text{ g/cm}^3$), schwach durchwurzelt (3-5 Feinwurzeln/cm²), vereinzelt Wurzeln bis 90 cm, 2,5 YR 4/6

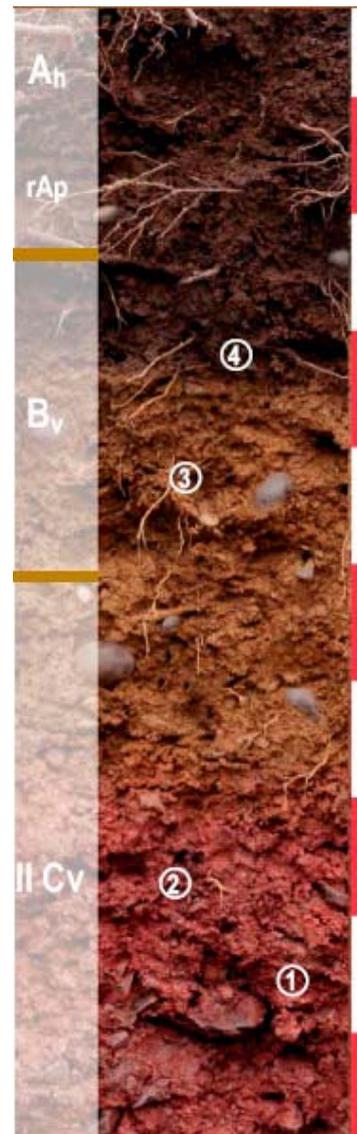


Abb. 3-4: Bodenprofil einer Braunerde westlich des Untersuchungsgebietes im Wald gelegen (SCHNEIDER, TRESSEL & SCHRÖDER 2005: 93).

Das erste der beiden Profile zeigt eine (Norm-)Braunerde (Abb. 3-4). Gut zu erkennen ist der Tonschiefer (1), der in grau-rötlichen Ton (2) eingebettet ist, ein Verwitterungsprodukt des Tonschiefers. Die Vermischung von Schieferschutt und Ton ist auf Bodenfließprozesse während des Pleistozäns zurückzuführen. In der Hauptlage finden sich solifluidal beigemischte Terrassenkiese der Mosel (3) und Löß, der während der Kaltzeiten aus den vegetationslosen trockenen Schotterflächen der Mosel ausgeweht, auf den benachbarten Höhen abgelagert und seit dem Holozän im Zuge der Bodenbildung verbraunt und verlehmt wurde (4) (SCHNEIDER, TRESSEL & SCHRÖDER 2005: 92).

Ah: 0-5 cm, stark toniger Schluff, schwach kiesig-grusig (2-10 Vol.-%), Krümelgefüge, mittel humos (2-5 M.-%), geringe Lagerungsdichte (1,4-1,6 g/cm³), stark durchwurzelt (11-20 Feinwurzeln/cm²), 7,5 YR 3/2

rAp: 5-23 cm, stark toniger Schluff, schwach kiesig-grusig (2-10 Vol.-%), Subpolyedergefüge, mittel humos (2-5 M.-%), geringe Lagerungsdichte (1,4-1,6 g/cm³), schwacher Vernässungsgrad, mittel durchwurzelt (6-10 Feinwurzeln/cm²), 7,5 YR 3/2

Sw: 23-52 cm, stark toniger Schluff, schwach kiesig-grusig (2-10 Vol.-%), z. T. Grusbänder, Subpolyedergefüge, sehr schwach humos (< 1 M.-%), mittlere Lagerungsdichte (1,6-1,8 g/cm³), mittlerer Vernässungsgrad, schwach durchwurzelt (3-5 Feinwurzeln/cm²), 7,5 YR 4/6

II rBt-Sd: 52-100 cm, mittel schluffiger Ton, schwach grusig (2-10 Vol.-%), Polyedergefüge, hohe Lagerungsdichte (1,8-2,0 g/cm³), sehr schwach durchwurzelt (1-2 Feinwurzeln/cm²), vereinzelt Wurzeln bis 65 cm, 5 YR 5/8



Abb. 3-5: Bodenprofil eines Pseudogleys westlich des Untersuchungsgebietes im Wald gelegen (SCHNEIDER, TRESSEL & SCHRÖDER 2005: 94).

Das zweite Profil zeigt einen stauwasserbeeinflussten Boden – einen (Norm-)Pseudogley (Abb. 3-5). Aus Tongestein und Lößlehm bildete sich zunächst ein grusführender Ton, den ein ebenfalls aus Tongestein und Lößlehm entstandener kies- und grusführender Schluff überlagert. Auffallend sind hier die mächtigen Lößablagerungen. Aus Löß der vorletzten Kaltzeit ging eine Parabraunerde hervor. Ton wurde aus dem Oberboden in den Unterboden verlagert. Heute ist lediglich der tonangereicherte Bt-Horizont vorhanden. Da er dicht und wasserundurchlässig ist, wird er als Stauhorizont (II rBt-Sd) bezeichnet. Von diesem Entwicklungsprozess ausgeschlossen blieb Löß, der sich in der darauf folgenden, der letzten Kaltzeit, ablagerte. Der Sw-Horizont besitzt eine bessere Wasserdurchlässigkeit. Ständige Wechsel von stauwasserbedingten reduzierenden Verhältnissen mit oxidativen Prozessen

während Austrocknungsphasen führten zur Bildung von Mangan-Konkretionen (1) und Rostflecken (2) (SCHNEIDER, TRESSEL & SCHRÖDER 2005: 94f).

Alte Pflughorizonte an beiden Profilen bezeugen, dass sie früher ackerbaulich genutzt worden sind. Unter der aktuellen Waldnutzung konnte sich ein Ah-Horizont entwickeln.

Als weitere Bodentypen kommen ausschließlich in Quellmulden Gleye und in den Weinhängen Rigosole vor (BGHPLAN 2002: 3).

Braunerden und Parabraunerden mit teilweise daraus hervorgegangenen Pseudogleyen sind damit die im Gebiet natürlicherweise dominierenden Bodentypen. Für den Großteil des ehemaligen militärischen Geländes und v. a. für das Untersuchungsgebiet muss jedoch hervorgehoben werden, dass vielfach Boden abgetragen, aufgeschüttet und vermischt wurde. Dies belegt der Großteil der vorliegenden Bohrprofile und Schichtenverzeichnisse (für den Bereich der Quellmulde s. Abb. XVII - XXXII und Tab. I - IX im Anhang). Häufig finden sich auch Schlacken und Kohle der Heizungen oder Bauschutt als Beimengungen wieder (BGHPLAN 2002: 3, HIERLMEIER 2004: 192). Auch ein Vergleich der Höhenlinien unterschiedlich alter Karten zeigt das Ausmaß der anthropogenen Eingriffe.

Für die Planung eines Entwässerungskonzeptes, das zu einem großen Teil auf der Versickerung von Niederschlagswasser beruht, ist die Durchlässigkeit des Untergrundes von besonderem Interesse. Um Kenntnisse über die Versickerungseigenschaften der Böden des Planungsgebietes zu erlangen, fand im August 1999 an drei Standorten eine erste Voruntersuchung statt. Die Auffüllversuche und Infiltrationsmessungen ergaben k_f -Werte zwischen $8 \cdot 10^{-5}$ und $8 \cdot 10^{-6}$ m/s. Da Untersuchungen beim nahe gelegenen Studentenwohnheim Werte $< 1 \cdot 10^{-6}$ m/s ergaben, erfolgten vertiefende Messungen im Oktober 2001. An 29 Standorten erfolgten 32 Versickerungsversuche mittels Doppelringinfiltrationsmeter und/oder Auffüllversuch. Bei den Messungen wurden die Höhenlagen der geplanten späteren Geländeoberfläche berücksichtigt. Gemessen wurde daher in neun Baggerschürfen bis in eine Tiefe von maximal 4 m. Auch einige der Bohrlöcher reichten bis zu 4 m tief. Besondere Bedeutung kam dabei dem Bereich der heutigen Quellmulden zu. Die Retentionsanlage entstand durch Abtrag von 3 - 4 m der Geländeaufschüttung. Während der Untersuchungen zeigte sich, dass dieser Bereich gegenüber der vormals aufliegenden Bodenschicht sandiger und kiesiger ist und somit eine höhere Versickerungsleistung aufweist als die schluffigeren Substrate oberhalb der Quellmulden (BGHPLAN 2002: 5).

Die Untersuchungen ergaben k_f -Werte zwischen $6 \cdot 10^{-3}$ und $< 1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Laut ATV-DVWK A 138 (ATV-DVWK 2002: 16) ist ein Standort dann zur Versickerung von Niederschlagswasser geeignet, wenn der k_f -Wert zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ m/s und $1 \cdot 10^{-6}$ m/s liegt. Laut BGHPLAN (2002: 5) erfüllten 18 der untersuchten Messstellen diese Anforderung, 14 dagegen nicht. Nach HEYER (2001: 8) konzentrieren sich die gut durchlässigen Böden auf die Bereiche, in denen Kiese und Sande der Moselterrasse verbreitet sind. Hier lagen k_f -Werte zwischen 10^{-4} und 10^{-7} m/s vor.

Tab. 3-2: Während der Planungsphase im Untersuchungsgebiet ermittelte bodenhydraulische Kennwerte (in Anlehnung an SCHEID 2007: 118).

Nr.	Lage im Teil-EZG	Aufschluss-art	Tiefe [m u. GOK]	Bodengruppe n. DIN 18 196	kf-Wert [m/s]	Eignung n. ATV A-138 (2002)
B1*	EZG3b	Handscharf	0,1	UM/TM	$< 1 \times 10^{-7}$	-
B2*	Wasserband	Handscharf	0,4	[UM]	$5,1 \times 10^{-5}$	✓
B11*	westl. Sattelmulden	Handscharf	0,1	SU/UL	$1,1 \times 10^{-5}$	✓
B12*	nördl. Sattelmulden	Handscharf	0,1	UL/TL	$3,3 \times 10^{-6}$	✓
B13*	EZG2	Handscharf	0,1	OH/UL	$2,4 \times 10^{-5}$	✓
C1*	EZG10	Handscharf	0,1	UM	$1,3 \times 10^{-6}$	✓
V20**	EZG3a	Handscharf	0,1	k. A.	3×10^{-5}	✓
V30**	nördl. Quellbereich	Handscharf	0,1	k. A.	4×10^{-5}	✓
A10*	EZG3a	Baggerscharf	0,7	UM/TM	$4,5 \times 10^{-9}$	-
B3*	westl. Quellbereich	RKS	1,0	SU	$4,5 \times 10^{-9}$	-
B8*	Sportplatzmulde	RKS	1,0	[UM]	$< 1 \times 10^{-9}$	-
B14*	Quellmulden	Baggerscharf	2	UM	$6,4 \times 10^{-7}$	-
B15*	EZG1b	Baggerscharf	2	[UM/TM]	$8,2 \times 10^{-7}$	-
V20**	EZG3a	RKS	3	k. A.	$2,5 \times 10^{-5}$	✓
V30**	nördl. Quellbereich	RKS	3	k. A.	8×10^{-5}	✓
B4*	Wasserband	RKS	1,6	GW	$1,4 \times 10^{-6}$	✓
B5*	EZG1a	RKS	2,0	SW	$2,4 \times 10^{-5}$	✓
B6*	EZG1a	RKS	1,4	SU	$1,3 \times 10^{-7}$	-
B7*	Quellmulden	RKS	5,0	GW	$6,0 \times 10^{-5}$	✓
B9*	EZG1b	Baggerscharf	1,7	GW/GU	1×10^{-4}	✓
B10*	östl. Quellbereich	RKS	5,0	SW	$1,6 \times 10^{-5}$	✓
B14*	Quellmulden	RKS	4	SW	$8,4 \times 10^{-6}$	✓
B15*	EZG1b	RKS	4	SW	$6,0 \times 10^{-3}$	-

Legende:		
PBD1	Oberboden	Doppelring-Infiltrometer
PBD2	Hanglehm	Auffüllversuch im Bohrloch
	Terrassenschotter	✓ : geeignet - : ungeeignet

* : HEYER (2001)
** : SPOO & PITTNER (1999a)

Tabelle 3-2 gibt einen Überblick über jene bodenhydraulischen Kennwerte, die im Untersuchungsgebiet oder in unmittelbarer Nähe ermittelt wurden. Die Verortung der Messungen zeigt Abb. 3-6.

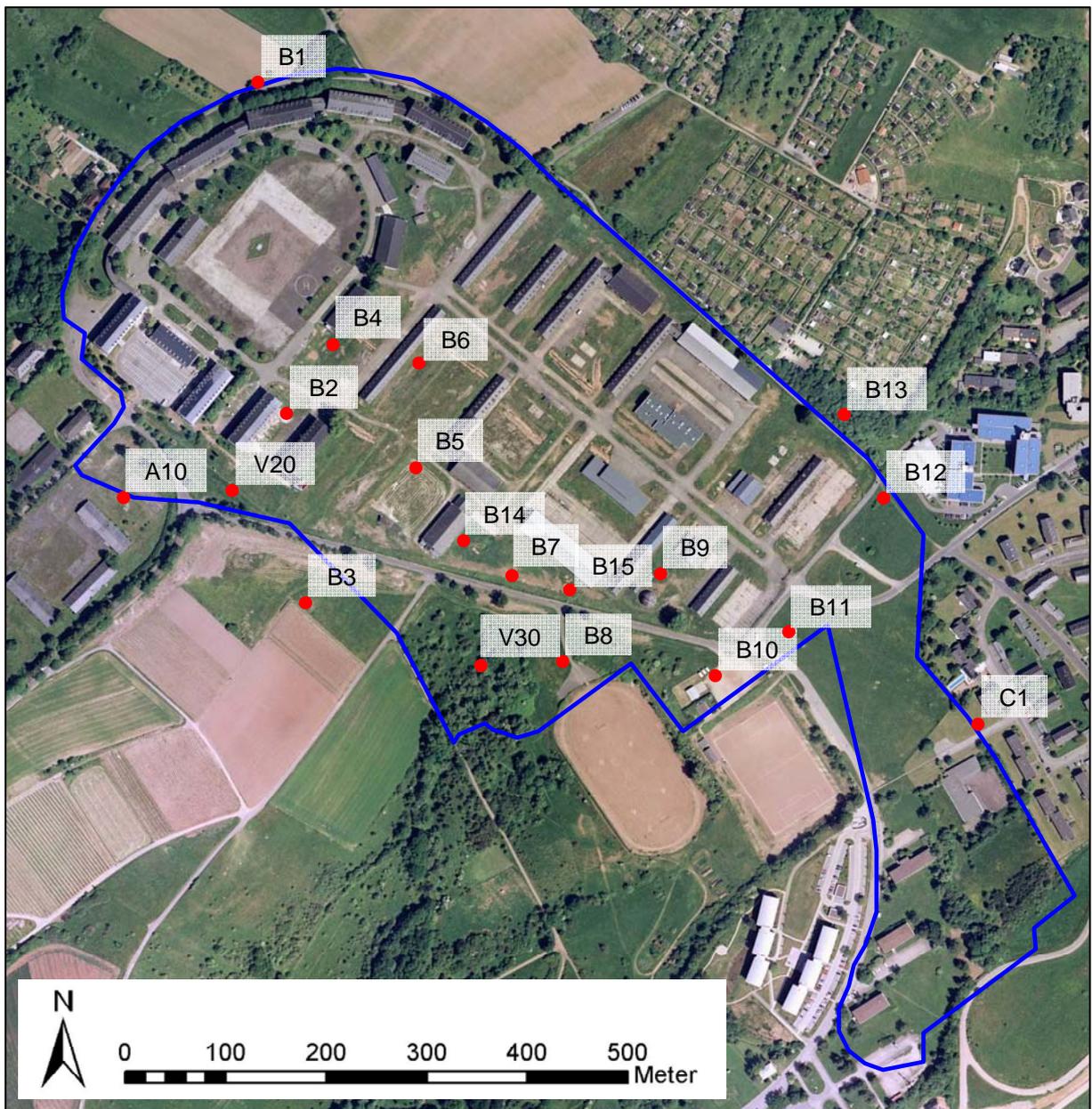


Abb. 3-6: Lage der in Tab. 3-2 aufgelisteten Messstandorte (n. HEYER 2001 und SPOO & PITTNER 1999a).

3.6 Klima

Der Raum Trier liegt im Bereich der nordhemisphärischen Westwindzone, zwischen der Ostküste des Atlantiks und der Eurasischen Landmasse. Aufgrund der sowohl ozeanischen als auch kontinentalen Einflüsse ist das Klima feuchttemperiert mit kühlen Sommern und milden Wintern.

Makroskalig gesehen liegt der Raum Trier im westeuropäischen, atlantischen Klimabereich. Mesoskalig spiegelt sich jedoch die für Mittelgebirgsregionen charakteristische orographisch starke Gliederung mit kleinräumiger Reliefstruktur und Flächennutzung in der Variabilität der

Klimaelemente wider. Dies bedingt eine klimatische Dreiteilung der Region Trier in die Mittelgebirgsregion der Eifel, die Mittelgebirgsregion des Hunsrücks und das Moseltal. Im Vergleich zum kühleren, niederschlagsreicheren Mittelgebirgsklima weist die Trierer Talweite ein wärmeres und etwas trockeneres Tal- bzw. Beckenklima auf, das als warm und mäßig feucht beschrieben wird (MUF 1996: 16, LICHT 2005: 165). Schon der Vergleich zwischen den Klimastationen Trier-Stadt (144 m ü. NN) und Trier-Petrisberg (265 m ü. NN) zeigt klimatische Unterschiede auf. Die Differenz der Niederschlagsmengen – insgesamt sind es 23 mm – verteilt sich mit 19 mm zugunsten des Petrisberges v. a. auf das Winterhalbjahr (Oktober bis März) (CLOß 1979: 365). Das langjährige Mittel (1961 - 1990) der Lufttemperatur für die Station Trier-Petrisberg liegt bei 9,1°C. In der Stadt ist es etwa 1 °C wärmer (LICHT 2005: 66, MUF 1996: 17f).

Die folgenden Angaben beziehen sich auf die DWD-Station Trier-Petrisberg.

Für den Zeitraum 1949 - 1998 hat HARDER (2000: 3, 24f) eine durchschnittliche Niederschlagsmenge von 763 mm/a berechnet. Laut Auskunft des DWD Trier³ beträgt das langjährige Mittel des Niederschlags für den Zeitraum 1961 - 1990 785 mm/a. Das zehnjährige Mittel für den Zeitraum 1993 - 2002 ergibt 824 mm/a. Eine Zunahme der Niederschläge ist deutlich zu erkennen. Der positive Trend beträgt laut HARDER 37 mm bzw. 5 % und liegt damit knapp über den 4 %, die RAPP & SCHÖNWIESE (1996: 67) für den Zeitraum 1961 - 1990 angeben. Zurückzuführen ist diese Zunahme auf einen positiven Trend im Winter, der vermutlich in Zusammenhang mit einer Zunahme der Westwetterlagen im Winter steht (LICHT 2005: 148, 152, 167ff). So ergibt sich im Vergleich der 30-jährigen Mittelwerte 1961 - 1990 und 1971 - 2000 eine Zunahme der mittleren Niederschlagssumme von > + 20 % in den Monaten Oktober bis Dezember und sogar > + 50 % für den Monat März. Im Sommer nehmen die Niederschlagssummen dagegen ab. Für den dargestellten Bezugszeitraum gesprochen, konzentriert sich das Defizit mit – 30 % auf den Monat August (HELBIG, LICHT, JUNK, BAREISS & LÜERS 2002: 12, LICHT 2005: 138).

Aus der Verteilung – Frühjahr (171 mm), Sommer (210 mm), Herbst (195 mm), Winter (187 mm) – geht hervor, dass der Niederschlag relativ gleichmäßig verteilt ist und eine Doppelwelle beschreibt mit einem schwachen Maximum im Sommer (vgl. Abb. 3-7). Im hochsommerlichen Niederschlagsmaximum macht sich die ozeanische Prägung bemerkbar. April bis Juli ist der Zeitraum der häufigsten „Regenschauer“, wobei diese in 88 % der Fälle nicht mehr als sieben Stunden dauern. Eine genauere Angabe ist aufgrund der festgelegten Messintervalle nicht möglich (HARDER 2000: 73).

Niederschläge fallen in Trier an etwa 170 Tagen im Jahr (FISCHER 1989: 77, CLOß 1979: 365). Nach HARDER (2000: 62 ff) wird im Jahr an durchschnittlich 110 Tagen „Regen“ als die häufigste aller Niederschlagsarten gemeldet. Dieser kommt dann zumeist aus W und bringt im

³ telefonische Auskunft vom 08.09.2003, Herr Bonertz

Mittel 5 mm Niederschlag. Für die Dimensionierung von Rückhalteräumen interessant sind v. a. Starkregenereignisse. Während $> 60\%$ der Niederschläge im Jahr als Tagessummen ≤ 1 mm fallen, wird an der Station Trier-Petrisberg an 20,2 Tagen Niederschlag > 10 mm aufgezeichnet (LICHT 2005: 105).

Während CLOß (1979: 365) sich auf den Zeitraum 1951 - 1970 bezieht und als Monate mit den häufigsten Niederschlägen Juli/August und Dezember/Januar mit 68/84 mm und 75/62 mm an 13/15 bzw. 16/17 Tagen nennt, ist in Abb. 3-7 zu erkennen, dass sich hier eine Verschiebung ergeben hat. Bezogen auf das langjährige Mittel von 1961 - 1990 sind die Monate Juni/Juli/August (73/70/71 mm) und November/Dezember (74/72 mm) die regenreichsten.

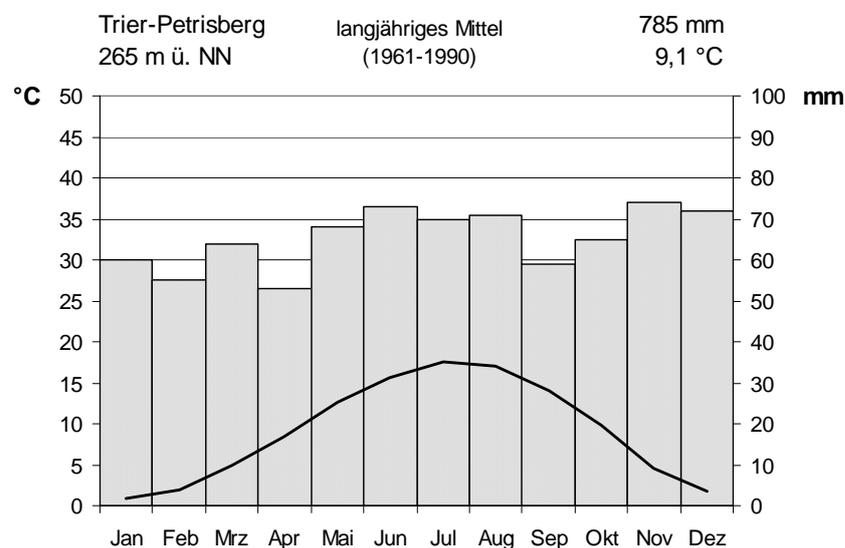


Abb. 3-7: Klimadiagramm für die Station Trier-Petrisberg nach Daten des DWD (DWD 2003: o. S.).

Schneefall ist in Trier eher selten zu beobachten (CLOß 1979: 365). Durchschnittlich schneit es an 19 Tagen im Mittel 2,5 mm wobei auch hier ein negativer Trend vorliegt (HARDER 2000: 67ff).

Trockenperioden dauern selten länger als 21 Tage. Im Zeitraum 1948 - 1998 dauerte die längste Trockenzeit 32 Tage (DELTAU 1997: 27, HELBIG, LICHT, JUNK, BAREISS & LÜERS 2002: 13). Am häufigsten treten Trockenperioden im Sommerhalbjahr auf. Die längsten werden dagegen im Winterhalbjahr (Oktober bis März) erfasst (FBR 1996: 45).

3.7 Vegetation und Landnutzung

Die steil abfallenden Hänge im NW des Petrisberges sind bewaldet, an den Wissenschaftspark im N schließen sich ackerbaulich genutzte Flächen an, im NE finden sich v. a. Kleingärten.

Die sich südöstlich bis südwestlich anschließenden Hänge werden vorwiegend weinbaulich genutzt. Laut Biotopkartierung befinden sich nördlich als Schongebiet ausgewiesene Streuobstwiesen und zum Teil geschützte Quellbereiche, im südlichen Teil liegen ebenfalls als Schongebiet ausgewiesene Streuobstwiesen sowie schützenswerte Quellbereiche. Im Brettenbachtal wurden Weiden mit Gebüsch als Schongebiete ausgewiesen (BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG SPOO & PITTNER GMBH 1999b: 8).

Mauerwerk aus Schieferstein und Lehm sind erste Zeugen einer Besiedlung des Petrisbergs. Es handelt sich zum einen um „Bauspuren eines römischen Militärlagers aus der Zeit um 30 [v. Chr.]“ und zum anderen um Baureste eines römischen Bauernhofes aus dem 1. bis 3. Jahrhundert unserer Zeit. Im Zuge der Landesgartenschau Trier 2004 freigelegt, sind sie heute für jedermann zugänglich in die unterste der Quellmulden integriert (LÖHR 2004: 3f). In der Nähe der Fundamentreste wurden auch bronzezeitliche Kulturgerölle gefunden. Schon im 2. Jahrhundert wurden die Wasseraustritte der Brettenbachquelle in mehreren Drainagen aus Schieferplatten gefasst, um es komfortabel nutzen und ableiten zu können. Unter den Nationalsozialisten entstanden 1936/37 die so genannte Kimmelkaserne und das Barackenlager, welches als Lager für Kriegsgefangene und Fremdarbeiter diente (STALAG XII D). Nach dem zweiten Weltkrieg übernahm die französische Armee das Gelände und blieb dort bis 1998 (HIRSCHMANN 2004: 20ff).

In der Flächennutzungsplanänderung wurde das Gebiet als städtebaulicher Entwicklungsbereich festgelegt. Der städtebauliche Rahmenplan, „Zielvorgabe und Grundlage [...] für die Änderung des Flächennutzungsplans und die Aufstellung von Bebauungsplänen“, wurde im April 2002 beschlossen (STADT TRIER 2002: 1). Das heutige Siedlungsgebiet verfügt über großzügig angelegte parkähnliche Grünflächen, die der Naherholung und dem Aufenthalt dienen. Sie werden gerne als Spielraum angenommen und dienen der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. Daneben ermöglichen sie den Schutz und die Entwicklung ökologischer Grünraumfunktionen (STADT TRIER 2002: 7). Die Wohngebiete selbst werden nach Fertigstellung von so genannten „grünen Fingern“ durchzogen sein.

3.8 Konzept der Regenwasserretention im Untersuchungsgebiet Petrisberg

Abb. 3-8 zeigt das Untersuchungsgebiet, zu dem der Wissenschaftspark (WIP) mit Firmen- und Bürogebäuden und das Wohngebiet zählen sowie die der Bemessung und der später vorgestellten Modellierung zugrunde liegenden Teil-Einzugsgebiete. Hellblau hervorgehoben sind die Retentionsflächen (Wasserband, Kaskaden, Quellmulden, Sattelmulden, Sportplatzmulde), dunkelblau der Brettenbach und hellgrün die nicht zur Bebauung vorgesehenen Grünflächen.

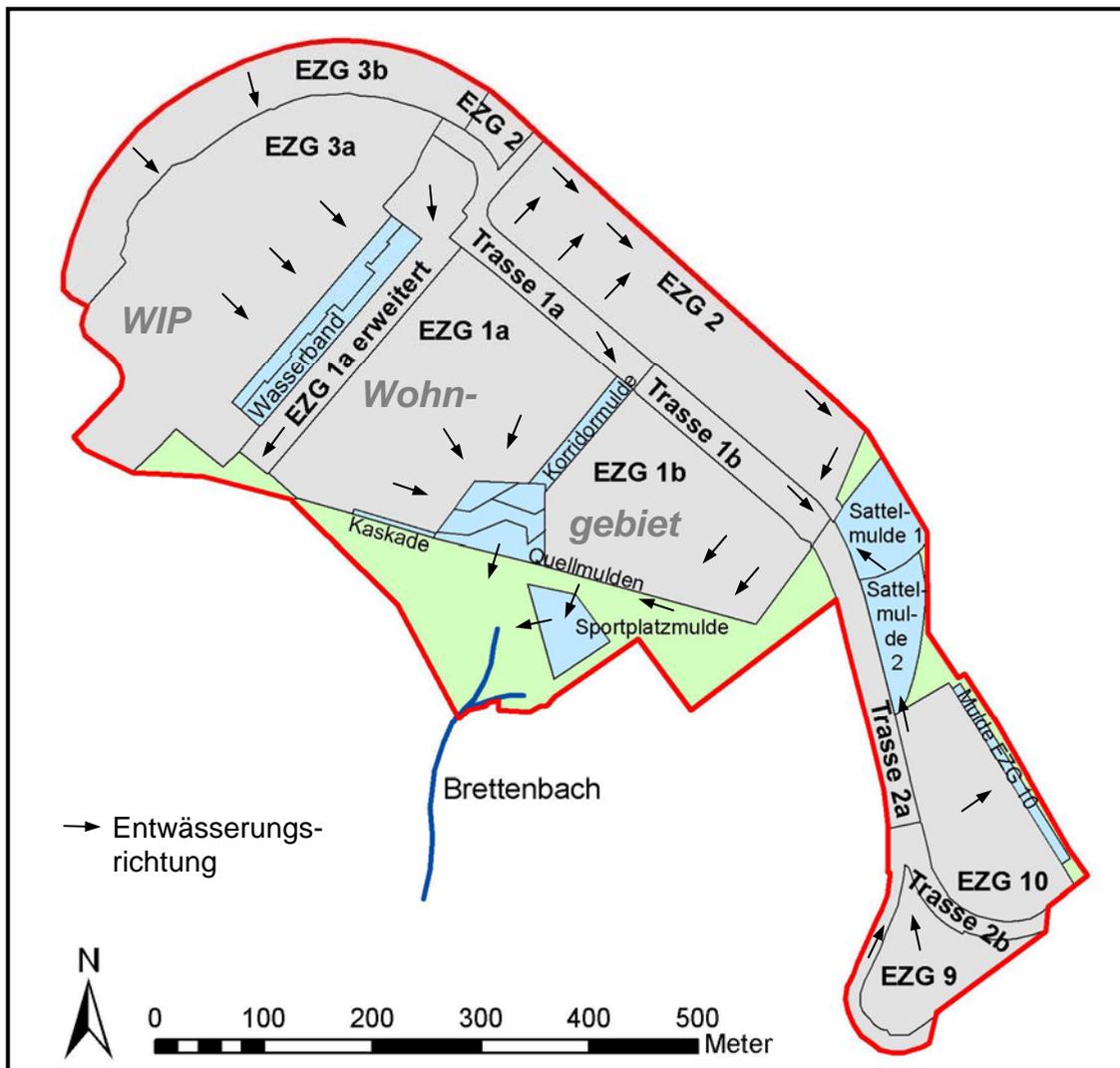


Abb. 3-8: Das Untersuchungsgebiet, seine Retentionsanlagen (hellblau), daran angeschlossene Teil-EZG sowie Grünflächen (grün).

Die Planung der Oberflächenentwässerung erfolgte gemäß § 2 Abs. 2 LWG. Das bis zur Konversion bestehende Mischwassersystem wurde durch ein modifiziertes Trennwassersystem ersetzt. Innerhalb des Untersuchungsgebietes wird Oberflächenwasser soweit möglich am Ort des Entstehens zurückgehalten. Wasser das nicht versickern kann, wird breitflächig in das Gelände abgeleitet oder dem Brettenbach verzögert zugeführt. Gemäß § 62 LWG dürfen Einleitungen in den Brettenbach zu keiner Abflussverschärfung führen (BGHPLAN 2002: 2).

Als Bemessungsniederschlag wurde ein 100-jährliches Ereignis mit 56 mm Niederschlag in 3 h gewählt, da Hochwasserereignisse im Vorfluter Olewiger Bach durch 2- bis 3-stündige Ereignisse ausgelöst werden (BGHPLAN 2002: 8). Auf den Privatgrundstücken werden lediglich 30 l der angesetzten 56 l pro Quadratmeter versiegelter Fläche zurückgehalten. Die restlichen 26 l sowie der Überlauf werden in die Anlagen auf den öffentlichen Flächen eingeleitet (BGHPLAN 2002: 11).

Tabelle 3-3 beschreibt kurz die einzelnen Retentionsanlagen. Abbildung 3-9 zeigt die Anordnung derselben in einem Fließschema. Das untersuchte Regenwasserbewirtschaftungssystem besteht aus privaten Retentionsanlagen und daran anschließenden, hintereinander geschalteten zentralen Mulden und Muldenrigolen. Es beinhaltet die Komponenten Rückhalt, Versickerung, Verdunstung und gedrosselte Ableitung in den Brettenbach.

Tab. 3-3: Beschreibung der Retentionsanlagen im Untersuchungsgebiet Petrisberg (BGHPLAN 2002: 12, aktualisiert nach Fließschema BGHPLAN 2005).

Bezeichnung	Art	Rückhalte-	Fläche	Drossel-
		volumen		
		[m ³]	[m ²]	[l/s]
Wasserband	Betonbecken mit 120 cm tiefen Dauerstau und 40 cm Freibord für Rückhaltung incl. angrenzender Versickerungsfläche	2520	6300	
Wasserbandrigole	Rigole (50 cm mächtig) unter seitlich an Betonbecken anschließender Versickerungsfläche mit Drosselablauf	310	1930	16
Kaskade	durch Schwellen getrennte Erdmulden, 40 cm tief, 30 cm Freibord für Überlauf Wasserband	50	250	-
Korridormulde	Erdmulde, 40 cm tief	60	500	-
Quellmulde 1	Erdmulde, 40 cm tief	276	770	-
Quellmulde 2	Erdmulde, 40 cm tief	531	1430	-
Quellmulde 3	Erdmulde, 50 cm tief	1035	1870	16
Mulde EZG 10	Erdmulde, 40 cm tief	696	1750	-
Sattelmulde 1 mit Rigole	Erdmulde, 40 cm tief, Rigole 70 cm mächtig	M: 800 R: 420	2000	12
Sattelmulde 2 mit Rigole	Erdmulde, 40 cm tief, Rigole 50 cm mächtig	M: 560 R: 210	1400	4
Sportplatzmulde	Erdmulde, 40 cm tief	1200	3000	16
Privatmulden	Erdmulden, 30 cm tief	2150		-
Summe:		10818	21200	

Es beginnt im N mit dem Wasserband, einem 1,20 m tiefen, dauerhaft eingestauten Becken, dem sich eine Mulden-Rigole anschließt. Überlaufendes Wasser kann hier versickern und wird bei entsprechenden Mengen in eine Kaskade geleitet. Wasser, das dort nicht zurückgehalten werden kann, läuft in die untere der drei Retentionsterrassen (Quellmulde 3). Wasser aus dem nordöstlichen Teil des Gebietes wird ebenfalls über eine Kaskade in die obere der drei Quellmulden geleitet. Im Osten nehmen drei Retentionsmulden das Wasser auf und leiten es an die so genannte Sportplatzmulde weiter. Kommt es zu einem Überlauf in den Quellmulden und der Sportplatzmulde, so wird dieser gedrosselt in Richtung des Quellbereiches des Brettenbaches abgegeben. Jede der beiden Drosseleinrichtungen lässt maximal 16 l/s durch, so dass die für den Quellbereich ermittelte schadlose Einleitmenge von 32 l/s nicht überschritten wird. Um Erosion zu verhindern, fließt der Überlauf zunächst in einen Verteiler-

graben. Schwellen verteilen das Wasser, so dass dieses flächenhaft der Brettenbachquelle zufließt.

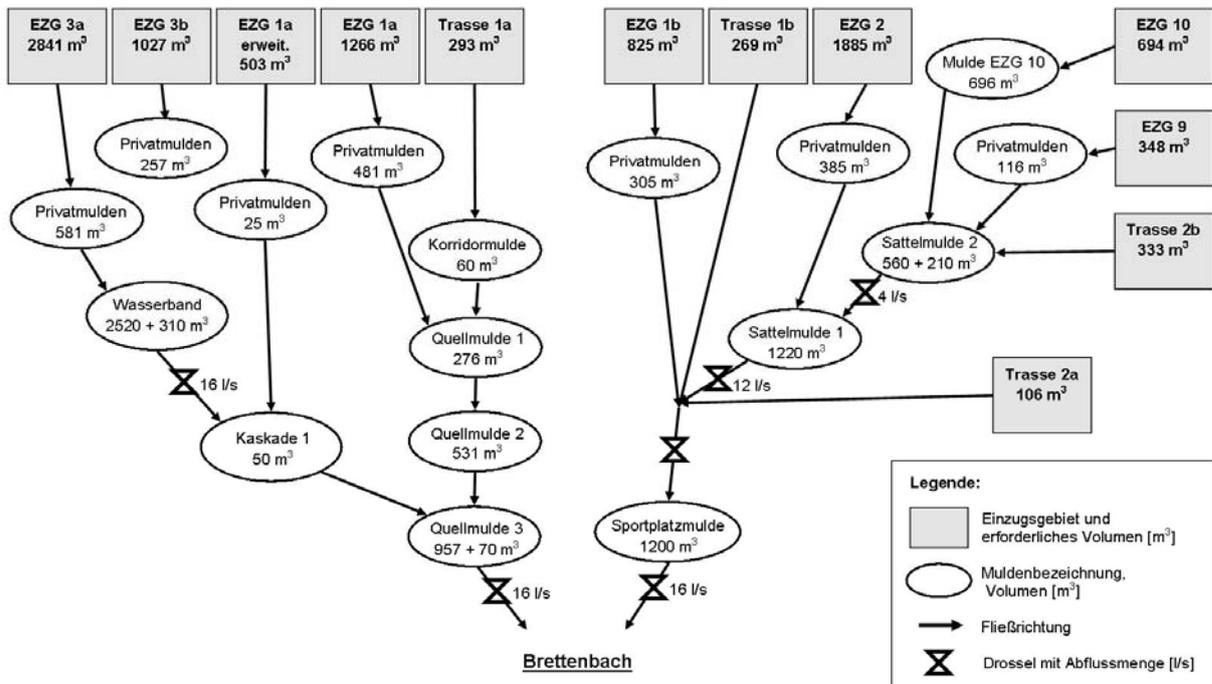


Abb. 3-9: Fließschema Rückhaltung im Einzugsgebiet Brettenbach mit Privatrückhaltungen und Direkteinleitung (nach BGHPLAN 2005).

3.9 Quellmulden

Da das Retentionsverhalten der Quellmulden näher untersucht wird, folgt nun eine detaillierte Beschreibung derselben.

Die Quellmulden sind drei hintereinander geschaltete Retentionsmulden (von oben nach unten: Quellmulde 1, 2, 3) mit einer Einstautiefe von je 40 cm. Sie liegen auf unterschiedlichen Höhenniveaus und sind durch Gabionen-Mauern voneinander getrennt (s. a. Abb. 3-10). Neben der gestalterischen Funktion mindern diese die Fließgeschwindigkeit des Wassers bei Überlaufereignissen und verhindern so Erosionsprozesse in der jeweils tiefer gelegenen Mulde. Sämtliche Mulden sind mit einer artenreichen Saatgutmischung magerer Grünlandpflanzen begrünt. Der westliche Teil der Quellmulde 1 wurde mit Schilf (*Phragmites australis*) bepflanzt. In Quellmulde 3 stehen einige Weiden. Während die beiden oberen Mulden reine Versickerungsmulden sind, wurde die unterste Mulde um eine Rigole erweitert.

Quellmulde 1 wurde durch eine Erdschwelle geteilt. An den westlichen Teil ist das westlich davon gelegene Wohngebiet EZG 1a angeschlossen. Solange die Bauarbeiten hier andauern und nicht alle Flächen befestigt oder begrünt sind, führt das Oberflächenwasser abhängig von Dauer und Intensität der Niederschlagsereignisse mehr oder weniger große Frachten an Feinsediment aus dem Baugebiet mit sich. Diese lagern sich in der Mulde ab und bilden

zwangsweise eine Schlammdecke, die nur wenig Wasser infiltrieren lässt. Dieser Muldenteil wird daher auch als Sedimentfang bezeichnet. Um einem Dauereinstau entgegenzuwirken, wurde der Sedimentfang mit Schilf bepflanzt. Dieser zeichnet sich durch eine hohe Evapotranspirationsrate aus, so dass einstauendes Wasser zu einem großen Teil an die Atmosphäre abgegeben wird. Eine Eigenschaft, aufgrund derer Schilf Verwendung in Pflanzenkläranlagen und Vererdungsbeeten findet. KRAFT (1984, zit. in NEY 2003: 140) beispielsweise ermittelte in $0,5 \text{ m}^2$ großen Gefäßen eine maximale Verdunstungsleistung von $49,8 \text{ mm/d}$. Ähnliche Versuche durch NEY & SIEGL (2003, zit. in NEY 2003: 140) in $0,2 \text{ m}^2$ großen Behältnissen ergaben eine maximale Evapotranspiration von $31,4 \text{ mm/d}$.

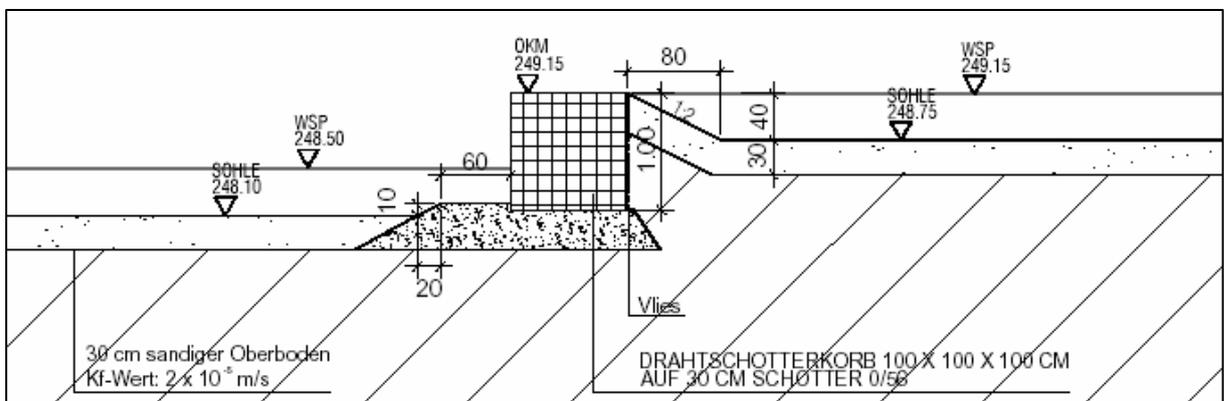


Abb. 3-10: Schnitt durch zwei Versickerungsterrassen und eine Gabionenmauer im Maßstab 1:50 (BÜRO ERNST 2003, leicht verändert)

An den östlichen Teil der Quellmulde 1 ist die im Fließschema (Abb. 3-9) als Trasse 1a bezeichnete Allee angeschlossen. Erst nach Passieren der Korridormulde gelangt das Wasser in die Quellmulde. Überschüssiges Wasser fließt breitflächig in Quellmulde 2, die keine weiteren Einleitungen erfährt und von dort in Quellmulde 3. In diese wird Wasser eingeleitet, das weder im Wasserband nebst Rigole noch in der Kaskade zurückgehalten werden kann sowie eine geringe Wassermenge vom Südhang des östlichen Teils von Wohngebiet W1. Von hier aus wird Wasser verzögert (16 l/s) durch einen Durchlass DN 250 in einen Verteilergraben abgegeben, der dem Brettenbach vorgelagert ist (BGHPLAN 2002: 12).

4 Material und Methoden

Im Folgenden wird aufgezeigt, welche Materialien und Methoden zur Verfügung standen, um Näheres über das Prozessgeschehen und die Retentionswirkung des Entwässerungssystems zu erfahren. Abbildung 4-1 gibt einen Überblick über die Lage der Messstellen im Untersuchungsgebiet. Der Messaufbau wird jeweils im Kontext mit den Daten beschrieben.

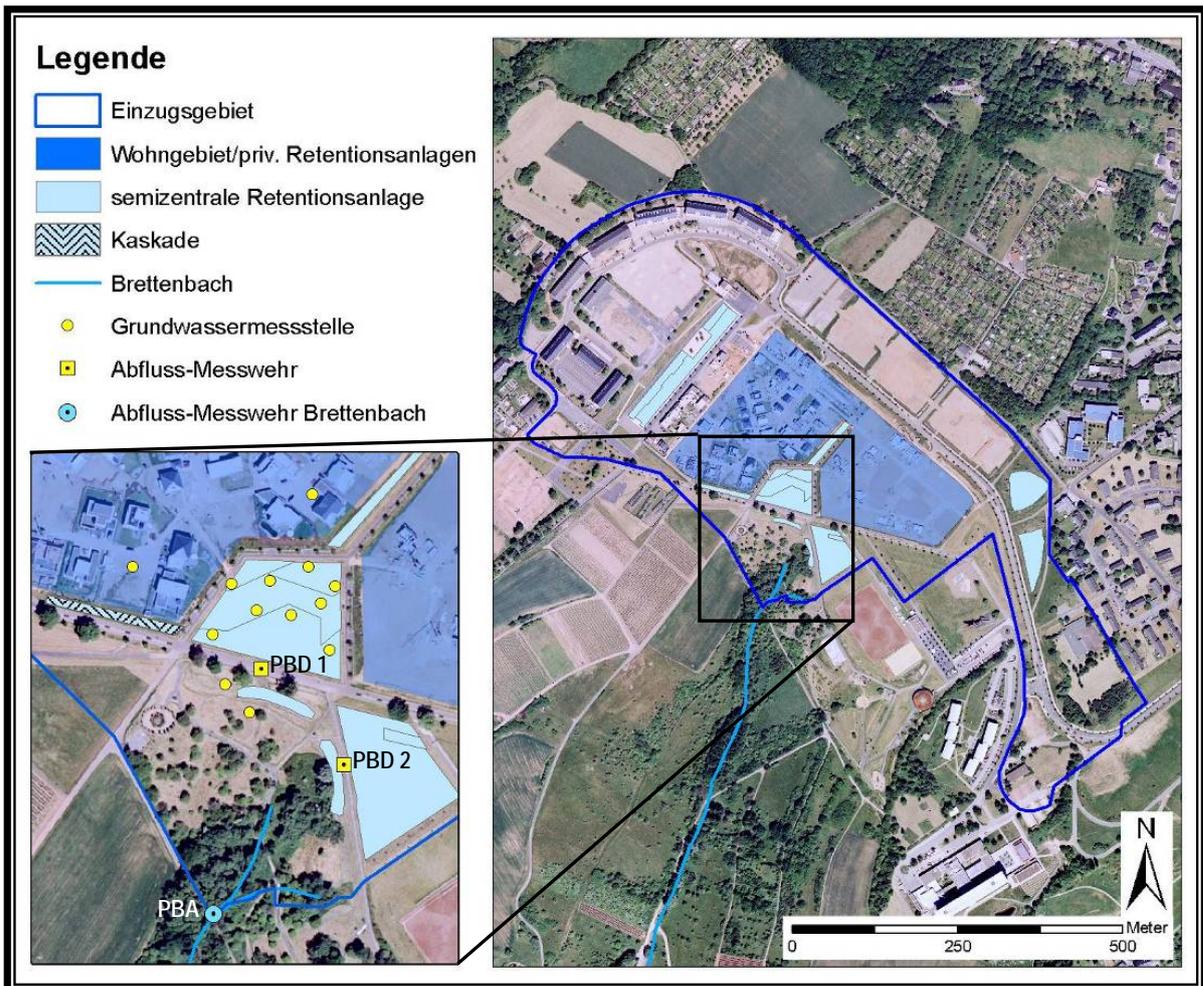


Abb. 4-1: Untersuchungsgebiet Petrisberg und Lage der Messstellen (im Zoom links unten: Quellmulden = nördliche Retentionsfläche, Sportplatzmulde = östliche Retentionsfläche; Orthophoto: Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz).

4.1 Messaufbau, Datenerhebung, -aufbereitung und -auswertung

4.1.1 Abflussdaten

An drei im Folgenden näher beschriebenen Stellen im Untersuchungsgebiet wurden von Dezember 2004 bis Januar 2005 zwei Rechteck- und ein V-Messwehr (vgl. Abb. 4-2) installiert und Drucksonden mit Datenlogger der Firma ECOTECH eingebaut. Hierzu wurden vorhandene Schachtbauwerke genutzt. Es handelt sich dabei um die Drosselschächte PBD1 südlich der Quellmulden und PDB2 westlich der Sportplatzmulde und um ein Mönchsbauwerk im Quellbereich des Vorfluters Brettenbach PBA (s. Abb. 4-1). In PBD1 wird der Überlaufabfluss aus den Quellmulden gemessen bevor dieser gedrosselt in den Verteilergraben Richtung Brettenbachquelle läuft. Analog dazu wird in PBD2 der Überlauf aus der Sportplatzmulde gemessen, der ebenfalls erst in den Verteilergraben geleitet wird. Bei PBA wird der Gesamtabfluss des Untersuchungsgebietes im Quellbereich erfasst, der bei entsprechenden Niederschlagsereignissen den Überlauf aus Quellmulden und Sportplatzmulde beinhaltet (vgl. Fließschema in Abb. 3-9). Abb. 4-2 zeigt links ein Rechteckwehr mit Seitenkontraktion nach PONCELET und rechts ein Dreieckswehr nach THOMSON mit:

α = halber Öffnungswinkel des Dreieckswehres [°]

b = Überfallbreite [m]

b_G = Breite des Gerinnes [m]

h = Überfallhöhe [m]

w = Höhe der Wehrkante [m]

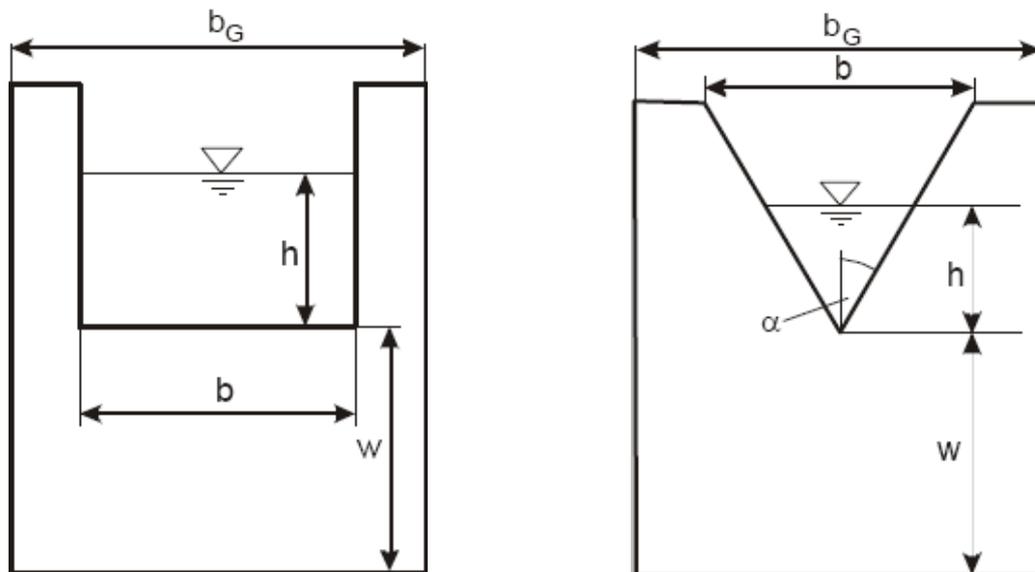


Abb. 4-2: Schematische Darstellung eines Rechteckwehres (links) und eines Dreieckswehres (rechts) (NÜTZMANN o. J.: 46).

Die Lage der Messwehre sowie Messbeginn und Messintervall werden durch die in Tabelle 4-1 zusammengestellten Angaben beschrieben:

Tab. 4-1: Lage der Messwehre sowie Auflösung und Messbeginn der Abflussdaten.

Standort	Messwehre	Koordinaten		Einheit	Auflösung	Messbeginn
	ID	Rechtswert	Hochwert			
Quellmulden, Drosselschacht	PBD1	2548444	5513129	mWS	10-minütig	12.01.2005
Sportplatzmulde, Drosselschacht	PBD2	2548493	5513074	mWS	10-minütig	28.01.2005
Quellbereich, Mönchsbauwerk	PBA	2548419	5512975	mWS	10-minütig	22.12.2004

Ausgelesen wurden die Datenlogger an allen Messwehren in einem 2- bis 4-wöchigen Turnus. Mithilfe der jeweils wehrspezifischen Formel können die Wasserstände [mWS] in Abfluss [l/s] umgerechnet werden. Die Formel für die baugleichen Rechteck-Wehre in den Drosselschächten lautet:

$$Q = 1000 \cdot k \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \mu b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}\right) \quad [\text{l/s}] \quad (4-1)$$

mit:

$$\begin{aligned} Q &= \text{Abfluss [l/s]} & b &= \text{Überfallbreite [m]} \\ k &= \text{Korrekturfaktor [-]} & g &= 9,81 \text{ m/s}^2, \text{ Erdbeschleunigung} \\ \mu &= \text{Überfallbeiwert [-]} & h &= \text{Überfallhöhe [m]} \end{aligned}$$

Der Überfallbeiwert μ berechnet sich nach:

$$\mu = 0,615 \cdot \left(1 + \frac{1}{1000 \cdot h + 1,6}\right) \cdot \left[1 + 0,5 \left(\frac{h}{h+w}\right)^2\right] \quad [-] \quad (4-2)$$

mit:

$$\begin{aligned} \mu &= \text{Überfallbeiwert [-]} \\ h &= \text{Überfallhöhe [m]} \\ w &= \text{Höhe der Wehrkante [m]} \end{aligned}$$

Bis zu einer Stauhöhe von 7 cm im Drosselschacht gilt der Überfallbeiwert nach SIA (Schweizer Ingenieur- und Architektenverein). Durch den Rückstau der Drosselblende bedingte höhere Stauhöhen verhindern einen vollkommenen Überfall. Dies wird durch die höhenabhängigen Korrekturfaktoren (vgl. Tab. 4-2) berücksichtigt.

Ab einer Stauhöhe von 22 cm greift die Wirkung der Drossel, so dass der Durchfluss auch bei höherem Einstau nicht mehr als 16 l/s beträgt. Der Messbereich liegt daher zwischen 0 und 16 l/s bzw. 0 - 2 m.

Tab. 4-2: Korrekturfaktor in Abhängigkeit der Überfallhöhe und resultierende Abflussmenge.

h	Rückstau- korrekturfaktor	Q	
[m]	[-]	[l/s]	
0	1,000	0,0	rückstaufrei
0,01	1,000	0,3	rückstaufrei
0,02	1,000	0,8	rückstaufrei
0,03	1,000	1,3	rückstaufrei
0,04	1,000	2,0	rückstaufrei
0,05	1,000	2,7	rückstaufrei
0,06	1,000	3,5	rückstaufrei
0,07	1,000	4,4	rückstaufrei
0,08	0,983	5,2	
0,09	0,958	6,1	
0,11	0,909	7,7	
0,13	0,865	9,3	
0,15	0,827	10,9	
0,17	0,794	12,6	
0,19	0,765	14,2	
0,21	0,739	15,9	
0,22		16,0	Drosselfunktion

Im Mönchsbauwerk wurde ein V-Wehr errichtet, welches auf einen Messbereich von 0 - 50 l/s bzw. 0 - 1 m WS ausgelegt ist. Die Formel für dieses Wehr lautet:

$$Q = 1343 \cdot h^{2,48} \quad [l/s] \quad (4-3)$$

mit:

Q = Abfluss [l/s]

h = Überfallhöhe [m]

Der Messfehler ist abhängig vom jeweils gewählten Messbereich. Da dieser bei allen Wehren unter 5 m liegt, beträgt der Messfehler 0,25 % bei einer Auflösung von $\leq 0,01$ %.

Aufgrund der hohen Datenanzahl wurden die Daten mit der Software MATLAB R2006a von The MathWorks verwaltet und bearbeitet. Bevor die Abflussdaten analysiert werden konnten, waren mehrere Bearbeitungsschritte mittels eigens hierfür geschriebener Befehlsroutinen nötig. Nach Einlesen neuer Daten werden zunächst redundante Daten identifiziert, gelöscht und die resultierenden Daten an die Ausgabedatei, welche alle bisher ausgelesenen Abflussdaten enthält, angehängt. In einem weiteren Bearbeitungsschritt werden die Abflussdaten hinsichtlich Datenlücken und kleinen Zeitversätzen, die beim Umstellen des Datenlogger-Timers eintreten können, korrigiert und mit Fehlercodes versehen. Es entsteht eine konsistente Zeitreihe. Anschließend erfolgt eine Umrechnung der Daten von mWS in l/s nach der jeweils erforderlichen Formel (s. Gleichung 4-1 und 4-3). Zur schnelleren Weiterverarbeitung der Da-

ten wird eine kompilierte Version erzeugt. Die derart aufbereiteten Abflussdaten lassen sich graphisch darstellen, wobei der Nutzer wählen kann, welche Daten (PBA, PBD1 und/oder PBD2) aus welchem Zeitraum er mit oder ohne Niederschlag abbilden möchte.

Eine weitere Befehlsroutine ermöglicht die Selektion von N-A-Ereignissen nach vorher festgelegten Kriterien. Dabei werden zunächst Regenperioden durch Trockenzeiten mit einer vorzugebenden Dauer abgegrenzt (vgl. VERWORN 2006: 148). Ab welcher Gesamtniederschlagsmenge eine Regenperiode als solche gewertet wird, legt der Nutzer fest. Der Arbeit zugrunde liegende Ereignisse beruhen auf einer Regenmenge ≥ 1 mm mit einer Regopause von maximal 2 Stunden.

Während des Untersuchungszeitraums traten am V-Wehr mehrere Störeinflüsse auf, wie z. B. regelmäßige Sedimentierung und Abfall der Sonde infolge unbemerkter Korrosion der Halterung. Hierdurch kam es zu einer mehrmaligen Verfälschung der Daten. Bis auf die ersten Daten im Januar und Februar 2005 wurde daher auf eine Verwendung derselben in der vorliegenden Arbeit verzichtet. Die Arbeit von SCHEID (2007) widmet sich u. a. der Korrektur dieser Abflussdaten.

4.1.2 Grundwassermesspegel

An drei Terminen im Juli 2005 wurden in den Quellmulden Pegel zur Messung des Wasserstandes installiert: drei Pegel in der untersten Quellmulde 3, ebenso viele in Quellmulde 2 und zunächst zwei in der obersten Quellmulde 1. Eine dritte Bohrung im westlichen Teil der Quellmulde 1, dem Sedimentfang war erst Ende Juli 2006 möglich, nachdem Schilf und Schlamm entfernt und die Erdoberfläche abgetrocknet war. Abb. 4-3 zeigt die räumliche Verteilung der Messstellen und Tab. 4-3 listet die Lage der Pegel sowie Messintervall und Messbeginn auf.

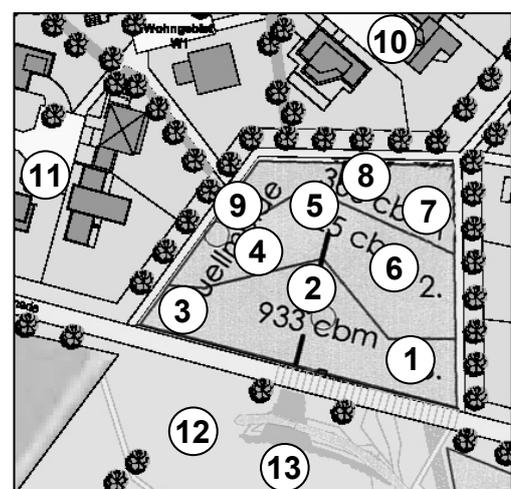


Abb. 4-3: Übersicht über die Lage der Grundwasser-Messstellen P1 - P9 in den Quellmulden sowie P10 und P11 im Zustrom bzw. P12 und P13 im Abstrom (EGP 2005, Ausschnitt, verändert).

Im gleichen Zeitraum erfolgten je zwei weitere Bohrungen im Siedlungsgebiet nordwestlich und nördlich der Quellmulden sowie südlich der Quellmulden im Grünland, um den Zustrom zu den Quellmulden und den Abstrom in Richtung Brettenbach zu erfassen.

Tab. 4-3: Lage der Pegel in den Quellmulden sowie Auflösung und Messbeginn.

Standort	Pegel-ID	Rechtswert	Hochwert	Auflösung	Messbeginn
Quellmulde 3	P1	2548484	5513141	täglich	05.08.2005
Quellmulde 3	P2	2548462	5513161	täglich	05.08.2005
Quellmulde 3	P3	2548416	5513150	täglich	05.08.2005
Quellmulde 2	P4	2548442	5513164	täglich	05.08.2005
Quellmulde 2	P5	2548450	5513182	täglich	05.08.2005
Quellmulde 2	P6	2548479	5513168	täglich	05.08.2005
Quellmulde 1	P7	2548487	5513178	täglich	05.08.2005
Quellmulde 1	P8	2548472	5513189	täglich	05.08.2005
Quellmulde 1	P9	2548425	5513179	täglich	31.07.2006
Zustrom	P10	2548369	5513189	täglich	31.07.2006
Zustrom	P11	2548474	5513232	täglich	31.07.2006
Abstrom	P12	2548423	5513120	täglich	31.07.2006
Abstrom	P13	2548437	5513104	täglich	31.07.2006

Die Bohrungen wurden mit einem Rammkernsondiergerät durchgeführt. Der Bohrdurchmesser betrug 51 mm. Bis auf P9 erfolgten alle Bohrungen in den Quellmulden bis in den anstehenden wasserundurchlässigen Tonschiefer und erreichten Endteufen zwischen 3,20 m und 4,60 m. Im Abstrom wurde 3,20 m und 4,20 m tief gebohrt, im Zustrom 5,50 m und 7,00 m. Bei P9 erfolgte die Bohrung bis zum Erreichen mürben Tonschieferbruchs, bei P10 und P11 konnte der Tonschiefer nicht erreicht werden, bei P12 erfolgte die Bohrung bis zum Erreichen aufgearbeiteten Tonschiefers, im untersten Bereich des Pegels P13 befanden sich Tonschieferbruchstückchen.

Sämtliche Bohrungen wurden als Pegel ausgebaut, die aus 1,5-Zoll-PVC-Rohren (Durchmesser: 3,81 cm) bestehen. Im unteren Teil stehen mit Filterkies ummantelte Filterrohre, nach oben schließen Vollrohre an. Eine Verschlusskappe verhindert, dass bei einstauendem Oberflächenwasser selbiges in das Pegelrohr läuft. Die Unterflurkappe schließt bündig mit der Geländeoberkante ab, um die Durchführung von Pflegemaßnahmen nicht zu behindern. Tabelle 4-4 gibt einen Überblick über die Pegel und einige ausgewählte Höhenangaben. Im Anhang finden sich Ausbau- und Bohrprofilsskizzen sowie die Schichtenverzeichnisse der Pegel P1 bis P8, welche im Anschluss an deren Bohrung erstellt werden konnten. Für die Pegel P9 bis P13 liegen Schichtenverzeichnisse vor.

Die Messung der Pegelstände erfolgte in allen Pegeln täglich mit einem Kabellichtlot. Daneben wurden überschlägig auch die Füllstände der 15 Kaskadenmulden notiert. Vandalismus blieb wohl nicht zuletzt wegen des unauffälligen Einbaus der Pegel trotz Lage an einem stark frequentierten Spazierweg aus.

Die Pegel- und Kaskadenfüllstände konnten mit Excel 2003 (Version 11.0) verwaltet und ausgewertet werden. Zur Darstellung und besseren Vergleichbarkeit wurden die Messwerte

nach Einmessen der absoluten Höhe der Pegelstandorte mittels Theodolit in m ü. NN umgerechnet.

Tab. 4-4: Einige Höhenangaben zu den Bohrungen.

Pegel	GOK	Endteufe		Pegelsohle	Tonschiefer
ID	[m ü. NN]	[m u. GOK]	[m ü. NN]	[m ü. NN]	[m ü. NN]
P1	246,92	4,4	242,52	242,86	243,52
P2	246,89	3,2	243,69	243,83	244,44
P3	246,97	3,3	243,67	243,90	244,67
P4	248,16	3,6	244,56	244,63	244,86
P5	248,14	3,6	244,54	244,59	244,84
P6	248,11	4,2	243,91	244,05	244,21
P7	248,76	4,6	244,16	244,20	244,56
P8	248,75	4,2	244,55	244,71	244,70
P9	248,99	4,4	244,60	244,60	(244,80)
P10	253,41	7,0	246,41	246,51	-
P11	252,96	5,5	247,46	247,46	-
P12	246,64	3,2	243,44	243,54	(243,84)
P13	244,46	4,2	240,26	240,31	(240,26)

4.1.3 Tomogramme

Zur Erkundung der flächenhaften Lage des Wasserspiegels und der Feuchteverteilung im Untergrund der Quellmulden wurden insgesamt acht geoelektrische Profile erstellt. Zum einen, weil die Geoelektrik als minimal invasive Methode die angelegten und gepflegten Flächen schont. Zum anderen, weil sie im Gegensatz zu Bohrungen, welche nur Punktinformationen liefern, die flächenhafte, zweidimensionale Erkundung des Untergrundes ermöglicht und zudem eine kostengünstige Alternative darstellt. Die vorhandenen Grundwasserpegel und die durchgeführten Wasserstandsmessungen erhöhen die Aussagesicherheit der geoelektrischen Ergebnisse (KNEISEL, MÜLLER & WINTRICH 2007: 195, KNÖDEL, KRUMMEL & LANGE 2005: 71).

Die Geoelektrik ist neben Refraktions- oder Reflexionsseismik, Gravimetrie, Geomagnetik und Georadar eines jener geophysikalischen Verfahren, die über die Erfassung der Leitfähigkeitsstrukturen des Untergrundes, Aussagen über dessen Struktur, Mächtigkeit und Schichtung zulassen. Geoelektrische Methoden nutzen die unterschiedlichen Leitfähigkeiten bzw. die unterschiedlichen elektrischen Widerstände der den Untergrund bildenden Substrate und Gesteine (s. Tab. 4-5). Einen maßgeblichen Einfluss auf die Leitfähigkeitsverhältnisse im Untergrund haben dabei der Sättigungsgrad und die Feuchteverteilung. Daneben ist die Leitfähigkeit auch von dem Chemismus der Porenwässer, der Porenraumstruktur und der Temperatur abhängig. Schichten mit deutlichen Leitfähigkeits- bzw. Widerstandskontrasten lassen sich besonders gut sondieren (KNEISEL 2002: 7).

Tab. 4-5: Spezifische elektrische Widerstände ausgewählter Materialien (nach KNÖDEL et al. 2005: 98, VOGELSANG 1998: 89)

Material	Wertebereich [Ωm]
Ton (erdfeucht)	3 - 30
Ton (trocken)	>1.000
Sand	50 - >10.000
Schluff	20 - 50
Lößlehm	30 - 100
Tonschiefer	50 - >100.000
Natürliche Wässer	10 - 300
Grundwasserleiter	>200

Die geoelektrische Sondierung wurde mit einem Messgerät durchgeführt, welches mittels einer Fahrzeugbatterie mit Energie versorgt wird und neben dieser Stromzufuhr (Geber/Sender) ein Spannungsmessgerät (Empfänger) enthält. Daran angeschlossen wird ein Kabel. In gleichen Abständen voneinander werden hieran Metallstangen angeklemt, die in den Boden geschlagen werden und während der Messung die Funktion von Elektroden bzw. Sonden übernehmen.

Bei der hier verwendeten Gleichstrom-Geoelektrik wird über zwei Stromelektroden (A und B) Gleichstrom bzw. niederfrequenter Wechselstrom in den Untergrund eingespeist. Es entsteht ein räumliches Potentialfeld, welches von den Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund beeinflusst wird. Zwei Messsonden, auch Potentialelektroden (M und N) genannt, messen die Potentialdifferenz. Abb. 4-4 zeigt diese so genannte Vierpunktanordnung, die während eines Messdurchganges am Kabel entlang von Elektrode zu Elektrode vorrückt.

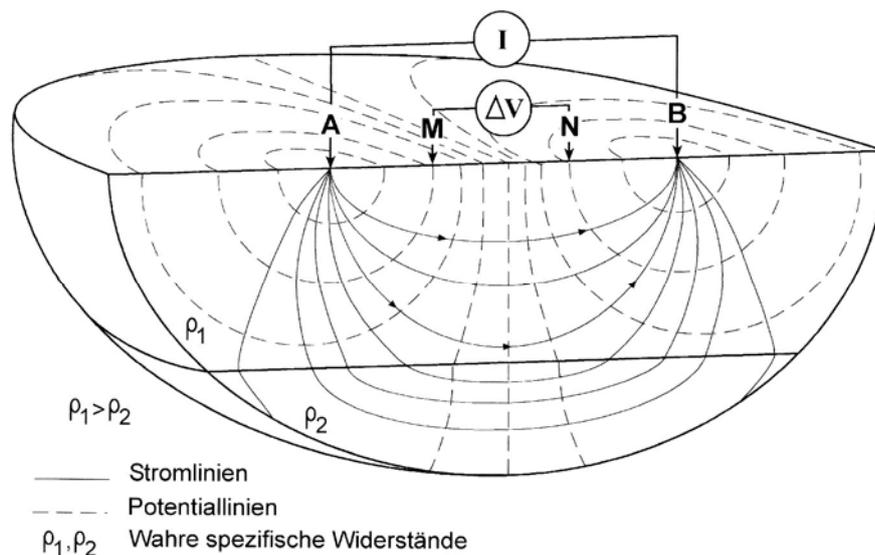


Abb. 4-4: Prinzip der Widerstandsmessung mit der Vierpunktanordnung (KNEISEL 2002: 9).

Aus der Potentialdifferenz (ΔV_{MN}) und der Stromstärke (I_{AB}) zwischen A und B lässt sich unter Verwendung des Konfigurationsfaktors K der gewählten Elektroden-Sonden-Anordnung die räumliche Verteilung der wahren spezifischen elektrischen Widerstände im Untergrund ableiten (KNEISEL 2002: 9, KNÖDEL et al. 2005: 129). Der spezifische Widerstand ρ des homogenen Halbraumes des elektrischen Feldes (vgl. Abb. 4-4) ergibt sich aus:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad [\Omega\text{m}] \quad (4-4)$$

mit:

ρ = spezifische Widerstand [Ωm]
 K = Konfigurationsfaktor [m]

ΔV = Potentialdifferenz [V]
 I = Stromstärke [V/ Ω]

Da der Aufbau des Untergrundes im Gegensatz zur Modellvorstellung inhomogen ist, wird der Begriff des „scheinbaren spezifischen Widerstandes“ verwendet.

Ergebnis der Auswertung sind farbige Schichtenmodelle, die so genannten Tomogramme (tomos, griech. Schnitt). Sie geben die gemessenen scheinbaren Widerstände wieder und stellen die Verteilung der spezifischen Widerstände im Untergrund dar. Für die zweidimensionale Ergebnisdarstellung der im Rahmen der vorliegenden Arbeit erhobenen Messwerte wurden die so genannten Pseudotiefenschnitte gewählt. Die Modellierung der Messergebnisse erfolgte mit Hilfe des Programmes RES2DINV von GEOTOMO (GEOTOMO 2007: o. S., KNEISEL et al. 2007: 192). Die Ergebnisdarstellung beruht auf einer Inversion der Widerstandsdaten mittels einer „smoothness constrained“ kleinsten Quadrate Methode. Dabei erfolgt eine Optimierung der Daten mittels Vergleich zwischen berechnetem und gemessenem scheinbaren Widerstand. Die resultierende Abweichung wird als root-mean-square-Fehler (RMS) in der Graphik angezeigt (GEOTOMO 2007: o. S., WERBAN 2005: 30).

Einen störenden Einfluss auf die Messung können beispielsweise Metallteile ausüben, insbesondere dann, wenn sie parallel zur Elektroden-Sonden-Anordnung verlaufen. Auch Hangneigungen $> 10^\circ$ und Geländesprünge müssen berücksichtigt werden (KNÖDEL et al. 2005: 144). Schwierigkeiten bei der Interpretation können die sich überlappenden Widerstandsbereiche unterschiedlicher Materialien bereiten (KNEISEL et al. 2007: 192).

Zweidimensionale geoelektrische Messungen können der Fragestellung insofern angepasst werden, als dass eine höhere Auflösung durch Verringerung der Elektrodenabstände erzielt werden kann (KNÖDEL et al. 2005). In den Quellmulden wurden die Auslagengeometrien Wenner-Schlumberger und Dipol-Dipol mit Elektrodenabständen von 2 m (hohe Eindringtiefe, geringe Auflösung) und 1 m (geringere Eindringtiefe, höhere Auflösung) verwendet.

4.1.4 Akzeptanzbefragung

Im Rahmen des WaReLa-Projektes wurde auch der Öffentlichkeitsarbeit Aufmerksamkeit geschenkt. Hierzu zählt insbesondere die Analyse derjenigen Aspekte, die in der Bevölkerung zur Befürwortung naturnaher Retentionsmaßnahmen in Siedlungsgebieten, speziell auf Privatgrundstücken führen und derer, die eine ablehnende Haltung verursachen. Um der Frage nach Akzeptanz schaffenden Faktoren nachzugehen, wurden im Zuge einer Diplomarbeit (MICHALSKI 2005) zunächst in den Gebieten Trier-Tarforst („BU 11 – Östlich Olbeschgraben“) und Konz-Langenscheid („Langenberg IV“) im Zeitraum 16.05. - 26.06.2005 Befragungen durchgeführt. Hierauf aufbauend, folgte eine Befragung im Neubaugebiet „BU 18“ in Trier-Petrisberg vom 10. - 23.12.2005.

Auf die Methodik der Befragungen, die Ergebnisse der Umfragen in den ausgewählten Siedlungsgebieten und die Interpretation derselben wird hier nicht weiter eingegangen, da diese ausführlich in der Arbeit von MICHALSKI (2005) und zusammenfassend in KRONEWIRTH & WINTRICH (2007) dargestellt sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit fließen die Ergebnisse unter Bezugnahme weiterer Literaturquellen in Handlungsempfehlungen für alle an Planung und Umsetzung dezentraler Retentionsmaßnahmen Beteiligten. Diesen Empfehlungen widmet sich Kapitel 8.

4.2 Verwendetes Karten- und Datenmaterial

4.2.1 Niederschlagsdaten

Die Verfügbarkeit klimatologischer Daten betreffend, liegt das Untersuchungsgebiet sehr günstig zwischen der etwa 1100 m entfernten Klimamessstation Trier-Petrisberg des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und dem ca. 560 m entfernten Klimamessfeld des Faches Umweltmeteorologie der Universität Trier. Letztere stellte Niederschlagsdaten in 10-minütiger Auflösung zur Verfügung, welche bei der Untersuchung der ebenfalls 10-minütigen Abflussdaten Verwendung fanden.

Für die N-A-Simulationen war eine 30-jährige Niederschlagsreihe erforderlich. Hier wurde auf Daten der etwa 3300 m entfernten Station Trier-Irsch zurückgegriffen. Tabelle 4-6 gibt eine Übersicht über die verwendeten Niederschlagsdaten sowie deren Herkunft, Messstandort, Einheit und Auflösung.

Sämtliche im Folgenden genannten Bearbeitungsschritte erfolgten mit der Software MATLAB. Da die Daten der Umweltmeteorologie unkorrigiert und ungeprüft vorlagen, wurden sie zunächst auf Konsistenz und Homogenität geprüft. Dies erfolgte anhand von Tagessummen der DWD-Station Trier-Petrisberg, die im Internet kostenlos zur Verfügung stehen. Hierbei wurde angenommen, dass die Daten des DWD als offizielle Messdaten aufgrund der

besseren Überwachung und Bewertung der Datengüte mittels Qualitätsbytes eine höhere Messsicherheit besitzen (s. HERZOG & MÜLLER-WESTERMEIER 1998: 22ff).

Tab. 4-6: Herkunft und Auflösung der verwendeten Niederschlagsdaten.

Herkunft	Standort	Einheit	Auflösung/ Aufnahmedatum
Klimamessfeld der Umweltmeteorologie der Universität Trier	2548669, 5512642 251 m ü. NN	mm	10-minütig seit 2005, äquidistant
DWD Trier-Petrisberg (02276) (Wetterwarte)	2547506, 5512587 265 m ü. NN	0,1 mm	10-minütig 01.06.2006 bis 31.12.2006, äquidistant
WMO-Stationsnr.: 10609 http://www.dwd.de/de/FundE/ Klima/KLIS/daten/online/nat/ ausgabe_tageswerte.htm	2547506, 5512587 265 m ü. NN	mm	Tageswerte 01.01.2005 bis 30.04.2007
Landesamt für Wasserwirtschaft Mainz Trier-Irsch (2652) (Filterstation)	2550200, 5510150 225 m ü. NN	0,01 mm	5-minütig 01.11.1967 bis 31.10.1997, äquidistant

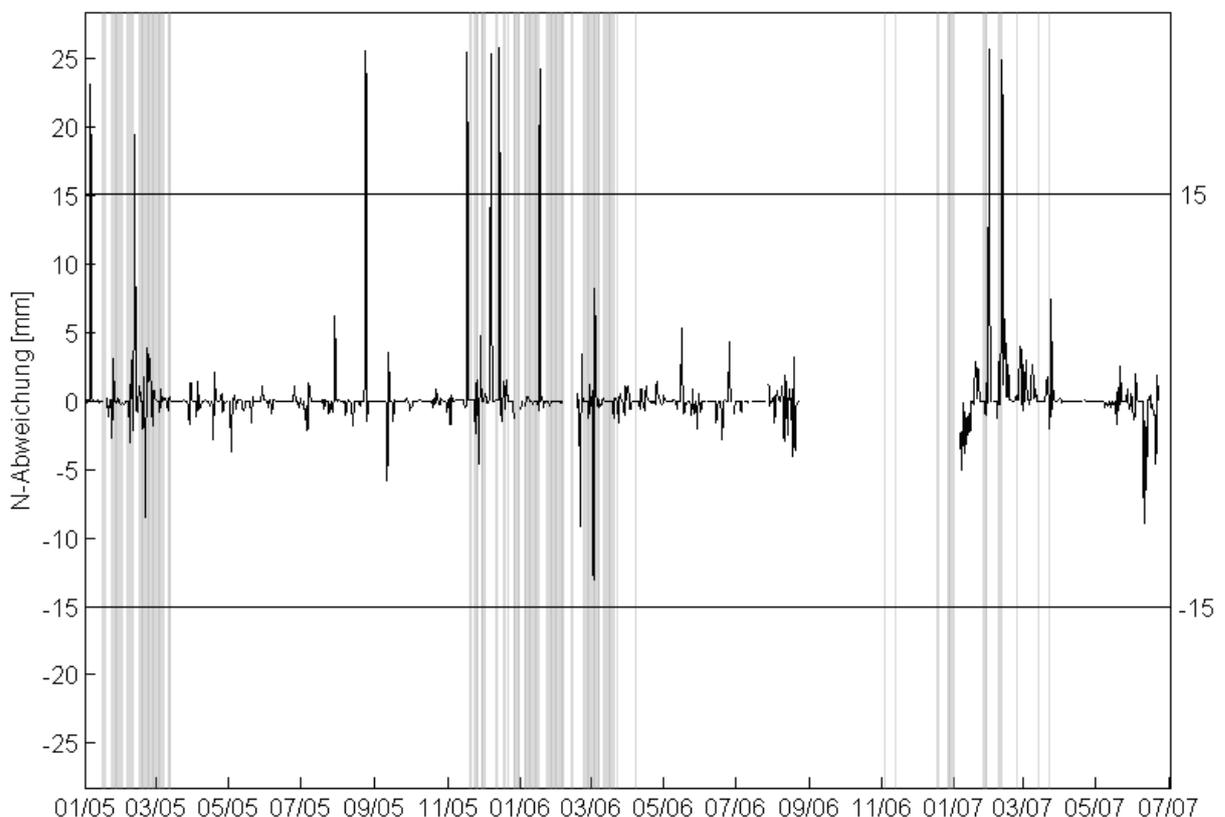


Abb. 4-5: Differenzen zwischen Niederschlags-Tagessummen der Messstation der Umweltmeteorologie, Universität Trier und des DWD, Station Trier-Petrisberg (grau hinterlegt: Frosttage; Lücke: Messausfall, Erläuterung s. Text).

Zur Prüfung der Daten der Umweltmeteorologie anhand derer des DWD wurden die Differenzen beider Datenreihen graphisch ausgewertet (s. Abb. 4-5). Dabei zeigt sich deutlich, dass den Tagessummindifferenzen des Niederschlags kein Verteilungsmuster zugrunde liegt. Einzig erkennbar ist eine stärkere Streuung der Werte um Null in den Winterhalbjahren. Dies ist auf folgende Messfehlerproblematik zurückzuführen: Laut Herrn Baltes, Mitarbeiter der Umweltmeteorologie kommt es vor, dass die Kippwaage des Messgerätes ein falsches elektronisches Signal empfängt oder während der Wintermonate im Auffangtrichter festgefrorenes Tau- oder Nebelwasser im Laufe des Vormittags auftauert und so erfasst wird. Insgesamt acht von neun Werten (s. Abb. 4-6) sind wohl hierauf zurückzuführen. Sie liegen im Winterhalbjahr und der jeweils gemessene Peak erfolgt meist gegen Mittag bei Temperaturen von 3°C bis 6°C. Die Ursache für den falschen Wert vom 24.08.2005 ist unbekannt. Diese Einzelwerte weichen deutlich um mehr als 15 mm von den DWD-Daten ab. Daher wurden sie gelöscht und an ihre Stelle der Messwert des vorausgegangenen 10-Minuten-Messintervalls übernommen, so dass eine in sich konsistente Datenreihe resultiert.

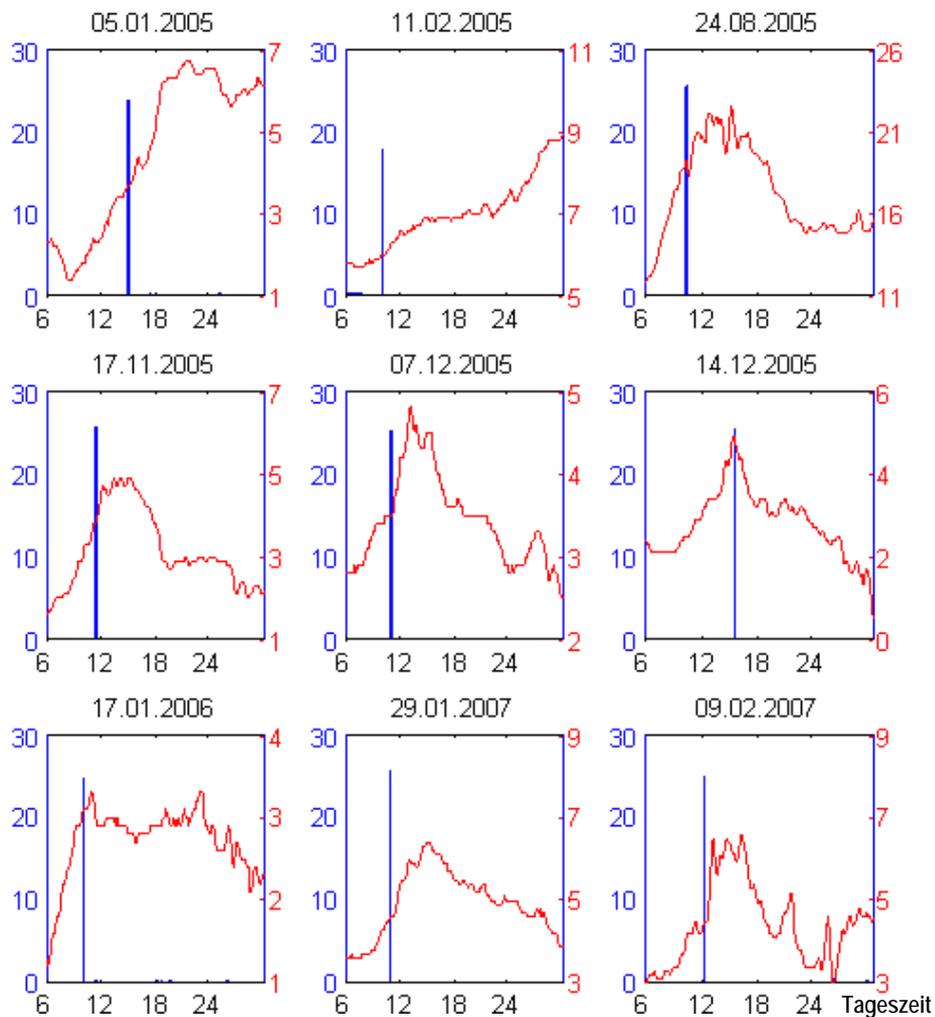


Abb. 4-6: Einzeldarstellungen der gelöschten Niederschlagswerte (blau: Niederschlag, rot: Temperatur).

Wegen Unterbrechung der Messungen im Zeitraum September bis Dezember 2006 wurde auf DWD-Daten für den Zeitraum 01.06.2006 - 31.12.2006 im 10-Minuten-Intervall zurückgegriffen. Vorher wurden die Daten vom 01.06.2006 - 23.08.2006 mit denen der Umweltmeteorologie verglichen, um deren Übereinstimmung zu prüfen (Abb. 4-7). Da die grafische Darstellung der Differenzen keinen systematischen Trend (z. B. generell höhere Niederschlagswerte) erkennen lässt, wurden die DWD-Daten ohne Änderung übernommen.

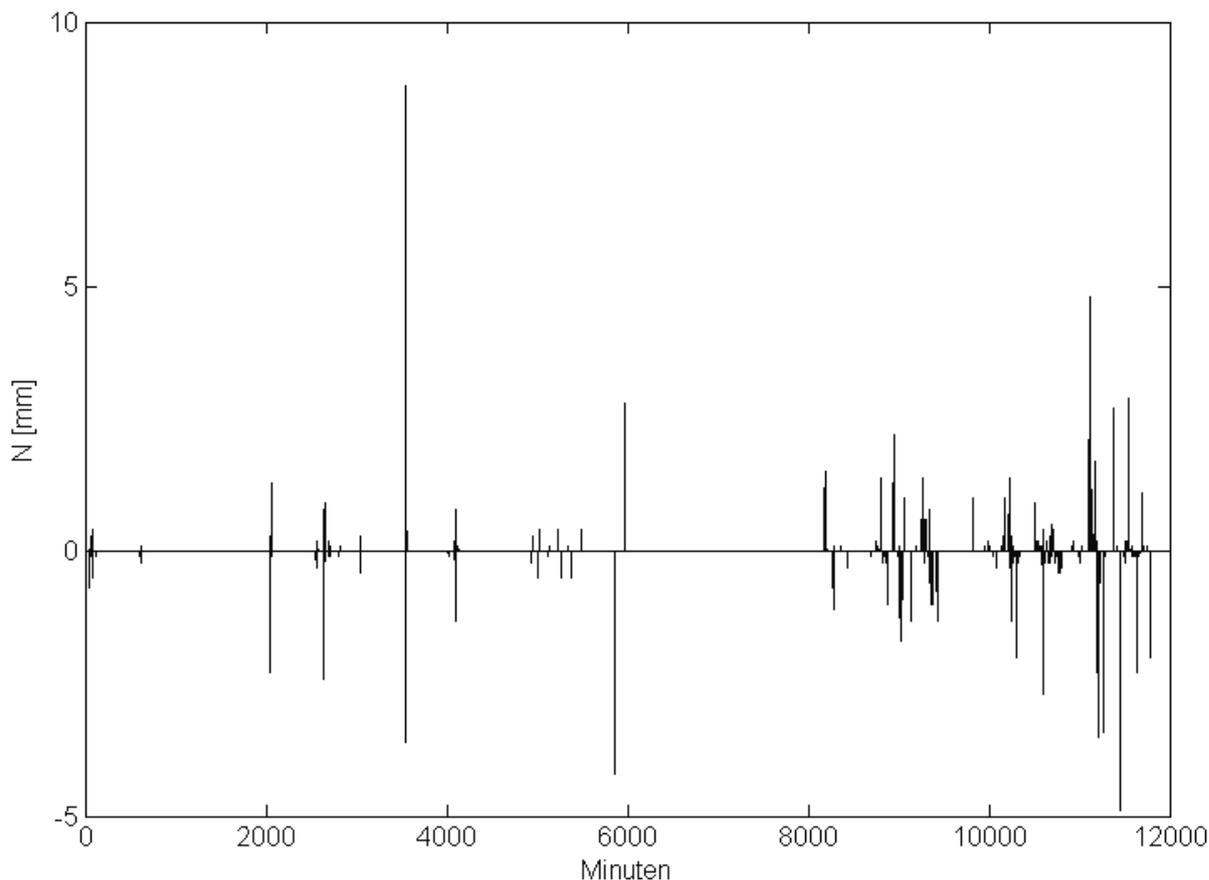


Abb. 4-7: Differenzen zwischen den 10-Minuten-Niederschlagsdaten des DWD und der Umweltmeteorologie, Universität Trier im Zeitraum 01.06.2006 - 23.08.2006.

Niederschlagsdaten weisen außerdem generell systematische Fehler auf. Verluste durch Benetzung des Auffangtrichters und Verdunstung aus selbigem sowie der Einfluss des Windes führen zu einer Unterschätzung der gefallenen Niederschlagsmengen (HELBIG 2004: 8, RICHTER 1995, SEVRUK 1981, SYMADER 2004: 31f). Grob lässt sich der Gesamtfehler im deutschen Mittelgebirgsraum für mittlere Niederschlagstagesummen auf 10 % bis 20 % schätzen. Die in Trier-Irsch und Trier-Petrisberg gewonnen Daten bedürfen nach der von RICHTER (1995: 82) entworfenen Karte zum mittleren prozentualen Niederschlagsmessfehler bei mäßig geschützter Lage einer Erhöhung um 11 %.

Auf eine Korrektur der Daten nach RICHTER (1995) wurde jedoch verzichtet, da diese in den unter Kapitel 2.2.2 aufgeführten, meist ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen ebenfalls unterblieb und somit eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist. Lediglich NIEHOFF (2002) verwendete mit WASIM-ETH ein Programm mit integriertem Korrekturverfahren, das den Einfluss des Windes berücksichtigt, dazu jedoch auch mindestens Daten zu Temperatur und Windgeschwindigkeit benötigt (NIEHOFF 2002: 47, SCHULLA 1997: 20). In der Praxis können sich solch zeitaufwändige Verfahren nicht durchsetzen. Daher erfolgt bei der Dimensionierung von Retentionsanlagen eine Kompensation der meist unterschätzten Niederschlagshöhen durch einen Sicherheitszuschlag in Form einer Erhöhung der einer Bemessung zugrunde liegenden Dauerstufe.

4.2.2 Karten- und Bildmaterial

Zur Verfügung standen der Plan des Entwässerungskonzeptes Petrisberg (BGHPLAN 2005) sowie das Städtebauliche Gesamtkonzept, aus dem Anzahl, Größe und Lage der geplanten sowie der bis zum Druck des Plans bereits bestehenden Gebäude hervorgehen (EGP 2005).

Um den Baufortschritt und die damit einhergehende Versiegelung zu dokumentieren, fanden am 08.12.2005, 14.02.2006 und 12.11.2006 anhand dieses Plans eigene Kartierungen im Untersuchungsgebiet statt. Daneben wurden Luftbilder ausgewertet, die den Bebauungszustand erkennen lassen. Die Befliegungen wurden von der EGP in Auftrag gegeben und fanden in unregelmäßigen Abständen statt. Die Aufnahmen stammen aus dem Zeitraum 07/2002 - 11/2006. Tabelle 4-7 listet das verwendete Karten- und Bildmaterial zusammenfassend auf.

Tab. 4-7: Verwendetes Karten- und Bildmaterial.

Material	Erstellungs-/Ausgabedatum	Herkunft
Entwässerungskonzept	2005	BGHPLAN
Städtebauliches Gesamtkonzept	2005	EGP
Kartierung des Baufortschritts	08.12.2005 14.02.2006 12.11.2006	eigene Kartierungen
Luftbilder	07/2002 – 11/2006 in unregelmäßigen Abständen	EGP
detaillierte Kartierung des Baubestandes	Februar 2007	eigene Kartierungen

4.3 Niederschlag-Abfluss-Simulation

Der Frage nach der Effizienz des Retentionssystems im untersuchten Gebiet kann nur an einem Modell desselben mittels N-A-Simulation nachgegangen werden. Vor Umsetzung des

Retentionskonzeptes wurden noch keine Abflussdaten erhoben, die einen Vorher-Nachher-Vergleich ermöglichen würden, zudem erfolgte die Entwässerung vorher nicht in den Brettenbach, sondern Richtung Norden. Zusätzlich erschwerend kommt hinzu, dass das Untersuchungsgebiet während der Datengewinnung ständigen Veränderungen infolge der fortschreitenden Bebauung unterlag. Diese Gegebenheiten berücksichtigend, wurde folgende Fragestellung formuliert:

Wie viel Oberflächenwasser hält das Retentionssystem im Vergleich zu einer konventionellen Entwässerung über einen Regenwasserkanal (Trennsystem) mit Abgabe in den Brettenbach zurück?

Um die für eine Simulation notwendigen Aussagen über Art und Grad der Versiegelung des Einzugsgebietes treffen zu können, fand im Februar 2007 zunächst eine detaillierte Kartierung des Baubestandes und sämtlicher Oberflächen statt. Als Kartiergrundlage dienten das städtebauliche Gesamtkonzept der EGP, der Entwässerungsplan des Planungsbüros BGHPLAN, ein Auszug der ALK des Stadtvermessungsamtes Trier und ein Orthophoto des Landesamtes für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz. Die Kartierung wurde durch Auswertung von Luftbildern (insbesondere zur Identifizierung von Dacheindeckungen) ergänzt. Anschließend wurden alle Flächen mit dem Programm ArcMap 9.1 von ESRI digitalisiert. Jeder Flächenart wurde in der Attributtabelle in Anlehnung an das Merkblatt ATV-DVWK-M 153 „Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser“ (ATV-DVWK 2000: 10) ein bestimmter Abflussbeiwert zugeordnet. Eine weitere Spalte diente der Berechnung der Flächengrößen. Durch Multiplikation jeder Flächengröße mit dem jeweiligen Abflussbeiwert wurde der gewichtete Abflussbeiwert bestimmt. Dieser sagt aus, wie viel Prozent der betrachteten Fläche zu 100 % versiegelt sind. Das Mittel sämtlicher gewichteter Abflussbeiwerte eines Teil-Einzugsgebietes dividiert durch die Gesamtfläche gibt den Flächenanteil der undurchlässigen Flächen an der Gesamtfläche an (ATV-DVWK 2000: 297). Da es sich theoretisch um voll versiegelte Flächen handelt, kann dieser Wert mit dem Versiegelungsgrad des Gebietes gleichgesetzt werden. Es fließen also nicht tatsächliche Flächengröße und Abflussbeiwert in die Modellierung des Untersuchungsgebietes ein, sondern die berechnete, theoretische Flächengröße der vollversiegelten Flächen (vgl. erwin 4.0).

4.3.1 Erwin 4.0

Zur Modellierung des Gebietes wurde auf das Programm erwin 4.0 der IFS INGENIEUR-GESELLSCHAFT FÜR STADTHYDROLOGIE MBH, Hannover zurückgegriffen. Mit diesem Programm erfolgte bereits die Dimensionierung der Retentionsanlagen am Petrisberg. Es handelt sich um ein flächendetailliertes, konzeptionelles N-A-Modell, das auf systemhydrologischen Modellansätzen basiert. Es wird hauptsächlich zur Planung von konventionellen als auch naturnahen Konzepten der Bewirtschaftung von Regenwasser in Siedlungsgebieten verwen-

det. Neben der Dimensionierung von Versickerungsanlagen nach DWA-A 138 können mittels Langzeitsimulation Nachweise über die Leistungsfähigkeit von Anlagen erstellt und Wasserbilanzen berechnet werden. Dabei ist die Bemessung der Entwässerung einzelner Grundstücke bis hin zu großen, komplexen Einzugsgebieten möglich.

Erwin 4.0 bildet den Abflussprozess nach dem Prinzip der linearen Speicherkaskade ab. Da die zu erwartende hydraulische Belastung einer Retentionsanlage deren Größe bestimmt, steht insbesondere der direkte Oberflächenabfluss im Mittelpunkt des Modells. Es werden vereinfachte Prozessmodelle für die Abflussbildung verwendet, wobei nach Oberflächenabfluss und Verlusten differenziert wird. Zu letzteren zählen bei undurchlässigen Flächen Anfangsverluste durch Benetzungs- und Muldenverluste sowie Dauerverluste aufgrund von Teilversickerung durch Pflasterfugen, Neigungen von Flächen weg vom Kanalanschluss, Regentonnen o. ä.. Diese werden durch den Endabflussbeiwert beschrieben. Bei durchlässigen Flächen werden Benetzungs- und Interzeptionsverluste, Mulden- und Dauerverluste sowie Infiltrationsverluste unterschieden.

Die Verdunstung wird vereinfacht als mittlere potentielle Verdunstung in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit und basierend auf der örtlichen Jahrsverdunstungshöhe dargestellt (s. Abb. 4-8). Verdunstungsverluste während eines Niederschlagsereignisses werden nicht berücksichtigt, da diese insbesondere bei stärkeren Regenereignissen vernachlässigbar sind (IFS MBH 2002: 23).

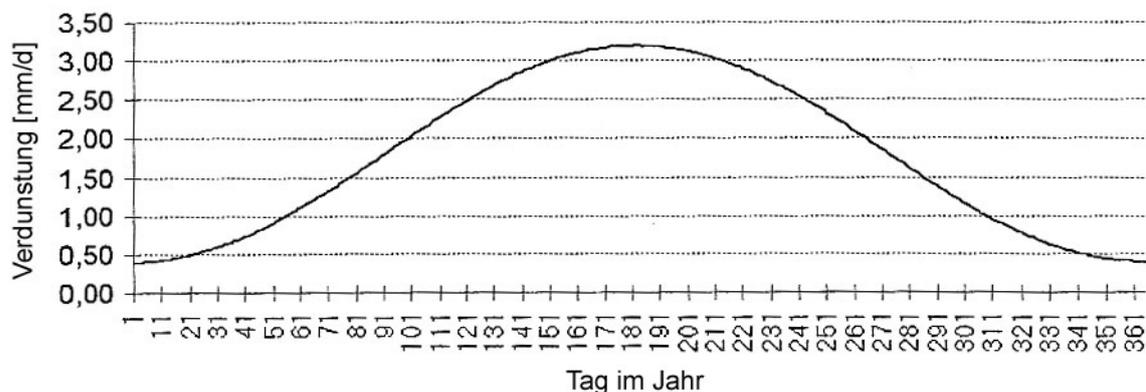


Abb. 4-8: Jahresgang der mittleren potentiellen Verdunstung im Modell erwin 4.0 (IFS 2002: 25).

Die Infiltration wird nur in Form von Infiltrationsverlusten in einer Mulde berücksichtigt, um das geminderte Volumen, Einstauzeiten und den ggf. eintretenden Überlauf quantifizieren zu können. Abflussprozesse im Boden, die beispielsweise zur Aufsättigung tiefer liegender Mulden führen können, werden somit nicht berücksichtigt. Trotz der relativ einfachen Modellstruktur sind bei Verwendung kalibrierter Modelle laut IFS MBH (2002: 20) bewiesener Maßen „realitätsgerechte Berechnungsergebnisse zu erzielen“.

Erwin 4.0 kann als flächen- und komponentendetailliertes Modell bezeichnet werden, da folgende Bausteine zur Verfügung stehen:

- Flächenelemente: Einzugsgebiet, Dach- und Straßenflächen
- Transportelemente: Rohr (unterirdisch) und Gerinne (oberirdisch)
- Sonderbauwerke: Becken, Versickerungsanlagen (Flächenversickerung, Muldenversickerung, Rohr-/Rigolenversickerung, Schachtversickerung), Mulden-Rigolen-Elemente, Bodenfilter, Teiche, Regenwassernutzung

Neben den zuvor ermittelten Angaben zu Größe, Abflussbeiwert und Anfangsverlusten der Straßen- und Dachflächen der einzelnen Teileinzugsgebiete sind daher weitere Parameter erforderlich: Bei Versickerungsmulden werden Länge, Breite, Tiefe und Böschungswinkel der Mulden, deren Versickerungsfläche und k_f -Wert abgefragt. Anhand der Angaben errechnet das Programm die Kennlinien der Beziehungen zwischen dem Wasserstand und a) der Versickerungsfläche und b) dem Volumen. Für die Beziehung zwischen Wasserstand und c) dem Überlauf und ggf. d) dem Überlauf in die Rigole ist die Eingabe des Überfallbeiwertes, der Breite und der Höhe der Wehrschwelle über der Muldensohle erforderlich. Anhand der Überfallformel von POLENI wird die Kennlinie automatisch erstellt. Bei den Mulden-Rigolen sind zusätzlich Angaben zu Mächtigkeit der Rigole, Porenanteil der Kiesfüllung, nutzbarer Feldkapazität und Grobporenanteil zu machen.

Die Angaben zu den Retentionsanlagen wurden von dem zur Planung verwendeten Modell übernommen, da sie auf den Vorgaben zum Bau der Anlagen beruhen und die meisten Parameter an den Anlagen nicht ohne Beschädigung derselben durch Messungen überprüft werden können. Der k_f -Wert orientiert sich zumeist an dem ungünstigsten k_f -Wert, der bei Infiltrationsversuchen in der Nähe der jeweiligen Mulde ermittelt wurde (BGHPLAN 2002: 16).

Die programminterne Vorgabe für die mittlere potentielle Jahresverdunstung liegt mit 657 mm über dem Wert für Trier. Daher wurde dieser entsprechend den genannten Angaben zum langjährigen Mittel des Niederschlags für den Zeitraum 1961 - 1990 (784 mm/a) und den Angaben zum Verdunstungsanteil (66 %) über den Verdunstungsfaktor (0,78) korrigiert.

Aufgrund der Nachbildung des Bewirtschaftungssystems am Petrisberg werden anhand von Niederschlagsdaten Abflussganglinien berechnet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Modell mit gemessenen Niederschlagsdaten belastet. Hierfür wurde auf eine 30-jährige Datenreihe der Station Trier-Irsch zurückgegriffen. Es handelt sich dabei um Niederschlagsdaten aus dem Zeitraum 1967 - 1997 in einer Auflösung von 5 Minuten, wobei diese im MD-Format bereitgestellt werden müssen. Dabei handelt es sich um ein Format, das zur Speicherung äquidistanter **Massen-Daten** entwickelt wurde.

Da Niederschlag räumlich und zeitlich variabel ist, ermöglicht das Programm, jeder Teilfläche eine eigene Niederschlagsdatei zuzuordnen. Somit entspricht die räumliche Wiedergabe im Modell der jeweiligen Teilfläche. Da das untersuchte Gebiet lediglich rund 35 ha groß ist und

Niederschlagsdaten von zwei nahe gelegenen Messstationen zur Verfügung standen, wurde auf zusätzliche Messeinrichtungen verzichtet und allen Teilflächen die gleiche Niederschlagsdatei zugewiesen. Die zeitliche Wiedergabe entspricht dem gewählten Simulationszeitschritt, der im vorliegenden Fall mit der Auflösung der Niederschlagsdaten von 5 Minuten übereinstimmt.

Nach Durchführung einer Langzeitsimulation generiert das Programm eine Ereignisliste sämtlicher Niederschlags-Abfluss-Ereignisse. Durch die Eingabe einer Mindest-Niederschlagshöhe und/oder die Ereignisdauer können bestimmte Ereignisse aus dieser Liste herausgefiltert werden. Über die Simulation von Einzelereignissen kann das Systemverhalten mittels Ganglinien und Ereignisbilanz im Detail überprüft werden (IFS MBH 2002: 1). Angaben zu Abflussvolumen und Abflussscheitel sind Teil der Ganglinienabbildungen. Da sie nicht kopiert werden konnten, mussten sie manuell in eine Excel-Tabelle übertragen werden. Eine ausführliche Beschreibung der hydrologischen und hydraulischen Modellgrundlagen findet sich im Teil 1 des Programmhandbuches zu erwin 4.0 (IFS MBH 2002).

Die vereinfachten Verfahren, die dem Programm zugrunde liegen, werden in Kauf genommen, da es hinsichtlich der Fragestellung geeignet erscheint. Komplexere Modelle sind zudem mit einem erheblich größeren Aufwand zur Erhebung von Felddaten und einem hohen zeitlichen Rechenaufwand verbunden.

4.3.2 Erstellte Modelle

Das Untersuchungsgebiet wurde gemäß Entwässerungsplan in Teil-Einzugsgebiete gegliedert. Es wurden zwei Modelle erstellt, die jeweils die Straßen- und Dachflächen dieser Teil-Einzugsgebiete zum Kartierungszeitpunkt abbilden, wobei eines die Bewirtschaftung des Regenwassers simuliert und das andere die Entwässerung des Oberflächenwassers über einen Regenwasserkanal. Natürliche Flächen können in den erstellten Modellen nicht berücksichtigt werden. Somit erfolgt die Modellierung unter der Annahme, dass das Oberflächenwasser auf den unbefestigten Flächen versickert, verdunstet oder oberflächlich abfließt. Folglich wird angenommen, dass es keinen Einfluss auf das Bewirtschaftungssystem hat und im Falle von Oberflächenabfluss ohne vorherige Belastung der Mulden in den Vorfluter gelangt. Erwin 4.0 enthält zwar die Möglichkeit, Einzugsgebiete als solche darzustellen, die dafür erforderlichen Eingabeparameter lagen jedoch größtenteils nicht vor. Zudem ergab eine Erkundigung bei verschiedenen Büros, dass es bei Planungen durchaus üblich ist, sich bei der Modellierung auf die bebauten Flächen zu konzentrieren.

Im Modell BB_RWB wurden die versiegelten Flächen getrennt nach Dach- und Straßenflächen eingegeben. Die einzelnen Flächen sind wahlweise per Kanal oder offenem Gerinne an die Retentionsanlagen angeschlossen. Private Retentionsflächen wurden vereinfacht zu je einer Retentionsanlage zusammengefasst (s. Abb. 4-9).

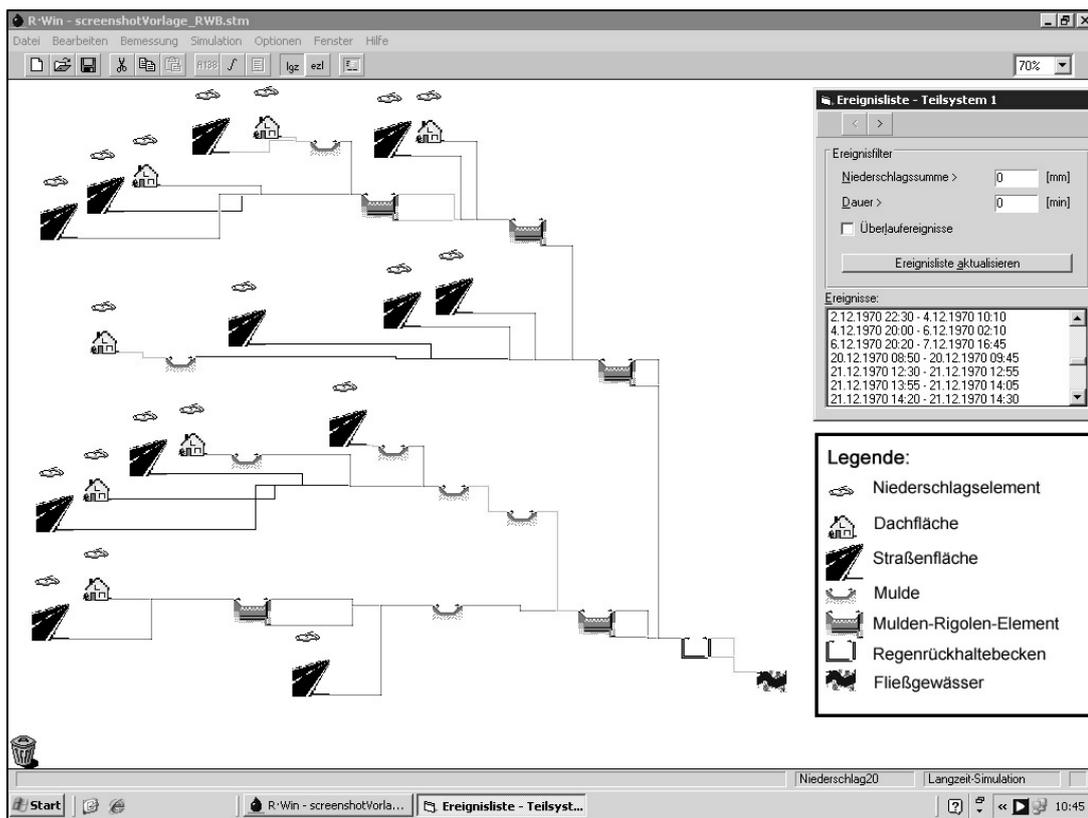


Abb. 4-9: Aufbau des Modells BB_RWB.

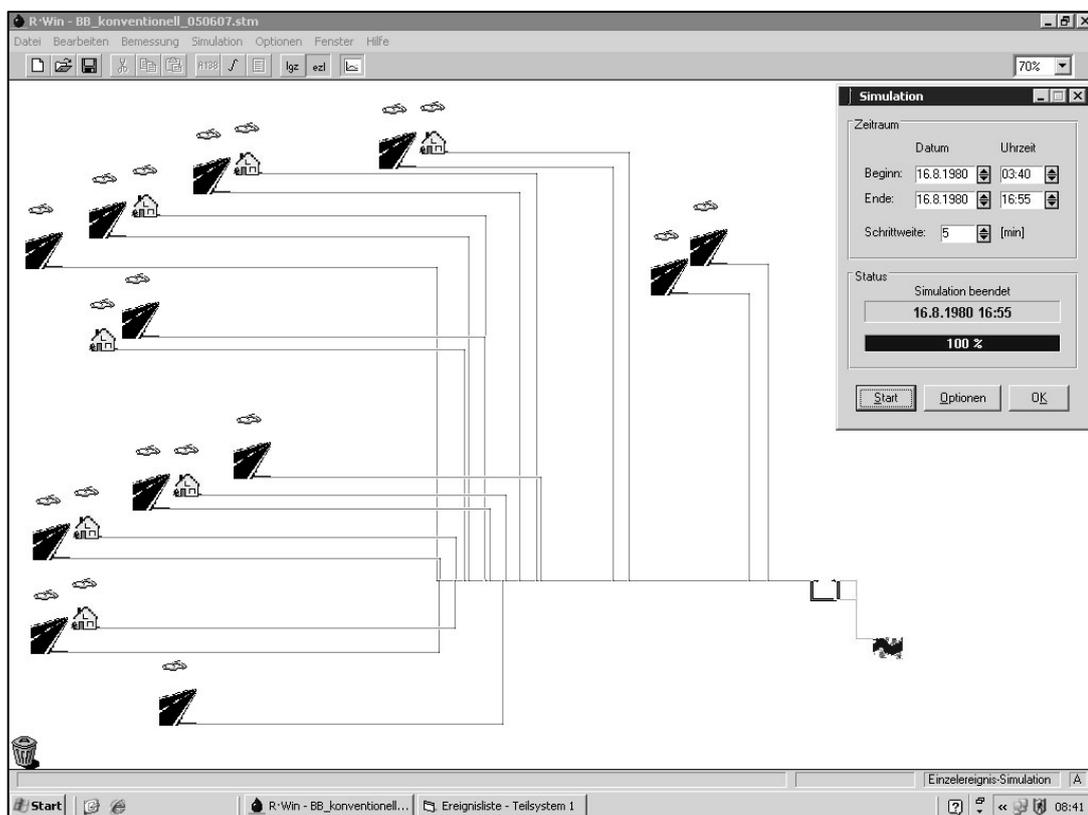


Abb. 4-10: Aufbau des Modells BB_konv.

In einem zweiten Modell (BB_konv) wurde eine fiktive Entwässerung des Petrisbergs über ein Trennsystem dargestellt. Hierzu wurden sämtliche Retentionselemente entfernt und alle Flächen an einen Regenwasserkanal angeschlossen, der über ein altes Regenrückhaltebecken in den Brettenbach entwässert (s. Abb. 4-10).

Jener als „altes Becken“ bezeichnete Regenrückhalteraum liegt im Quellbereich des Brettenbaches. Dieser und der daran anschließende Brettenbach sind beiden Modellen gemeinsame Vergleichspunkte. Als Vergleichsgrößen dienen der Zulauf zum alten Becken, die dortige Einstauhöhe, die Einstaudauer, die Anzahl der Überläufe und Überflutungen sowie der Zulauf zum Brettenbach. Alle Größen können sowohl in Bilanzen für Einzelereignisse als auch in einzelnen Jahresbilanzen und in einer Bilanz für den Gesamtzeitraum ausgegeben werden.

Die Jahresbilanzen oder die Gesamtbilanz zugrunde legend ergibt sich der Rückhalt bei Regenwasserbewirtschaftung aus der Differenz von Niederschlag (N) oder effektivem Niederschlag (N_{eff}) und der Zulaufmenge zum Brettenbach (Q_{zu}) im Verhältnis zum Niederschlag beispielsweise bei Betrachtung des effektiven Niederschlags wie folgt:

$$Rückhalt = \frac{(N_{eff} - Q_{zu/RWB})}{N_{eff}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4-5)$$

mit:

N_{eff} = effektiver Niederschlag [mm]

$Q_{zu/RWB}$ = Zulauf zum Brettenbach im Modell zur Regenwasserbewirtschaftung [m³]

Um den Rückhalt und die Scheitelabminderung des Retentionssystems im Vergleich zu einer konventionellen Entwässerung (Trennsystem) zu berechnen, wurde folgendermaßen vorgegangen. Zunächst wurde im Modell BB_RWB eine Langzeitsimulation mit den Niederschlagsdaten der Station Trier-Irsch (1967 - 1997) durchgeführt. In der resultierenden Ereignisliste wurden alle Niederschlagsereignisse > 10 mm ausgewählt. Anschließend wurden diese alle einzeln simuliert und das Abflussmaximum am alten Becken sowie die Zuflussmenge zum Brettenbach notiert. Dieser Vorgang wurde am Modell BB_konv wiederholt. Mit den Niederschlagsdaten des Zeitraums 2005 - 2006 (Umweltmeteorologie der Universität Trier und DWD-Station Trier-Petrisberg) wurde genauso verfahren.

Der Rückhalt ergibt sich hier aus der Differenz der Zulaufmengen zum Brettenbach bei Regenwasserbewirtschaftung und konventioneller Ableitung im Verhältnis zur Zulaufmenge bei konventioneller Ableitung wie folgt:

$$Rückhalt = \frac{(Q_{zu/konv} - Q_{zu/RWB})}{Q_{zu/konv}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4-6)$$

mit:

$Q_{zu/konv}$ = Zulauf zum Brettenbach im Modell zur konventionellen Ableitung [m³]

$Q_{zu/RWB}$ = Zulauf zum Brettenbach im Modell zur Regenwasserbewirtschaftung [m³]

Anders formuliert, handelt es sich um die in Relation zum Kanalabfluss gesetzte Menge an Oberflächenwasser, die in der Fläche zurückgehalten wird.

Die Scheitelabminderung gibt an, um wie viel geringer der maximale Abfluss bei Bewirtschaftung des Regenwassers ausfällt, als dies bei einer konventionellen Entwässerung der Fall wäre und berechnet sich folgendermaßen:

$$\Delta Q_{\max} = \frac{(Q_{\max/konv} - Q_{\max/RWB})}{Q_{\max/konv}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4-7)$$

mit:

ΔQ_{\max} = prozentuale Scheitelabminderung [%]

$Q_{\max/konv}$ = maximaler Abfluss bei Regenwasserableitung [l/s]

$Q_{\max/RWB}$ = maximaler Abfluss bei Regenwasserbewirtschaftung [l/s]

4.3.3 Kalibrierung, Modellgüte

Zur Kalibrierung des Modells wurden die simulierten Abflussganglinien mit den gemessenen verglichen. Dabei wurden einige Parameter nach dem Trial-and-Error-Verfahren solange verändert bis eine bestmögliche Übereinstimmung der berechneten Ganglinien mit den gemessenen erreicht wurde. Als Niederschlags-Input dienten Niederschlagsdaten aus dem Zeitraum 01.01.2005 bis 31.12.2006 vom nahe gelegenen Klimamessfeld der Umweltmeteorologie der Universität Trier und der DWD-Station Trier-Petrisberg.

Auf eine Validierung des Modells nach dem split-sample test musste verzichtet werden, da die vorliegende Datenreihe mit zwei Jahren hierfür zu kurz ist. Auch ein differential split-sample test eignet sich nicht, da sich die Bebauung und somit die Zunahme der Versiegelung über den gesamten Zeitraum erstreckt. Der Umweg über die Erstellung eines Modells für ein anderes Gebiet nach dem proxy-basin test oder dem proxy-basin differential split-sample test wäre zu zeitaufwändig gewesen. Da das Modell weder zu Prognosen noch zur Übertragung auf ein anderes Gebiet vorgesehen ist, erscheint die fehlende Validierung tolerierbar.

Um die Modellgüte zu testen, wurden zunächst die berechneten Spitzenabflüsse und Abflussvolumina der Drosselabläufe der Quellmulde 3 (PBD1) und der Sportplatzmulde (PBD2) mit den dort gemessenen Werten desselben Zeitraums visuell verglichen. Im nächsten Schritt erfolgte die Darstellung der Abweichungen der simulierten Werte von den gemessenen mittels Streudiagrammen. Als Indikatoren für die Modellgüte dienten dabei der Korrelationskoeffizient r und das Bestimmtheitsmaß R^2 .

Simuliert wurden sämtliche Niederschlagsereignisse des Zeitraumes 1967/68 bis 1996/97 mit einer Niederschlagshöhe > 10 mm (insgesamt 685 Ereignisse). Ereignisse < 10 mm wurden nicht untersucht, da diese einer Wiederkehrzeit von $T < 2$ a (entspricht der jährlichen Überschreitungshäufigkeit von im Mittel einmal in zwei Jahren) entsprechen und somit auch lokal nicht Hochwasser relevant sind. Außerdem wurde das System auf ein hundertjähriges

Ereignis ausgelegt, so dass eine hohe Rückhaltekapazität bei jährlichen Ereignissen angenommen werden kann. Nach Durchführung einer Langzeitsimulation und anschließenden Einzelsimulationen im Modell BB_RWB wurden der Ereignisliste die Angaben zu Beginn (Tag, Uhrzeit) und Ende (Tag, Uhrzeit) eines Ereignisses entnommen und anschließend im Modell BB_konv simuliert.

Notiert wurden jeweils die Zulaufmenge zum alten Becken [m^3], der maximale Abfluss [l/s] und die Zulaufmenge vom alten Becken zum Brettenbach. Mithilfe der Angaben zu den Zulaufmengen wurde der Rückhalt [%] des Retentionssystems im Vergleich zum Regenwasserkanal eines Trennsystems berechnet. Dabei sind zwei zu betrachtende Stellen zu unterscheiden: das alte Becken und der Brettenbach. Der Rückhalt im Brettenbach wird bei den seltenen Überlaufereignissen des alten Beckens gegenüber dem dortigen Rückhalt geringfügig (um einige Prozent) abgemindert. Da die Werte ansonsten übereinstimmen, werden in der vorliegenden Arbeit nur Angaben über den Rückhalt im Brettenbach direkt unterhalb des alten Beckens gemacht. Über den maximalen Abfluss wurde die Scheitelabminderung des Retentionssystems an einer gedachten Einleitstelle oberhalb des alten Beckens im Vergleich zum Regenwasserkanal ermittelt. Der Zusammenhang zwischen Niederschlagsmenge und erzielttem Rückhalt bzw. entsprechender Scheitelabminderung wurde anschließend graphisch dargestellt.

5 Ergebnisse

Die Reihenfolge der Ergebnisdarstellung entspricht der Reihenfolge der Anordnung der untersuchten Standorte im Retentionssystem dem Gefälle folgend von oben nach unten. Darauf folgen die Ergebnisse der N-A-Simulationen.

Zur Darstellung der Ergebnisse der Pegelmessungen wurde das hydrologische Abflussjahr vom 01.11.2005 - 31.10.2006 gewählt. Die Pegel P10 und P11 werden ausgelassen, da hier kein Grundwasser erfasst werden konnte.

5.1 Kaskadenfüllstände

Die Mulden der untersuchten Kaskade sind die kleinsten der untersuchten Retentionselemente und ermöglichen visuell einen schnellen ersten Eindruck von den Prozessgeschwindigkeiten. Um die Entleerungszeiten der Kaskade unter möglichst gleichen Bedingungen vergleichen zu können, wurden zunächst jene Tage herausgesucht, an denen alle Kaskadenmulden (K1 bis K15) aufgefüllt waren und denen ein Tag ohne Niederschlag folgte. Sechs Ereignisse, jeweils drei davon im Herbst/Winter und drei im Frühjahr/Sommer gelegen, entsprechen diesen Kriterien.

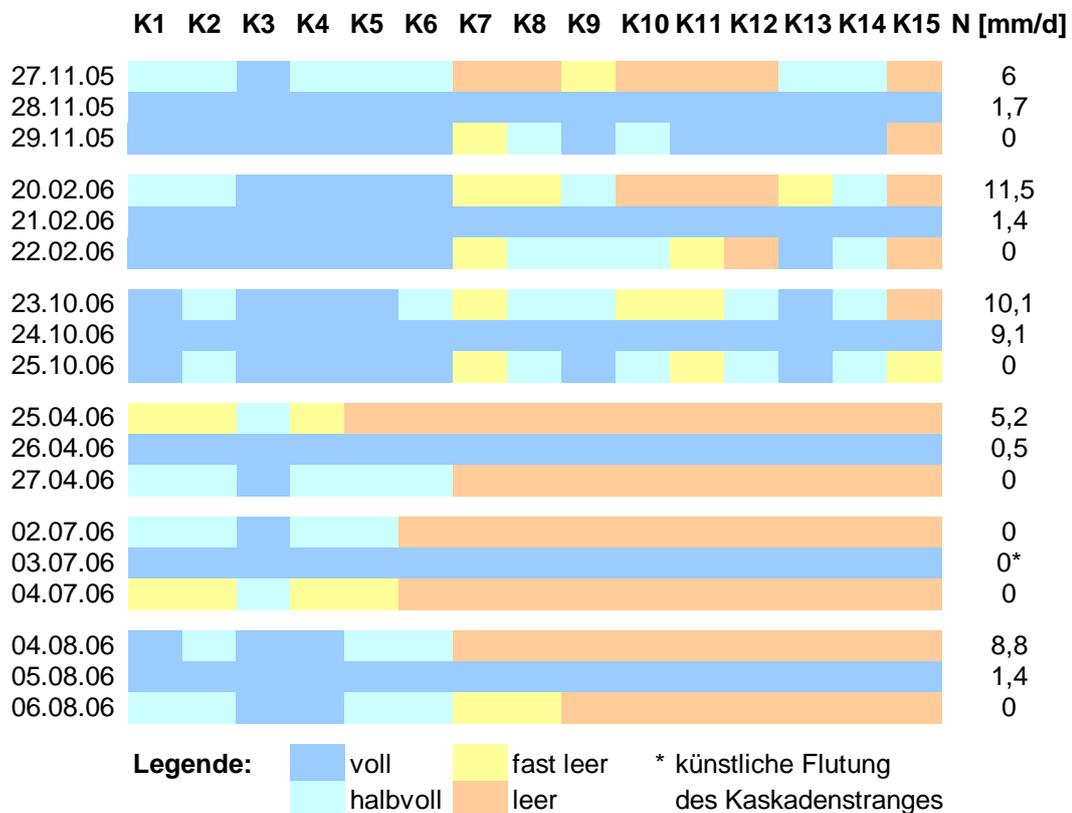


Abb. 5-1: Darstellung der Veränderungen der Kaskadenfüllstände zu sechs ausgewählten Ereignissen.

In Abb. 5-1 sind diese Ereignisse jeweils mit der Situation des Vortages dargestellt, da der Vorregen bzw. die Vorfeuchte des Bodens entscheidend für die Speicherkapazität des Bodens ist. Ist der Boden bereits im Vorfeld eines Regenereignisses stark wassergesättigt, füllen sich die Mulden schneller und entleeren sich danach langsamer, weil das Wasser kaum oder nur langsam versickern kann.

Zu den gewählten Terminen weisen die oberen Mulden fast stets Wasser auf. In den unteren Mulden werden geringere Füllstände erfasst. Am Tag nach Vollfüllung der Kaskade sind in den Monaten des Winterhalbjahres zumindest einige der unteren Mulden teilentleert, während sie in den wärmeren Monaten April, Juli und August komplett trocken fallen.

5.2 Profilschnitte

Abb. 5-2 zeigt nebeneinander drei schematische Profilschnitte durch die Pegel der drei Terrassen der Quellmulden sowie einen Profilschnitt durch die beiden im Abstrom der Kaskaden und der Quellmulden gelegenen Pegel P12 und 13 (vgl. Abb. 4-3). Die Schnitte erfolgen auf gleicher Terrassenebene jeweils von W nach E und in der dargestellten Reihenfolge von N nach S.

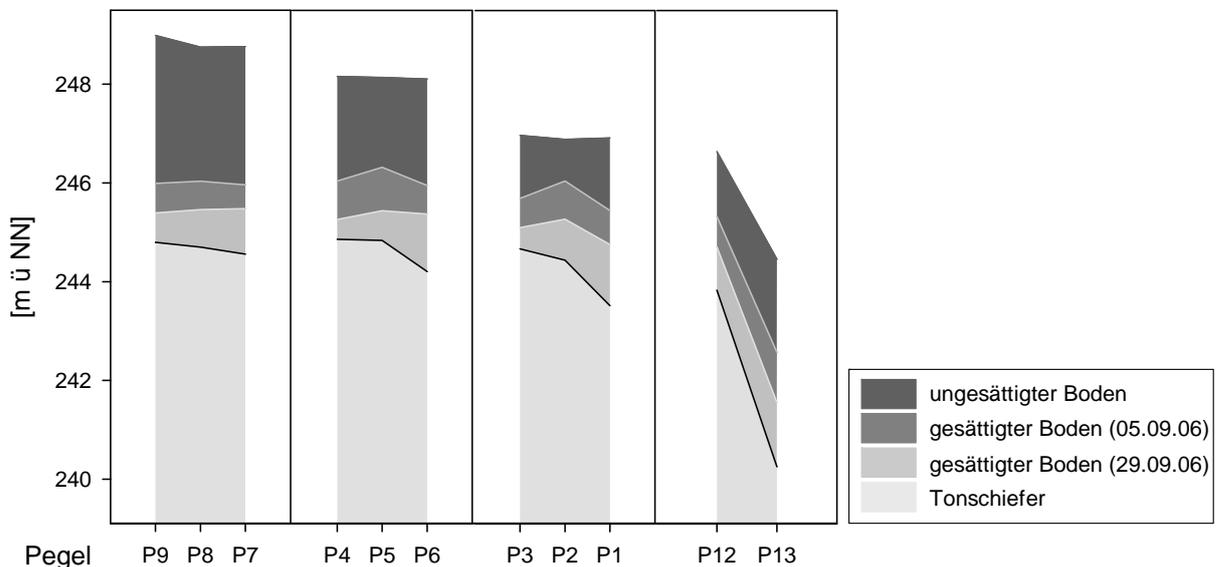


Abb. 5-2: Lage der Quartärbasis an den Pegeln P1 bis P9 sowie P12 und P13, die Grundwassermächtigkeit (beispielhaft nach Niederschlag am 05.09.06 und während der Trockenphase am 29.09.06) und die darüber liegende ungesättigte Zone bis zur Geländeoberkante in m ü. NN.

Zu unterst ist der Tonschiefer dargestellt, dessen Lage im Zuge der Errichtung der Grundwassermessstellen in und unterhalb der Quellmulden ermittelt wurde. Die Mächtigkeit des Grundwasserleiters entspricht der wassergesättigten Bodenzone. Um die Variabilität der Grundwassermächtigkeit innerhalb nur weniger Wochen zu zeigen, wird diese zu zwei unter-

schiedlichen Terminen dargestellt. Der 05.09.06 zeigt die Wasserstände zwei Tage nach einer etwa dreiwöchigen Regenperiode und der 29.09.06 nach der darauf folgenden regenarmen Periode. Darüber ist der ungesättigte Boden bis zur Geländeoberkante abgebildet. In Abb. 5-3 sind die Grundwassermächtigkeiten an den Pegeln P1 bis P9 sowie P12 und P13 analog zur Reihenfolge in Abb. 5-2 im Abflussjahr 01.11.2005 - 31.10.2006 dargestellt. Auffällig sind die häufigen Ausreißer nach oben. Sie sind durch den schnellen Anstieg und den logarithmischen Abfall der Wasserstände mit der dadurch bedingt größeren Anzahl niedrigerer Wasserstände zu erklären.

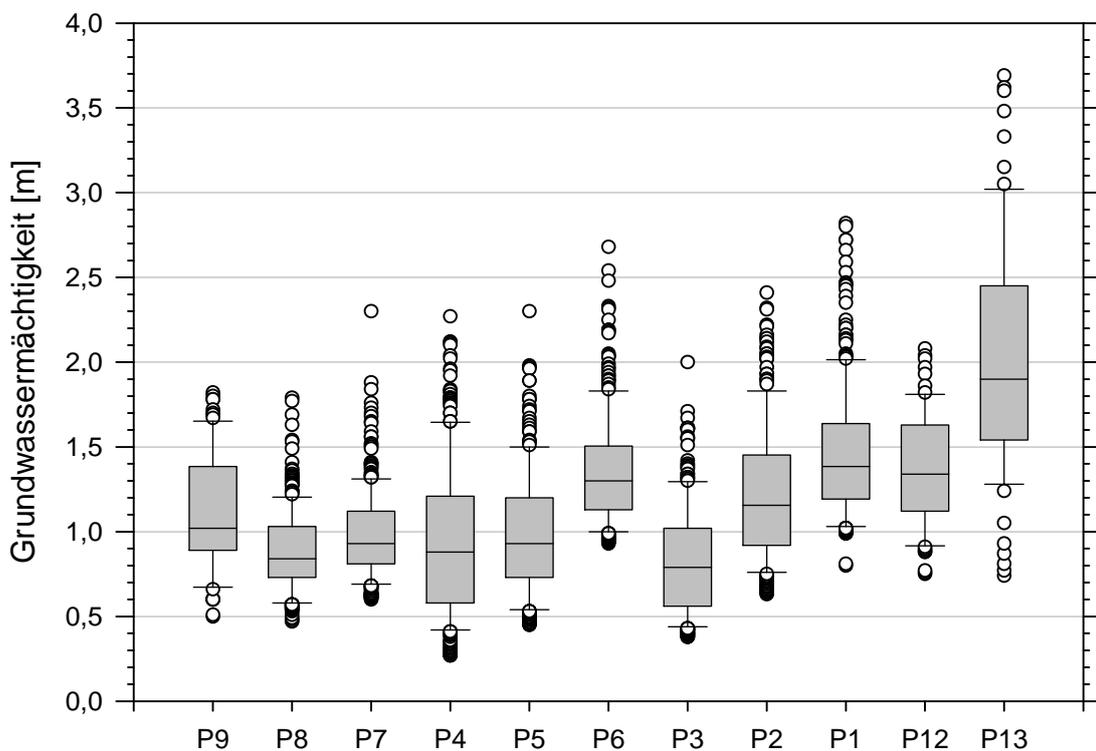


Abb. 5-3: Darstellung der Grundwassermächtigkeit mittels boxplots.

Die Mächtigkeit der wasserführenden Schicht in den Quellmulden (P1 - P9) erreicht in diesem Zeitraum bei P4 mit 27 cm den geringsten Wert und bei P1 mit 2,82 m den größten. Am Ende von Trockenphasen liegt sie ungefähr zwischen 40 - 100 cm und bei Höchstständen zwischen 130 - 200 cm. Es ist jedoch zu beachten, dass die maximalen Wasserstände insbesondere der Pegel P5, P3, P2 und P4 bei stärkeren Niederschlagsereignissen auch P6, P13 und P1 sowie nach Starkniederschlägen ebenso P8 und P7 infolge einstauenden Wassers nicht gemessen werden können (zur Anzahl der überstauten Tage s. a. Tab. XIV im Anhang). Infolge Pfützenbildung liegen die Pegelkappen dann unter der Wasseroberfläche. Beim Öffnen der Pegelkappen würde das Wasser in die Pegel fließen und die Werte verfälschen. Die

tatsächlichen Höchststände in den genannten Pegeln können daher nicht erfasst werden (s. a. Kapitel 7.3).

5.3 Grundwasserganglinien

Zunächst zeigt Abb. 5-4 den über die Monatsmittel der Pegel P1 bis P8 gemittelten Grundwassergang von November 2005 bis Januar 2007 sowie die Monatssummen des Niederschlags und die monatlichen Temperaturmittel. Der Grundwasserstand steigt bis März 2006 an, sinkt daraufhin bis Juli ab, um bis zum Januar 2007 wieder anzusteigen. Aufgrund des negativen Zusammenhangs zwischen Verdunstung und Versickerung weisen Grundwasserganglinie und Temperatur einen entgegengesetzten Verlauf auf.

Abb. 5-5 zeigt die Ganglinien der Pegel P1 - P8 im hydrologischen Winterhalbjahr (01.11.2005 - 30.04.2006).

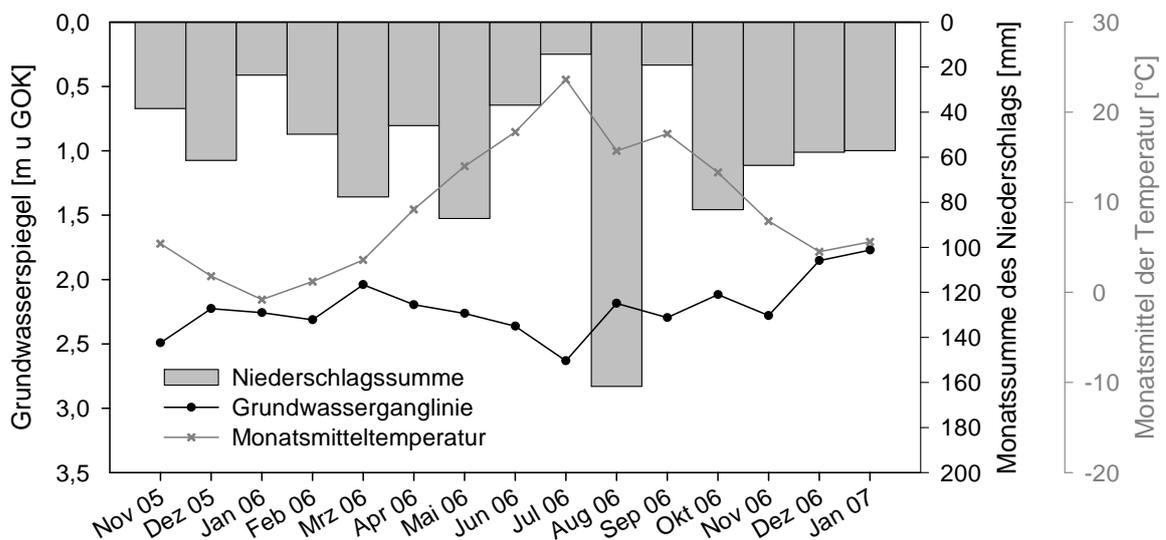


Abb. 5-4: Über die Monatsmittel der Pegel P1 - P8 gemittelter Grundwassergang von November 2005 bis Januar 2007 sowie monatliche Temperaturmittel und Niederschlagssummen.

Alle Grundwasserganglinien der Quellmulden-Pegel beschreiben einen ähnlichen Verlauf. Einzig der Wasserspiegel bei P1 nimmt, mit durchschnittlich 56 cm und im Extremfall bei sinkendem Wasserstand mehr als 1 m Abstand zum nächst höher gelegenen Wasserspiegel bei P3, eine Sonderstellung ein. Der oben beschriebene Grundwassergang ist an P1 am einfachsten nachzuvollziehen. P7 und P8 zeigen die geringsten Wasserstandsänderungen bzw. die kleinsten Amplituden. In Abb. 5-6 sind die Grundwasser-Ganglinien der Pegel P1 bis P13 im hydrologischen Sommerhalbjahr 2006 zu sehen. Die Pegel P9 bis P13 wurden erst Ende Juli 2006 installiert, so dass erst ab diesem Zeitpunkt Daten vorliegen. Die Wasserspiegel sinken zunächst während trockener Perioden bis Ende Juli ab. Mit erneut einsetzenden, teilweise starken Niederschlägen steigen sie dann bis Ende Oktober wieder an.

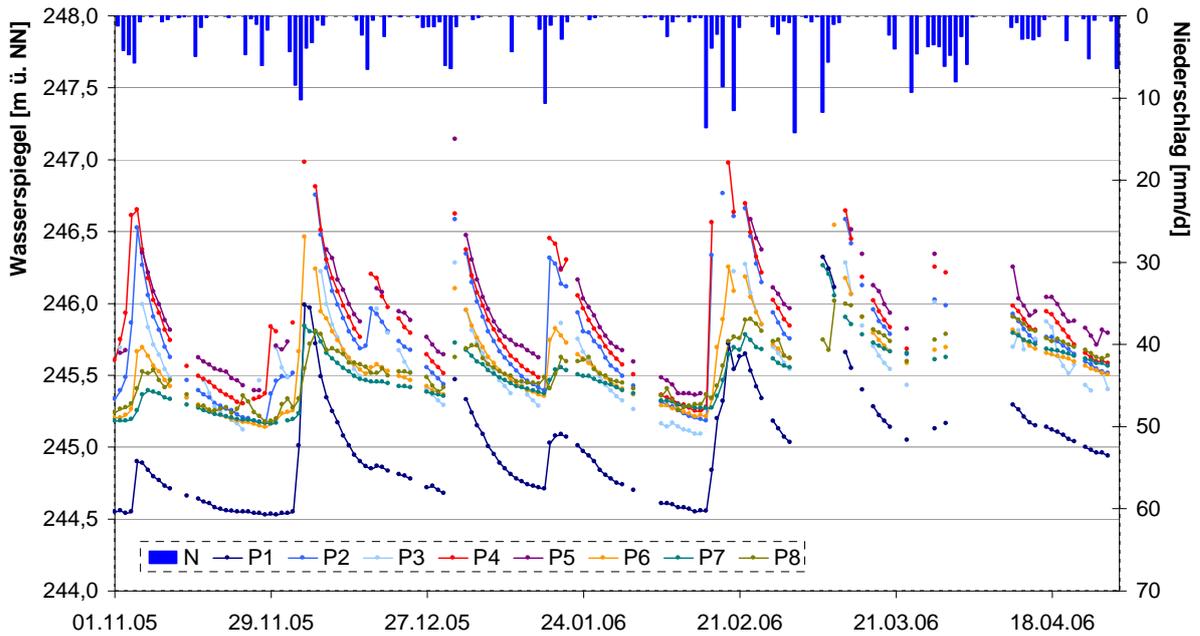


Abb. 5-5: Wasserganglinien der Pegel P1-P8 und Tagessummen des Niederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr 01.11.2005 - 30.04.2006.

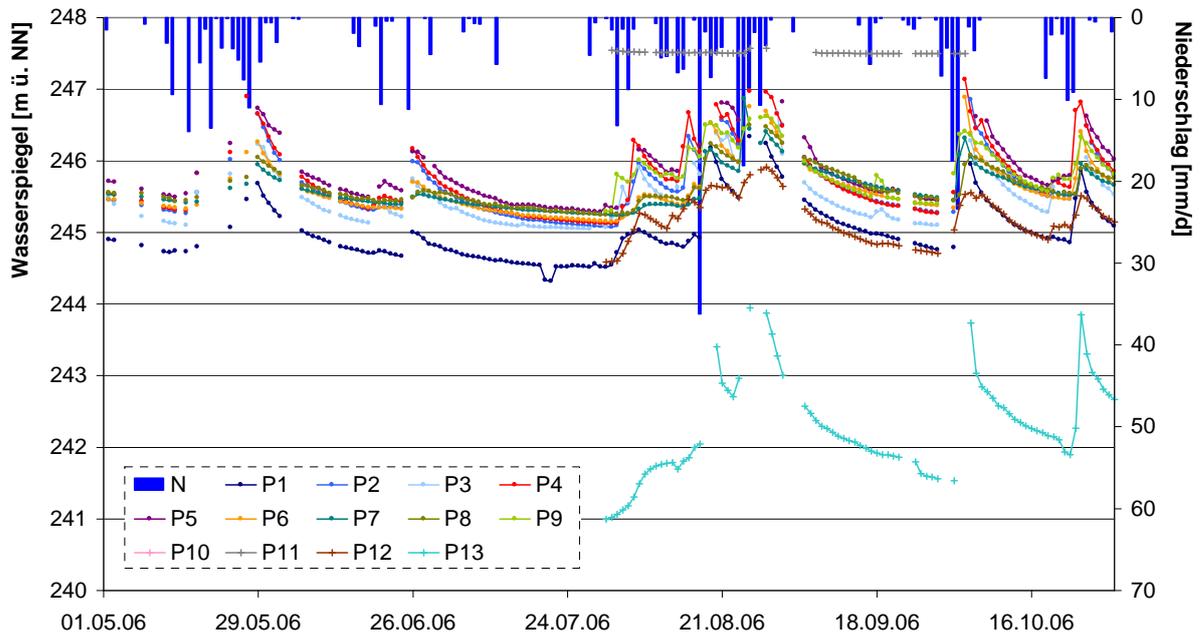


Abb. 5-6: Wasserganglinien der Pegel P1 - P13 und Tagessummen des Niederschlags im hydrologischen Sommerhalbjahr 01.05.2006 - 31.10.2006.

Der Vergleich zwischen allen Pegeln einschließlich P9 sowie der Pegel oberhalb der Quellmulden P10 und P11 sowie der Pegel unterhalb der Quellmulden P12 und P13 ab dem 31.07.2006 zeigt Folgendes (vgl. Korrelations-Tabelle XV im Anhang):

Der Wasserspiegel bei P12 liegt wie auch die Quartärbasis ähnlich tief wie der bei P1. Der Verlauf der Wasserganglinien bei den Pegeln 2, 3, 4, 5, 6 und 9 sowie der unterhalb der

Quellmulden gelegenen Pegel 12 und 13 ist sehr ähnlich (vgl. Abb. 5-6), wobei die Wasserganglinien von P9, P3, P5 und P12 bei näherer Betrachtung die größte Übereinstimmung zeigen. Hier sind zeitgleich auch kleine Anstiege zu finden, die bei den übrigen Pegeln nicht auftreten.

Im Vergleich zu den Pegeln P7 und P8, welche in der gleichen Muldenterrasse installiert sind, zeigt die Wasserganglinie bei P9 mehr Anstiege und größere Amplituden. Steigen die Wasserspiegel, kann der Abstand bis zu 50 cm betragen. Der größte Unterschied besteht zu P7. Während der Wasserspiegel bei P9 steigt, kann er bei P7 noch einige Tage absinken.

P13 ist an einer tieferen Stelle gelegen als die übrigen Pegel. Auch die Quartärbasis liegt hier deutlich tiefer (s. Abb. 5-2). Dementsprechend liegt auch der Wasserspiegel deutlich unter dem der übrigen Pegel und beschreibt einen ähnlichen, insgesamt etwas ruhigeren Verlauf.

Die Pegel P10 und P11 nördlich und nordwestlich der Quellmulden im höher gelegenen Siedlungsbereich liefern kaum Daten. Im Zuge der Bohrungen konnte weder das Anstehende noch der Wasserspiegel erreicht werden.

5.4 Feuchteverteilung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der geoelektrischen Untersuchungen anhand einer Auswahl von Tomogrammen dargestellt. Eine Zusammenstellung aller Tomogramme findet sich im Anhang (Abb. I - VIII). Einen Überblick über die Auslagen der Sondierungen gibt Abb. 5-7.

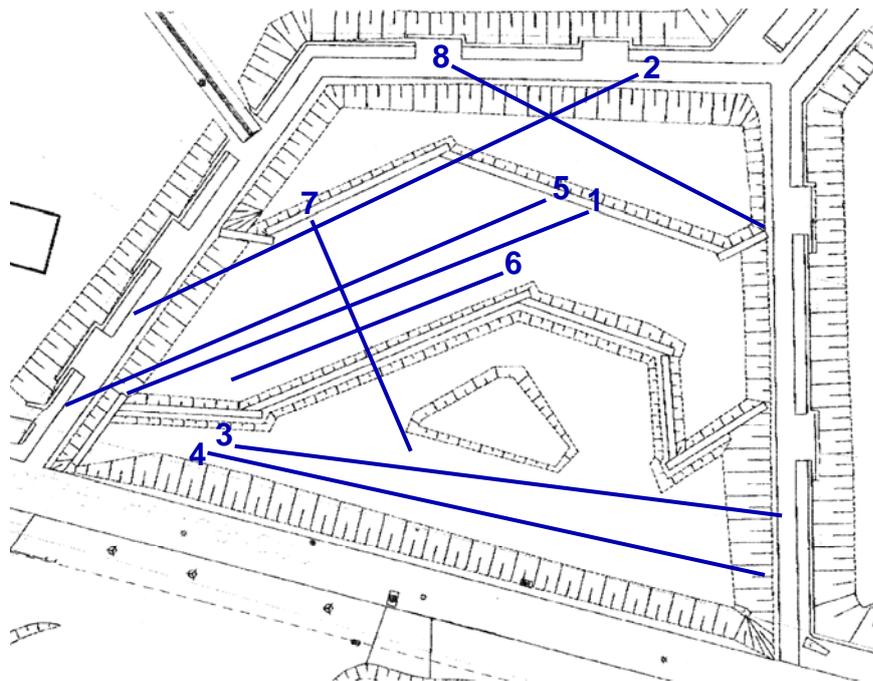


Abb. 5-7: Übersichtsplan der Quellmulden mit den Auslagen der Sondierungen und den entsprechenden Profilnummern (Kartengrundlage: SWT-AÖR).

Abb. 5-8 zeigt zwei Widerstandstomogramme identischer Auslage aus der mittleren Versickerungsmulde, die im März 2006 gemessen wurden (Profil 6 in Abb. 5-7). Während die Wenner-Schlumberger-Auslage (Abb. 5-8a) tiefere Schichten erfasst, ermöglicht die Dipol-Dipol-Auslage (Abb. 5-8b) eine höhere Auflösung der oberen zwei Meter. Gut zu erkennen, sind ein feuchter Oberboden, eine trockenere Zone zwischen 1,25 m und 2 m Tiefe und der wassergesättigte Unterboden.

Die Tomogramme bilden den Wasserspiegel in einer Tiefe von 2,5 m bis 2,7 m u. GOK ab. In Pegel P4, nahe der Elektrode 18 gelegen, wurde ein Wasserstand von 2,48 m u. GOK gemessen.

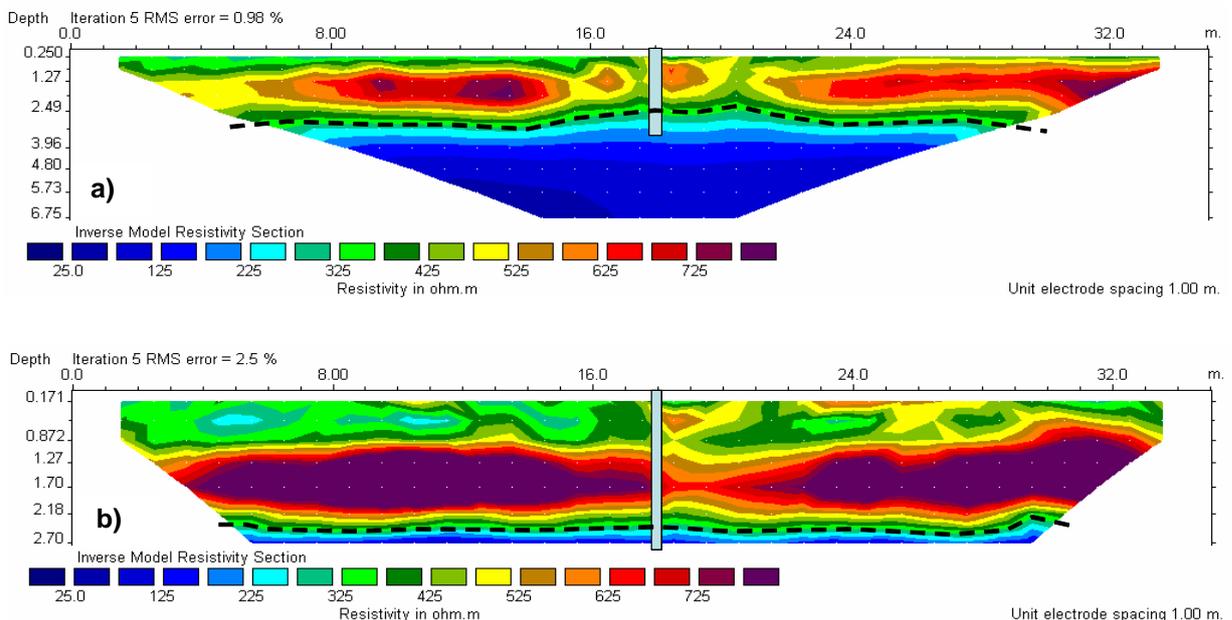


Abb. 5-8: 2D-Widerstandstomogramme aus der mittleren Versickerungsmulde (Profil 6); identische Auslage gemessen am 23.03.2006 mit a) Wenner-Schlumberger Konfiguration und b) Dipol-Dipol Konfiguration; gestrichelte Linie: geoelektrisch ermittelter Verlauf des Wasserspiegels; senkrechte hellblaue Linie: Lage des Pegels P4

Senkrecht zum Profil in Abb. 5-8 wurde am 05.05.2006 die Sondierung in Abb. 5-9 durchgeführt (Profil 7 in Abb. 5-7). Sie beginnt unterhalb des Sedimentfangs auf der mittleren Versickerungsmulde, quert die Gabione und setzt sich auf der unteren Versickerungsmulde fort. In beiden Tomogrammen sind hohe Widerstandscontraste im Bereich der Gabione zwischen den Elektroden 18 und 22 deutlich zu erkennen. Nach Abb. 5-9a liegt der Wasserspiegel in etwa 3 m Tiefe während der gemessene Wasserstand 2,67 m u. GOK betrug.

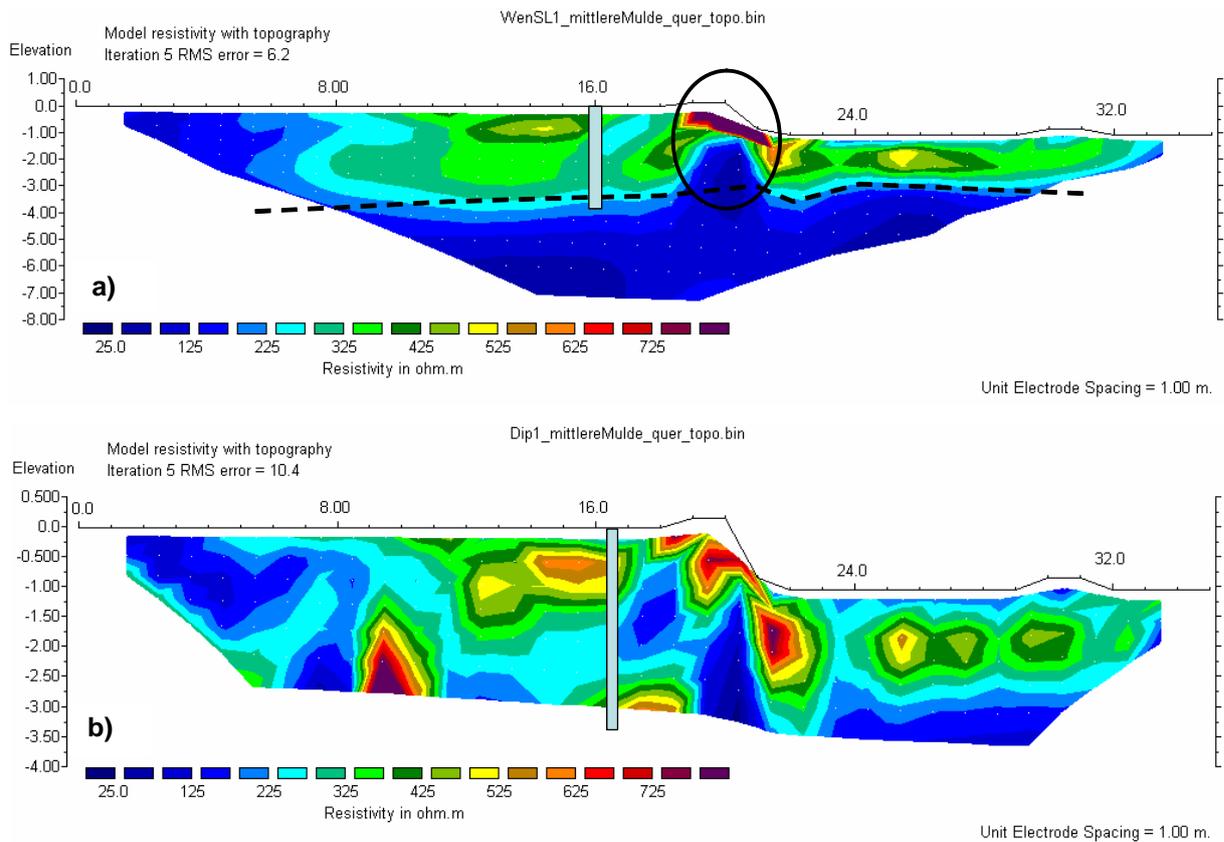


Abb. 5-9: 2D-Widerstandstomogramm von der mittleren Versickerungsmulde zur unteren (Profil 7); identische Auslage gemessen am 05.05.2006 mit a) Wenner-Schlumberger Konfiguration und b) Dipol-Dipol Konfiguration; gestrichelte Linie: geoelektrisch ermittelter Verlauf des Wasserspiegels; senkrechte hellblaue Linie: Lage des Pegels P4; schwarzer Kreis: durch Gabione bedingte Inversionsartefakte

Abb. 5-10 zeigt die Sondierung vom 23.03.2006 in der unteren Versickerungsmulde (Profil 3 in Abb. 5-7). Am rechten Bildrand mit höheren Widerstandskontrasten ist Pegel P1 zu sehen. Hier ergab die Wasserstandsmessung 1,87 m. Der per Sondierung ermittelte Wasserspiegel liegt zwischen 1,5 m und 2,5 m.

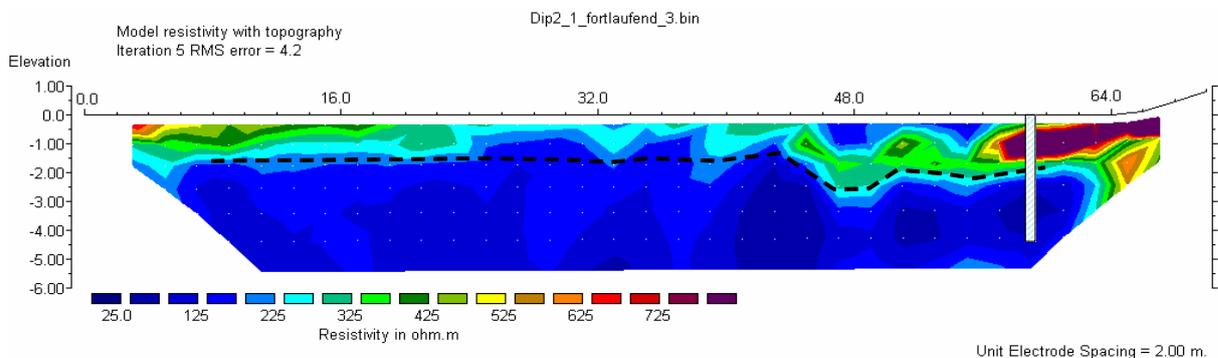


Abb. 5-10: 2D-Widerstandstomogramm aus der unteren Versickerungsmulde(nrigole) (Profil 3); gemessen am 23.03.2006 mit der Dipol-Dipol Konfiguration; gestrichelte Linie: geoelektrisch ermittelter Verlauf des Wasserspiegels; senkrechte hellblaue Linie: Lage des Pegels

Das Tomogramm der oberen Versickerungsmulde (östlicher Teil ohne Sedimentfang), gemessen am 05.05.2006 zeigt Abb. 5-11 (Profil 8 in Abb. 5-7). Es lässt sich in einen feuchteren linken und einen trockeneren rechten Teil gliedern. An dem auf etwa halber Strecke gelegenen Pegel P 8 wurde ein Wasserstand von 3,22 m notiert. Da sich dieser Pegel jedoch deutlich versetzt von der Auslage befand, wurde er nicht in das Tomogramm aufgenommen.

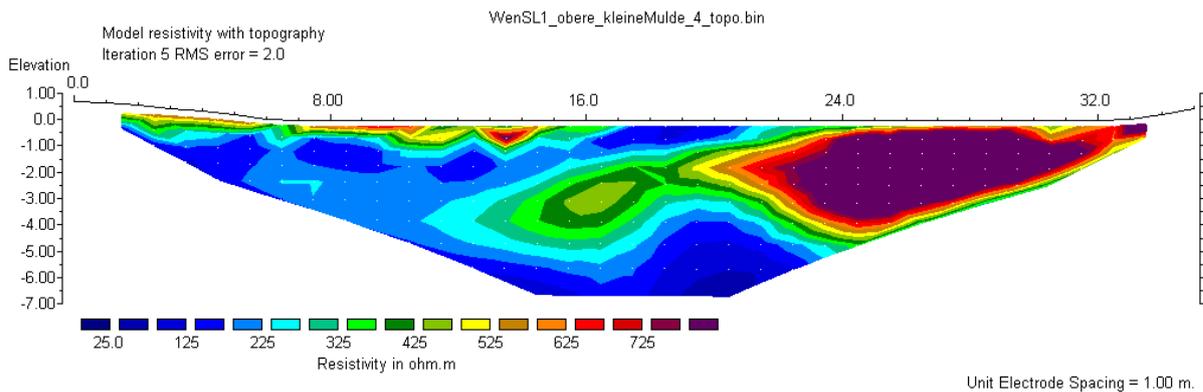


Abb. 5-11: 2D-Widerstandstomogramm aus der oberen Versickerungsmulde (Profil 8); gemessen am 05.05.2006 mit der Wenner-Schlumberger-Konfiguration

5.5 Abfluss und Niederschlag im Zeitraum 01.01.2005 - 30.04.2007

Um eine Aussage über das Abflussverhalten des Brettenbaches treffen zu können, ist in Abb. 5-12 die Abflussspende des Brettenbaches über den Zeitraum 01.01.2005 bis 01.03.2005 nebst aufsummierter Niederschlagsmenge abgebildet. Die Ganglinie des Brettenbaches erscheint als sehr steil und gestaucht, die Auslaufkurven als sehr kurz.

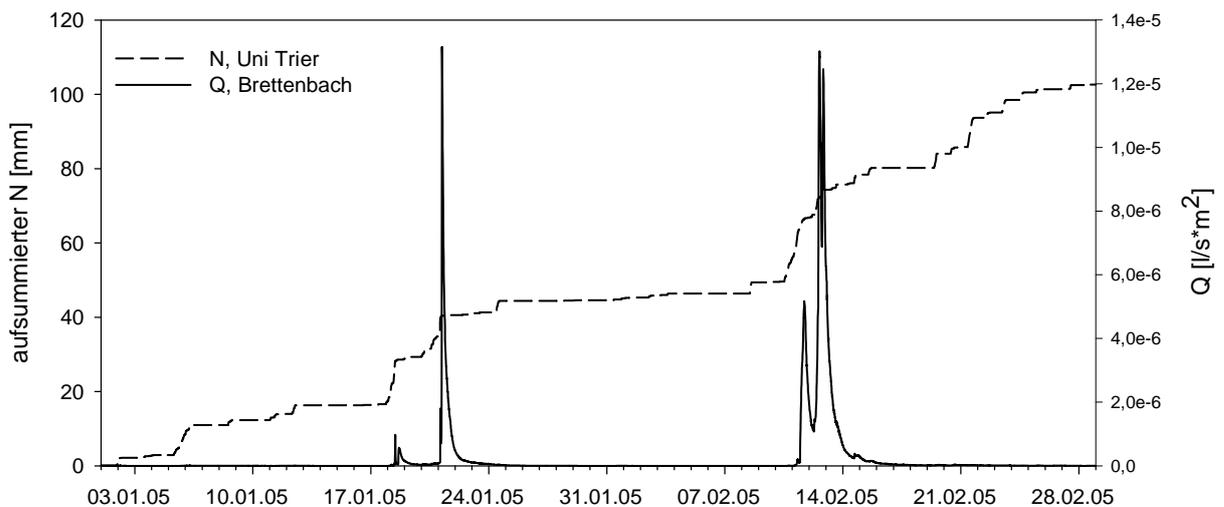


Abb. 5-12: Abflussganglinie des Brettenbaches und aufsummierter Niederschlag des Klimamessfeldes der Universität Trier.

Ein Vergleich der Darstellungen von Niederschlag und Drosselabfluss der Messstellen PBD1 und PBD2 in den erfassten Sommer- und Winterhalbjahren (s. Abb. 5-13) zeigt Folgendes: Das Niederschlagsmaximum liegt im Sommer. Im Sommerhalbjahr 2005 fallen etwa 22 % mehr Niederschlag als im Winterhalbjahr 2005/2006 und im Sommerhalbjahr 2006 etwa 7 % mehr als im Winterhalbjahr 2006/2007. Vom Sommerhalbjahr 2005 zum darauf folgenden nimmt der Niederschlag zu und auch vom Winterhalbjahr 2005/2006 zum darauf folgenden in 2006/2007. Im ersten Fall um ca. 27 % und im zweiten um ca. 45 %. Insgesamt steigt also die Niederschlagsmenge von 2005/2006 nach 2006/2007 um 35 %.

Dementsprechend nimmt auch der Abfluss in beiden Drosselschächten zu wie an der steigenden Anzahl der Peaks zu erkennen ist. Aufgrund der im Untersuchungsgebiet schnellen Abflussprozesse, stehen Niederschlag und Abfluss in engem Zusammenhang. Während in den Sommerhalbjahren nicht jedes Niederschlagsereignis Drosselabfluss generiert, tritt in den Winterhalbjahren Drosselablauf bereits nach kleineren Niederschlagsereignissen auf. Insgesamt sind die Niederschläge in den Winterhalbjahren tendenziell durch geringere Intensitäten und somit durch geringere maximale Niederschlagsmengen pro 10-Minuten-Intervall gekennzeichnet. Außerdem regnet es öfter als in den Sommerhalbjahren. Obwohl im Winter 2005/2006 insgesamt weniger Niederschlag fällt als im vorausgegangenen Sommer ist auch öfter Drosselabfluss zu verzeichnen. Sehr auffallend ist dies bei einem Vergleich des Sommerhalbjahres 2006 mit dem darauf folgenden Winterhalbjahr. Obwohl in letzterem 24,4 mm (6 %) Niederschlag weniger fallen, wird deutlich öfter Drosselabfluss generiert und dies schon bei geringeren Niederschlagsintensitäten als im Sommer.

Der Sommer 2005 war insgesamt zu warm und regenarm (MÜLLER-WESTERMEIER & RIECKE 2005). Gegenüber dem langjährigen Mittel (1961 - 1990) war es in Trier 1,1°C wärmer und es fielen 178 mm weniger Niederschlag. Der Juni war extrem trocken. Im Vergleich dazu war der Sommer 2006 mit 84 % und 77 % mehr Niederschlag in den Monaten August und Oktober extrem regenreich. Dennoch war 2006 das fünftwärmste Jahr seit 1901 und insgesamt etwas zu trocken (DWD 2007). Der Juli 2006 war der heißeste seit Beginn des 20. Jahrhunderts, der September der wärmste und der Oktober der zweitwärmste seit 1901.

Wie im Sommer 2006, so finden sich auch im darauf folgenden Winterhalbjahr 2006/2007 einige Extreme. November und Dezember waren in Deutschland die drittwärmsten seit 1901. Für Trier zeigt der Vergleich zum Winterhalbjahr 2005/2006, dass der November 2006 mit 68 % mehr Niederschlag, der Januar 2007 mit 138 % und der Februar mit 106 % mehr Niederschlag sehr regenreich waren. Der April war mit nahezu ausbleibendem Niederschlag dagegen extrem trocken.

Das mittels erwin 4.0 ermittelte größte Niederschlagsereignis mit 55,7 mm in 2,5 Tagen setzte am 28.07.2005 ein. Die Einstaudauer der Quellmulden und der Sportplatzmulde betrug während des Untersuchungszeitraumes und diesem Ereignis weniger als die geforderten 48 Stunden.

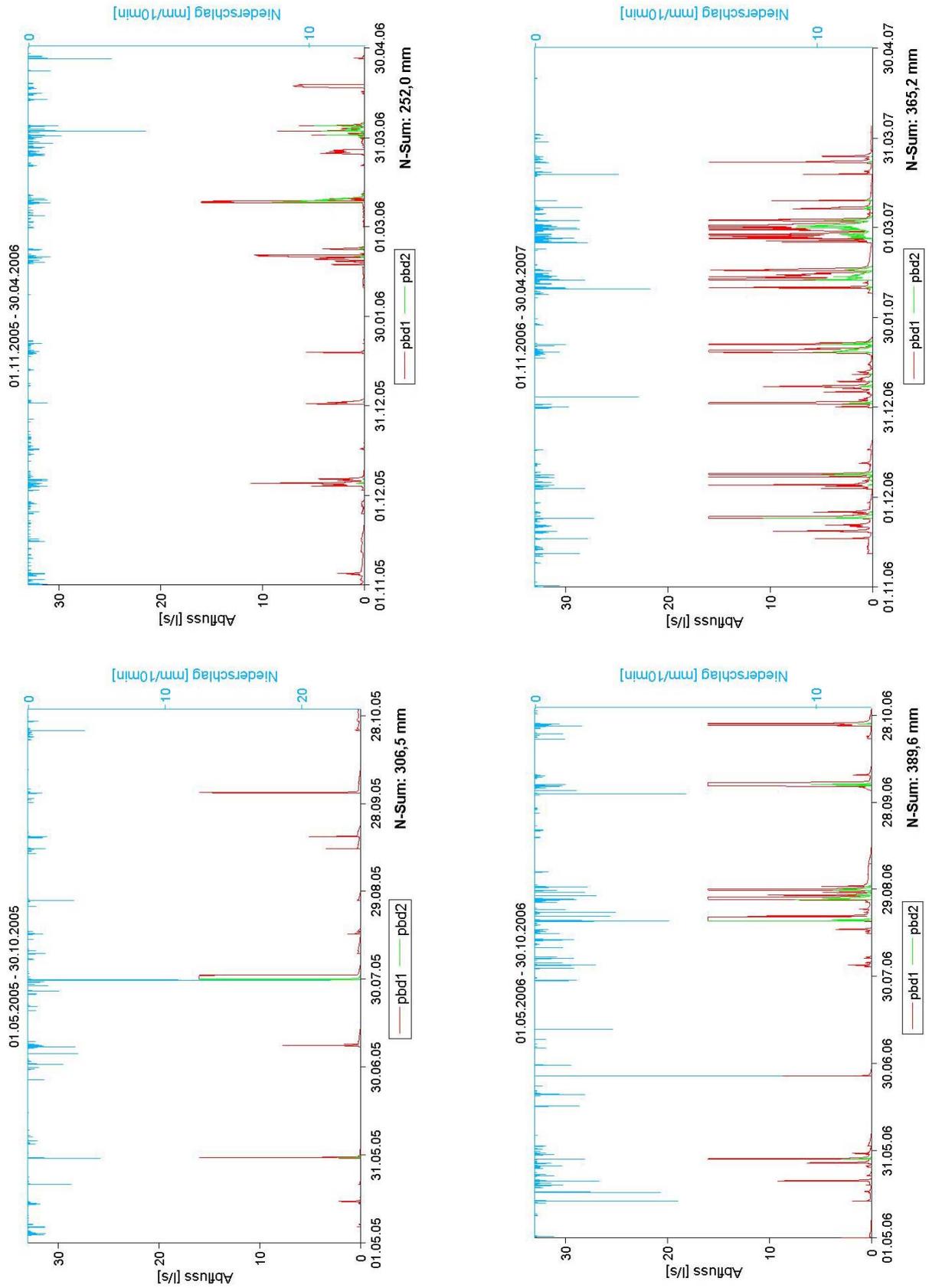


Abb. 5-13: Niederschlag und Drosselabflüsse an den Messstellen PBD1 (rot) und PBD2 (grün) während der hydrologischen Halbjahre vom 01.05.2005 bis zum 30.04.2007.

5.6 N-A-Simulation mit erwin 4.0

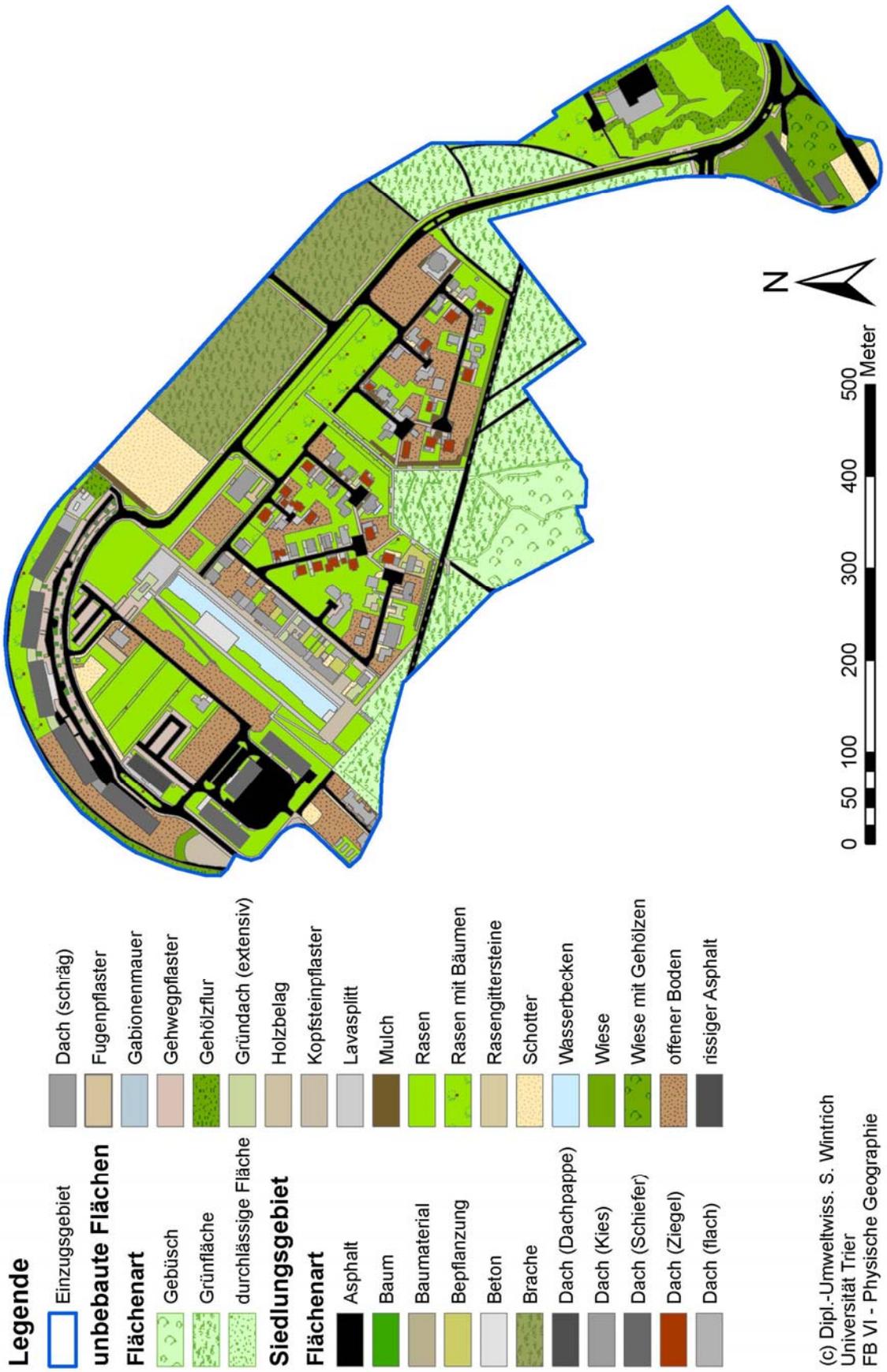
5.6.1 Versiegelungsgrad des Untersuchungsgebietes

Tab. 5-1 listet die nach ATV-DVWK-M 153 empfohlenen mittleren Abflussbeiwerte von Einzugsgebietsflächen für verschiedene Flächentypen und Befestigungsarten auf und zeigt die Einordnung der im Februar 2007 kartierten Flächenarten in dieses Schema. Die Kartierung des Baubestandes ergab einen Abflussbeiwert für das gesamte Untersuchungsgebiet von $\psi = 0,4$. Genauer betrachtet zählen 29,3 ha von 35,1 ha zur Siedlungsfläche. Somit nimmt die Siedlungsfläche 83,5 % des Untersuchungsgebietes ein, davon sind 47,9 % versiegelt. Nicht zur Siedlungsfläche zählen Grünflächen und Gebüsch, die nicht als Bauland ausgewiesen sind. Innerhalb der Siedlungsfläche zählen hauptsächlich Grünflächen, Brachen und Gärten zu den unversiegelten Flächen. Natürliche, nicht an das Retentionssystem angeschlossene Flächen machen lediglich 6 % des Gebietes aus. Abb. 5-14 zeigt das Ergebnis der Kartierung.

Tab. 5-1: Empfohlene mittlere Abflussbeiwerte ψ_m von Einzugsgebietsflächen nach ATV-DVWK-M 153 (2000: 10) und Zuordnung der kartierten Flächenarten (bei Wertebereichen wurde der Mittelwert oder der fett markierte Wert gewählt).

Flächentyp	Art der Befestigung	ψ_m	kartierte Flächenarten
Schrägdach	Metall, Glas, Schiefer, Faserzement	0,9 - 1,0	Dach (Schiefer)
	Ziegel, Dachpappe	0,8 - 1,0	Dach (Ziegel, schräg)
Flachdach (Neigung bis 3° oder ca. 5 %)	Metall, Glas, Faserzement	0,9 - 1,0	
	Dachpappe	0,9	Dach (flach, Dachpappe)
	Kies	0,7	Dach (Kies)
Gründach (Neigung bis 15° oder ca. 25 %)	humusiert < 10 cm Aufbau	0,5	Gründach (extensiv)
	humusiert \geq 10 cm Aufbau	0,3	
	Asphalt, fugenloser Beton	0,9	(rissiger) Asphalt, Beton
	Pflaster mit dichten Fugen	0,75	Gehwegpflaster, Holzbelag
	fester Kiesbelag	0,6	Lavasplitt, Schotter
	Pflaster mit offenen Fugen	0,5	Kopfsteinpflaster
	lockerer Kiesbelag, Schotterrasen	0,3	
	Verbundsteine mit Fugen, Sickersteine	0,25	Fugenpflaster
	Rasengittersteine	0,15	Rasengittersteine, Gabionenmauer
Böschungen, Bankette und Gräben mit Regenabfluss in das Entwässerungssystem	toniger Boden	0,5	
	lehmiger Sandboden	0,4	
	Kies- und Sandboden	0,3	
Gärten, Wiesen und Kulturland mit möglichem Regenabfluss in das Entwässerungssystem	flaches Gelände	0,0 - 0,1	Rasen, Rasen mit Bäumen, Wiese, Wiese mit Gehölzen, Brache, Gehölzflur, Baum, Bepflanzung (Sträucher), offener Boden, Mulch, Holzhäcksel, Baumaterial
	steiles Gelände	0,2 - 0,3	

Versiegelungskarte Trier-Petrisberg



(c) Dipl.-Umweltwiss. S. Wintrich
 Universität Trier
 FB VI - Physische Geographie

Abb. 5-14: Versiegelungskarte für das untersuchte Neubaugebiet Trier-Petrisberg.

5.6.2 Prüfung der Modellgüte

Um die Aussagekraft des Modells zu testen, werden zunächst die gemessenen Ganglinien der Drosselabflüsse mit den simulierten verglichen. Darauf folgt ein Vergleich der berechneten und gemessenen Spitzenabflüsse und Abflussvolumina. Die Darstellung der gemessenen und simulierten Abflussganglinien für den Zeitraum 01.05.2005 bis 31.10.2006 sind im Anhang (Abb. XIV - XVI) zu finden.

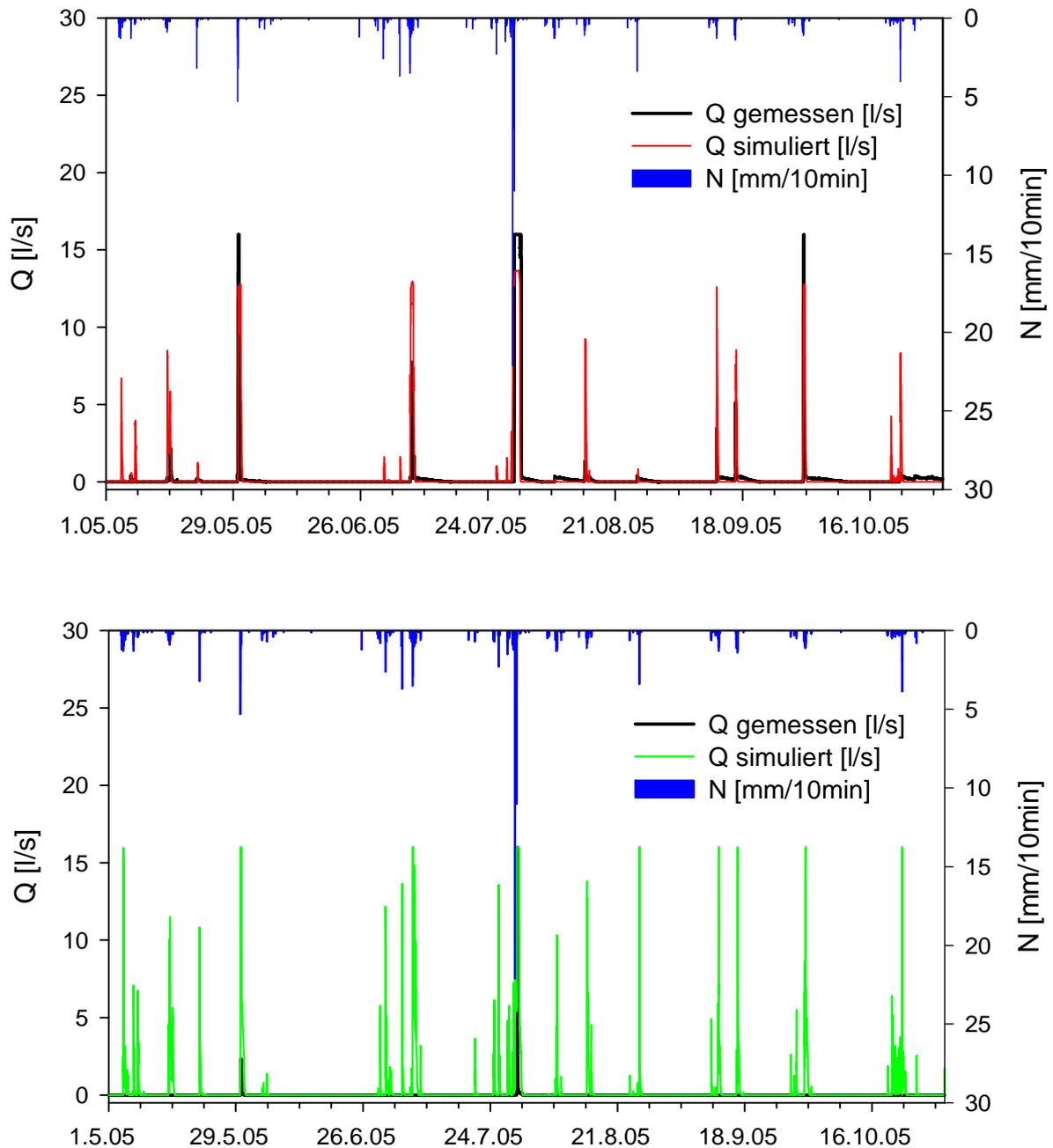


Abb. 5-15: Gemessene und simulierte Abflussganglinien bei PBD1 (oben) und PBD2 (unten) im hydrologischen Sommerhalbjahr 2005. (schwarz: gemessener Abfluss, rot: simulierter Abfluss bei PBD1, grün: simulierter Abfluss bei PBD2, blau: Niederschlag, schwarze Kreuze: fehlende Niederschlagsdaten).

Wie die grafische Gegenüberstellung (Abb. 5-15) der simulierten und gemessenen Drosselabläufe beispielhaft für das hydrologische Sommerhalbjahr 2005 zeigt, setzt der simulierte Drosselabfluss in etwa zeitgleich mit dem gemessenen ein. In höherer Auflösung (Abb. 5-16) bestätigt sich dies für PBD1. Lediglich bei kleinen Ereignissen setzt der simulierte Abfluss manchmal deutlich später ein. Auffällig ist, dass die simulierten Auslaufkurven sehr viel kürzer sind als die gemessenen.

Bei PBD2 setzen die simulierten Abflüsse tendenziell etwas früher ein. Es werden deutlich mehr Ereignisse simuliert als erfasst wurden. Auch die Abflussvolumina sind sehr viel größer. Die Auslaufkurven sind hier deutlicher ausgeprägt als die für PBD1 simulierten.

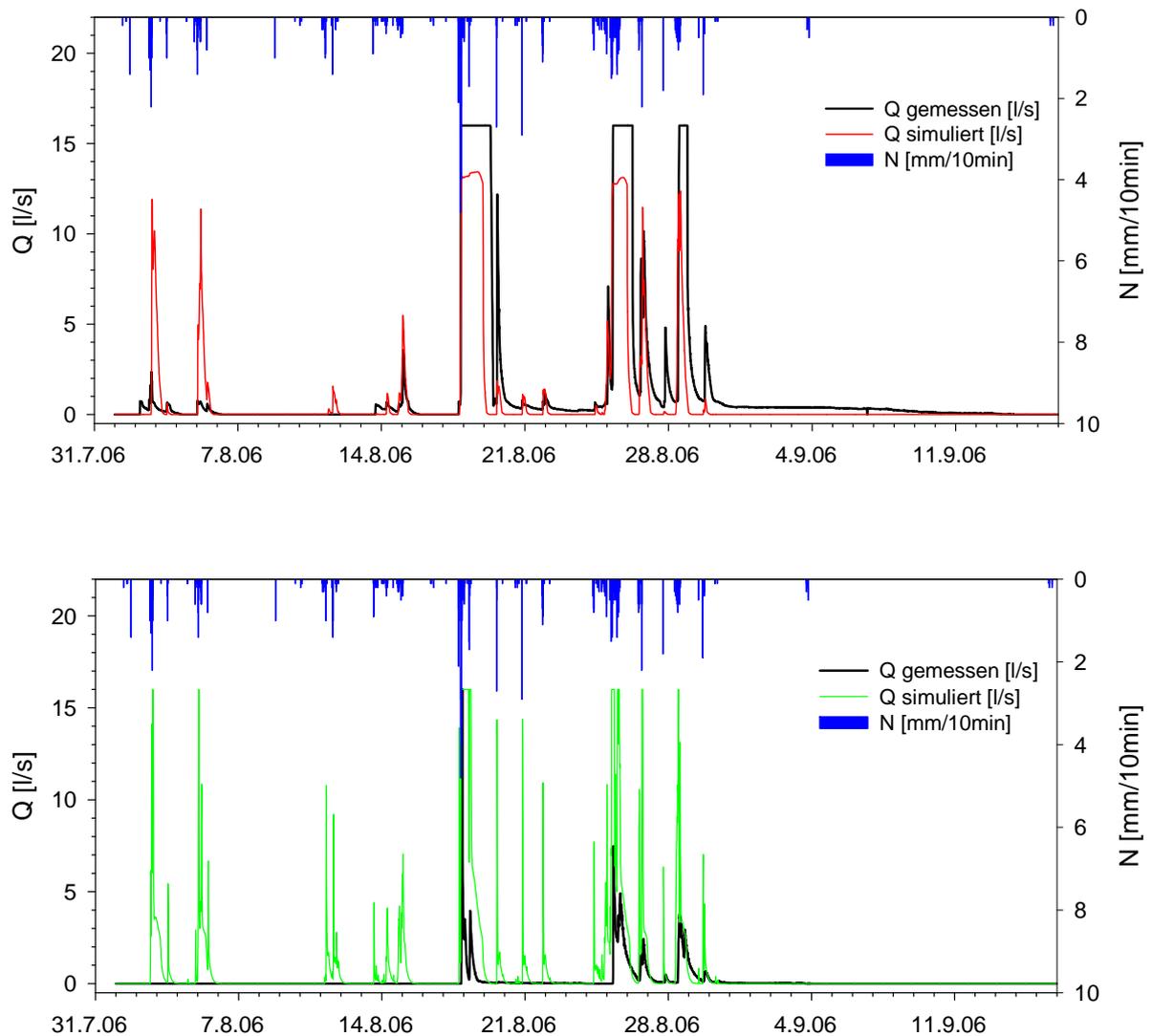


Abb. 5-16: Gemessene und simulierte Abflussganglinien bei PBD1 (oben) und PBD2 (unten) vom 01.08. bis 15.09.2006.

Mit der Zeit nehmen hohe Abflussspitzen zu (s. Abb. 5-13). Dies wird durch das Modell nicht deutlich genug abgebildet, wohl aber die steigende Anzahl an Ereignissen bei PBD2.

Während für PBD2 öfter der maximale Drosselablauf von 16 l/s simuliert als gemessen wird, wird bei PBD1 keiner der rund zehn Maximalabläufe als solcher simuliert. Bei PBD2 werden die Abflussspitzen generell zu hoch simuliert und die Maximalereignisse zu lang. Bei PBD1 werden kleine Abflussspitzen etwas höher und die maximalen etwas geringer simuliert. Insbesondere für PBD1 ergeben Anzahl und Höhe der simulierten Drosselabläufe ein ähnliches Bild wie die tatsächlich gemessenen. Dagegen wird insbesondere die Anzahl für PBD2 erheblich überschätzt.

Es ist zu beachten, dass beide Modellversionen (Regenwasserbewirtschaftung und Ableitung im Trennsystem) den im Februar 2007 kartierten Baubestand abbilden. Dieser unterlag während des davor liegenden Messzeitraumes jedoch einer enormen Zunahme, die im Modell nicht berücksichtigt werden kann. Demnach müsste die Modellgüte mit der Zeit zunehmen. Werden positive und negative Abweichungen getrennt voneinander betrachtet, dann zeigt sich, dass die Höhe der positiven Abweichungen bei PBD1 tatsächlich zugunsten der Modellgüte deutlich abnimmt (s. Abb. 5-17a). Dagegen nähern sich die unterschätzten Werte mit nur geringer Tendenz den gemessenen an und nehmen in ihrer Anzahl zu (s. Abb. 5-17b). Infolge der häufiger auftretenden negativen Abweichungen verschlechtert sich die Modellgüte für PBD1. Die Abflussspitzen werden zum größten Teil unterschätzt.

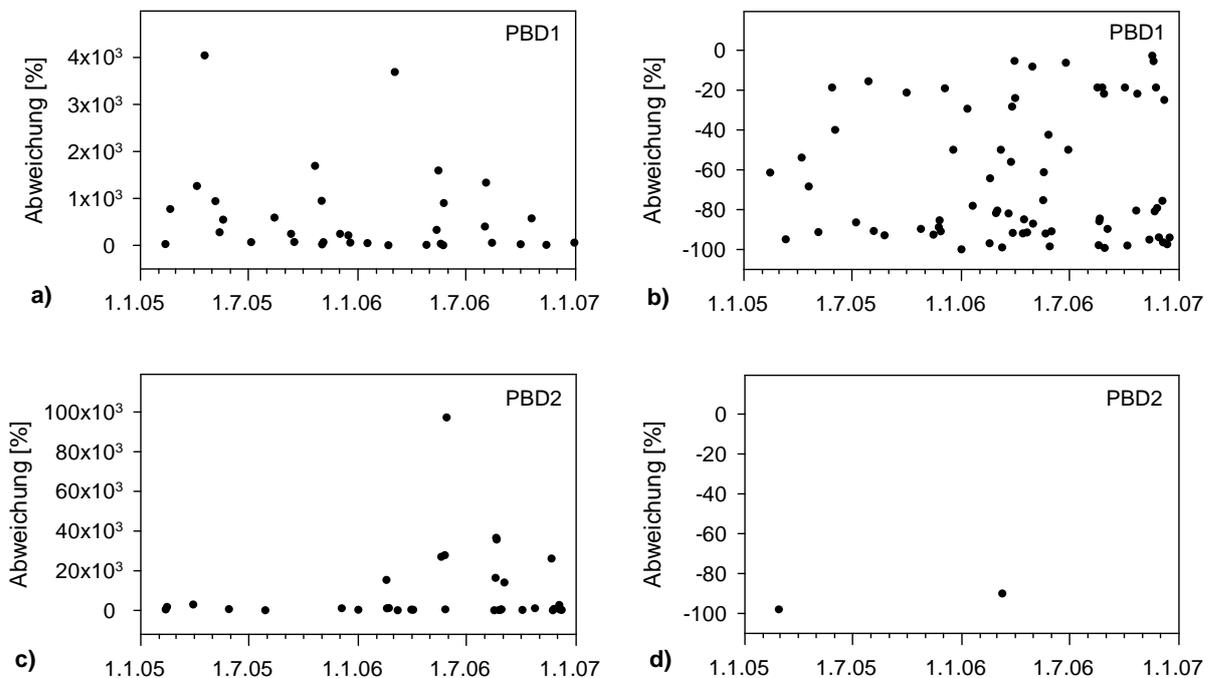


Abb. 5-17: Überschätzung und Unterschätzung der simulierten Abflussspitzen mit der Zeit bei PBD1 (a und b) und bei PBD2 (c und d).

Anders als bei PBD1 ergeben sich bei PBD2 zu Beginn der Messreihe die geringsten Abweichungen (Abb. 5-17c). Zu diesem Zeitpunkt war das angeschlossene Gebiet kaum bebaut. Ab dem Frühjahr 2006 werden die Abflussspitzen zunehmend überschätzt. Nur zwei Ereignisse werden unterschätzt (Abb. 5-17d). Ein Blick auf die Skalierung der Ordinaten zeigt, dass hinsichtlich Q_{\max} die Abweichungen für PBD2 bis zu 24 Mal größer sind als bei PBD1. Die simulierten Werte für PBD2 weisen außerdem nur zwei negative Abweichungen auf. Während die Überschätzungen bei PBD1 mit der Zeit abnehmen und Unterschätzungen zunehmen, werden die Abflussspitzen bei PBD2 generell überschätzt und die Abweichungen der simulierten Werte von den gemessenen werden größer.

Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmaß bestätigen die im Vergleich zu PBD2 bessere Wiedergabe der Spitzenabflüsse bei PBD1. Zur Ermittlung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson und des Bestimmtheitsmaßes wurden die Wertepaare (Q_{\max} simuliert und gemessen) nach negativer und positiver Abweichung voneinander getrennt betrachtet. Für PBD1 ergibt sich bei den positiven Abweichungen eine mittlere Korrelation von $r = 0,6$ und ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,36$. Bei den negativen Abweichungen wird eine hohe Korrelation von $r = 0,92$ und ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,85$ erreicht. Für PBD2 ergibt sich bei den positiven Abweichungen bei einer Korrelation von $r = 0,55$ ein Bestimmtheitsmaß von nur 0,3. Nur zwei Ereignisse werden unterschätzt.

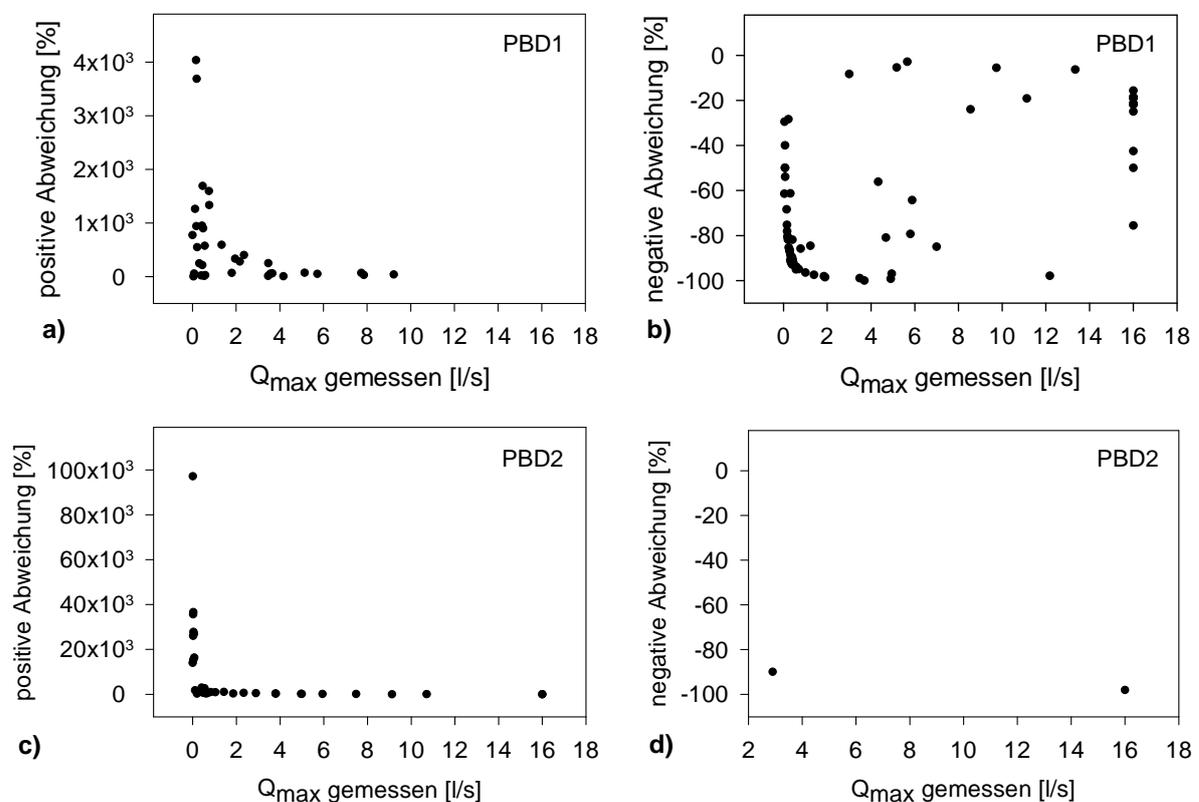


Abb. 5-18: Abweichungen der simulierten Abflussspitzen von den gemessenen in Abhängigkeit von den gemessenen Abflussspitzen: Über- und Unterschätzung bei PBD1 (a und b) und bei PBD2 (c und d).

Werden die positiven Abweichungen getrennt von den negativen gegen die gemessenen Spitzenabflüsse aufgetragen, so wird deutlich, dass bei niedrigen Abflussspitzen sowohl bei PBD1 als auch bei PBD2 die stärksten und meisten Abweichungen zu finden sind (s. Abb. 5-18). Mit zunehmenden Abflussspitzen nähern sich die überschätzten simulierten Werte bei beiden Messstellen den gemessenen schnell an (Abb. 5-18a und c). Bei PBD1 weichen die simulierten Werte ab einem gemessenen Q_{\max} von etwa > 4 l/s weniger als 100 % von den gemessenen Werten ab. Bei PBD2 fallen die Abweichungen erst ab einem Q_{\max} von > 8 l/s unter die 100 %-Grenze.

Eine ähnliche, jedoch nicht ganz so enge Beziehung zeigt sich bei Betrachtung der Abweichungen in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (s. Abb. 5-19). Mit zunehmender Niederschlagshöhe nähern sich die simulierten Werte den gemessenen an, wobei die Abweichungen bei PBD1 sehr viel geringer sind als bei PBD2.

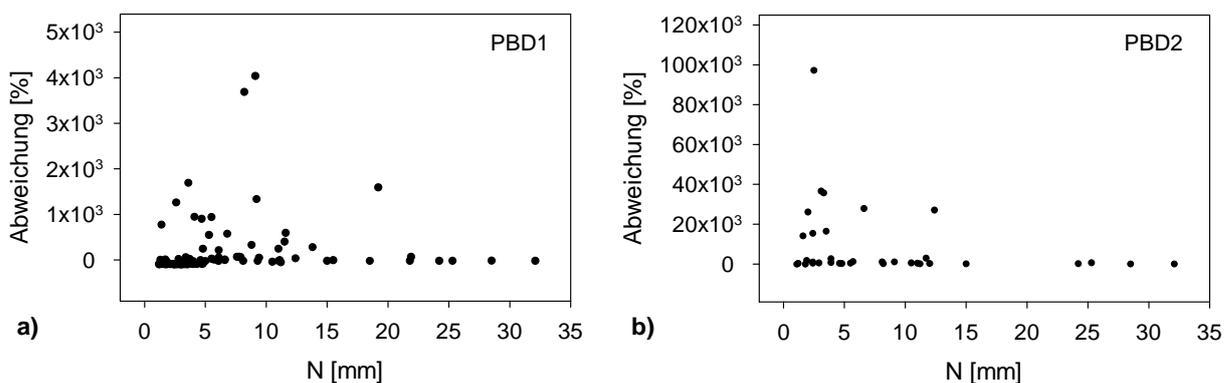


Abb. 5-19: Abweichungen der simulierten Abflussspitzen von den gemessenen in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe [mm] bei PBD1 (a) und PBD2 (b).

Neben den Abflussspitzen werden die Abflussvolumina $> 0,038 \text{ m}^3$ zur Prüfung der Modellgüte herangezogen, da dies der kleinste mögliche Simulationswert ist, der bei Niederschlagsmengen von ungefähr < 3 mm berechnet wird. Aufgrund der wenigen resultierenden Wertepaare müssen die folgenden Ergebnisse kritisch betrachtet werden.

Insgesamt wurden bei PBD1 bis zu zwölf Mal höhere Abflussmengen gemessen als bei PBD2. In der Simulation wird dagegen nur knapp das Dreifache erreicht.

Bei PBD1 unterschätzt das Modell die Abflussvolumina etwa 1,5 Mal öfter als dass es sie überschätzt. Sieben Mal wird sogar kein Abfluss simuliert. Bei PBD2 kommt es nur zwei Mal zu einer Überschätzung und einmal zu ausbleibendem Abfluss. Während die gemessenen Abflussvolumina bei PBD1 generell deutlich höher sind als bei PBD2, sind etwa 78 % aller simulierten Abflussvolumina kleiner als bei PBD2.

Ähnlich wie bei Q_{\max} werden die Abflussvolumina bei PBD1 mit der Zeit besser wieder gegeben. Die positiven Abweichungen werden geringer mit einem Anstieg im Sommer 2006

(Abb. 5-20a). Die negativen Abweichungen nähern sich ebenfalls tendenziell Null an (Abb. 5-20b), so dass die Abflussvolumina mit der Zeit, wie erwartet, besser wiedergegeben werden. Bei PBD2 werden dagegen auch die Abflussvolumina mit der Zeit eher zunehmend überschätzt und insgesamt nur zwei Mal unterschätzt (Abb. 5-20c und d).

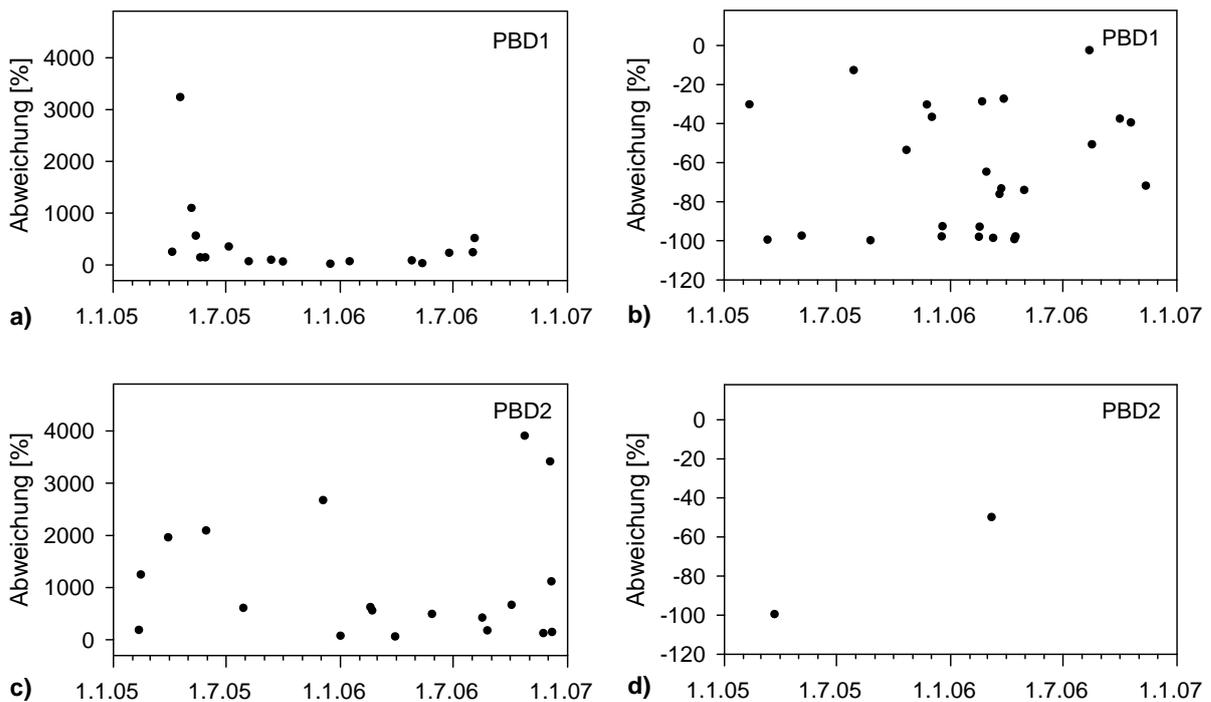


Abb. 5-20: Änderung der Abweichungen der simulierten Abflussvolumina von den gemessenen während des Messzeitraumes: Über- und Unterschätzung bei PBD1 (a und b) und bei PBD2 (c und d).

Nach Trennung der Wertepaare hinsichtlich positiver und negativer Abweichung der simulierten Werte von den gemessenen, ergibt sich für PBD1 bei Überschätzung der Werte eine sehr enge Korrelation von $r = 0,91$ und ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,82$. Bei den negativen Abweichungen besteht zwischen simulierten und gemessenen Werten eine ebenfalls sehr enge Korrelation von $r = 0,92$ mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,85$. Für PBD2 zeigt sich eine noch hohe Korrelation von $r = 0,72$ mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,52$. Insgesamt gibt das Modell die Abflussvolumina besser wieder als die Abflussspitzen, wobei die meisten Werte unterschätzt werden.

Werden die positiven Abweichungen getrennt von den negativen gegen die gemessenen Abflussvolumina aufgetragen, so zeigt sich analog zu den Abflussspitzen, dass sowohl die höchsten Über- als auch Unterschätzungen auf die geringen Abflussvolumina entfallen. Bei PBD1 fallen die Überschätzungen ab einem Abflussvolumen von ca. 400 m^3 unter 100% . Bei PBD2 ist dies erst bei größeren Abflussvolumina der Fall (Skalierung der x-Achse beachten).

Abflussereignisse mit einem Volumen $> 1000 \text{ m}^3$ werden bei PBD1 generell unterschätzt. Tendenziell werden sie umso stärker unterschätzt, je größer das gemessene Abflussvolumen ist. Bei PBD2 gibt es dagegen nur zwei Unterschätzungen. Mit Zunahme der gemessenen Abflussvolumina liefert das Modell bessere Simulationsergebnisse, mit einer Tendenz zur Unterschätzung bei PBD1 (Abb. 5-21).

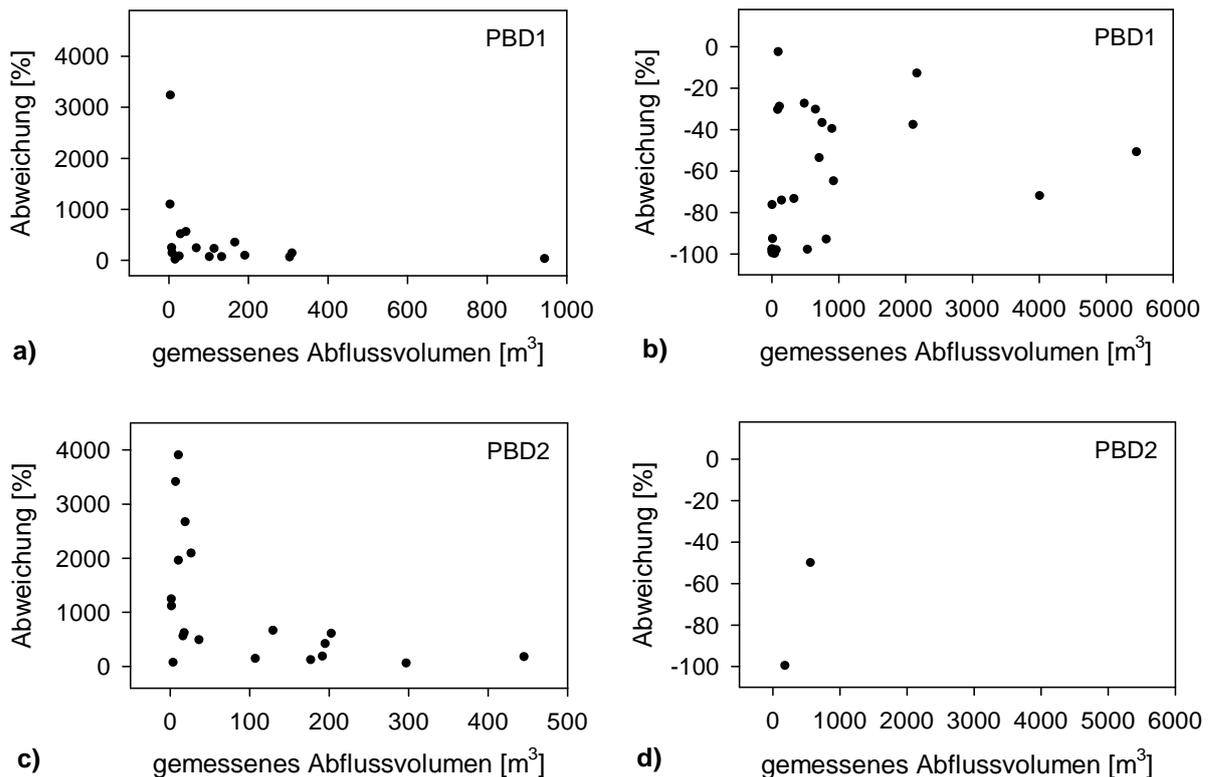


Abb. 5-21: Abweichung der simulierten Werte von den gemessenen in Abhängigkeit vom gemessenen Abflussvolumen: Über- und Unterschätzung bei PBD1 (a und b) und bei PBD2 (c und d).

5.6.3 Simulationsergebnisse

Aus der Gesamtmenge der Niederschlagsereignisse wurden mittels erwin 4.0 alle Ereignisse des Zeitraums 1967 - 1997 mit einer Niederschlagsmenge von mehr als 10 mm herausgefiltert. Diese sind in Abb. 5-22 dargestellt. Eine lineare Trendlinie und die zugehörige Gleichung ergänzen die Punktwolke.

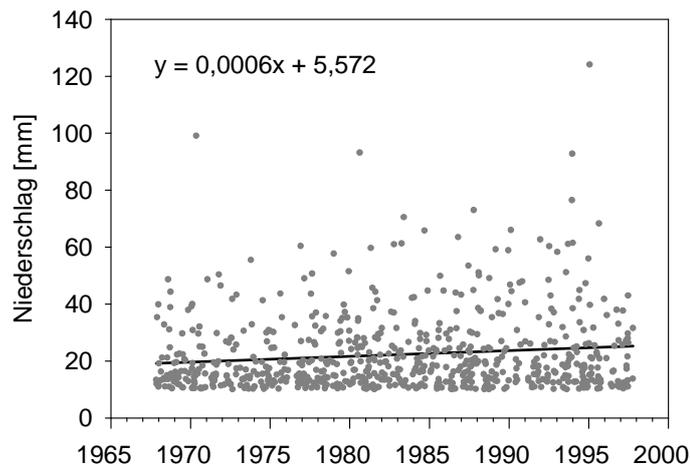


Abb. 5-22: Verteilung der Niederschlagshöhen > 10 mm im Zeitraum 1967 - 1997.

In Tab. 5-2 sind einige Parameter der Gesamtbilanzen beider simulierter Modelle (RWB: Regenwasserbewirtschaftung und konv: konventionelle Entwässerung) über den Zeitraum 1967 - 1997 gegenübergestellt.

Tab. 5-2: Gesamtbilanzen der N-A-Modelle mit Regenwasserbewirtschaftung (RWB) und konventioneller Entwässerung (konv) über den Zeitraum 1967 - 1997.

	Einzugsgebiet		Brettenbach	altes Becken		
	N [m ³]	N _{eff} [m ³]	Q _{zu} [m ³]	Q _{zu} [m ³]	Überlauf [Anzahl]	Q _ü [m ³]
RWB	2200737	1622822	807639	807644	1	311,8
konv	2200736	1622822	1620487	1624578	1261	204297

Fortsetzung: altes Becken						
	Überlauf- dauer [h]	mittlere Überlaufdauer [h]	Einstau- dauer [h]	mittlere Einstaudauer [h]	maximale Einstauhöhe [m]	Überflutung [m ³]
RWB	1	1	15660	4,2	0,705	0
konv	392,7	0,311	13885	1,62	0,9	4712

Zu erkennen ist, dass dem Brettenbach bei konventioneller Ableitung etwa zwei Mal mehr Wasser zulaufen würde als dies bei Bewirtschaftung des Regenwassers der Fall ist. Infolgedessen würde das alte (Rückhalte-)Becken mehr als tausend Mal überlaufen, wohingegen das bei Regenwasserbewirtschaftung nur ein Mal der Fall wäre. Eine Überflutung des alten Beckens kann laut Modell durch das Retentionssystem verhindert werden. Bei konventioneller Ableitung würde dies jedoch einige tausend Mal eintreten.

Der Rückhalt wird nach Gleichung 4-5 berechnet und beträgt im Mittel 50 % des effektiven Niederschlags bzw. 37 % des gesamten Niederschlags. Die einzelnen Jahresbilanzen betrach-

tend, nimmt der Rückhalt Werte zwischen 46 % und 55 % des effektiven Niederschlags und 58 % bis 68 % des gesamten Jahresniederschlags ein.

Die nächste Abb. 5-23 bildet den Rückhalt des Retentionssystems in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge (> 10 mm) ab, der im Vergleich zu einer konventionellen Entwässerung (Trennsystem) erreicht wird. Anders formuliert, handelt es sich um die in Relation zum Kanalabfluss gesetzte Menge an Oberflächenwasser, die in der Fläche zurückgehalten wird.

Hier ergibt sich der Rückhalt mittels Einzelsimulationen aus der Differenz der Zulaufmengen zum Brettenbach bei Regenwasserbewirtschaftung und konventioneller Ableitung im Verhältnis zur Zulaufmenge bei konventioneller Ableitung nach Gleichung 4-6.

Eine farbliche Kennzeichnung ordnet die Ereignisse den Sommer- (rot) bzw. den Winterhalbjahren (blau) zu. Die zugehörigen Trendlinien beschreiben einen logarithmischen Verlauf. Mit steigender Niederschlagshöhe entfernen sich beide Linien zunehmend voneinander, so dass in den Sommerhalbjahren ein deutlich geringerer Rückhalt erreicht wird als in den Winterhalbjahren. Aufgrund der wenigen Starkregenereignisse ist der Verlauf der Linien nicht besonders sicher.

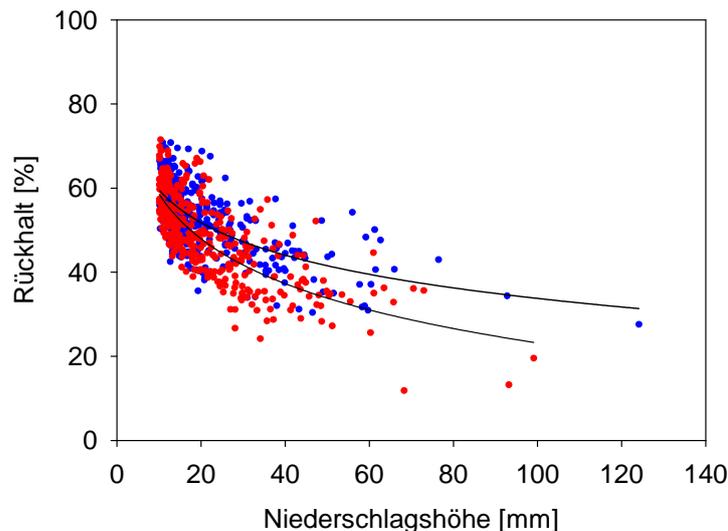


Abb. 5-23: Rückhalt des Retentionssystems gegenüber konventioneller Entwässerung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (Simulationszeitraum 1967 - 1997).

In der folgenden Abb. 5-24 ist die Scheitel abmindernde Wirkung des Retentionssystems im Vergleich zu einer konventionellen Entwässerung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe dargestellt. Es wird also gezeigt, um wie viel geringer der maximale Abfluss bei Bewirtschaftung des Regenwassers ausfällt, als dies bei einer konventionellen Entwässerung der Fall wäre (s. Gleichung 4-7). Eine Differenzierung nach Sommer- oder Winterhalbjahr bleibt hier aus, da es kaum Unterschiede gibt. Die per Einzelsimulation berechneten Ergebnisse für

Rückhalt und Scheitelabminderung aller N-A-Ereignisse > 10 mm Niederschlag sind im Anhang in Tabelle XVII aufgelistet.

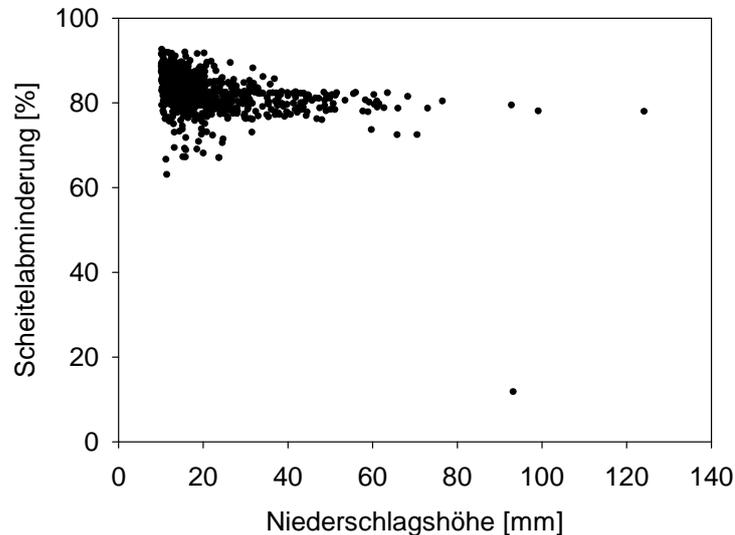


Abb. 5-24: Scheitel abmindernde Wirkung des Retentionssystems im Vergleich zu einer konventionellen Entwässerung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (Simulationszeitraum 1967 - 1997).

In Abb. 5-25 sind die größeren Niederschlagsereignisse mit mehr als 30 mm ebenfalls differenziert nach Sommer- und Winterhalbjahr zu sehen. Zehn Ereignisse wurden ausgewählt, um den Grund für die geringere Rückhaltewirkung im Sommer bzw. die höhere Effizienz des Systems im Winter zu untersuchen. Es handelt sich um fünf Sommer- und fünf Winterereignisse, die durch eine Kreissignatur kenntlich gemacht sind. Es wird vermutet, dass die Niederschlagsintensität der ausschlaggebende Faktor für die Retentionsleistung ist.

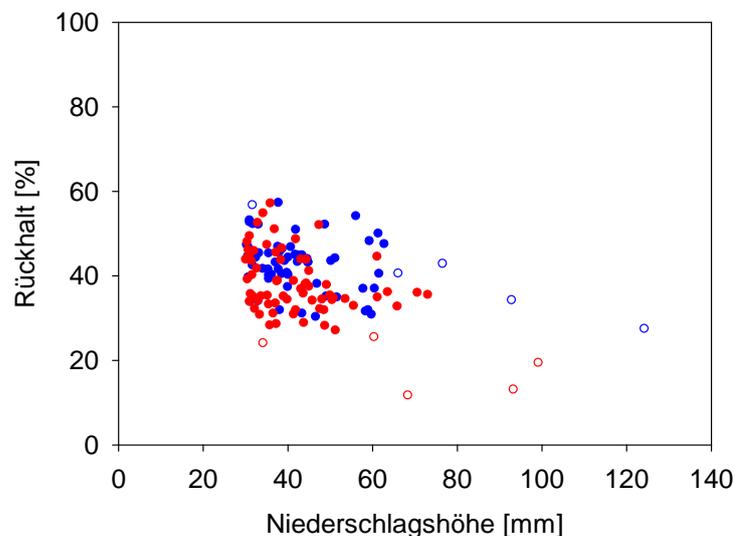


Abb. 5-25: Rückhalt bei Ereignissen mit > 30 mm N sowie je fünf ausgewählten Ereignissen der Sommerhalbjahre (rote Kreise) und der Winterhalbjahre (blaue Kreise) (Simulationszeitraum 1967 - 1997).

Tab. 5-3 gibt Informationen zu Niederschlagshöhe, Dauer und Rückhalt der ausgewählten Ereignisse sowie der währenddessen gefallenen maximalen Niederschlagshöhe. Die Ereignisse der Winterhalbjahre sind links, die der Sommerhalbjahre rechts aufgelistet.

Eine grafische Gegenüberstellung der ausgewählten winterlichen und sommerlichen Ereignisse in einer Auflösung von fünf Minuten zeigt Abb. IX im Anhang. Der besseren Vergleichbarkeit wegen zeigen alle Abszissen einen Zeitraum von acht Tagen. Die Ordinaten sind ebenfalls, bis auf eine Ausnahme beim dritten Sommerereignis, gleich skaliert. Die insgesamt gefallene Niederschlagsmenge (N_{Sum}) ist jeweils rechts unten im Diagramm angegeben.

Tab. 5-3: Angaben zu Niederschlag, Rückhalt und Dauer von je fünf ausgewählten Ereignissen der Sommer- und Winterhalbjahre.

	Ereignisse während der Winterhalbjahre				Ereignisse während der Sommerhalbjahre				
	N [mm]	Rückhalt [%]	N_{max} [mm]	Dauer [h]	Dauer [h]	N_{max} [mm]	Rückhalt [%]	N [mm]	
6.12.1982	31,6	57	2,1	125	40	5,05	24	34,1	1.6.1979
10.2.1990	66	41	2,4	116	62	5,7	26	60,3	10.7.1992
10.12.1993	76,5	43	1,64	175	60	9,2	12	68,3	23.8.1995
19.12.1993	92,8	34	2,1	143	13	3,3	13	93,2	16.8.1980
20.1.1995	124,1	28	2,1	172	78	2,1	20	99,1	10.5.1970

Wie vermutet, handelt es sich bei den ausgewählten sommerlichen Ereignissen, welche mit einem geringeren Rückhalt einhergehen, um Niederschlagsereignisse hoher Intensität. Bei vergleichbaren Gesamtniederschlagsmengen sind die sommerlichen Ereignisse durch eine kürzere Dauer und dadurch bedingt höhere maximale Niederschlagsmengen pro Zeitintervall gekennzeichnet als jene, die im Winterhalbjahr liegen.

Auch für den Untersuchungszeitraum (01.01.2005 - 31.12.2006) wurden Simulationen durchgeführt. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse basieren auf Niederschlagsereignissen > 3 mm. Bei geringeren Mengen gelangt das Modell scheinbar an seine Grenzen, da die Abflussmenge dann konstant mit $0,038 \text{ m}^3$ angegeben wird. Die Gesamtbilanzen beider Modelle für diesen kurzen Zeitraum sind in Tab. 5-4 aufgelistet.

Tab. 5-4: Gesamtbilanzen der N-A-Modelle mit Regenwasserbewirtschaftung (RWB) und konventioneller Entwässerung (konv) über den Zeitraum 2005 - 2006.

	Einzugsgebiet		Brettenbach	altes Becken		
	N [m ³]	N_{eff} [m ³]	Q_{zu} [m ³]	Q_{zu} [m ³]	Überlauf [Anzahl]	$Q_{\text{ü}}$ [m ³]
RWB	120370	85552	40016	40020	0	0
konv	120370	85552	85023	85649	56	11381

Fortsetzung: altes Becken						
	Überlauf- dauer [h]	mittlere Überlaufdauer [h]	Einstau- dauer [h]	mittlere Einstaudauer [h]	maximale Einstauhöhe [m]	Überflutung [m ³]
RWB	0	0	745,7	3,2	0,122	0
konv	23,7	0,423	791,3	1,3	0,9	992,3

Hier erreicht der Rückhalt des Retentionssystems 53 % des effektiven Niederschlags bzw. 67 % des Gesamtniederschlags und auch hier ist zu sehen, dass das alte Becken bei konventioneller Ableitung eine höhere hydraulische Belastung erfahren würde als bei Regenwasserbewirtschaftung (altes Becken/Überlauf, Überflutung).

Tabelle XVIII im Anhang listet sämtliche per Einzelsimulation berechneten Werte für Rückhalt und Scheitelabminderung auf. Abb. 5-26 zeigt den berechneten Rückhalt des Retentionssystems im Vergleich zu einer konventionellen Ableitung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe. Auch hier werden die Ereignisse getrennt nach Sommer- und Winterhalbjahren abgebildet. Da der Datensatz nur zwei Jahre enthält, konnten sämtliche N-A-Ereignisse simuliert werden. Im Gegensatz zum Zeitraum 1967 - 1997 werden somit auch kleinere Ereignisse erfasst.

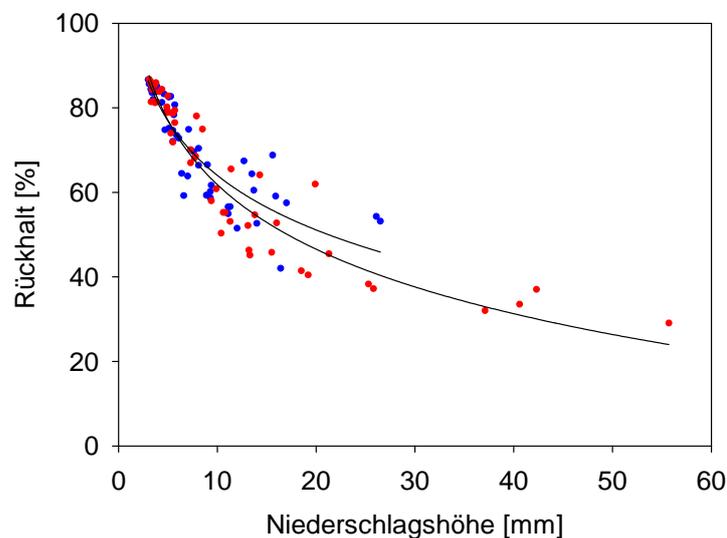


Abb. 5-26: Rückhalt des Retentionssystems gegenüber konventioneller Entwässerung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (Simulationszeitraum 2005 - 2006).

Aufgrund des kurzen Zeitraums enthält der Datensatz jedoch nur wenige Niederschlagsereignisse hoher Intensität. Im Vergleich zum Zeitraum 1967 - 1997 ist die höchste Niederschlagsmenge des Zeitraums 2005 - 2006 nicht einmal halb so groß.

Die Scheitelabminderung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe zeigt Abb. 5-27.

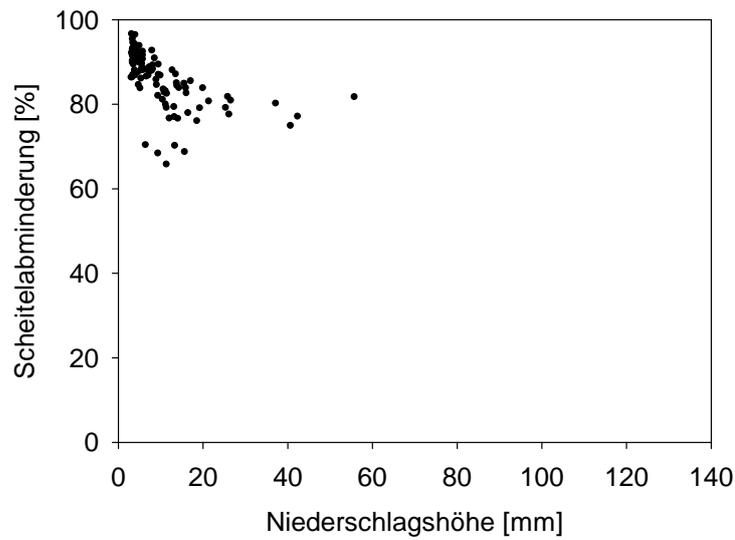


Abb. 5-27: Scheitel abmindernde Wirkung des Retentionssystems im Vergleich zu einer konventionellen Entwässerung in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe (Simulationszeitraum 2005 - 2006).

Bei den kleinsten Ereignissen wurden Scheitelabminderungen von nahezu 97 % erreicht. Abgesehen von den Scheitelabminderung für sehr kleine Ereignisse und fehlenden Daten für Ereignisse > 57 mm Niederschlag, deckt sich die Punktelwolke mit der für den Zeitraum 1967 - 1997.

6 Interpretation

6.1 Kaskadenfüllstände

Versickerung ist abhängig von Art und Dichte der Vegetation, der Neigung des Geländes, der Bodenart, der Struktur von Boden und Gestein und dem Porenvolumen des Bodens. Die Infiltrationsrate hängt vor allem von der Vorfeuchte des Bodens und der Oberflächeneigenschaften ab.

Wie zu erwarten, entleeren sich die Kaskadenmulden im Frühjahr und Sommer schneller als im Winter und stehen daher schneller wieder als Retentionsraum zur Verfügung. Während der wärmeren Monate im Frühjahr und Sommer (14 - 24°C im Fall der ausgewählten Beispiele) sind die meisten Mulden bis zum nächsten Niederschlagsereignis entleert und abgetrocknet, können also mehr Wasser aufnehmen. Der nur wenig gesättigte Boden verfügt über eine höhere Speicherkapazität. Aufgrund der wärmeren Lufttemperaturen ist die Verdunstung stärker und die Vegetation, die sich in den Mulden angesiedelt hat, verbraucht ebenfalls einen Teil des Wassers.

Anders sieht es während der Herbst- und Wintermonate aus. Vor Einsetzen des nächsten Niederschlagsereignisses sind die meisten Mulden der Kaskade noch zur Hälfte oder sogar ganz gefüllt. Der Boden darunter ist dementsprechend teilweise aufgesättigt, also eingeschränkt aufnahmefähig. Die verbliebene Vegetation nimmt kaum Wasser auf und die Verdunstung ist aufgrund der kälteren Luft (1 - 14°C im Fall der ausgewählten Beispiele) gering. Unter diesen Bedingungen dauert es länger bis sich die Kaskadenmulden entleeren.

Die hydraulische Belastung der einzelnen Kaskadenmulden nimmt von oben nach unten ab, allerdings recht unregelmäßig (s. hierzu Abb. X im Anhang). Zum einen führt nicht jedes Niederschlagsereignis dazu, dass alle oder die gleiche Anzahl an Mulden aufgefüllt wird, zum anderen können ihr Bau und dadurch möglicherweise bedingte Verdichtungen sowie der Eintrag von Boden, Laub und Mahdgut die Versickerungsleistung herabsetzen. Auch weichen die einzelnen Muldenvolumina mehr oder weniger voneinander ab.

Die höchste hydraulische Belastung erfahren die Mulden K1 bis K6. Hier wird der Zustand „leer“ in den seltensten Fällen notiert. Auffallend häufig gefüllt ist die Mulde K3, jedoch ohne erkennbaren Grund. Der Eintrag von Boden von der Böschung ist nur für K5, K6 (jeweils am 17.11.05) und K7 (21.10.06) bekannt, wobei daraus jedoch nicht auf einen negativen Einfluss geschlossen werden kann.

Die geringste Belastung erfährt K15, das Endglied der Kaskade. Nur bei sehr starken Ereignissen strömt Wasser oberirdisch aus K14 in K15. Im Normalfall fließt das Wasser unterirdisch durch die Gabione und die gepflasterte Muldensohle in K15 und tritt erst kurz vor dem daran anschließenden Betonrohr zutage.

Hieraus ergibt sich die Vermutung, dass auch aus den oberen Mulden Wasser unterirdisch den darunter liegenden Mulden zufließt. Hierfür spricht beispielsweise die Zunahme der Tage mit Vollfüllung von K7 nach K9 insbesondere aber von K10 nach K14 (s. Abb. X im Anhang). Ein weiteres Indiz geben acht ausgewählte Beispiele (s. Abb. 6-1), die zeigen dass die Mulden K13 und K14 Wasser enthalten können, obwohl sie am Vortag leer und auch einige darüber gelegene Mulden leer sind. Im Zeitraum vom 28.07. - 02.08.06 ist gut zu sehen, dass K7 kaum Wasser enthält, während K8 und K9 schon zur Hälfte gefüllt sind und K9 am Folgetag sogar gänzlich aufgefüllt wird. Oberirdische Rohre, die Wasser in die genannten Mulden einleiten könnten, wurden nicht entdeckt.

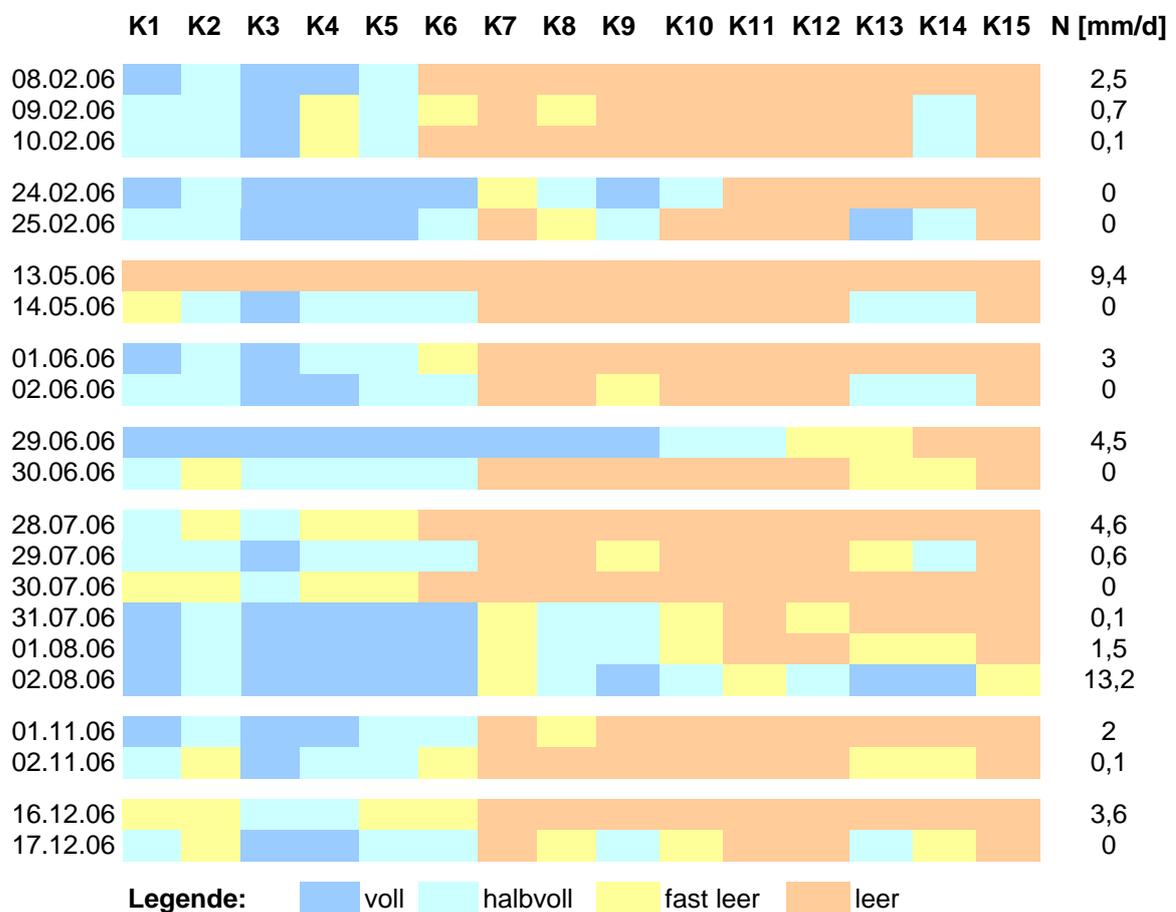


Abb. 6-1: Ereignisse mit unterirdischer Wasserabgabe in tiefer liegende Kaskadenmulden.

6.2 Profilschnitte

Anhand der Profilschnitte zeigt sich, dass der Tonschiefer südostexponiert ist. Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass der Tonschiefer bei P1 deutlich tiefer (70 cm bis 135 cm) als bei den übrigen Pegeln in den Quellmulden ansteht und bei P13 erreicht er mit etwa 3,3 m Abstand zu P1 den tiefsten erfassten Wert (vgl. Tab. 4-4). Beide Punkte liegen inmitten der in Kapitel 3 beschriebenen Erosionsrinne, welche für das Grundwasser eine unterirdische Senke

darstellt. Wenige Meter westlich von P1 ereignete sich ein von KONZ (2003: 58) erwähntes extremes Erosionsereignis. Auch die südöstliche Verlängerung des römischen Fundamentes erlag erosiven Prozessen.

Als Konsequenz hieraus nimmt die Mächtigkeit des Grundwasserkörpers wie in den Abbildungen 5-2 und 5-3 zu sehen, jeweils von W nach E, von den geneigten Tonschieferflanken zum tiefsten Punkt hin zu, d. h. von P9 nach P7, von P4 nach P6, von P3 nach P1 und von P12 nach P13.

Im Vergleich der Grundwasserstände direkt nach einem Niederschlagsereignis und nach einer mehrtägigen Trockenperiode zeigt, dass die Höhenunterschiede zwischen den Pegeln bei hohen Wasserständen größer sind als bei sinkendem Wasserspiegel (s. Abb. 5-2).

Der höhere Wasserstand bei P5 ist durch die Wasserzufuhr der oberen Terrasse zu erklären. Mit zunehmender Entfernung in Richtung P4 sinkt der Wasserstand wieder. Die Wasserabgabe von der oberen schilfbepflanzten Terrasse zur mittleren Terrasse durch die Gabionenmauer ist bei überlaufendem Schilfbeet deutlich hörbar und spiegelt sich auch in der Vegetation wieder. Nahe der Gabionenmauer zeigt sich eine vergleichsweise üppige Vegetation mit sattem Grün, in der sich innerhalb von 3 Jahren beispielsweise *Lychnis flos-cuculi*, ein Wechselfeuchtezeiger, vermehrt angesiedelt hat und vereinzelt auch der Feuchtezeiger *Juncus effusus* zu finden ist. Mit einiger Entfernung von der Gabionenmauer geht die Vegetation in eine magere, hellere Pflanzengesellschaft über (s. Abb. XI und XII im Anhang). Auch im geoelektrischen Profil 7 (s. u.) ist deutlich zu sehen, dass Wasser aus dem Schilfbeet durch die Gabione hindurch in die mittlere Terrasse strömt und dort oberflächennah zu einer starken Aufsättigung des Bodens führt, die fast bis zur Mitte der mittleren Terrasse reicht und dann deutlich abnimmt. Ob der Einfluss der Wasserzufuhr aus der oberen Terrasse auch den im Vergleich zu P3 höheren Wasserstand bei P2 bedingt, lässt sich nur durch nähere Untersuchungen klären.

6.3 Grundwasserganglinien

Die Grundwasserneubildung beginnt zwischen Oktober und Dezember und dauert bis zum Frühjahr an. Mit Beginn der Vegetationsperiode ab April/Mai sinkt der Grundwasserspiegel über den Sommer bis zum Herbst hin wieder ab. Diese Jahresschwankung ist umso ausgeprägter, je durchlässiger ein Grundwasserkörper ist (HEATH 1988: 35, MATTHEß & UBELL 1983: 446, VOGELSANG 1998: 58f).

Dieser Theorie entsprechend beginnt der Wasserspiegel in den Quellmulden 2006 ab März zu sinken. Nach nur vier Monaten steigt er mit Beginn des Monats August in den folgenden Monaten jedoch wieder an. Dies liegt an den vergleichsweise regenreichen Monaten August und Oktober, wie Tab. 6-1 zeigt. Nach einem extrem trockenen Juli erreicht der August mit einer Niederschlagsmenge von 162 mm mehr als das Doppelte des langjährigen Mittels. Auf

einen ebenfalls sehr trockenen September folgt der Oktober mit einem Plus von rund 28 % gegenüber dem langjährigen Monatsmittel. Hinsichtlich der Verdunstung erscheint es erwähnenswert, dass die noch vor der Trockenperiode im Juli gemähten Grünflächen anschließend zu einem großen Teil verdorrten und bei dem einsetzenden Niederschlag im August keine hohe Evapotranspirationsleistung erreicht haben dürften.

Tab. 6-1: Gegenüberstellung der langjährigen Niederschlags-Monatsmittel (DWD 2005: o. S.) und der Monatssummen der Jahre 2005 und 2006.

Monat	Langjähriges Mittel (1961 - 1990)	2005	2006
Januar	60	49	24
Februar	55	57	50
März	64	32	78
April	53	43	46
Mai	68	75	87
Juni	73	17	37
Juli	70	60	14
August	71	88	162
September	59	41	19
Oktober	65	47	83
November	74	38	64
Dezember	72	61	58
Summe	785	608	721

Wie Abb. 5-4 und Abb. 5-5 zeigen, ist der Zusammenhang zwischen Niederschlag und Grundwasserneubildung in den Quellmulden evident. Laut DVWK (1982: 87, 97) können in extrem nassen Jahren bis zu 70 % des Niederschlags zur Grundwasserneubildung beitragen.

Der Niederschlag, der im bebauten Teil des Untersuchungsgebietes nicht versickern kann, wird den Quellmulden zugeführt. Den Versickerungsanlagen wird somit ein Vielfaches der natürlichen Mengen zugeführt, die dem oberflächennahen Grundwasser zusickern bevor sie durch Pflanzen aufgenommen und verdunstet werden können. Laut SARTOR (2002: 7) handelt es sich dabei um das 2- bis 7fache (s. a. SIEKER, KAISER & SIEKER 2006: 180ff).

Die Evaporationsleistung durch Pflanzen beträgt auch bei Mulden und Muldenrigolen lediglich etwa 5 % (SARTOR 2002: 7). Dieser Sachverhalt führt dazu, dass die Einleitung von Oberflächenwasser in Retentionsanlagen durchaus gleichgesetzt werden kann mit der Situation „extrem nasse Jahre“ auf natürlichem Boden. Im Gegensatz dazu ist die Grundwasserneubildungsrate in dicht bebauten Gebieten mit Null gleichzusetzen.

Die Auswertung der Ganglinien hinsichtlich der Änderungen des Grundwasserspiegels innerhalb der hydrologischen Halbjahre erfolgte nicht streng anhand der Datumsgrenzen 01.11. - 30.04. und 01.05. - 31.10. Sinnvoller erschien die visuelle Festlegung der Grenzen

anhand der abfallenden Ganglinienabschnitte (s. Abb. XIII im Anhang) in Anlehnung an die Datumsgrenzen, so dass das hydrologische Winterhalbjahr mit dem niedrigsten Grundwasserstand erst am 28.11.2005 beginnt. Das Sommerhalbjahr beginnt am 13.05.2006 und endet am 23.10.2006. Dies scheint vertretbar, da in der Literatur unterschiedliche Angaben zu Beginn und Ende der Grundwasserneubildung zu finden sind und gewisse klimatische Abweichungen vom langjährigen Mittel normal sind (HEATH 1988: 35, MATTHEB & UBELL 1983: 446, LÜERS 2003: 31, VOGELANG 1998: 58f).

Da die Flurabstände eher gering sind, machen sich auch kurzfristige Niederschlagsereignisse bemerkbar. Die Grundwassertiefststände als Bezugspunkt betrachtend, ist der Grundwasserspiegel im Winterhalbjahr 2005/2006 um durchschnittlich rund 100 mm gestiegen. Aufgrund der hohen Niederschläge im August und Oktober 2006 wurde auch während des Sommerhalbjahres Grundwasser gebildet. Der Grundwasserspiegel stieg um rund 190 mm. Während des hydrologischen Jahres 2005/2006 erfuhr der Grundwasserspiegel somit einen Anstieg von insgesamt rund 290 mm (s. Tab. XVI im Anhang).

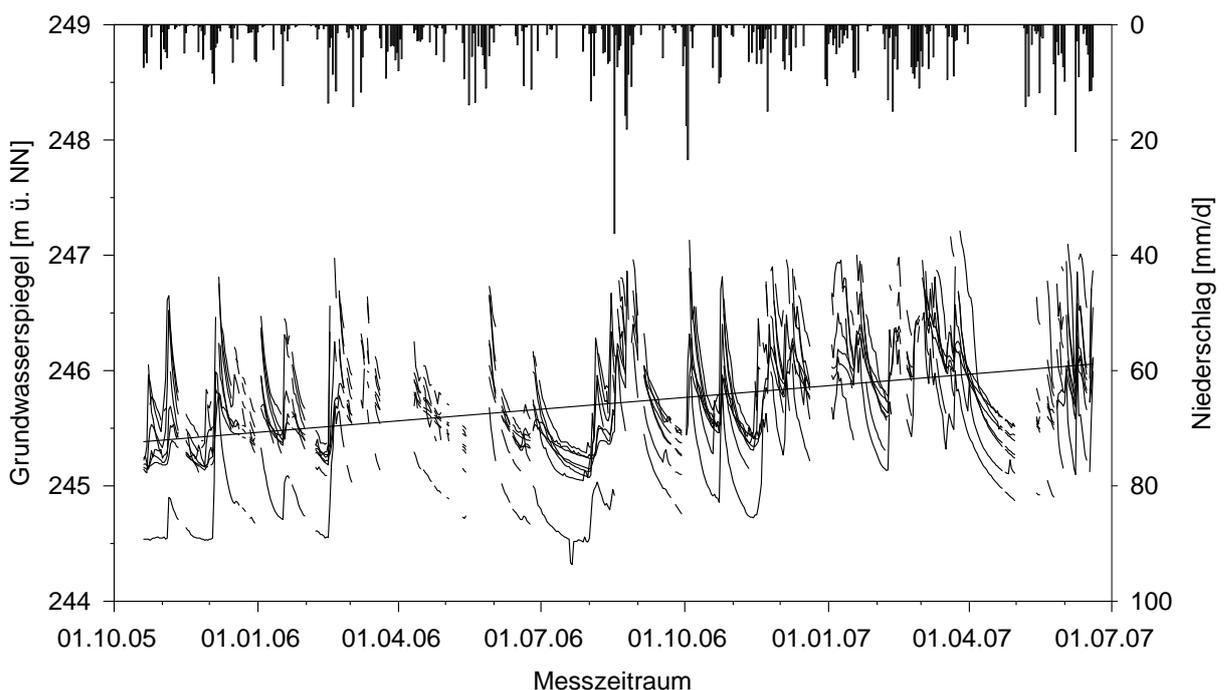


Abb. 6-2: Grundwasserstände der Pegel P1 - P8 vom 20.10.2005 bis 20.06.2007.

Die Datenreihe vom 20.10.2005 bis zum 20.06.2007 betrachtend fällt auf, dass der Wasserspiegel insgesamt ansteigt (Abb. 6-2). Die Trendlinie für den Pegel P8, an dem kaum Überstauereignisse zu verzeichnen sind, zeigt, dass der Wasserspiegel in 20 Monaten von 3,40 m u GOK um 60 cm auf 2,80 m u GOK angestiegen ist. Auf lange Sicht führt diese Tendenz zu der fortschreitenden Abnahme des in den Quellmulden bereitgestellten Speichervolumens. GÖBEL, STUBBE, WEINERT, ZIMMERMANN, FACH, DIERKES, KORIES, MESSER, MERTSCH,

GEIGER & COLDEWEY (2004: 280f) warnen in ihrer Untersuchung davor, mehr als 75 % des Jahresniederschlags versickern zu lassen, da der Grundwasserspiegel dadurch nicht ausgeglichen, sondern überkompensiert wird. Der steigende Grundwasserspiegel kann in ebenen Lagen zu Nässeschäden an Gebäuden führen. Laut N-A-Simulation werden am Petrisberg bis zu 68 % des Jahresniederschlags zurückgehalten und die Quellmulden befinden sich auf einem tieferen Niveau als die nächstgelegenen Häuser. Dennoch würde ein weiterhin steigender Grundwasserspiegel zu einer Verringerung des Speichervolumens und damit zur Abnahme der Leistungsfähigkeit insbesondere der Quellmulde 3 führen. Im Hinblick auf das zur Verfügung stehende Speichervolumen der Quellmulden sollte diese Entwicklung daher weiter beobachtet werden.

Da es sich bei den Quellmulden um eine vergleichsweise kleine Fläche handelt, auf der sich das Wasser aufgrund der ebenen Geländefläche gerade bei großen Einleitungsmengen gut verteilen kann, zeigen alle Pegel der Quellmulden ähnlich verlaufende Grundwasserganglinien (vgl. Korrelations-Tabelle XV im Anhang).

Eine leichte Sonderstellung nehmen die mit $r = 0,94$ sehr eng miteinander korrelierenden Pegel P7 und P8 ein. Deren Wasserstände beschreiben eine vergleichsweise flache Linie. Dies liegt zum einen daran, dass dieser Teil der Mulde kaum oberirdische Einleitungen erfährt. Während P7 nie und P8 lediglich zwei Mal während des betrachteten Zeitraumes unter Wasser lagen, war dies beispielsweise bei P5 und P3 mehr als 50 Mal der Fall (eine Übersicht über die Anzahl der Tage mit Überstau pro Pegel findet sich im Tab. XIV im Anhang). Zum anderen liegt die Vermutung nahe, dass unterirdisch nur ein geringer Teil des Wassers dem Gefälle der Quartärbasis folgend in Richtung der Pegel 7 und 8 abfließt.

Ein Grund für das geringe Ausmaß und das langsamere Verhalten hinsichtlich Anstieg und Fallen der Wasserspiegel bei P7 und P8 kann eine dichtere Lagerung der Bodenschichten sein. Hierfür spricht auch das geoelektrische Profil Nr. 8 (s. u.). Der trockenere Bereich im rechten Teil der Darstellung könnte von einer Verdichtung des Untergrundes herrühren (KNEISEL et al. 2007: 196).

Eine mit $r = 0,96$ sehr hohe Korrelation liegt auch zwischen den Ganglinien der Pegel P3 und P9 vor. Grafisch zeigt sich dies in einem ähnlichen Verlauf und den zeitgleichen Anstiegen der Wasserspiegel. Die Anstiege erfolgen außerdem am Tag des jeweiligen Niederschlagsereignisses. Der Grund hierfür ist, dass beide Pegel im Bereich der Einleitung liegen. P3 erhält das überlaufende Wasser aus der Kaskade, P9 das Oberflächenwasser aus dem darüber gelegenen Wohngebiet.

Bei P5 und P12 ist dies mit $r = 0,97$ ähnlich, da beide Pegel unterhalb einer Einleitungsstelle liegen. P5 liegt direkt unterhalb der Quellmulde 1 in Gefällerrichtung nahe an der Gabionenmauer und ist somit gut an die Quellmulde 1 bzw. deren unterirdischen Wasserstrom angeschlossen.

Bei P12 liegt die Vermutung nahe, dass hier jenes Wasser erfasst wird, das bereits in den Mulden der Kaskade und am Pegel P3 versickert und unterirdisch der Brettenbachquelle zufließt. Hierdurch ließe sich auch das in etwa zeitgleiche Ansteigen des Pegels P12 mit den Pegeln P9, P3 und P5 bei zufließendem Oberflächenwasser erklären (s. Abb. 6-3).

Ein weiteres Indiz ist der nach Südwesten einfallende Tonschiefer und ein Boden, der mit Mittelkies und feinkiesigem, sandigen Substrat bei P12 durchlässiger ist als beispielsweise bei dem verzögert ansteigenden P13. Dort enthält der Boden deutlich höhere Schluffanteile.

Ein Vergleich mit P1 spricht ebenfalls für eine unterirdische Zulieferung des Wassers aus Kaskaden- und Quellmulden. P1 ist einer der letzten Pegel, die das Wasser erreicht. Entsprechend verzögert setzt hier eine Reaktion ein. Die Ganglinie des Pegels 12 beschreibt in trockenen Perioden den gleichen Verlauf wie die des Pegels 1. Mit der Einleitung von Oberflächenwasser in die Kaskaden und die Quellmulde steigt der Wasserspiegel bei P12 jedoch sofort und zeitgleich mit P3 an, während er dies bei P1 zum Teil erst einige Tage später tut.

Alle übrigen Pegel liegen nicht so nah an Einleitungsstellen wie P9 und P3. Eingeleitetes Wasser kann sich über die Fläche verteilen und evtl. auch schon versickern bevor es diese erreicht. Dadurch weisen die Ganglinien weniger oder deutlich flachere Anstiege auf. P13 liegt unterhalb des Verteilergrabens und erfasst somit auch oberirdische Überlaufereignisse aus diesem.

Die Ganglinie bei P13 ist mit $r > 0,91$ eng korreliert mit denen bei P6, P1, P7 und P8 und weist wie diese einen ruhigeren Verlauf mit deutlich weniger Zwischen-Peaks auf als jene Pegel, die näher an den Einleitungsstellen liegen. Nach längeren Trockenphasen steigt der Wasserspiegel bei P13 im Vergleich zu den reaktionsschnellsten Pegeln (P9, P3, P12) mit einer zeitlichen Verzögerung von ein bis vier Tagen an. Bei einem Abfall der übrigen Pegel sinkt der Wasserspiegel bei P13 dagegen am gleichen Tag. Die Zeitverzögerung nach Trockenphasen lässt sich durch das langsame Fortbewegen der Feuchtefront im Boden erklären und das zeitgleiche Absinken der Pegel durch den ausbleibenden Druckimpuls neuen Wassers.

Besonders deutlich steigt der Wasserspiegel bei Überflutung des Verteilergrabens, während er sich schon wieder senkt, wenn zwar noch Wasser im Verteilergraben steht, jedoch nicht mehr

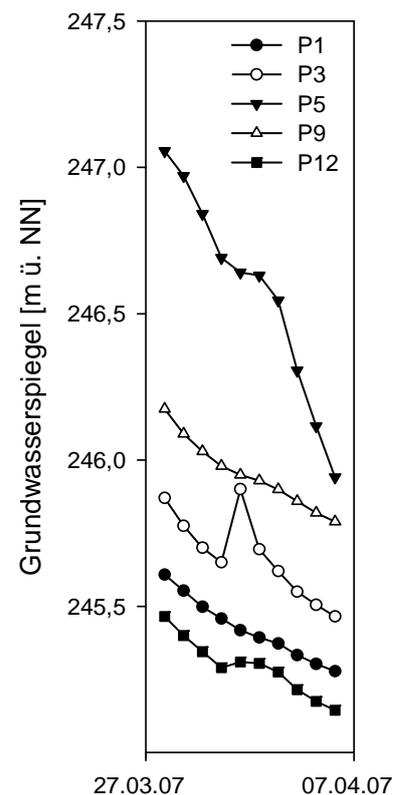


Abb. 6-3: Grundwasserganglinien der Pegel P1, P3, P5, P9 und P12.

überläuft (s. Abb. 6-4). Hier macht sich der wesentlich langsamere Wassertransport durch die Bodenzone bemerkbar.

Die genannten Beobachtungen sprechen dafür, dass bereits in den Quellmulden Wasser zurückgehalten wird und die Ganglinien des Grundwassers bzw. der Wasserspiegel dort ausgeglichen bzw. geglättet werden. Hierfür spricht auch, dass insbesondere in geschichteten Sedimenten die horizontale Durchlässigkeit größer ist als die vertikale (HEATH 1988: 31).

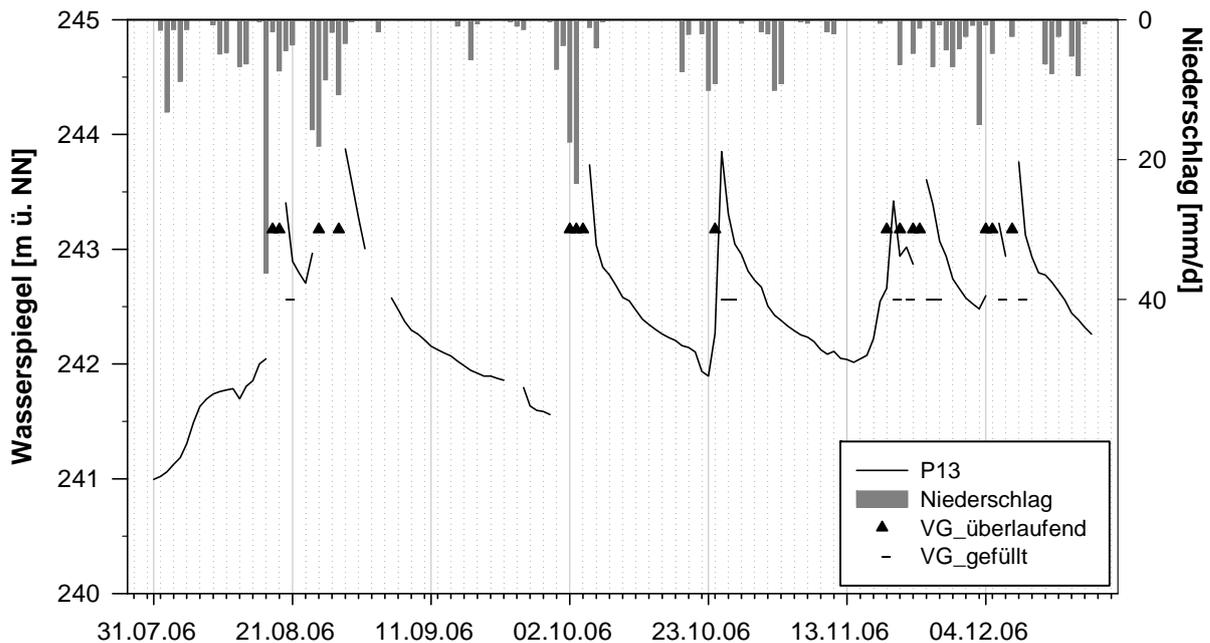


Abb. 6-4: Änderungen des Wasserspiegels bei P13 in Abhängigkeit des Füllstands im Verteilergraben (VG).

Im Verteilergraben findet demnach ein weiterer Rückhalt des Wassers mit daraus resultierender zeitlich verzögerter Abgabe des Wassers Richtung Brettenbach statt. Die Laufzeit verlängernde Wirkung von Wasserband, angeschlossener Rigole und der Kaskade ist bei einem Messintervall von einem Tag nicht erkennbar. Um genauere Aussagen über die Laufzeitverlängerung und die daraus resultierende zeitlich verzögerte Abgabe des Wassers in die Quellmulden machen zu können, bedarf es einer höheren Messauflösung. In der Siedlungswasserwirtschaft und kleinen Einzugsgebieten sollte diese im Minutenbereich liegen, wodurch der Einsatz eines Datenloggers unabdingbar wird (GUJER 2007: 205, SYMADER 2004: 34). GUJER (2007: 208) wie auch BERNE, DELRIEU, CREUTIN & OBLED (2004: 178) fordern analog hierzu eine Auflösung der Niederschlagsdaten im Bereich von ein bis zwei Minuten, was bislang nur per Radarmessung möglich ist.

Die Pegel oberhalb der Quellmulden P10 und P11 liefern kaum brauchbare Ergebnisse. Bei Pegel 10 wurde zwar 7 m tief gebohrt, dennoch liegt die Endteufe des Pegels 10 mehr als 2 m über jener von P7, P8 und P9. Der Tonschiefer konnte hier nicht erreicht werden. Mangan-

Ausscheidungen in den unteren 50 cm des Bohrprofils sprechen für zeitweise auftretendes Stauwasser in diesem Bereich. Im untersuchten Zeitraum konnte dieses jedoch nicht erfasst werden. Bei P11 musste die Bohrung nach 5,50 m abgebrochen werden, da Quarzgeröll den Bohrfortschritt verhinderte. Damit liegt die Endteufe mehr als 1 m über der bei P10. Ein Erfassen des freien Wasserspiegels ist somit noch unwahrscheinlicher als bei P11.

6.4 Feuchteverteilung

In der mittleren Versickerungsmulde wird der Wasserspiegel geoelektrisch in einer Tiefe von 2,5 m bis 2,7 m erfasst. Zur Unterstützung der Dateninterpretation und -darstellung erfolgten am gleichen Tag Messungen in den Grundwasserpegeln. Das Ergebnis der Sondierung von Profil 6 wird durch den am gleichen Tag gemessenen Pegel P4 mit einem Wasserstand von 2,48 m u. GOK bekräftigt.

Die Feuchteverteilung lässt sich durch das Wettergeschehen der vorausgegangenen Tage erklären. Während einer achttägigen niederschlagsfreien Periode verlor der Boden an Feuchtigkeit. Am 20. und 21.03.2006 fielen insgesamt rund 6 mm Niederschlag, die für einen feuchten Oberboden sorgten. Am folgenden Tag und dem Tag der Sondierung blieb es bei maximal 11°C trocken. Hierdurch konnte der Oberboden an der Oberfläche stellenweise wieder abtrocknen.

In beiden Tomogrammen des im Mai sondierten Profils 7 deutlich zu erkennen, ist der störende Einfluss des Gabionen-Drahtkorbes zwischen den Elektroden 18 und 22. Die Dipol-Dipol-Konfiguration zeigt sich diesbezüglich sensitiver mit markanten Inversionsartefakten. In der Sondierung nach Wenner-Schlumberger lässt sich der Wasserspiegel in einer Tiefe von etwa 3 m u. GOK ausreichend gut detektieren. Damit liegt er nahe an dem in Pegel P4 gemessenen Wasserstand von 2,67 m u. GOK.

Die teils sehr markanten Widerstandskontraste sind auf den Materialwechsel (Kies und Sand oberhalb und Tonschiefer unterhalb 3,30 m u. GOK) und die dadurch bedingte unterschiedliche Wassersättigung in der Versickerungsmulde zurückzuführen.

In beiden Tomogrammen ebenfalls gut zu erkennen, ist der wassergesättigte linke Bereich. Es handelt sich um Wasser, das aus der oberen Versickerungsmulde, dem Sedimentfang, in die mittlere fließt und dort horizontal wie vertikal versickert. Mit zunehmender Entfernung sinkt der Wasserspiegel und der Boden wird trockener. Ein Blick in die Klimadaten zeigt, dass die maximalen Tagestemperaturen mehr als 20°C erreichten. Vom 02. - 05.05.2006, dem Tag der Messung, fiel kein Niederschlag. An den drei vorausgegangenen Tagen waren es insgesamt 8,5 mm, auf die eventuell die Durchfeuchtung des Oberbodens in der unteren Mulde zurückzuführen ist.

Den mit zunehmender Entfernung zur oberen Versickerungsmulde sinkenden Wasserstand zeigen auch die Sondierungen der Profile 2 und 1 (s. Abb. II und IV im Anhang), während

zwischen den Sondierungen der Profile 5 und 6, beide mehr als 5,50 m von der oberen Versickerungsmulde entfernt, kaum Höhenunterschiede vorliegen (s. Abb. III und V im Anhang). Die untere Mulde weist dagegen eine gleichmäßige Feuchteverteilung im Oberboden auf.

Im Vergleich zu den oberen Muldenniveaus sind die Leitfähigkeiten in der unteren Quellmulde, gemessen am 23.03.2006 deutlich höher wie auch in einem weiteren Tomogramm der unteren Mulde (s. Profil 4 in Abb. VII im Anhang) zu sehen ist. Dies liegt vermutlich an der Einleitung von Oberflächenwasser aus dem Wohngebiet. Zum einen erfährt die untere Quellmulde direkte Einleitungen aus der Kaskade und zum anderen die unterirdische Wasserzufuhr aus den oberhalb gelegenen Quellmulden. Tatsächlich fielen über dem Untersuchungsgebiet von Ende Februar bis Mitte März insgesamt 39 mm Niederschlag, die zusammen mit der Sammlerfunktion der unteren Quellmulde zu einer Durchfeuchtung des Bodens bis in Oberflächennähe geführt haben können. Hinsichtlich der Retentionsleistung spricht dies zunächst für einen guten Rückhalt, da zumindest ein Teil des Wassers über mehrere Tage im Boden verbleibt und nur verzögert in Richtung Brettenbach abfließt.

Trotz der erschwerten Sondierung sind die Leitfähigkeitskontraste in der Nähe des Pegels P1 stärker und hier stimmt der Wasserspiegel mit dem gemessenen Wert von 1,87 m überein. Obwohl der Wasserspiegel zu diesem Zeitpunkt sinkt, kann die Speicherkapazität nicht als hoch eingestuft werden, was zum Ende der Grundwasserneubildungsphase hin auch nicht anders zu erwarten ist.

Im Gegensatz zu den SW-NE verlaufenden Profilen weisen die NW-SE verlaufenden Profile keinen einheitlichen Wasserspiegel auf. Der östliche Bereich der oberen Versickerungsmulde ist deutlich trockener als der zentrale und westliche Bereich. Verantwortlich für den trockeneren rechten Bereich könnte eine natürlicherweise dichtere Lagerung sein. Aquifere, insbesondere solche, die aus geschichteten Sedimenten bestehen, sind selten homogen und isotrop (HEATH 1988: 30). Es kann sich jedoch auch um eine während der Bauphase verursachte Verdichtung handeln. Außerdem erfährt dieser Teil der Mulde kaum Einleitungen aus der angeschlossenen Korridormulde und wird sehr viel seltener durchfeuchtet als der linke, mit Schilf bepflanzte Bereich. Da auch in der untersten Mulde im Bereich des Pegels P1 niedrigere Wasserstände auftreten und sich die Pegel P7, 8 und 1 im Bereich einer ehemaligen Erosionsrinne befinden, liegt auch der Verdacht nahe, dass die Rinne im Laufe der Zeit mit feinerem, undurchlässigerem Material verfüllt wurde. KONZ (2003: 58) nennt nordwestlich anstehenden Lösslehm. Ein geoelektrisches NW-SE verlaufendes Profil im Bereich des Pegels P6 könnte Aufschluss über den Verdacht eines natürlicherweise oder durch Bauarbeiten bedingten dichteren Bodens bringen.

Die Tomogramme zeigen, dass die 2D-Widerstandstomographie eine geeignete Methode zur minimal invasiven flächenhaften Erfassung der Bodenfeuchteverteilung darstellt (vgl. auch HAUCK, KURZ, SCHMALHOLZ, KNEISEL, MAYER, HÜBNER, HEIDT, KÖNIGER, SCHLAEGER, SCHUHMANN, KALTHOFF & KOTTMEIER 2005: 120, KNEISEL et al. 2007: 197, MÜLLER,

MOHNKE, SCHMALHOLZ & YARAMANCI 2003: 176, WERBAN 2005: 62). Der Wasserspiegel konnte in den Versickerungsmulden meist gut detektiert werden. Als hilfreich bezüglich der Dateninterpretation erwiesen sich am jeweils gleichen Tag durchgeführte Pegelmessungen. Um nähere Erkenntnisse über die Feuchteverteilung in der unteren Quellmulde zu gewinnen, empfiehlt es sich, die Messungen während sommerlicher trockener Perioden zu wiederholen. Ein Kenntnissgewinn wird auch durch ein NW-SE verlaufendes Profil in der mittleren Versickerungsmulde erwartet. Detaillierte Aussagen über die raumzeitliche Bodenfeuchteverteilung und -dynamik können über ein geoelektrisches Monitoring mit fest installierten Elektroden gewonnen werden (KNEISEL et al. 2007: 197, WERBAN 2005: 64f, 102). Die zeitliche Auflösung liegt laut WERBAN (2005: 32) bisher im Wochen- bis Monatsbereich und erlaubt beispielsweise Aussagen über jahreszeitliche Veränderungen (vgl. hierzu auch AALTONEN (2001), BINLEY, CASSIANI, MIDDLETON & WINSHIP (2002) und BINLEY, WINSHIP, WEST, POKAR & MIDDLETON (2002) zit. in WERBAN 2005: 32). Ob Aussagen über Veränderungen innerhalb kürzerer Zeiträume möglich sind, wäre zu untersuchen.

6.5 Abfluss und Niederschlag im Zeitraum 01.01.2005 - 30.04.2007

Nach Abb. 5-12 führen Niederschlagsereignisse erst ab bestimmten Niederschlagsmengen zur Abflussbildung. Zur Begründung des dann sehr schnellen und hohen Abflusses müssen mehrere Faktoren herangezogen werden. Eine Rolle spielt beispielsweise der Versiegelungsgrad. Das Untersuchungsgebiet Petrisberg ist ein urban geprägter Raum, der ansonsten Rasen, Wiesen und Gebüsch aufweist. Oberflächenabfluss tritt hier sehr schnell auf. Hinzu kommt der ohnehin kürzere Fließweg, den das Wasser bis zum Erreichen des Brettenbaches zurücklegt.

Auch der geologische Untergrund trägt zum Abflussverhalten bei. Der Grundwasserspiegel im Untersuchungsgebiet Brettenbach liegt sehr oberflächennah in den gering mächtigen quartären Sedimenten und der anstehende Tonschiefer des Petrisbergs hat als Wasserspeicher keine große Bedeutung.

Neben dem Versiegelungsgrad und der Geologie ist die Ursache für das Abflussverhalten des Brettenbaches in seinem Kopfeinzugsgebiet sicherlich die Größe dieses Gebietes. So zeigen kleine Einzugsgebiete laut THIEL (2000: 11) typischerweise sehr steile, gestauchte Abflusskurven mit hohem Anteil an Direktabfluss, während große Einzugsgebiete flach ansteigende, über die Zeit gedehnte Abflusskurven mit langen Fließzeiten aufweisen. Sie sind charakterisiert durch eine hohe Niederschlags-Pufferkapazität und vornehmlich Basisabfluss produzierende Speicher. Steiler Anstieg, gestauchte Abflusskurve und kurzes Auslaufen sind beim Brettenbach deutlich erkennbar (Abb. 5-12). Auch PATT (2001: 11) weist darauf hin, dass Einzugsgebiete mit kleinem Speichervermögen schnelle und hohe Abflüsse produzieren.

Wie hoch der dämpfende Einfluss des Retentionssystems auf das Abflussverhalten ist, kann nur ein Vergleich der in den Brettenbach geleiteten Oberflächenabflüsse bei Bewirtschaftung des Regenwassers durch ein Retentionssystem und bei Ableitung des Oberflächenwassers über ein konventionelles Entwässerungssystem zeigen. Hierzu wurden Niederschlag-Abfluss-Simulationen mit dem Programm erwin 4.0 durchgeführt (s. Kapitel 6.7).

Abbildung 5-13 spricht dafür, dass die Verdunstung in den Winterhalbjahren bei kühlen Temperaturen in den Hintergrund tritt und die Vegetation kaum Wasser verbraucht. Trockenphasen, in denen der Bodenspeicher sich entleeren kann, fallen kürzer aus. Bei höherer Vorfeuchte und geringerer Versickerung als im Sommer kann daher schneller und mehr Oberflächenabfluss entstehen.

Durch den von 2005 nach 2007 zunehmenden Niederschlag, die kürzeren Trockenphasen und die resultierende höhere Vorfeuchte steigt der Grundwasserspiegel in den Quellmulden an. Das Speichervolumen nimmt ab, der Drosselabfluss setzt schneller und öfter ein und der maximale Drosselabfluss wird schneller erreicht.

Generelle Aussagen zum jahreszeitlich bedingten Verhalten des Retentionssystems sind kritisch zu sehen, da einige Monate hinsichtlich der Niederschlagssumme stark vom langjährigen Mittel abweichen. Lang andauernde Niederschläge im Winterhalbjahr scheinen Drosselabläufe jedoch eher zu begünstigen als die oftmals kürzeren im Sommerhalbjahr. Somit ist bei sommerlichen konvektiven Ereignissen eine größere Rückhaltewirkung des Systems zu erwarten als im Winterhalbjahr. Dies deckt sich mit den Ergebnissen NIEHOFFs (2002: 108), wonach bei konvektiven Ereignissen die geringere Vorfeuchte der Böden im Sommer eine höhere Scheitelabminderung begünstigt.

Insgesamt ist das Retentionssystem zum Zeitpunkt der Untersuchungen sehr ungleichmäßig ausgelastet. Während die Quellmulden häufig Einleitungen erfahren, ist in den Sattelmulden selten Wasser zu sehen und unterhalb der Sportplatzmulde (PBD2) werden deutlich weniger Drosselabflüsse als unterhalb der Quellmulden (PBD1) registriert. Menge und Verteilung der Abflüsse werden sich bei fortschreitender Bebauung des Gebietes jedoch noch ändern.

Zusammenfassung – Geländeuntersuchungen

Die Erhebungen im Gelände zeigen folgendes Bild: Die Kaskadenmulden entleeren sich während der Sommerhalbjahre schneller als in den kühleren Monaten. Die aufgrund der wärmeren Lufttemperaturen höhere Verdunstung und der Wasserverbrauch durch die Vegetation bedingen eine schnellere Entleerung von Mulden- und Bodenspeicher. Die gemachten Beobachtungen sprechen dafür, dass das Wasser in den Mulden auch unterirdisch hangabwärts zu tiefer liegenden Mulden fließt.

Unterhalb der Quellmulden ist die Quartärbasis nach Südosten exponiert. Im östlichen Teil der Quellmulden wurde während archäologischer Ausgrabungen eine SW-NE verlaufende Erosionsrinne kartiert, die für das Grundwasser eine unterirdische Senke darstellt. Als Konse-

quenz von einfallender Quartärbasis und Erosionsrinne nimmt die Grundwassermächtigkeit von W nach E zu. Da die Flurabstände eher gering sind, führen auch kurzfristige Niederschlagsereignisse zu einem Anstieg des Wasserspiegels.

Die Datenreihe vom 20.10.2005 bis zum 20.06.2007 betrachtend fällt auf, dass der Wasserspiegel insgesamt mehr als einen halben Meter ansteigt. Auf lange Sicht führt diese Tendenz zu der fortschreitenden Abnahme des in den Quellmulden bereitgestellten Speichervolumens. Im Hinblick auf das zur Verfügung stehende Speichervolumen der Quellmulden sollte diese Entwicklung daher weiter beobachtet werden.

Die Vermutung des von den Kaskadenmulden ausgehenden unterirdischen Wasserstroms wird durch den schnellen Anstieg des Wasserspiegels bei P12 nach entsprechenden Ereignissen gestützt, wobei hier als Liefergebiet auch die untere Quellmulde denkbar ist. Die Laufzeitverlängerung des Wassers infolge der Retentionsanlagen ist sehr deutlich an der Reaktion des unterhalb gelegenen Grundwasserpegels P13 zu sehen. Zur Quantifizierung der gesamten Laufzeitverlängerung und der daraus resultierenden zeitlich verzögerten Abgabe des Wassers in die Quellmulden bedarf es einer Messauflösung im Minutenbereich. Die Messung des Wasserspiegels per Lichtlot müsste hierzu an mindestens einem Pegel durch einen Datenlogger ergänzt werden.

Die geoelektrische Untersuchung der Feuchteverteilung in den Quellmulden zeigt, dass die hydraulische Belastung in der unteren Quellmulde am größten ist und das Wasser über mehrere Tage im Boden gespeichert wird. Der östliche Bereich der oberen Quellmulde ist dagegen äußerst trocken und legt den Schluss nahe, dass hier eine natürliche oder anthropogene Verdichtung des Bodens vorliegt. Hinzu kommt, dass dieser Bereich kaum Einleitungen erfährt. Ein geoelektrisches SE-NW verlaufendes Profil im Bereich des Pegels P6 könnte hierüber Aufschluss geben.

Bei Betrachtung der Abflusspende über den Zeitraum 01.01. - 01.03.2005 wird deutlich, dass das urbane Kopfgebiet des Brettenbaches das typische Abflussverhalten eines kleinen Einzugsgebietes zeigt. Der steile Anstieg der Abflusskurve, deren gestauchter Verlauf und die kurze Auslaufphase sind Indizien für das geringe Retentionsvermögen des untersuchten Gebietes am Petrisberg. Wie hoch der dämpfende Einfluss des Retentionssystems auf das Abflussverhalten ist, kann nur mittels Niederschlag-Abfluss-Simulationen beantwortet werden.

Die Abflussdatenreihe weist zwar einige Monate auf, die hinsichtlich der Niederschlagssumme stark vom langjährigen Mittel abweichen, dennoch sprechen die Ereignisse dafür, dass lang andauernde Niederschläge im Winterhalbjahr Drosselabläufe eher begünstigen als die oftmals kürzeren im Sommerhalbjahr. Dies deckt sich mit den Ergebnissen NIEHOFFS (2002: 108), wonach bei konvektiven Ereignissen die geringere Vorfeuchte der Böden im Sommer eine höhere Scheitelabminderung begünstigt.

6.6 N-A-Simulation mit erwin 4.0

6.6.1 Aussagekraft des Modells

Die Zunahme an Ereignissen sowie hohen Abflussspitzen ist in erster Linie auf den im Untersuchungszeitraum zunehmenden Niederschlag zurückzuführen.

Die generell höheren Abflüsse bei PBD2 erscheinen paradox, da das Verhältnis Retentionsfläche zu daran angeschlossener versiegelter Fläche mit ungefähr 1:3 günstiger ist als bei PBD1 mit 1:9. Allerdings sind die k_f -Werte der Rigolen, mit denen drei von fünf Anlagen ausgestattet sind um durchschnittlich eine 10er-Potenz niedriger als bei den in PBD1 entwässernden Anlagen. Außerdem könnte die etwas höhere Anzahl an Retentionsanlagen, die an PBD1 angeschlossen sind, zu einem längeren „Aufenthalt“ des Wassers und infolgedessen besseren Infiltration führen. Das Wasser kann in den vielen kleinen Mulden der Kaskade und den oberen Terrassen der Quellmulden stehen bleiben und erreicht nicht direkt den in der unteren Quellmulde ebenerdig eingebauten Drosselablauf.

Bei PBD1 nimmt die Höhe der positiven Abweichungen mit der Zeit ab. Hier spiegelt sich vermutlich der Baufortschritt wieder. Zu Beginn des Messzeitraumes können mehr Grünflächen das Oberflächenwasser zurückhalten. Somit werden weniger Drosselabläufe generiert als simuliert. Erst mit der Zeit nimmt die Bebauung zu. Daher werden die Abflüsse anfangs überschätzt, nähern sich aber dann den gemessenen Werten an. Somit gäbe das Modell für PBD1 wie erwartet das Abflussverhalten zum Ende der Messreihe hin am besten wieder.

Bei PBD2 werden die Abflüsse mit der Zeit zunehmend überschätzt. Hier wird der Oberflächenabfluss des unbebauten Gebietes besser wiedergegeben als jener zum Zeitpunkt der Kartierung. Als Ursache für die geringe Anzahl gemessener Abflüsse kommt hier zunächst die natürliche Retention der im Modell nicht berücksichtigten Grünflächen in Betracht. Das an PBD1 angeschlossene Gebiet weist bei einer Flächengröße von 16 ha einen Versiegelungsgrad von 44 % auf, während jenes an PBD2 angeschlossene, etwa 4 ha kleinere Gebiet nur zu 31 % versiegelt ist. Auf die Fläche bezogen, weist ersteres 41 % mehr Versiegelung auf als das an PBD2 angeschlossene. Somit beinhaltet das in PBD2 erfasste Gebiet zum Zeitpunkt der Kartierung wesentlich mehr Grünflächen, die das Oberflächenwasser zurückhalten können.

Die simulierten Abflussspitzen (Q_{\max}) weichen bei niedrigen gemessenen Abflüssen am stärksten von diesen ab. Hohe Abflussraten, die tendenziell infolge hoher N-Mengen auftreten, werden besser abgebildet. Da insbesondere Hochwasser relevante Ereignisse Gegenstand der Untersuchung sind, sind die hohen Abweichungen bei geringem Abfluss vertretbar.

Mit der Überschätzung von Spitzenabflüssen, wie bei PBD2, liegt der Planer auf der sicheren Seite. Kritischer zu sehen, ist die Unterschätzung der gemessenen Spitzenabflüsse von 16 l/s bei PBD1. Dies kann z. B. durch Angabe zu hoher k_f -Werte für die Retentionsanlagen oder zu schnelles Leerlaufen des Bodenspeichers im Modell bedingt sein, worauf auch das Fehlen

deutlicher Auslaufkurven bei der Darstellung von Einzelereignissen zurückgeführt werden könnte.

Die Annäherung der simulierten Werte an die gemessenen bei zunehmender Niederschlagshöhe deutet darauf hin, dass der bei Starkniederschlägen vorherrschende Oberflächenabfluss (SOF und HOF) durch das Modell besser wieder gegeben wird als andere Prozesse, auch weil die Retention der natürlichen Flächen dann in den Hintergrund tritt (vgl. NIEHOFF 2002: 4f). Eine streng lineare Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss kann jedoch nicht vorliegen, da die Abflussbildung nicht alleine von der Niederschlagshöhe abhängig ist, sondern von weiteren Größen (Vorfeuchte, Verdunstung, Vegetation etc.) gesteuert wird. Wie die Abb. 6-5a bis d zeigen, stellt das Modell einen deutlicheren Zusammenhang zwischen Niederschlagshöhe und Abflussspitze dar, als er in Wirklichkeit gegeben ist. Die zunehmende Überschätzung von Q_{\max} bei PBD2 (s. Abb. 5-17c) könnte daher auch durch die im Vergleich zum Vorjahr höheren Niederschlagsmengen ab Mai 2006 (s. Abb. 5-13 und Tab. 6-1) bedingt sein.

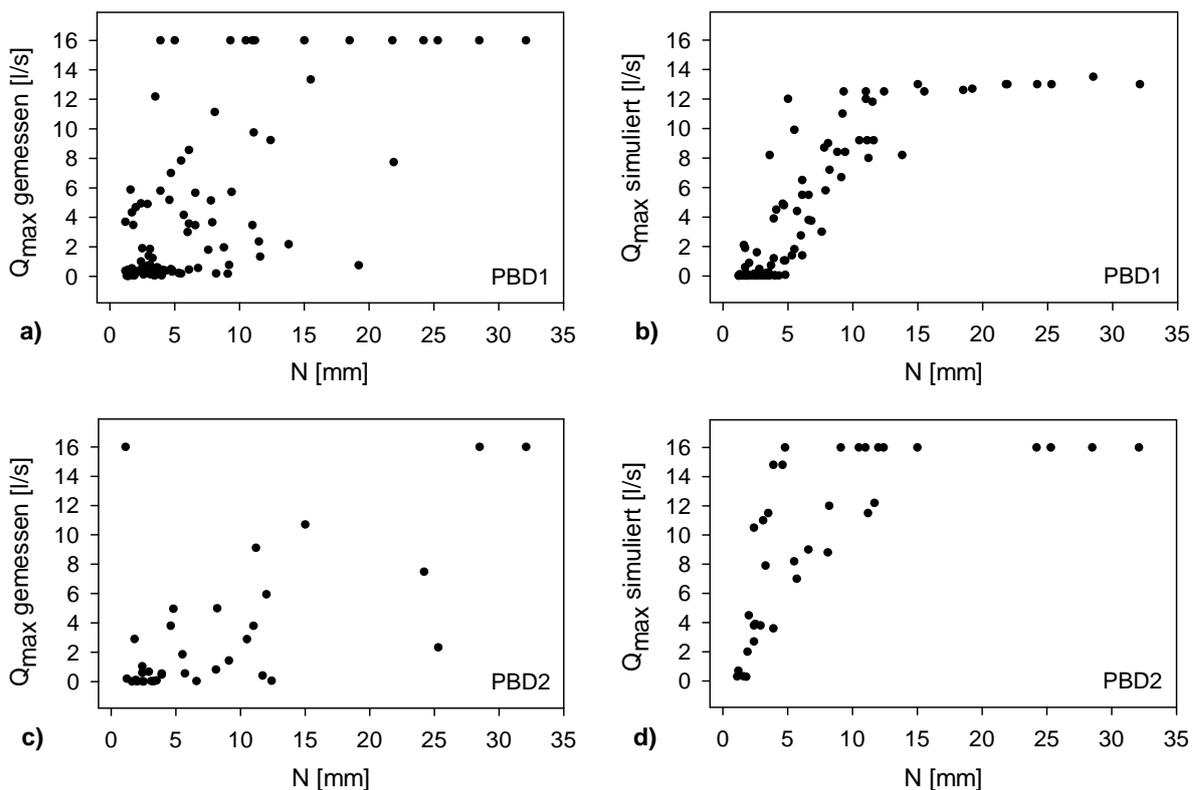


Abb. 6-5: Gemessene und simulierte Abflussspitzen (Q_{\max}) in Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe für PBD1 (a und b) und PBD2 (c und d).

Zu berücksichtigen ist auch die Rolle der Abflussdrossel, die keine höheren Abflussspitzen als 16 l/s zulässt. Eine Verbesserung der Modellgüte nach Löschen dieser Werte ergibt sich jedoch nicht.

Eine Verbesserung der Modellgüte könnte durch Wahl eines mittleren k_f -Wertes an Stelle des niedrigsten erreicht werden. Eine konsequente Verwendung der mittleren k_f -Werte würde bei PBD1 jedoch zu einer zunehmenden Unterschätzung der Abflüsse führen. Weitere Verbesserungen des Modells sind durch die genauere Wiedergabe der einzelnen Prozesse möglich. Beispielsweise weichen einige Monatsmittel der Tagestemperatur während des Messzeitraumes stark vom langjährigen Mittel ab und können durch die in erwin 4.0 standardisierte Verdunstungskurve nicht hinreichend genau wiedergegeben werden.

Hierdurch ließe sich beispielsweise die Abweichung der simulierten Ganglinie von der gemessenen in der folgenden Abbildung zumindest teilweise erklären. Den ersten Ereignissen (1 in Abb. 6-6) voraus ging ein extrem trockener Juli (13 mm⁴) mit überdurchschnittlich hohen Temperaturen (6°C⁵ über dem langjährigen Mittel). Es ist zu erwarten, dass die Verdunstung in den vorausgegangenen zwei Wochen höher war als die standardisierte Kurve der potentiellen Verdunstung dies vorgibt. Der Boden wäre demnach aufnahmefähiger als im Modell dargestellt. In der Konsequenz muss der simulierte Abfluss höher sein als der gemessene. Für den August fällt die simulierte Ganglinie (2 in Abb. 6-6) dagegen schwächer aus als die gemessene.

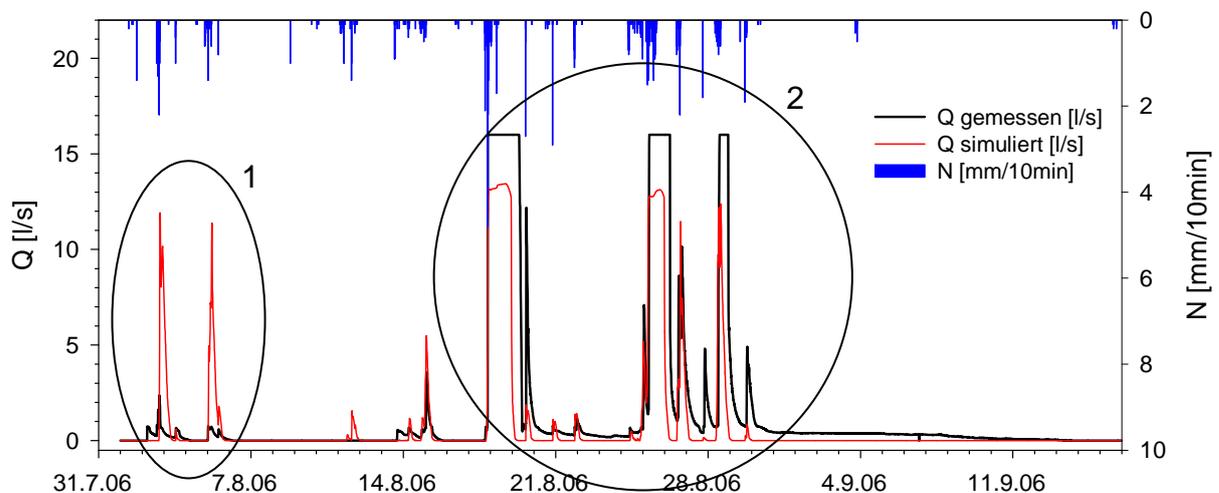


Abb. 6-6: Gemessene und simulierte Abflussganglinie bei PBD1 vom 01.08. - 15.09.2006.

Dieser Monat war extrem verregnet (155 mm⁶) und die durchschnittliche Temperatur lag 1,4°C⁷ unter dem langjährigen Mittel. Die Verdunstung war also niedriger als durch die Standardkurve dargestellt bei gleichzeitig hohen Niederschlagsmengen. Demnach konnte tatsächlich weniger Wasser verdunsten und mehr abfließen als vom Modell vorgegeben. Daraus folgt, dass der simulierte Abfluss hier geringer sein muss als der gemessene.

^{4,6} laut Messdaten der Umweltmeteorologie der Universität Trier

^{5,7} laut Messdaten der DWD-Station Trier-Petrisberg

Dem für komplexere Modelle höheren Aufwand stehen jedoch Praktikabilität und Zeitdruck entgegen. Ein Planer muss ohne lange Einarbeitung in ein Programm innerhalb einer bestimmten Zeit brauchbare Ergebnisse erzielen können. Daneben können Parameter, die sich auf das gesamte Einzugsgebiet beziehen keine gegenläufigen Entwicklungen erzielen, d. h. das Abflussgeschehen bei PBD1 eher nicht beeinflussen, da sich die simulierten Werte den gemessenen mit der Zeit annähern, bei PBD2 jedoch eine starke Reduzierung der Abflüsse bewirken. Die Ursache für die unterschiedlich gute Wiedergabe der gemessenen Abflüsse ist vielmehr in der Abbildung des Einzugsgebietes im Modell begründet. Die Rigolen, die an PBD2 angeschlossenen Retentionsanlagen weisen im Mittel um eine 10er-Potenz niedrigere k_f -Werte auf als die an PBD1 angeschlossenen.

Ausgehend von dem an PBD2 angeschlossenen Gebiet ist das an PBD1 angeschlossene um mehr als 41 % stärker versiegelt. Ersteres weist mit einem Abflussbeiwert von 0,3 wesentlich mehr Flächen auf, die das Oberflächenwasser aufnehmen können. Hierin ist wohl die Hauptursache für die Abweichungen der simulierten Ganglinie zu sehen. Das Beispiel in Abb. 6-6 aufgreifend, sind die Überschätzungen kleiner Ereignisse so zu erklären, dass die Grünflächen bei kleineren Niederschlagsereignissen viel Wasser aufnehmen können und nur wenig Oberflächenabfluss entsteht. Im Modell werden die Grünflächen jedoch nicht berücksichtigt und auf versiegelten Flächen entsteht folgerichtig mehr Oberflächenabfluss (1). Bei größeren Niederschlagsereignissen tritt die Retentionsfähigkeit der natürlichen Flächen in den Hintergrund. Wie in Abb. 2-8 zu sehen, reagieren diese dann ähnlich wie versiegelte Flächen. Neben dem HOF tritt dann der SOF auf.

Den Anteil der natürlichen Retention kann das Modell in der erstellten Form nicht wiedergeben. Zwar enthält erwin 4.0 die Möglichkeit, Einzugsgebiete mitsamt natürlichen Flächen darzustellen, die dafür erforderlichen Eingabeparameter lagen jedoch größtenteils nicht vor und konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht erhoben werden. Trotzdem scheint die Darstellung der versiegelten Einzelflächen als Alternative zur Modellierung des gesamten Einzugsgebietes brauchbar zu sein. Immense Überschätzungen des Oberflächenabflusses ergeben sich lediglich bei geringer Versiegelung, da die, selbst bei ungünstigen niedrigen k_f -Werten, nicht unerhebliche natürliche Retention der vorhandenen Grünflächen nicht berücksichtigt werden kann. Im Modell werden die Abflüsse dann überschätzt. Demnach ist eine Verbesserung der Modellgüte für PBD2 mit fortschreitender Bebauung zu erwarten. Interessant wäre eine Überprüfung der Modellgüte nach Erreichen des Planungsziels.

Da insbesondere die Spitzenabflüsse bei PBD2 überschätzt werden, bedeutet dies für die anhand von N-A-Simulationen ermittelte Scheitelabminderung, dass diese eher höher ausfällt als berechnet.

Die wenigen Überschätzungen des Abflussvolumens Ende Juni bis Anfang August 2006 können durch den extrem warmen und trockenen Juli und den vorausgegangenen trockenen Juni bedingt sein, infolge derer vermutlich mehr Wasser verdunstet ist, als dies in durchschnittli-

chen Monaten der Fall gewesen wäre. Diese Extrema können im Modell nicht berücksichtigt werden. Erwin 4.0 gibt die Verdunstung mit Hilfe eines stark vereinfachten Ersatzmodells wieder. „Basierend auf einer örtlichen Jahresverdunstungshöhe und Standardverläufen für Jahres- und Tagesgang wird für jedes Berechnungsintervall eine potentielle Verdunstung berechnet (IFS MBH 2000: 23).“

Wie bei den Abflussspitzen werden auch die hohen gemessenen Abflussvolumina am besten wiedergegeben. Allerdings werden hohe Abflussmengen überwiegend unterschätzt. Da große Abflussvolumina eher unterschätzt werden, ist mit einem geringeren Rückhalt des Oberflächenwassers durch das Retentionssystem zu rechnen, als per N-A-Simulation ermittelt wird.

Insgesamt ist es schwierig, eine Aussage über die Modellgüte zu treffen. Die Messreihe ist mit zwei Jahren relativ kurz und der simulierte Zeitraum liegt vor dem Zeitpunkt der modellierten Kartierung des Untersuchungsgebietes. Da das Gebiet bereits vor Beginn der Messreihe und bis zum Zeitpunkt der Kartierung ständigen Veränderungen infolge von Abrissarbeiten, gartenbaulichen Veränderungen, Erdbewegungen, weiteren Abrissarbeiten und gleichzeitiger Bebauung unterlag, kann das Modell die Gebietseigenschaften, wie beispielsweise den Versiegelungsanteil nur mäßig gut wiedergeben. Geeigneter wäre eine mehrjährige Messreihe ab dem Jahr 2007 bzw. nach Erreichen des Endbebauungszustandes. Eine weitere Beobachtung der Entwicklung wäre wünschenswert.

6.6.2 Simulationsergebnisse

An der Darstellung aller Niederschlagsereignisse des Zeitraums 1967 – 1997 mit mehr als 10 mm Gesamtniederschlagshöhe ist eine leichte Tendenz in Richtung höherer Niederschlagsmengen zu erkennen. Dieser Eindruck wird durch die Trendlinie und die zugehörige Gleichung bestätigt und kann als Hinweis auf die Folge einer Klimaänderung gewertet werden. Genauere Untersuchungen, die dies für den Raum Trier bestätigen, sind beispielsweise in HELBIG, LICHT, JUNK, BAREISS & LÜERS (2002), HELBIG (2004, s. a. Abb. 6-7) und LICHT (2005) zu finden (s. Kapitel 1.1). In diesem Zusammenhang interessant wäre eine Untersuchung dahingehend, ob wasserwirtschaftliche Berechnungsformeln um einen regionalspezifischen Klimaänderungsfaktor, wie er in Süddeutschland bereits eingeführt wurde, auch für den Trierer Raum zu erweitern sind (KLIWA 2006: 16). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte dieser Fragestellung nicht weiter nachgegangen werden.

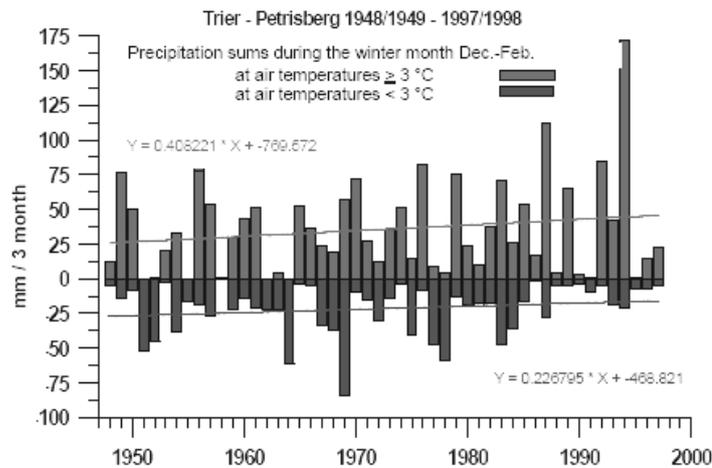


Abb. 6-7: Trend des Winterniederschlags in Trier-Petrisberg (HELBIG 2004: 17).

Wie die Abb. 5-23 zeigt, folgt die Entwicklung der Rückhaltewirkung mit zunehmender Niederschlagshöhe einer logarithmischen Regressionsgleichung. Die stärkste Abminderung der ablaufenden Oberflächenwassermenge im Vergleich zu einer Entwässerung im Regenwasserkanal wird bei 12,8 mm Niederschlag mit 71 % erreicht, die geringste bei 68,3 mm mit 12 %. Bei den nicht untersuchten Ereignissen mit weniger als 10 mm Niederschlag sind höhere Werte zu erwarten. Die Werte weichen um bis zu mehr als 10 % von der Trendlinie ab. Diese Abweichungen lassen sich durch die vorausgehenden Speicherbedingungen sowie Dauer und Höhe des Niederschlagsereignisses erklären, von denen das Ausmaß der Rückhaltewirkung abhängig ist (HERPERTZ & KRAHE 2004: 11).

Bei Betrachtung der Scheitel abmindernden Wirkung des Retentionssystems im Vergleich zu einer konventionellen Ableitung ergibt sich ein anderes Bild. Bei Niederschlagshöhen < 30 mm werden Werte zwischen 63 % und 93 % erreicht. Diese streuen bis zu fast 20 % um den Mittelwert (82 %). Auffällig ist, dass die Werte sich mit steigender Niederschlagshöhe dem Mittelwert annähern. Die Ereignisse mit den höchsten Niederschlagsmengen weichen nur 1 - 2 % von der mittleren Scheitelabminderung ab. Die relativ hohe und stete Scheitelabminderung ist darauf zurückzuführen, dass das System auf ein 100-jährliches Ereignis ausgelegt ist und dass der Überlauf gedrosselt abgeleitet wird. Einzig das Ereignis vom 16.8.1980 nimmt mit 12 % Scheitelabminderung eine Sonderposition ein. Es ist ein weit mehr als 100-jährliches Ereignis der Dauerstufe 10 Stunden und das einzige, das einen Überlauf im alten Becken verursacht und die Scheitelabminderung somit drastisch senkt. Dieses Ereignis muss jedoch als Extremfall gewertet werden, angesichts dessen 13 % Rückhalt und auch 12 % Scheitelabminderung des Zulaufs bemerkenswert sind. Zur Veranschaulichung: Ein 50-jährliches Ereignis, dessen Scheitel um 10 % abgemindert wird, tritt nur noch etwa alle 100 Jahre ein (DWA 2006b: 107). Ein jahreszeitlich bedingter Einfluss auf die Scheitelabminderung konnte nicht festgestellt werden.

An dieser Stelle sei nochmals auf den systematischen Fehler der Niederschlagsdaten hingewiesen. Benetzungs- und Verdunstungsverluste sowie der Einfluss des Windes führen zu einer Unterschätzung der Niederschlagsmengen. Eine Korrektur der Daten nach RICHTER (1995) durch einen Aufschlag der erwähnten 11 % hat nur dann einen Einfluss auf die berechnete Scheitelabminderung, wenn ein Ereignis dadurch in der Jährlichkeit so stark angehoben wird, dass es als Extremereignis ähnlich dem des 16.8.1980 eingestuft werden kann. Hierzu müsste ein Jahrhundertereignis jedoch um einen größeren Faktor erhöht werden. Während ein Einfluss einer Datenkorrektur auf die Scheitelabminderung irrelevant erscheint, ist hinsichtlich des Rückhalts mit einer Verschiebung der Punktwolke (Abb. 5-23) der Ereignisse in Richtung höherer Niederschlagsmengen und geringeren Rückhalts zu rechnen, da sich bei gleich bleibendem Zeitraum die Niederschlagsintensität erhöht. Um welchen Faktor der Rückhalt dann abnimmt, bedarf weitergehender Untersuchungen.

Bei starken Niederschlagsereignissen kann ein 100 %iger Rückhalt des Oberflächenwassers in der Fläche zwar nicht erreicht werden, wie hoch die Effektivität des Systems jedoch im Vergleich zu anderen untersuchten Systemen ist, soll nachfolgend gezeigt werden:

Ein Vergleich der Gesamtbilanzen über den Zeitraum 1967 - 1997, die in Tab. 5-2 gegenübergestellt sind, zeigt, dass die Retentionsanlagen im Mittel 50 % des effektiven Niederschlags zurückhalten. Dadurch wird die Abflussmenge (Q_{zu} [m^3]), die auf den Brettenbach trifft, um etwa die Hälfte reduziert. Betrachtet man die Einzelbilanzen des Simulationszeitraums, so schwankt der Rückhalt zwischen 46 % und 55 % des effektiven Niederschlags. Den gesamten Jahresniederschlag betrachtend, sind es 58 - 68 %. Damit erreichen die Anlagen annähernd die von GÖBEL, STUBBE, WEINERT, ZIMMERMANN, FACH, DIERKES, KORIES, MESSER, MERTSCH, GEIGER & COLDEWEY (2004: 270f) nachgewiesene Leistung von 60 - 80 % des Jahresniederschlags. Die Böden weisen dem Petrisberg ähnliche k_f -Werte zwischen $1 \cdot 10^{-6}$ m/s und $5 \cdot 10^{-5}$ m/s auf. Zu beachten ist, dass die Autoren nur die Versickerung in den Anlagen simulierten, nicht die Abminderung der in den Vorfluter abgegebenen Überlaufmenge, die je nach Vernetzung der Anlagen und Entfernung zum Vorfluter variieren kann.

Einen Rückhalt von 60 - 80 % des Jahresniederschlags erwähnt auch WEGNER (1992: 7f) und hebt hervor, dass urbane Maßnahmen bei Ereignissen hoher Jährlichkeit nur noch eine sehr geringe Wirkung zeigen. Nach seinen Erkenntnissen werden Spitzenabflüsse am Oberlauf eines kleinen Gewässers (4 km^2) bei einem HQ_{100} um bis zu 10 % gemindert, die eines weiteren kleinen Gewässers (ca. 55 km^2) um 6 % bis maximal 9 %. Das Retentionssystem am Petrisberg erreicht zwar nur annähernd die gleiche Rückhaltewirkung, jedoch wird eine höhere Scheitelabminderung erzielt. Der Spitzenabfluss wird bei dem weit mehr als 100-jährlichen Ereignis vom 18.6.1980 um 12 % verringert. Dies ist sicherlich durch den im Verhältnis zur Einzugsgebietsgröße höheren Siedlungsanteil bedingt, wodurch ein größerer Teil des Oberflächenwassers bewirtschaftet wird als dies in Gebieten mit geringerem Siedlungs-

flächenanteil der Fall ist. Weitere Gründe hierfür sind die Laufzeitverlängerung des Oberflächenwassers durch die hintereinander geschalteten Retentionsanlagen und insbesondere die Drosselung des Abflusses.

Auch das von SIEKER (1996b: 535) untersuchte Einzugsgebiet Kirchhörder Bach (7,14 km²) in Dortmund, weist mit 16,1 % bebauter Fläche und einem Versiegelungsgrad von 43 % einen geringeren Siedlungsanteil auf als der Petrisberg. Auch hier fallen die Scheitelabminderungen niedriger aus. So ergeben SIEKERS Simulationen bei einem Ereignis von 1993, hervorgerufen durch 227 mm Niederschlag in 18 Tagen eine Minderung des Abflussscheitels um 7,5 % und bei einem Hochwasser von 1995 nach 85 mm Niederschlag in 5 Tagen um 25 %. Zum Vergleich werden drei Ereignisse am Petrisberg kurz aufgelistet: 10.5.1970 (99 mm in 4 Tagen mit einer Scheitelabminderung von 78 %), 19.12.1993 (93 mm in 6 Tagen mit einer Scheitelabminderung von 80 %) und 18.6.1980 (93 mm in 13 Stunden mit einer Scheitelabminderung von 12 %). Die weitaus höheren Werte liegen mit Sicherheit zum einen auch hier in dem weitaus höheren Siedlungsanteil (rund 84 %) des Untersuchungsgebietes Petrisberg und dem dadurch bedingt hohen Anteil des bewirtschafteten Oberflächenwassers und zum anderen in der Bemessung der Anlagen nach einem Jahrhundertereignis begründet. Auch SIEKER & WILCKE (2006: 22) erwähnen die besonders hohe Retentionsleistung in hoch urbanen Gebieten.

Während SIEKER (1996b: 538) durch seine Ergebnisse schon einen wesentlichen Beitrag zur Dämpfung extremer Hochwasser durch Retentionsmaßnahmen in der Siedlung sieht, kann dies für den Petrisberg nur bestätigt werden. Auch wenn das System bewusst entgegen der gängigen Praxis auf ein Jahrhundertereignis ausgelegt ist, so zeigt erst die Simulation, welche Scheitelabminderungen erreicht werden.

Interessant ist die Untersuchung SIEKERS (2001b: 87) am Holzbach (29 km²) nahe Weiskirchen im nordwestlichen Saarland. Dort konnten bei Abkopplung von 35 % der Siedlungsfläche, die 9 % des Einzugsgebietes ausmacht, die Kanalnetzabflüsse um maximal etwas mehr als 50 % gemindert werden. Der maximale Scheitelabfluss des Holzbaches konnte dadurch jedoch nur um 1,5 - 2,4 % reduziert werden. Ein direkter Vergleich mit dem Untersuchungsgebiet Petrisberg wäre möglich, wenn man die Höhe der Scheitelabminderung des Brettenbaches nicht direkt unterhalb des Siedlungsgebietes, sondern an dessen Mündung in den Olewiger Bach ermitteln würde. Zu berücksichtigen wäre dabei die Tatsache, dass am Petrisberg sämtliche Grundstücke an das Retentionssystem angeschlossen sind, während beim Holzbach der größte Teil des Oberflächenwassers abgeleitet wird.

Auf die Gesamtbilanzen beider für den Petrisberg simulierter Modelle zurückkommend, ergibt der Vergleich über den Zeitraum 1967 - 1997 folgende weitere Ergebnisse:

Das alte Becken läuft bei Bewirtschaftung des Regenwassers nur ein Mal über, wobei die mittlere Überlaufdauer gegenüber der konventionellen Variante mehr als dreimal so lang ist. Bei einer Ableitung des Oberflächenwassers in einem Regenwasserkanal würde das alte

Becken dagegen 1261 Mal überlaufen. Auch die Einstaudauer erfährt bei Bewirtschaftung des Regenwassers eine Verlängerung. Während die mittlere Einstaudauer um mehr als das 2,5fache verlängert wird, nimmt die gesamte Einstaudauer nur um 13 % zu. Dies lässt sich nur durch einen Rückgang der Anzahl der Einstauereignisse erklären. Auch bleibt die maximale Einstauhöhe unter jener bei konventioneller Ableitung. Sehr viel gravierender ist die Anzahl der Überflutungen, womit die Überschwemmung des alten Beckens über den darunter gelegenen Wegedamm gemeint ist. Während eine Überflutung durch das Retentionssystem verhindert wird, würde eine Entwässerung im Regenwasserkanal 4712 Mal zu einem solchen Ereignis führen. Dies ginge mit beträchtlichen Schäden einher (Zerstörung des Wegedamms, Erosionsschäden im Quellbereich und im Brettenbach) bzw. würde eine bauliche Vergrößerung des alten Beckens erforderlich machen. Eine ausführliche Darstellung der Einzelbilanzen ist im Anhang in Tab. XVII zu finden.

Insgesamt bewirkt eine Bewirtschaftung des Oberflächenwassers gegenüber der Ableitung im Regenwasserkanal also eine beachtliche hydraulische Entlastung des Quellbereichs und des Brettenbachs. Hinsichtlich des Quellbereichs wird damit auch § 24 LPflG Folge geleistet.

Wie die farbliche Differenzierung der Rückhaltewirkung aller simulierten Ereignisse differenziert nach Sommer- und Winterhalbjahren zeigt, ist der Rückhalt bei sommerlichen Ereignissen tendenziell geringer als im Winterhalbjahr. So können durch das Retentionssystem beispielsweise bei Ereignissen mit 80 mm Niederschlag tendenziell 10 % weniger Oberflächenwasser zurückgehalten werden, wenn das Ereignis im Sommerhalbjahr stattfindet. Dem Verlauf der extrapolierten Trendlinien zufolge ist bei schwachen Niederschlagsereignissen (< 7 mm) während der Sommerhalbjahre gegenüber solchen in den Winterhalbjahren eine tendenziell leicht höhere Abminderung der Zulaufmengen erreichbar. Zur Absicherung wäre eine Simulation der Ereignisse < 10 mm notwendig.

Bei näherer Betrachtung von zehn ausgewählten Ereignissen sind zwei Unterschiede gut zu erkennen: Die ausgewählten Sommerereignisse zeichnen sich zum einen durch eine wesentlich kürzere Ereignisdauer und zum anderen durch höhere maximale Niederschlagsmengen (N_{\max} in Tab. 5-3) bei vergleichbarer Gesamt-Niederschlagshöhe (N_{Sum} in Abb. IX im Anhang) aus. Lang andauernde schwache Niederschläge in den Winterhalbjahren stehen somit kurzen, heftigen Ereignissen in den Sommerhalbjahren gegenüber.

Während bei den ausgewählten Ereignissen im Winterhalbjahr mittlere Drosselabflüsse zu verzeichnen sind, erreichen die ersten drei Ereignisse den maximalen Drosselabfluss, beim vierten wird dieser fast erreicht. Beim letzten ist dies nicht der Fall, der Niederschlag verteilt sich über eine längere Zeit als bei den übrigen Sommerereignissen, so dass bei den letzten beiden Ereignissen höhere Retentionsleistungen erreicht werden können.

Die N-A-Simulationen für den Zeitraum 2005 - 2006 betrachtend zeigt sich Folgendes:

Der Vergleich der Gesamtbilanzen für den Zeitraum 2005 - 2006 ergibt, dass 53 % des effektiven Niederschlages zurückgehalten werden. Bezogen auf den Gesamtniederschlag sind es 67 %. Diese Werte sind vergleichbar mit denen des Simulationszeitraums 1967 - 1997.

Auch für den Zeitraum 2005 - 2006 ergeben die Simulationen, dass der Rückhalt in den Winterhalbjahren im Schnitt größer ist als in den Sommerhalbjahren, wobei den Trendlinien zufolge ab einer Niederschlagshöhe von etwa < 5 mm das Gegenteil der Fall ist.

Die für 2005 - 2006 berechneten Scheitelabminderungen liegen im gleichen Bereich wie die des Simulationszeitraums 1967 - 1997. Die Abfluss mindernde Wirkung nimmt exponentiell mit zunehmender Niederschlagshöhe ab. Insgesamt stimmen die Simulationsergebnisse des Zeitraums 2005 - 2006 mit denen von 1967 - 1997 überein, wobei die Spannweite der Niederschlagshöhen bei einem Zeitraum von zwei Jahren deutlich kleiner ist als bei einer 30-jährigen Zeitreihe. Die Simulationsergebnisse lassen somit den Schluss zu, dass das System bei sommerlichen konvektiven Ereignissen weniger Oberflächenwasser zurückhält als bei winterlichen advektiven Ereignissen.

Einzig ZIMMERMANN (2001) liefert mit Simulationen für das Einzugsgebiet der Oberen Blies (316 km²) an der nordöstlichen Grenze des Saarlandes zu Rheinland-Pfalz gelegen mit 24 % Siedlungsfläche Ergebnisse, die ebenfalls für eine hohe Effektivität von Retentionsanlagen bei advektiven Ereignissen sprechen. Beim Hochwasser von 1995 mit 294 mm Niederschlag in 10 Tagen konnten in den Versickerungsmulden 56 - 100 % zurückgehalten werden und in den Mulden-Rigolen 21 - 93 %. Die k_f -Werte des Bodens lagen zwischen $1 \cdot 10^{-5}$ m/s und $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Selbst bei niedrigen Infiltrationsraten konnten 20 - 90 % des Niederschlagswassers zurückgehalten werden. Allerdings wurde hier nur der Rückhalt in den Anlagen selbst untersucht. Aussagen zur Auswirkung auf den Abflussscheitel werden keine gemacht und es bleibt ungewiss, welches Programm verwendet wurde.

Die vorliegenden Simulationsergebnisse untermauern somit die Aussage SIEKERS (1996b: 535), dass Retentionsanlagen bei advektiven Ereignissen besonders effizient sind. SIEKER sieht die Stärke der Anlagen darin begründet, bei lang anhaltenden Niederschlägen schwacher Intensität die Abflussspenden un bebauter Flächen unterbieten zu können.

Auch das Argument, dass in kleinen Einzugsgebieten lokal begrenzte konvektive Niederschläge Hochwasser verursachen können (KLEEBERG & ROTHER 1996, VERWORN & HARMS 1984 zitiert in NIEHOFF 2002: 12), spricht für einen geringeren Rückhalt im Sommer.

Gegenteilige Angaben macht GANTNER (2003a: 242), wonach verschiedene Regenwasserbewirtschaftungsanlagen bei konvektiven Ereignissen mit 11 - 100 % des Oberflächenwassers tendenziell mehr zurückhalten als bei advektiven Ereignissen mit 1 - 100 %.

Auch die Ergebnisse von NIEHOFF (2002: 108) zeigen, dass advektive Ereignisse eine Scheitelabminderung von 0 - 8 % und konvektive Ereignisse eine höhere Abminderung von 15 - 25 % ermöglichen. NIEHOFF begründet die höhere Scheitelabminderung bei konvektiven

Ereignissen in den von ihm untersuchten Einzugsgebieten mit der im Sommer geringeren Vorfeuchte der Böden und den meist geringeren Niederschlagsmengen.

Die von NIEHOFF (2002: 109) simulierten Ereignisse weisen im Gegensatz zum Petrisberg lediglich eine Jährlichkeit zwischen zwei und acht Jahren auf. Die im Vergleich zum Petrisberg geringen Werte lassen sich zum einen darauf zurückführen, dass die Retentionsanlagen am Petrisberg auf ein 100-jährliches Ereignis ausgelegt sind. Zum anderen steht einem Siedlungsanteil von 7,4 % mit einem Versiegelungsgrad von 35 % ein Siedlungsanteil von rund 84 % mit einem Versiegelungsgrad von fast 48 % gegenüber, wodurch es im Untersuchungsgebiet Petrisberg kaum Flächen gibt, die nicht an das Retentionssystem angeschlossen sind.

Einen Nachteil in NIEHOFFS Modell sieht die Autorin darin, dass aufgrund eines in WASIM-ETH fehlenden Modellbausteins für Retentionsanlagen, statt dieser eine Entsiegelung des Gebietes simuliert wurde, so dass lediglich der Siedlungsanteil zugunsten natürlicher Flächen weiter abnimmt und die für Retentionsanlagen spezifische oberirdische und/oder unterirdische Speicherung des Wassers unberücksichtigt bleibt.

Untersuchungen durch WILCKE, SIEKER, JIN & SIEKER (2007: 252f) ergaben, dass das Rückhaltepotential mit der Dauer der regenfreien Vorperiode zunimmt.

In die gleiche Richtung wie die von GANTNER (2003a: 242) und NIEHOFF (2002: 108) gemachten Angaben zielt die Aussage von ASSMANN & KEMPF (2005: 82), dass in kleinen Einzugsgebieten Ereignisse hoher Jährlichkeit bewirtschaftbar sind, jedoch nur bei gleichzeitig kurzen Dauerstufen (konvektive Ereignisse). Die N-A-Simulationen für das Untersuchungsgebiet Petrisberg zeigen ein entgegen gerichtetes Verhalten: So können beispielsweise die Ereignisse vom 20.1.1995 und 23.8.1995 beide in etwa einer Jährlichkeit von $T_n = 10$ zugeordnet werden (Dauerstufen: 40 h und 22 h). Der Rückhalt beim winterlichen Ereignis ist mit 28 % jedoch mehr als doppelt so groß wie jener beim kürzeren, konvektiven Ereignis im Sommer.

Die Untersuchungen und Beobachtungen an der Kaskade, den Profilschnitten, den Grundwasserganglinien und der Feuchteverteilung hinzuziehend, ergibt sich folgendes Bild: Die Tatsache, dass die Kaskaden während der Sommermonate öfter leer sind und sich nach Füllung schneller entleeren als im Winter spricht für eine bessere Retention im Sommer. Diese Beobachtung steht jedoch nicht unbedingt im Widerspruch zu der laut Simulation geringeren Rückhaltekapazität im Sommerhalbjahr. Die im Vergleich zum Winterhalbjahr höheren Niederschlagsintensitäten könnten die Infiltrationsrate übertreffen und somit zu HORTONSchem Oberflächenabfluss führen.

Die Grundwasser-Ganglinien in den Quellmulden lassen aufgrund der niedrigeren Tiefstände während der Sommermonate ebenfalls darauf schließen, dass mehr Wasser gespeichert werden kann. Doch auch hier könnte HORTONScher Oberflächenabfluss auftreten. Gerade im Sommer können die Böden so stark austrocknen, dass der Benetzungswiderstand der Bodenpartikel und/oder der „Schwammeeffekt“ von Moos und Wurzelfilz zu Infiltrationshemmnissen

führt, infolge derer temporärer HORTONScher Oberflächenabfluss einsetzt (MENDEL 2000: 24, SCHOBEL, ALTMEIER, SCHNEIDER & SCHRÖDER 2002: 119). Da der Überlauf in Quell- und Sportplatzmulde ebenerdig eingebaut ist, käme es sofort zu einer gedrosselten Ableitung des Wassers in Richtung Brettenbach. Die Bedeutung des im Sommer relativ leeren Bodenspeichers könnte somit in den Hintergrund treten.

Gesetzt den Fall, dass es im Sommerhalbjahr infolge konvektiver Niederschläge und ausgetrockneter Böden schneller zu Oberflächenabfluss als im Winterhalbjahr kommt, dann müssten in den Sommerhalbjahren generell mehr Abflussereignisse registriert worden sein als in den Winterhalbjahren. Dies ist jedoch nicht der Fall. In den Winterhalbjahren wurden deutlich mehr Ereignisse bei gleichzeitig geringeren Niederschlagssummen für diesen Zeitraum registriert als in den Sommerhalbjahren. Zudem sind die gemessenen Spitzenabflüsse und auch die Abflussvolumina im Winter bei gleicher Niederschlagsmenge größer als im Sommer.

Die Ergebnisse der Simulationen stehen damit im Widerspruch zu den Beobachtungen an den Retentionsanlagen und der im Vergleich zum Winterhalbjahr geringeren Anzahl an Drosselabflüssen im Sommerhalbjahr.

Annähernd Aufschluss über den tatsächlichen Rückhalt des Systems könnte eine Berechnung des Rückhaltes ausgehend von der Differenz des simulierten Abflusses bei konventioneller Ableitung und den gemessenen Abflussdaten geben. Dies ist jedoch aus folgenden Gründen nicht möglich: Das Modell der konventionellen Entwässerung bietet das alte Becken und den Brettenbach als Vergleichspunkte an. Analog dazu stehen Messdaten des Brettenbaches (PBA) zur Verfügung und die Abflussdaten der Drosselschächte PBD1 und PBD2, welche im Modell in der Summe mit dem Zufluss zum alten Becken gleich zu setzen sind. Erstere konnten jedoch nicht verwendet werden und die Drosselabläufe setzen meist zeitversetzt ein, so dass sie oft nicht demselben Niederschlagsereignis zugeordnet werden können.

Wie hoch die Scheitelabminderung im Brettenbach selbst ist, konnte nicht ermittelt werden. Die Tatsache, dass der Anteil natürlicher, nicht an das Retentionssystem angeschlossener Flächen mit rund 6 % sehr gering ist, lässt vermuten, dass die Scheitelabminderung im Brettenbach direkt unterhalb der Einleitstelle nur wenig geringer sein wird als die oben genannten Werte. Entscheidend ist jedoch, welchen Einfluss das versickernde Wasser auf den Basisabfluss ausübt bzw. wie viel Wasser durch Druckimpuls des versickernden Wassers in den Brettenbach abgegeben wird.

Zusammenfassung – Simulationen

Insgesamt ist es schwierig, eine Aussage über die Güte des verwendeten Modells zu treffen. Die Messreihe ist mit zwei Jahren relativ kurz und das Gebiet unterlag bereits vor Beginn der Messreihe und bis zum Zeitpunkt der Kartierung ständigen Veränderungen durch Abrissarbeiten, gartenbaulichen Veränderungen, Erdbewegungen, weiteren Abrissarbeiten und gleichzeitiger Bebauung.

Geeigneter wäre eine mehrjährige Messreihe ab dem Jahr 2007 bzw. nach Erreichen des Endbebauungszustandes. Eine weitere Beobachtung der Entwicklung und die Überprüfung der Modellgüte nach Erreichen des Planungsziels wären wünschenswert.

Da insbesondere die Spitzenabflüsse bei PBD2 überschätzt werden, bedeutet dies für die anhand von N-A-Simulationen ermittelte Scheitelabminderung, dass diese eher höher ausfällt als berechnet. Dagegen werden große Abflussvolumina, die nur bei PBD1 gemessen wurden, eher unterschätzt, so dass mit einem geringeren Rückhalt des Oberflächenwassers durch das Retentionssystem zu rechnen ist, als per N-A-Simulation ermittelt wird.

Die Annäherung der simulierten Werte an die gemessenen bei zunehmender Niederschlagshöhe deutet darauf hin, dass der bei Starkniederschlägen vorherrschende Oberflächenabfluss (HOF und SOF) durch das Modell besser wieder gegeben wird als andere Prozesse, auch weil die Retention der natürlichen Flächen dann in den Hintergrund tritt (vgl. NIEHOFF 2002: 5).

Die Jahresbilanz der Simulationen betrachtend hält das Retentionssystem zwischen 46 % und 55 % des effektiven Niederschlags zurück. Bezogen auf den gesamten Jahresniederschlag werden mit 58 - 68 % ähnliche Werte erreicht wie sie GÖBEL, STUBBE, WEINERT, ZIMMERMANN, FACH, DIERKES, KORIES, MESSER, MERTSCH, GEIGER & COLDEWEY (2004: 270f) und WEGNER (1992: 7f) mit 60 - 80 % des Jahresniederschlags nennen.

In Abhängigkeit von der Niederschlagshöhe werden 12 - 71 % zurückgehalten, wobei die Rückhaltewirkung mit zunehmender Niederschlagshöhe einer logarithmischen Regressionskurve folgend abnimmt.

Bei Betrachtung der Scheitel abmindernden Wirkung des Retentionssystems im Vergleich zu einer konventionellen Ableitung ergibt sich ein anderes Bild. Bei Niederschlagshöhen < 30 mm wird der Abflussscheitel um 63 % bis 93 % gemindert. Die Werte streuen bis zu fast 20 % um den Mittelwert (82 %). Mit steigender Niederschlagshöhe nähern sich die Werte dem Mittelwert an.

Einzig das Ereignis vom 16.8.1980 nimmt mit 12 % Scheitelabminderung eine Sonderstellung ein. Es ist ein weit mehr als 100-jährliches Ereignis der Dauerstufe 10 Stunden und das einzige, das einen Überlauf im alten Becken verursacht und somit die Scheitelabminderung drastisch senkt. Dieses Ereignis muss jedoch als Extremfall gewertet werden, angesichts dessen 13 % Rückhalt und auch 12 % Scheitelabminderung des Zulaufs bemerkenswert sind.

Wie hoch die Scheitelabminderung im Brettenbach selbst ist, konnte nicht ermittelt werden. Der Anteil natürlicher, nicht an das Retentionssystem angeschlossener Flächen ist mit rund 6 % sehr gering. Entscheidend ist jedoch, welchen Einfluss das versickernde Wasser auf den Basisabfluss ausübt bzw. wie viel Wasser durch Druckimpuls des versickernden Wassers in den Brettenbach abgegeben wird.

Im Vergleich zu den in der Literatur genannten Angaben wird eine deutlich höhere Scheitelabminderung erzielt. Als mögliche Gründe hierfür sind folgende Punkte zu nennen: Das Untersuchungsgebiet Petrisberg ist sehr viel kleiner als die in der Literatur genannten und

weist daher einen deutlich höheren Versiegelungsanteil (84 %) auf als diese. Dadurch ist der Anteil des bewirtschafteten Oberflächenwassers wesentlich größer als in Gebieten mit geringerem Siedlungsanteil. Außerdem sind die Anlagen nach einem Jahrhundertereignis bemessen, so dass die Anlagen per se mehr Wasser zurückhalten können. Des Weiteren kommen die Laufzeitverlängerung des Oberflächenwassers durch die hintereinander geschalteten Retentionsanlagen und insbesondere die Drosselung des Abflusses in Frage.

Die Simulationsergebnisse lassen den Schluss zu, dass das System bei sommerlichen konvektiven Ereignissen weniger Oberflächenwasser zurückhält als bei winterlichen advektiven Ereignissen. Sie untermauern somit die Aussage SIEKERS (1996b: 535), dass Retentionsanlagen bei advektiven Ereignissen besonders effizient sind.

Die Ergebnisse der Simulationen stehen jedoch im Widerspruch zu den Beobachtungen an den Retentionsanlagen und der im Vergleich zum Winterhalbjahr geringeren Anzahl an Drosselabflüssen im Sommerhalbjahr.

7 Diskussion

7.1 Unsicherheiten – Problem jeder Modellierung

Modelle können nie ein vollkommenes Abbild der Realität darstellen. Diese ist in ihrer Gesamtheit zu komplex und der Modellierer kennt nicht sämtliche Prozesse und Interaktionen. Laut BUCHHOLZ (2001: 151) gibt es bis heute keine Kausalstruktur aller Einflussfaktoren auf die hydrologischen Prozesse. Hinzu kommt, dass Messdaten stets mehr oder weniger fehlerbehaftet sind (s. a. Abb. 7-1). Die Unkenntnis des Modellierers, die Datenunsicherheit und die Modellunsicherheit führen dazu, dass Simulationen nie exakte Ergebnisse liefern, sondern ihrerseits ebenfalls fehlerbehaftet sind und gewisse Unsicherheiten bergen. Simulationsergebnisse sind daher immer als unsicher zu betrachten und „als ein dargestellter Wert eines Ergebnisbandes zu interpretieren (SCHWANDT 2004: 11).“

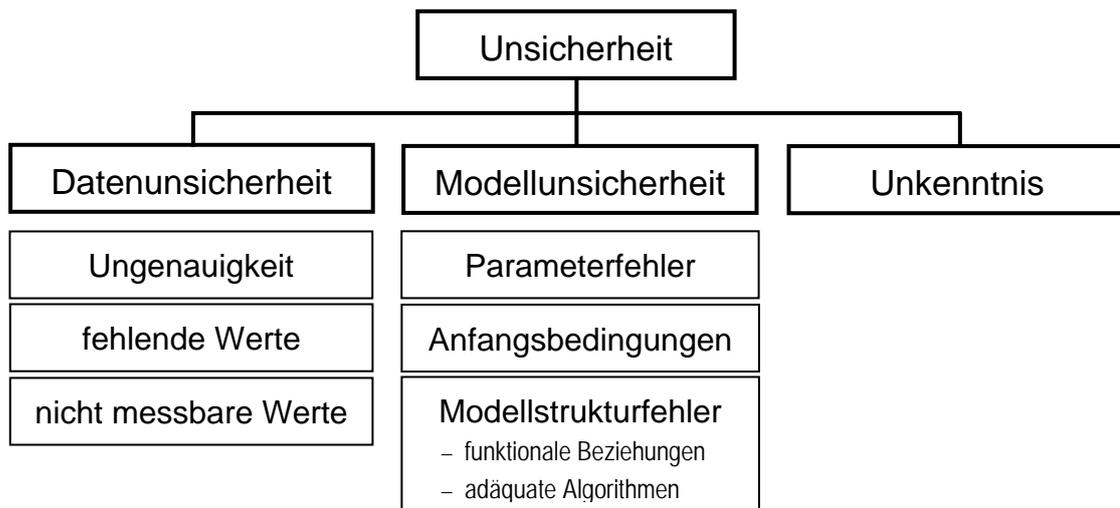


Abb. 7-1: Quellen der Unsicherheit (nach SCHWANDT 2004: 10).

7.2 Fehlerquellen

Im Folgenden sei auf die vielfältigen Fehlerquellen hingewiesen, die REFSGAARD & STORM (1996: 42) nennen, ergänzt um die in der vorliegenden Arbeit in Frage kommenden Fehler:

Inputdaten: Sie können mit zufällig verteilten oder systematischen Fehlern behaftet sein. Am Beispiel der Niederschlagsdaten wird deutlich wie vielfältig Fehler auftreten können. Schon zwischen den Daten der nahe gelegenen Messfelder des DWD und der Umweltmeteorologie, die nur 1200 m voneinander entfernt sind, bestehen mehr oder weniger große Differenzen. Für die Langzeitsimulation standen lediglich Daten der etwa 3000 m entfernten Station Trier-Irsch zur Verfügung. Hinzu kommen augenscheinlich falsche Werte, die beispielsweise durch Tau- und Nebelwasser oder technisch bedingte Fehler hervorgerufen werden (s. Kapitel 4.2.1) oder

auch fehlende Daten aufgrund von Messausfällen. Daneben besteht der bereits erwähnte systematische Fehler, der durch Benetzungs- und Verdunstungsverluste im Auffangbehälter sowie insbesondere durch Verwehungen hervorgerufen wird (RICHTER 1995, SEVRUK 1981).

Messdaten: Wie oben bereits gezeigt können auch hier zufällige oder systematische Fehler auftreten. Zur Messung des Abflusses wurden Drucksonden gewählt, deren Messfehler 0,25 % bei einer Auflösung von $\leq 0,01$ % beträgt. Die Drucksonden wurden kalibriert, doch empfiehlt sich aufgrund der laut IKT (2001: 65f) geringen Langzeitstabilität eine Nachkalibrierung in regelmäßigen Abständen von drei bis sechs Monaten. Ursache der so genannten „Nullpunktdrift“, der zunehmenden Abweichung vom Nullwert, ist die Alterung des Gerätes. Das Bauteil, das im Innern der Sonde den Druck aufnimmt, geht zusehends von einem elastischen in einen plastischen Zustand über. Hierdurch kann es laut Herstellerangaben zu Messwertabweichungen von 0,1 % pro Jahr kommen (IKT 2001: 44). Auch vom Messwehr geht ein so genannter schwellenabhängiger Messfehler aus, der 5 % betragen kann (IKT 2001: 45). Vandalismus blieb wahrscheinlich aufgrund der versteckten Lage und schweren Zugänglichkeit (Kanaldeckel) der Messwehre aus. Laub und feine Zweige, die sich vor dem Wehr festsetzen können, wurden selten angeschwemmt. Flutungen der Kaskade zur Bekämpfung von Stechmückenlarven sowie Rasenbewässerung im Sommer 2006 können zu Drosselabflüssen geführt haben, die nicht auf Niederschlagsereignisse zurückzuführen sind. Bei der Umrechnung der Messdaten von mWS in l/s standen zwei Formeln zur Verfügung, die aber zu nur minimal von einander abweichenden Werten führen. Zurückgegriffen wurde auf jene, die von der für den Einbau der Wehre verantwortlichen Firma empfohlen wurde. Die meisten Fehler birgt die Messstelle PBA. Aufgrund der schweren Zugänglichkeit des Messwehres und des permanenten Abflusses stellte sich eine Kalibrierung als schwierig dar. Während die Sonden der Drosselschächte durch Auffüllen des Zuleitungsrohres bis zur Wehrkante exakt auf den Nullpunkt eingestellt werden konnten, musste im Absturzschaft auf eine weniger genaue manuelle Messung des Wasserstandes per Zollstock zurückgegriffen werden. Die regelmäßige Zufuhr von feinsten Sedimenten führte zum Eintrag von Schlamm bis zum Wehrblech, wodurch auch die Sonde zusedimentiert wurde. Wider Erwarten stiegen die erfassten Drücke nach Entfernen des Schlammes. Hinzu kommt, dass die Sonde sich im Sommer 2006 aus ihrer Befestigung löste, der Schlamm jedoch einen freien Fall verhinderte. Daher ist anhand der Daten nicht ohne weiteres erkennbar, wann genau dieses Ereignis stattfand. Angesichts der problematischen Abflussmessung im Messschacht PBA wäre ein Austausch der Drucksonde durch ein Ultraschallecholot empfehlenswert. Dieses kann kopfüber am Gitterrost über dem Messwehr installiert werden und misst den Füllstand von oberhalb des Wasserspiegels. Eine Berührung mit Wasser oder Sediment bleibt dadurch aus. Weitere Vorteile sind ein geringerer baulicher Aufwand sowie die einfache und langzeitstabile Kalibrierung (IKT 2001).

Parameterwerte: Freie Parameter besitzen eine Bandbreite möglicher Werte, die sie annehmen können. Im Modell erwin 4.0 zählen hierzu der Verdunstungsfaktor, welcher die Jahresverdunstung steuert, der k_f -Wert der Versickerungsflächen und der Abflussbeiwert. Der Verdunstungsfaktor legt fest, wie hoch die absolute Jahresverdunstung ist. Besser wäre ein prozentualer Wert, der den Anteil der Verdunstung am Niederschlag angibt, da die Jahresniederschlagssummen sehr unterschiedlich sein können. Hinsichtlich des k_f -Wertes gilt, dass schon die Bestimmung desselben für eine Fläche ein schwieriges Unterfangen darstellt, da Böden sehr heterogen beschaffen sind. Ursache ist der starke kleinräumige Wechsel der versickerungswirksamen Porensysteme (BURGHARDT 1999: 18). Generell gilt, dass die Variabilität der ermittelten Durchlässigkeitswerte umso größer ist, je kleiner die Überstaupflähe ist. Die Güte der Messwerte steigt daher in Abhängigkeit der gewählten Messmethode in der Reihenfolge Open-End-Test < Stechringproben < Doppelringinfiltrrometer < Beetinfiltrrometer. Messungen mit dem Beetinfiltrrometer weisen immer noch Variationskoeffizienten von 50 - 75 % auf, geben die Versickerungsleistung eines Bodens jedoch weitaus besser wieder als Messungen mit dem Doppelring (116 %), per Open-End-Test (200 %) oder k_f -Proben (189 %).

Empfohlen wird daher eine Überstaupflähe von mindestens 1 m² (BLETTGEN & BURGHARDT 1999, BURGHARDT 1999, STEINBERG & BURGHARDT 1999, WINZIG, TÜSELMANN & BURGHARDT 1999). Auch die Ermittlung des Abflussbeiwertes birgt einige Unsicherheiten. Das ATV-DVWK-Merkblatt M 153 (ATV-DVWK 2000: 10) listet in einer Tabelle mittlere Abflussbeiwerte verschiedener Flächentypen und Befestigungsarten auf. Während die Beschaffenheit von Dachflächen, insbesondere unter Zuhilfenahme von Luftbildern einfach zu identifizieren ist, lassen Pflasterbeläge nicht immer leicht erkennen, ob sie durchlässig sind. Insbesondere die Frage, ob der Unterbau wasserdurchlässig ist, bleibt dem Betrachter unbekannt. In der vorliegenden Arbeit wurde von teilversickerungsfähigen Flächenbefestigungen mit einem Abflussbeiwert von maximal 0,6 ausgegangen, da der Bebauungsplan diese vorschreibt (STADT TRIER 2003: 25).

Modellstruktur: Abb. 7-2 zeigt eine einfache schematische Darstellung der Teilprozesse des Wasserkreislaufs. Anhand der hervorgehobenen Prozesse wird deutlich, dass erwin 4.0 ein relativ einfaches Modell ist, das den Schwerpunkt auf den Oberflächenabfluss legt. Fehlerhafte Ergebnisse können darauf zurückzuführen sein, dass das Modell bestimmte Prozesse nicht berücksichtigt, wie z. B. Schneeschmelze (im untersuchten Zeitraum vernachlässigbar) oder Teilprozesse im Boden, wobei die naturgetreue Beschreibung der Wasserbewegung im Boden bislang jedoch „nur mit großen Einschränkungen möglich ist“ (KOEHLER 2006: 8). Auch voreingestellte Annahmen, die von der Realität abweichen, können zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Hierunter fällt z. B. die Ermittlung der Verdunstungsverluste mittels standardisierter Tages- und Jahresverläufe. Besonders Monate, die stark vom langjährigen Temperaturmittel abweichen, werden dann nicht optimal wiedergegeben. Hinzu kommt, dass der Petrisberg aufgrund seiner SW-Exposition und Höhenlage im Hauptwindstrom liegt. Dies

fördert eine rasche Verdunstung, wenn der Wasserdampfgehalt der anströmenden Luft niedriger ist als jener des betrachteten Standortes. Des Weiteren ist hier die Darstellung des Untersuchungsgebietes zu nennen. Aufgrund fehlender Kennwerte konnten die Teileinzugsgebiete nicht in ihrer Gesamtheit abgebildet werden, sondern mussten auf die versiegelten Flächen reduziert werden. Im Modell wird davon ausgegangen, dass oberflächlich abfließendes Niederschlagswasser nur in die Retentionsanlagen fließt und sich nicht auf unbebauten Flächen sammeln und versickern kann.

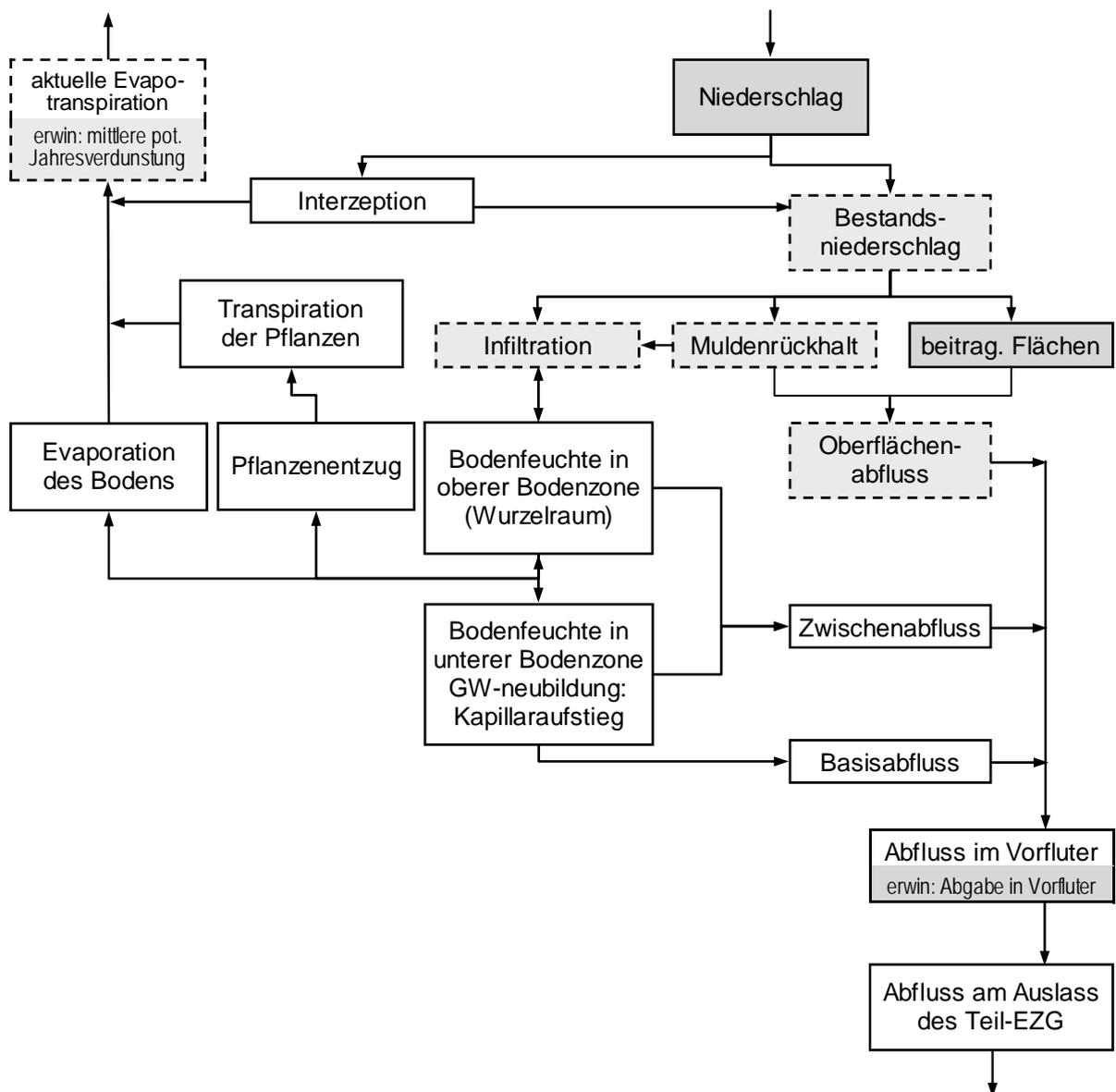


Abb. 7-2: Fließschema der Teilprozesse des Wasserkreislaufs. Hervorgehoben: Prozesse, die im Modell erwin 4.0 berücksichtigt werden: dunkelgrau: Input und Output, gestrichelt umrandet: berechnete Größen (BRONSTERT 2005: 10, leicht verändert).

Angesichts der modelleigenen "Schwachstellen" wäre es wünschenswert, die Simulationen an einem Modell zu wiederholen, das insbesondere auch die Fließprozesse im Boden darstellt, um die räumliche Anordnung der Retentionsanlagen bzw. deren dadurch bedingte unterirdische Verbindung berücksichtigen zu können. Vermutlich werden jahreszeitliche Unterschiede hinsichtlich der Speicherkapazität der Böden dann besser wiedergegeben. Bei gegebener Möglichkeit, die Niederschlagsdaten nach RICHTER (1995) zu korrigieren, würde sich zeigen, um wie viel geringer der Rückhalt gegenüber einem konventionellen Entwässerungssystem ausfällt als in der vorliegenden Arbeit berechnet wurde.

7.3 Messzeitraum und Messintervalle

Problematisch ist die relativ kurze Zeitreihe der erhobenen Daten. Während der Auswertungen wurden die verwendeten Datenreihen verlängert, so dass für die der Arbeit zugrunde liegenden Abflussdaten vom 01.01.2005 bis 30.04.2007 reichen und die Wasserstandsmessungen vom 01.11.2005 bis 30.04.2007. Somit wurden vier bzw. drei hydrologische Halbjahre erfasst und ausgewertet. Die N-A-Simulationen konnten nur für den Zeitraum 01.01.2005 - 31.12.2006 durchgeführt werden, da nur für diesen Zeitraum Niederschlagsdaten im vorgegebenen Format vorlagen. In dieser Zeit fanden insbesondere an PBD2 nur wenige Abflussereignisse statt. Die Anzahl der resultierenden Wertepaare wird zusätzlich dadurch reduziert, dass nicht jedem gemessenen Abflussereignis ein simuliertes Ereignis zugeordnet werden kann und die Niederschlagsdaten einige Lücken aufweisen. Die Auswertungen sind daher kritisch zu sehen. Außerdem weichen die Temperatur- und Niederschlagsdaten, wie bereits erwähnt, teilweise stark vom langjährigen Mittel ab. Dies ist insofern problematisch, als dass die Berechnung der potentiellen Verdunstung in erwin 4.0 auf einer Standardkurve für den Jahresverlauf basiert und somit von durchschnittlichen Verhältnissen ausgeht. Eine Zeitreihe von nur zwei Jahren kann nur einen kleinen Ausschnitt des gesamten Spektrums wiedergeben und eignet sich für statistische Auswertungen nur bedingt.

Um genauere Aussagen über die Retentionswirkung von Wasserband, Rigole und Kaskade und der daraus resultierenden zeitlich verzögerten Abgabe des Wassers in die Quellmulden machen zu können, bedarf es einer höheren Messauflösung. Für kleine Einzugsgebiete (ha bis km²) und somit auch für die Siedlungswasserwirtschaft sind schnelle Prozesse typisch, die im Minutenbereich liegen. Entsprechend sollte die Auflösung der Niederschlagsmessungen daher ein bis zwei Minuten betragen (GUJER 2007: 205ff, SYMADER 2004: 34). Mithilfe eines Datenloggers ließe sich die Laufzeitverlängerung quantifizieren. Analog dazu sollten bei kleinen Einzugsgebieten auch Niederschlagsdaten eine zeitliche Auflösung von ein bis zwei Minuten aufweisen. Dies lässt sich durch die Erfassung mittels Radar verwirklichen. In der Praxis liegen solche Daten jedoch nur selten vor. BERNE, DELRIEU, CREUTIN & OBLÉD (2004: 178) wie auch GUJER (2007: 208) weisen darauf hin, dass die Datenlage für kleine Einzugs-

gebiete generell räumlich wie zeitlich unzureichend ist. Vor dem Hintergrund zunehmend hochauflösender Modelle prognostiziert ENGEL (2006: 105) eine Zunahme an Messintensität und Parameteranzahl.

An dieser Stelle sei auch auf die Problematik der Erfassung der Höchststände der Grundwassermesspegel hingewiesen. Bei Einleitung großer Wassermengen liegen die Pegelkappen infolge von Einstau unter der Wasseroberfläche. Beim Öffnen der Pegelkappen würde das Wasser in die Pegel fließen und die Werte verfälschen.

Abhilfe könnten so genannte Maximumpegel schaffen, wie er in ASSMANN (1999: 61) ausführlich beschrieben ist (s. Abb. 7-3). In diesen Pegeln wird der maximal erreichte Wasserstand über einen ca. 5 cm hohen, zylindrischen Schwimmer aus Styropor ermittelt. An zwei gegenüberliegenden Seiten wird je ein Magnetstreifen befestigt. Bei steigendem Wasserstand treibt der Schwimmer nach oben und bleibt bei fallendem Wasserstand an der Wandung des Stahlrohrs hängen. Bei gleichzeitig kostengünstiger Konstruktion liegt die Messgenauigkeit bei ± 1 cm. Eine weitergehende Beschreibung findet sich in ASSMANN (1999: 61).

Da die Pegelrohre am Petrisberg aus 1,5-Zoll-Kunststoffrohren gefertigt sind, müsste ein Metallband eingehangen werden, an dem der Magnetschwimmer, möglichst rundum mit Magnetstreifen ausgerüstet, haften bleiben kann. Eine cm-Skalierung erleichtert das Ablesen.

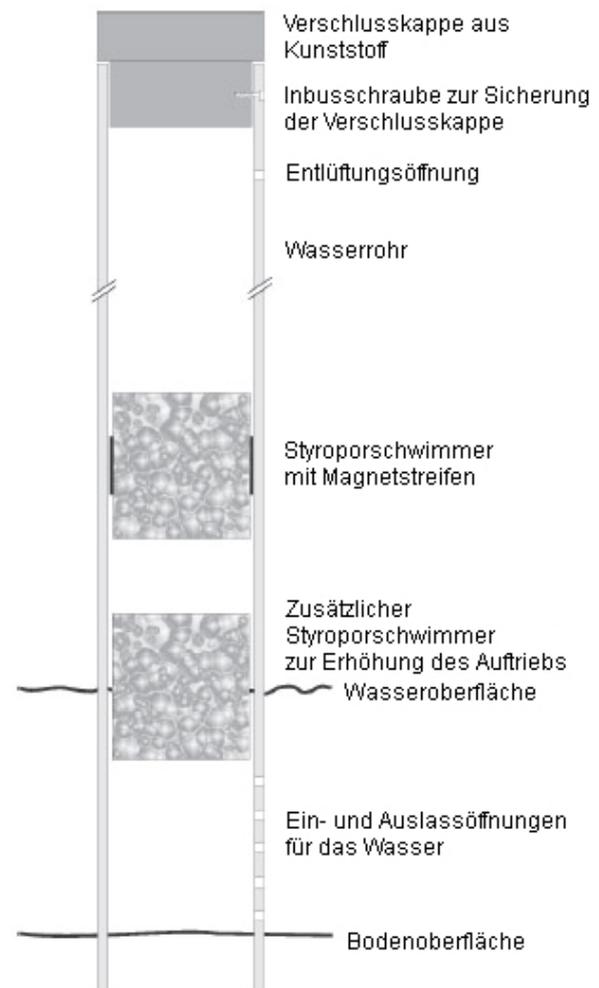


Abb. 7-3: Schematische Zeichnung eines Maximumpegels nach ASSMANN (1999: 61), leicht verändert.

7.4 Retentionswirkung

Die vorliegende Arbeit trägt dazu bei, die Wirkung dezentraler Maßnahmen zur Bewirtschaftung von Regenwasser in Siedlungsgebieten auf ihre Wirksamkeit im Hinblick auf den Siedlungsabfluss und die Entlastung des Vorfluters zu untersuchen. Angesichts der Literaturstudie fällt auf, dass bisher nur wenige Arbeiten hierzu veröffentlicht wurden.

Die vorliegende Arbeit unterscheidet sich von den in Kapitel 2.2.2 aufgeführten darin, dass es sich um ein sehr kleines Teil-Einzugsgebiet von nur 35 ha handelt. Es liegt zudem im Kopfgebiet seines Vorfluters und ist mit rund 84 % Siedlungsanteil sehr stark bebaut. Neben Untersuchungen an einzelnen Retentionsanlagen wird auch die Gesamtwirkung der Maßnahmen auf den Abfluss im Vorfluter unter Verwendung gemessener Abflussdaten anhand von N-A-Simulationen mit erwin 4.0 untersucht. Durch die Beobachtungen an den Retentionsanlagen kann die Güte der Simulationsergebnisse besser eingeschätzt werden. Insbesondere der jahreszeitliche Aspekt wird vom Modell konträr zur Realität dargestellt. Tatsächlich kann während der Sommerhalbjahre mehr Wasser zurückgehalten werden als in den Winterhalbjahren. Die nähere Untersuchung einzelner N-A-Ereignisse zeigt, dass die Retentionskapazität bei konvektiven Ereignissen größer ist als bei advektiven und stimmt daher mit den Aussagen NIEHOFFS (2002: 108) überein. Die konträre Wiedergabe durch das Modell ist vermutlich durch die fehlende Darstellung der Abflussprozesse im Boden bedingt. Die simulierten Abflussganglinien weisen wesentlich kürzere Auslaufkurven auf als die gemessenen. Ein Indiz dafür, dass die Modellspeicher zu schnell leer laufen. Die halbrunde Hangform des Untersuchungsgebietes legt unterirdische Fließbewegungen nahe und die Beobachtungen an Kaskadenmulden und Grundwasserpegeln sprechen dafür, dass das Wasser der höher gelegenen Retentionsanlagen auch unterirdisch den tiefer gelegenen zufließt. Gerade die letzten Glieder der Retentionsketten am Petrisberg (Quellmulden und Sportplatzmulde) weisen daher insbesondere im Winterhalbjahr vergleichsweise geringe Speicherkapazitäten auf. Im Modell kann dieser Wasserstrom nicht berücksichtigt werden und so führen die advektiven Sommerniederschläge trotz größerer Speicherkapazität des Bodens aufgrund ihrer stärkeren Intensität zu einem schnelleren Überlaufen der Anlagen als konvektive Niederschläge im Winter, die durch deutlich geringere Mengen gekennzeichnet sind. In der Realität kommt es jedoch wegen der hohen Sättigung der Böden im Winterhalbjahr auch infolge geringer Niederschlagsmengen zu Drosselabfluss.

Eine weitere Einschränkung des Modells ist die fehlende Möglichkeit, den Abfluss des Vorfluters zu integrieren. Die Scheitelabminderung im Vorfluter selbst kann daher nicht quantifiziert werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass das Modell nicht für diese Fragestellung konzipiert wurde. Es wird vermutet, dass die Scheitelabminderung am Auslass des untersuchten Teil-EZG angesichts der geringen natürlichen, nicht angeschlossenen Fläche nur wenig geringer ausfallen wird. Letztendlich ist dies jedoch abhängig von der Höhe des Basisabflusses, der teilweise auch von dem in den Retentionsanlagen versickerten Wasser gespeist wird. Aufschluss hierüber können nur weitere Untersuchungen bringen.

Die vorliegenden Simulationsergebnisse zu Rückhalt und Scheitelabminderung geben eine Art Momentaufnahme wieder, da sie auf der im Februar 2007 durchgeführten Kartierung des Baubestandes beruhen. Da das Gebiet noch nicht vollständig erschlossen ist, wird mit einer Abnahme der Wirkung zu rechnen sein. Abhängig ist dies auch von der Umsetzung der pri-

vaten Retentionsanlagen. Diese erfolgt meist erst nach Fertigstellung des Hauses, kann fehlerhaft sein oder bleibt aufgrund fehlender Kontrolle aus (s. hierzu auch Kapitel 8).

Die Beobachtungen und die Simulationsergebnisse sprechen dafür, dass das Retentionssystem bislang Ereignisse, für die es dimensioniert wurde, abfangen kann. Ob dies nach Erreichen des Bebauungsziels noch der Fall sein wird, kann nur durch Messungen sicher belegt werden, da die Dimensionierung der Retentionsanlagen auf N-A-Simulationen beruhen.

7.5 Ausblick und weitere Forschungsthemen

Die vorliegende Arbeit untersucht die Effizienz eines Retentionssystems in einem Neubaugebiet, welches im Kopfgebiet eines kleinen Fließgewässers liegt. Wie die Bibliographie über Untersuchungen zur Wirkung dezentraler Maßnahmen in Siedlungsgebieten auf der Meso- und Makroskala zeigt, liegen bislang nur wenige Studien zu dieser Fragestellung vor. Keines der Einzugsgebiete ist dabei so klein wie das untersuchte. Die vorliegende Arbeit kommt somit dem Wunsch der KHR (2004: 36) nach, weitere Studien auf der Maßstabsebene Standort, Hang und kleine Einzugsgebiete durchzuführen. Dem Potential dezentraler Regenwasserbewirtschaftung im Hinblick auf ganze Flusseinzugsgebiete widmet sich derzeit ein Forschungsprojekt der DBU (SCHLOTTMANN, ZWEYNERT, SIEKER & SIEKER 2007: 67).

Wünschenswert ist die Fortführung der Messungen über den Zeitraum des WaReLa-Projektes hinaus. Zum einen lassen sich künftige Modelle dann besser kalibrieren und zum anderen wächst die Aussagekraft statistischer Untersuchungen mit der Größe der betrachteten Datenmenge. Des Weiteren kann nur so auch die langfristige Wirkung des Retentionssystems am Petrisberg auf das Abflussgeschehen im Brettenbach untersucht werden, da Extrapolationen von N-A-Simulationen, also Vorhersagen mithilfe von Modellen als unsicher erachtet werden. Da nicht alle Teilprozesse, Zusammenhänge und Rückkopplungen bekannt sind, können auch sehr komplexe Modelle die Realität nicht vollständig abbilden. Ein Modell kann das Verhalten eines Gebietes nur für jenen Zeitraum nachahmen, für den gemessene Daten vorliegen (CASPER 2002: 149f, REFSGAARD & STORM 1996: 53). Angesichts der Vorteile langer Zeitreihen ist es nicht verwunderlich, dass BRONSTERT et al. (2001: 72) raten, bestehende Messnetze unbedingt zu erhalten und ggf. auch auszubauen und auch ENGEL (2006: 105) einen Bestandsschutz für sorgfältig betriebene Messnetze fordert. Als ein prioritäres Forschungsthema nennt MENDEL (1996: 46) die „Untersuchung von Hochwasserereignissen einer langen Zeitreihe in kleinen Einzugsgebieten im Hinblick auf mögliche Auswirkungen einer Klimavariabilität oder Klimaänderung auf den Abflussprozess.“ Dabei steht die Änderung von Ereignishäufigkeiten und Niederschlagsintensitäten im Vordergrund. Eine Zunahme der Winterniederschläge wird sich auf die Leistung des Retentionssystems negativ auswirken, da diese wie anhand der Darstellung der gemessenen Abflussdaten zu sehen und laut NIEHOFF (2002: 108) schlechter zurückgehalten werden können. In diesem Zusammenhang wäre auch zu unter-

suchen, ob die Einführung eines Klimaänderungsfaktors zur Verwendung bei der Dimensionierung von Retentionssystemen, wie im süddeutschen Raum bereits geschehen, auch für Rheinland-Pfalz notwendig erscheint. Simulationen unter Verwendung von Niederschlagsdaten des Zeitraums 1946 - 1976 und 1976 - 2006 könnten Hinweise hierauf geben.

Sinnvoll wäre auch die Erweiterung des Untersuchungsgebietes bis zur Mündung des Brettenbachs in den Olewiger Bach. Ein Messwehr kurz vor der Einmündung könnte Aufschluss über den Einfluss des Retentionssystems auf das Einzugsgebiet des Brettenbachs bringen. Eine Übertragung der Ergebnisse auf die weiteren Höhenstadtteile Triers unter Berücksichtigung eines Szenarios, dass 15 % der versiegelten Fläche vom Kanalnetz abgekoppelt⁸ und das Oberflächenwasser einer naturnahen Regenwasserbewirtschaftung zugeführt wird, könnte zeigen, ob die Hochwasserwahrscheinlichkeit im Olewiger Bach durch Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung in den Siedlungsgebieten reduziert werden kann. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob das Retentionssystem dazu führt, dass bei einem Starkregenereignis der Überlauf aus dem Siedlungsgebiet auf die Hochwasserwelle des natürlichen Gebietes trifft und diese somit verstärkt. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Siedlungsabfluss der Hochwasserwelle des natürlichen Gebietes voraus läuft, wenn die Siedlungsfläche direkt oberhalb der betrachteten Stelle am Gewässer liegt. Diese Vorentlastung entfällt, wenn das Wasser möglichst lange zurückgehalten wird und der Überlauf entsprechend zeitverzögert an den Vorfluter abgegeben wird (KA 1999, zit. in DWA 2006b: 17). In diesem Zusammenhang wäre auch zu untersuchen, ob eine Überlagerung der Welle aus dem Brettenbach-EZG mit jener des Olewiger Baches stattfindet.

SCHLOTTMANN, SIEKER, ZWEYNERT & SIEKER (2007: 70) sehen weiteren Forschungsbedarf in der Optimierung vorhandener Retentionssysteme, in der Entwicklung innovativer Produkte und geeigneten Analysemethoden für umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Letztere sind insofern von Bedeutung, als dass wirtschaftliche Aspekte die Entscheidung für oder gegen eine Maßnahme stark beeinflussen.

⁸ 15 % Abkopplung erscheinen realistisch, da sich das Land Nordrhein-Westfalen und alle Kommunen in der „Zukunftsvereinbarung Regenwasser“ zu dem Ziel bekennen, gemeinsam mit der Emschergenossenschaft innerhalb der nächsten 15 Jahre 15 Prozent des Abflusses von der Kanalisation abzukoppeln (http://www.emscherumbau.de/de/zukunft_der_emscher/download/MP_B.pdf 2006). Laut KA (1999: 578) können erfahrungsgemäß 25 % der Flächen abgekoppelt werden.

8 Handlungsempfehlungen zur Akzeptanzbildung

Zwanzig Jahre nach der für die Regenwasserbewirtschaftung bahnbrechenden Internationalen Bauausstellung in Berlin (s. Kapitel 2.1.1) setzt sich die dezentrale Versickerung nicht wie gewünscht durch (DAVID, EURSCH, LEIBER, REINERS & WACHTER 2003: 307f). Ein wichtiges Kriterium für oder gegen eine bestimmte Maßnahme sind die jeweils anfallenden Kosten. Die Wirtschaftlichkeit dezentraler Retentionsmaßnahmen wurde mehrfach untersucht. Dabei können solche Maßnahmen im Vergleich zu konventionellen Lösungen oft deutliche Einsparpotentiale aufweisen (DILLIG 1994: 30ff, KOLLMANN 1997, zit. in ASSMANN 1999: 16, LONDONG 1999: 122, REMBIERZ 2000: 12, SCHLOTTMANN, SIEKER, ZWEYNERT & SIEKER 2007: 69, s. hierzu auch BECKER, BECKEREIT & RAASCH 2004, HAMACHER 2000, HILLENBRAND & BÖHM 2004, SIEKER, KAISER & SIEKER 2006: 201 - 208) und zeichnen sich zudem durch eine Vielzahl monetär nicht bewertbarer Vorteile aus. Hierzu zählen beispielsweise der zumindest teilweise Erhalt des natürlichen Wasserhaushaltes mit Grundwasserneubildung, Trockenwetterabfluss und Verdunstung, die hydraulische Entlastung von Kläranlagen und Einleitgewässer bei Starkregenereignissen und damit auch minimierte Schmutzwassereinleitungen sowie der Naherholungswert semizentraler Retentionsflächen (FLOODSCAPE 2006: 44, GANTNER 2002, GANTNER 2003b, KOEHLER 2006: 16, SCHLOTTMANN, SIEKER, ZWEYNERT & SIEKER 2007: 62ff). Die Gründe für die oft noch zögerliche Umsetzung dieser Maßnahmen müssen also andere Ursachen haben.

Laut SIEKER & WILCKE (2006: 23) gibt es auch unter Fachleuten der Siedlungswasserwirtschaft Widerstände gegen die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung und SIEKER (2005: 7) sieht diese weniger rational als vielmehr psychologisch begründet. Dies lässt sich mit Sicherheit auch auf die fachfremde Öffentlichkeit übertragen. KLEEBERG & WILLEMS (2001, zit. in MENDEL 2005: 30) sehen mangelndes Wissen als Ursache für eine kritisch distanzierte Haltung, die einer flächendeckenden Umsetzung dezentraler Maßnahmen im Weg steht. Diese wird geschürt durch immer noch auftretende Hemmnisse und Misserfolge bei der Realisierung. Diese beruhen zumeist auf einer fehlerhaften Umsetzung der Anlagen oder auf ungenügender bis fehlender Einbindung der Grundstücksbesitzer in den Planungs- und Umsetzungsprozess (BENEKE 1999: 52, STADT TRIER 2001: 95).

Im Folgenden werden daher jene Faktoren hervorgehoben, die einen wesentlichen Einfluss auf die Akzeptanzbildung hinsichtlich der Maßnahmen zur Bewirtschaftung von Regenwasser haben. Die Grundlage hierfür bilden detaillierte Umfragen im Raum Trier (beschrieben in: KRONEWIRTH & WINTRICH 2007 und MICHALSKI 2005, vgl. BOHLEN 2003). Die Schlussfolgerungen münden in der vorliegenden Arbeit in Handlungsempfehlungen, die unter Verwendung weiterer Literatur erörtert werden. Sie sollen helfen, Fehler zu vermeiden und Projekte erfolgreich umzusetzen. Die Darstellung der Empfehlungen erfolgt chronologisch in Anlehnung an Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Retention von Regenwasser.

8.1 Planungsphase

Eine gut funktionierende Retentionsanlage wirkt sich am stärksten positiv auf die Akzeptanz aus. Die gegenteilige nicht minder starke Wirkung erzielt eine störanfällige Anlage. Primäres Ziel eines Konzeptes zur Bewirtschaftung von Niederschlagswasser muss daher eine fachgerechte Umsetzung und ein reibungslos funktionierendes System sein (MICHALSKI 2005: 125, vgl. BENEKE 1996: 5 und BOHLEN 2003: 109, 136).

Da die Dimensionierung von Versickerungsanlagen insbesondere von der Durchlässigkeit der Böden abhängt, ist schon bei der Planung darauf zu achten, dass ein an die herrschenden Bodenverhältnisse optimal angepasstes Konzept erstellt wird. Aufgrund der kleinräumig wechselnden bodenphysikalischen Merkmale sind neben Auswertung bodenkundlicher und hydrologischer Karten umfangreiche detaillierte Bodenanalysen unbedingt erforderlich. Als praxistaugliche und aussagekräftige Methoden zur Ermittlung der Versickerungsfähigkeit von Böden haben sich Messungen mittels Open-End-Test und Doppelring sowie Beetinfiltrimeter erwiesen, wobei die Aussagekraft der Verfahren in Reihenfolge der Nennung zunimmt (BLETTGEN & BURGHARDT 1999: 102, BURGHARDT 1999: 29, STEINBERG & BURGHARDT 1999: 1119, vgl. SCHNEIDER 1999: 109, WINZIG, TÜSELMANN & BURGHARDT 1999: 1149f). WINZIG (1997: 132) empfiehlt eine Bohrstockbeprobung in einem Raster mit 50 - 100 m Abstand. Nach Kenntnis der räumlichen Verbreitung von Bodenart, relativer Festigkeit und hydromorpher Merkmale können dann repräsentative Profile gegraben werden. Neben der detaillierten bodenkundlichen Ansprache sollten Infiltrationstests auf dem späteren Versickerungsniveau durchgeführt werden.

Ist eine Versickerung auf privaten Grundstücken vorgesehen, sollten die Grundstückseigentümer bzw. die potenziellen Anwohner bereits in die Planungsphase miteinbezogen werden, beispielsweise in Form der gesetzlich vorgeschriebenen frühzeitigen Bürgerbeteiligung. Nutzen und Zweck der dezentralen Versickerung sind oftmals nicht bekannt (DAVID et al. 2003: 313). Wie Umfragen zeigen, besteht seitens der Anwohner auch der Wunsch nach frühzeitiger und ausführlicher Information (MICHALSKI 2005: 101, 121, vgl. BOHLEN 2003: 109). Laut GANTNER (2003b: 366) ist es im Rahmen einer Entscheidung für eine bestimmte Maßnahme hilfreich, wenn bei Anwendern und Betreibern im Vorfeld Klarheit herrscht über die einzelnen Systeme, ihre Funktionsweise und Unterhaltung. Information, Hilfestellung und Einbindung aller Beteiligten ist insbesondere dann wichtig, wenn ungünstige hydrogeologische Standorteigenschaften vorliegen, da die Akzeptanz der Versickerung besonders dann ins Wanken gerät (BMBF-PROJEKTGRUPPE 1997: o. S.).

Eine Beteiligung Dritter bei (siedlungs-)wasserwirtschaftlichen Planungsprozessen ist bislang eher unüblich. Im Rahmen von Hochwasserschutz-Projekten wird sie dagegen schon einige Jahre praktiziert und in der EU-Wasserrahmenrichtlinie nimmt sie bei der Erstellung von Bewirtschaftungsplänen schon eine zentrale Schlüsselrolle ein (PATT 2001: 10, UBA 2002: 20). Information und Anhörung sind dort verbindlich vorgeschrieben, eine aktive Beteiligung

wird empfohlen. Auch wenn mit der Beteiligung der Öffentlichkeit Kosten, Zeit- und Energieaufwand verbunden sind, so zahlt sie sich am Ende doch aus. Öffentlichkeitsarbeit wird gesehen als „ein Mittel, das die Entscheidungsfindung verbessert, das Bewusstsein für Umweltbelange schafft und dazu beiträgt, die Akzeptanz beabsichtigter Planungen und das Engagement dafür zu erhöhen“ (UBA 2002: 4, s. a. SDF 2006: o. S., SIEKER, FÖRSTER, SCHEIBEL & ZIMMERMANN 2005: 16f). Auch MICHALSKI (2005: 128f, vgl. DILLIG 1994: 28, STADT TRIER 2001: 93) sieht darin die Möglichkeit zur Schaffung einer positiven Einstellung und zu einer Sensibilisierung gegenüber möglicher Probleme und laut UBA (2002: 26, 41, vgl. SCHWEIZER 1996: 3, 27) führt die Beteiligung Dritter zu transparenteren und kreativeren Lösungen, die auf einem breiten Spektrum von Kenntnissen und Auffassungen beruhen. Sie hilft Konflikte zu vermeiden, mündet in einer effektiveren Umsetzung der Maßnahmen und steigert so die Wahrscheinlichkeit langfristiger und allgemeiner Akzeptanz.

Konkret sollten Kommunen insbesondere über die Entwässerungskonzeption informieren. Dabei ist darauf zu achten, dass die Informationsvermittlung stets möglichst anschaulich, standortbezogen und praxisnah gestaltet wird. Umsetzungsfehler, daraus resultierende fehlerhafte, störanfällige Anlagen und eine dadurch bedingte ablehnende Haltung in der Bevölkerung können so verhindert werden (MICHALSKI 2005: 128, SIEKER 2004: 50ff, vgl. BENEKE 1999: 151). Die potenziellen Bauherren sollten die Möglichkeit einer Mitsprache haben. Diskussionen sollten möglichst verständlich geführt und Planungen nachvollziehbar dargestellt werden. So kann auch der Eindruck einer Fremdbestimmung „von oben herab“ ausgesetzt zu sein, vermieden werden (EGERT & JEDICKE, 2001 zit. in KRONEWIRTH & WINTRICH 2007: 215, FRANZ & KÜHN 2002: 784, PATT 2001: 231). Es ist wichtig, den Bürgern das Gefühl zu vermitteln, dass ihre Vorschläge ernst genommen und berücksichtigt werden. Denkbar ist auch ein flexibles Modell, das den Anwohnern Wahlmöglichkeiten zwischen unterschiedlichen Anlagentypen und Gestaltungen anbietet.

Zu einer anschaulichen Information können Broschüren, Schauwände, Ausstellungen, Aktionstage, Demonstrationsmodelle und Modellprojekte beitragen. Angesichts der oft vorhandenen Vielfalt an Informationsunterlagen ist darauf zu achten, dass eine Broschüre alle für den Bauherren erforderlichen Informationen enthält und ihm diese beispielsweise mit dem Bauantrag mitgegeben wird (DAVID et al. 2003: 313). Weitere Möglichkeiten sind öffentliche Expertenanhörungen, Podiumsdiskussionen und eine Artikelserie in der örtlichen Presse (MICHALSKI 2005: 129, STADT TRIER 2001: 93f, vgl. PATT 2001: 382). Im Rahmen des Projektes WaReLa wurde eine Demonstrationsanlage konzipiert und im Neubaugebiet Petrisberg realisiert (näheres hierzu in WINTRICH 2007: 221). Inwieweit diese dabei hilft, mehr Akzeptanz für Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung in der Öffentlichkeit zu schaffen, ist in eingehenden Untersuchungen zu klären. Für wen die Demonstrationsanlage Informationsmedium sein kann und wie diese in Informationsveranstaltungen eingebunden werden kann, wird derzeit im Rahmen einer Diplomarbeit näher untersucht (SCHLICK 2007).

Die Bedeutung der Akzeptanz und die Beteiligung der Öffentlichkeit dokumentieren jüngere und aktuelle Forschungsprojekte, die sich diesen Aspekten widmen: DAVID et al. (2003), SDF (2006), URBAN WATER (2006). Beispiele erfolgreicher Öffentlichkeitsarbeit und aktiver Beteiligung in wasserwirtschaftlichen Projekten finden sich unter anderem in KAISER (2004: 167ff), SCHNEIDER, W. (1999: 33f), TÖPFER (2005: 20) und URBAN WATER (2006: 19).

Wird eine Retentionsanlage mit einem gewissen Nutzwert verbunden, kann sich das positiv auf die Einstellung bezüglich des Gesamtkonzeptes auswirken. Daher sollte auch die Regenwassernutzung in die Planung miteinbezogen werden und auf die Entwässerung angerechnet werden. Generell sollte vermittelt werden wie das Wasser und wie die Retentionsflächen genutzt werden können. Auch im öffentlichen Bereich werden beispielsweise größere begrünte Retentionsflächen, die das Landschaftsbild bereichern und für freizeitleiche Aktivitäten genutzt werden können durchweg positiv aufgenommen (MICHALSKI 2005: 127f).

Finanzielle Anreize, in Form von Fördergeldern oder dem Wegfall des wiederkehrenden Beitrags für die Oberflächenentwässerung, haben keinen großen Einfluss auf die Akzeptanz, können aber dabei helfen, das Konzept bereits im Vorfeld positiv darzustellen und eine positive Grundeinstellung bei den Bauherren zu verstärken (MICHALSKI 2005: 128, vgl. BENEKE 1996: 11 und BOHLEN 2003: 134, 148). Daher sollte seitens der Kommune bereits während der Planung eine finanzielle Förderung angedacht oder – sofern dies wirtschaftlich nicht möglich ist – finanzielle Anreize geschaffen werden, beispielsweise über Abwassergebührensatzungen oder Ermäßigungen des Grundstückspreises. Laut Umfragen sind finanzielle Einsparungen durch die Retention von Niederschlagswasser sowie deren Größenordnung größtenteils unbekannt (MICHALSKI 2005: 114f, vgl. BENEKE 1996: 8 und BOHLEN 2003: 134). Genauso wichtig ist es deshalb, die Bauherren über finanzielle Vorteile vorab zu informieren und zu zeigen, dass das Konzept nicht nur ökologische, sondern auch ökonomische Vorteile hat (MICHALSKI 2005: 128).

8.2 Bauphase

Während der Bauausführung ist auf eine fachgerechte Umsetzung zu achten. Bodenverdichtungen infolge laufender Baumaßnahmen sind unbedingt zu vermeiden (MICHALSKI 2005: 126). Dies betonen auch DORNAUF & BURGHARDT (1999: 965). Sie verglichen die bodenphysikalischen Eigenschaften eines Bodens, welcher einer mechanischen Belastung durch Lagerung von Baumaterialien und durch Befahrung mit Baufahrzeugen unterlag mit denen eines Bodens vor Beginn der Bautätigkeit. Dabei stellten sie eine deutliche Abnahme der Infiltrationsleistung in den oberen 20 - 25 cm Tiefe fest (DORNAUF & BURGHARDT 1999: 968).

Für die Bauphase gelten daher folgende Vorgaben: Die zur Versickerung vorgesehenen Flächen dürfen nicht mit schwerem Baugerät befahren werden. Ist mangels Rangierfläche eine

Umzäunung nicht möglich, mindern Wege aus Kies oder Geotextilien sowie das Belassen des üblicherweise abgeschobenen Oberbodens die mechanische Belastung. Auch Bauschutt und Aushub dürfen nicht abgelagert werden. Andernfalls ist der Boden vor Modellierung der Retentionsanlagen tiefgründig zu lockern und eine erneute Belastung der Fläche zu verhindern.

Nach Fertigstellung der Retentionsanlagen dürfen die Flächen nicht betreten werden bis sich eine geschlossene Rasendecke gebildet hat. Vorher darf auch kein Wasser eingeleitet werden, da es sonst zu Verkrustung und Verschlämmung kommt (DORNAUF & BURGHARDT 1999: 968, TWER & BURGHARDT 1999: 1143, WINZIG 1999: 132). Diese Empfehlungen decken sich inhaltlich mit den im Rahmen eines Bürgergutachtens im Trierer Stadtteil Tarforst (STADT TRIER 2001: 86 - 89) und den von BOHLEN (2003: 110) in der Trierer Nachbargemeinde Osburg beobachteten Umsetzungsfehlern, welche unbedingt zu vermeiden sind:

- Befahren der Retentionsflächen mit schwerem Baugerät
- unkontrollierte Ablagerung von Bauschutt und Aushub
- unsachgemäße Nutzung von Versickerungsmulden (z. B. Lagerplatz für Holzpaletten)
- durch fehlende Begrünung bedingte Verschlämmung des Filtervlieses
- unterdimensionierte Mulden.

Für die Bauausführung sind folglich nur gut informierte Fachkräfte zu beauftragen. Treten dennoch Fehler auf, sollte die Reaktionszeit zwischen der Feststellung von Mängeln und deren Behebung möglichst kurz sein. Nur so kann gewährleistet werden, dass keine großflächigen Schäden auftreten oder es zu einem Versagen ganzer Teile des Entwässerungssystems kommt, was die Akzeptanz am stärksten negativ und nachhaltig beeinflusst (MICHALSKI 2005: 126). Um eine schnelle, qualifizierte Hilfe zu gewährleisten, ist die Einrichtung eines Bürgertelefons oder eines Bürgerbüros als direkte Anlaufstelle vor Ort sehr hilfreich.

Neben dem einwandfreien Funktionieren ist die optische Gestaltung von Retentionsanlagen ein weiterer Faktor, der die Akzeptanz derselben direkt und in hohem Maße beeinflussen kann (MICHALSKI 2005: 127, vgl. BOHLEN 2003: 130ff). Insbesondere dort, wo wenige Freiflächen vorhanden sind, wird eine Bewirtschaftung von Regenwasser mit einhergehender Durchgrünung und optischer Aufwertung des Wohngebietes begrüßt (BENEKE 1996: 4). Dem einzelnen Grundstücksbesitzer kann die Vorschrift zur Retention von Regenwasser jedoch ein Dorn im Auge sein, wenn er sich um einen Teil seiner Gartenfläche beraubt und in der optischen Gestaltung eingeschränkt sieht. Oftmals wird eine unauffällige Lösung gewünscht. Laut Umfrage wird gerade bei der Gestaltung der Anlagen Hilfe benötigt. So wünschten beispielsweise 34 % der Befragten in Tarforst Beratungsangebote hinsichtlich Umsetzungsmöglichkeiten und 29 % wollten mehr über Betrieb und Pflege der Anlagen erfahren (MICHALSKI 2005: 102). Hier sollte unbedingt Unterstützung geboten werden, etwa in Form visueller Darstellung von Gestaltungsmöglichkeiten oder Benennen sachkundiger Landschaftsarchitekten

oder Gärtner, die eine Vorortberatung durchführen können. Auch die öffentlichen Flächen sollten ansprechend gestaltet sein. Keinesfalls dürfen sie vernachlässigt werden und sich zu Schmutzfängern entwickeln, da dies zu einer ablehnenden Haltung führt (BENEKE 1996: 3, MICHALSKI 2005: 127).

8.3 Betriebsphase

Während und nach Umsetzung der Maßnahmen ist Kontrolle ein wichtiger Faktor, der von einem Teil der Befragten durchaus gewünscht wird. Neben der generellen Funktion soll auch die Einhaltung der oben genannten Vorgaben überprüft werden, um eine langfristige Funktion sicherzustellen. Auch allgemeine Vorgaben wie die Wahrung der festgesetzten Abstände von der Grundstücksgrenze, das Vorhandensein von Notüberläufen und die Anschlüsse an möglicherweise nachgeschaltete (öffentliche) Retentionsflächen sollten überprüft werden. Nur durch eine gute Kontrolle können Funktionsstörungen und Fehler in der Umsetzung rechtzeitig bemerkt und behoben werden. Eine Kontrolle aller Anlagen in einem bestimmten Gebiet könnte nach dem von FRANZ & KÜHN (2002: 782) beschriebenen „Schornsteinfegerprinzip“ durch einen Fachmann erfolgen.

Wurde ein Teil oder die komplette Retention von den privaten Flächen auf semizentrale öffentliche Flächen verlagert, so ist es wahrscheinlicher, dass Vorschriften eingehalten und das geforderte Rückhaltevolumen vorgehalten werden. Auch die Funktionskontrolle sowie Wartung und Pflege des Systems werden erleichtert. Semizentrale Lösungen treffen außerdem durchweg auf die Akzeptanz der Anwohner, da diese ihre privaten Grundstücksflächen uneingeschränkt gestalten können und keine Eigenverantwortung aufbringen müssen. Bei Einbindung in eine Grünanlage wird zudem das Wohnumfeld verbessert, wovon letztlich alle profitieren.

Nach der Fertigstellung sollte die Pflege der öffentlichen Anlagen nicht vernachlässigt werden, da verwahrloste Anlagen bei den Anwohnern eine ablehnende Haltung fördern und letztendlich die Akzeptanz negativ beeinflussen können (MICHALSKI 2005: 126f). Werden die Flächen nicht regelmäßig gemäht und im Herbst von Laub befreit, kann die Versickerungsleistung von Mulden zudem um 30 % abnehmen (WINZIG 1999: 130). Eine kostengünstige Alternative zur Beauftragung von Landschaftsgärtnern ist die Pflege durch Paten wie etwa Schulklassen (DWA 2006c: 10).

Generell ist das Gelingen von Projekten zur Bewirtschaftung von Regenwasser angewiesen auf eine gute Zusammenarbeit zwischen allen daran Beteiligten und der Einbeziehung der Öffentlichkeit.

9 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des INTERREG III B-Projektes WaReLa (Water Retention by Landuse), das sich mit dem Rückhalt von Wasser in der Fläche als Beitrag zum vorbeugenden Hochwasserschutz beschäftigt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Bereichen Siedlung, Land- und Forstwirtschaft sollen in ein Decision Support System fließen, welches die Raumplanung bei der Wahl geeigneter und standortbezogener Maßnahmen zur Hochwasservorsorge unterstützen soll. Im Vordergrund stehen dabei Handlungsalternativen bzw. Ergänzungen zum technischen Hochwasserschutz.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Frage nach der Effizienz von Retentionsmaßnahmen in urbanen Räumen und deren Beitrag zum Hochwasserschutz. Da es sich um ein relativ junges Forschungsthema handelt, welches die Fachwelt bis heute kontrovers diskutiert, werden zunächst die Ergebnisse bisher veröffentlichter Untersuchungen zur Wirkung dezentraler Retentionsmaßnahmen in Siedlungen auf den Hochwasserabfluss zusammengestellt. Dabei beruhen sämtliche Untersuchungen auf N-A-Simulationen. Es zeigt sich, dass allgemeine Aussagen über die Retentionswirkung nicht möglich sind, da das Potential der Regenwasserbewirtschaftung und deren Rückhaltewirkung von mehreren Faktoren gesteuert werden. Hierzu zählen insbesondere die Größe des Einzugsgebietes, der Anteil der Siedlungsfläche (Oberlieger), deren Versiegelungsgrad und Lage zum Vorfluter, die Lage der zu schützenden Ortschaft (Unterlieger) am Vorfluter, die naturräumlichen Gebietseigenschaften, die Größe des zur Dimensionierung der Retentionsanlagen gewählten Bemessungsregens sowie ggf. Wellenüberlagerung.

Ergänzt werden die bisher getroffenen Aussagen durch Untersuchungen an einem Retentionssystem. Das untersuchte Gebiet liegt im Neubaugebiet Trier-Petrisberg, welches zugleich Kopfgebiet des Brettenbaches ist. Vorherrschende Böden sind zu Pseudovergleyung neigende Braun- und Parabraunerden mit k_f -Werten zwischen $6 \cdot 10^{-3}$ und $< 1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Mehr als die Hälfte der untersuchten Standorte eignet sich laut DWA A-138 (2005: 15f) nicht zur Versickerung. Um der Frage nach der Effizienz des Systems nachzugehen, wurde zum einen die hydraulische Belastung einzelner Retentionsanlagen untersucht. Zum anderen wurden N-A-Simulationen mit dem Programm erwin 4.0 durchgeführt. Berechnet wurden hierbei der Rückhalt des Oberflächenwassers und die Scheitelabminderung der Ableitung in den Vorfluter Brettenbach im Vergleich zu einer Entwässerung des Siedlungsgebietes in denselben über ein Trennsystem.

Laut N-A-Simulationen hält das Retentionssystem, welches für ein 100-jährliches Ereignis mit 56 mm Niederschlag und der Dauerstufe 3 Stunden konzipiert wurde, zwischen 58 % und 68 % des Jahresniederschlags zurück. Ähnlich hohe Werte (60 - 80 %) nennen GÖBEL, STUBBE, WEINERT, ZIMMERMANN, FACH, DIERKES, KORIES, MESSER, MERTSCH, GEIGER &

COLDEWEY (2004: 270f) und WEGNER (1992: 7f) für die von ihnen untersuchten Anlagen, deren Dimensionierung jedoch nicht näher beschrieben wird.

Sehr hoch erscheint die Scheitel abmindernde Wirkung des Retentionssystems im Vergleich zu einer konventionellen Ableitung. Bei geringen Niederschlagsmengen streuen die Werte bis zu 20 % um den Mittelwert von 82 % und nähern sich diesem mit steigender Niederschlagshöhe an, so dass die Scheitelerhöhung im Vergleich zur Regenwasserableitung durch das Retentionssystem auf 1/5 reduziert wird. Lediglich ein Ereignis nimmt mit nur 12 % Scheitelabminderung eine Sonderstellung ein. In der N-A-Simulation verursacht es ein Überlaufen des letzten Rückhaltebauwerks unmittelbar vor dem Vorfluter Brettenbach. Hierbei handelt es sich allerdings um ein weit mehr als 100-jährliches Ereignis von 13 Stunden Dauer. Vor diesem Hintergrund sind 13 % Rückhalt und auch 12 % Scheitelabminderung des Zulaufs beachtlich.

Die Scheitelabminderung im Vorfluter selbst konnte nicht quantifiziert werden. Angesichts des geringen Anteils natürlicher, nicht angeschlossener Flächen können diese nur wenig zusätzliches Oberflächenwasser liefern. Bedeutsamer erscheint die Höhe des Basisabflusses, der teilweise auch von dem in den Retentionsanlagen versickerten Wasser gespeist wird. Aufschluss über die Scheitelabminderung im Vorfluter kann daher nur eine Quantifizierung der einzelnen Abflusskomponenten geben.

Insgesamt legen die Simulationsergebnisse die Schlussfolgerung nahe, dass während des Winterhalbjahres mehr Wasser zurückgehalten werden kann als während des Sommerhalbjahres. Dies konnte jedoch aufgrund von Beobachtungen revidiert werden. Vielmehr begünstigen trockene Vorperioden, höhere Lufttemperaturen und die Vegetation im Sommer einen besseren Rückhalt konvektiver Niederschläge. Korrespondierende Aussagen machen ASSMANN & KEMPF (2005), GANTNER (2003a) und NIEHOFF (2002).

Beobachtungen und Simulationen zeigen, dass das Retentionssystem bisher effektiv arbeitet. Sämtliche Retentionsanlagen entleeren sich innerhalb von 48 Stunden. Zudem geht mit der Retention eine hohe hydraulische Entlastung von Quellbereich und Brettenbach einher, die erosiven Prozessen entgegenwirkt. Ob sich Niederschlagsereignisse der Wiederkehrzeit von 100 Jahren auch nach Erreichen des Bebauungsziels optimal bewirtschaften lassen, lässt sich nur durch weitergehende Beobachtungen sicher beantworten und hängt auch von der Realisierung der Retentionsmaßnahmen auf den Privatgrundstücken ab.

Hinsichtlich der Umsetzung naturnaher Maßnahmen zur Bewirtschaftung von Regenwasser zeigen mehrere Autoren auf, dass dies oft nur zögerlich geschieht oder sogar auf Widerstände stößt. Die Arbeit wird daher ergänzt durch Handlungsempfehlungen zu Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Regenwasserbewirtschaftung auf Privatgrundstücken. Diese basieren im Wesentlichen auf der Analyse Akzeptanz beeinflussender Faktoren, der mehrere Befragungen im Raum Trier vorausgegangen sind. Sie sollen helfen, die Akzeptanz zu steigern, Fehler zu vermeiden und Projekte erfolgreich umzusetzen.

Literatur

- AALTONEN, J. (2001): Seasonal resistivity variations in some different Swedish soils. – in: *European Journal of Environment & Engineering Geophysical Society*, 6. – 3-31.
- ASSMANN, A. & J. KEMPF (2005): Wege zu einem dezentralen, integrierten Hochwasserschutz. – in: Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg [Hrsg.] (2005): *Dezentraler Hochwasserschutz in kleinen bewaldeten Einzugsgebieten: Beiträge zum Kolloquium am 05. und 06. März 2004 an der Fachhochschule Rottenburg.* – Rottenburg. – 73-83.
- ASSMANN, A. (1999): Die Planung dezentraler, integrierter Hochwasserschutzmaßnahmen – mit dem Schwerpunkt der Standortausweisung von Retentionsarealen an der Oberen Elsenz, Kraichgau. – Schriftenreihe des Landesamtes für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg, Heft 11. – Kornwestheim.
- ASSMANN, A. (2001): Dezentraler, integrierter Hochwasserschutz – vom Konzept zur Planung. – in: Heiden, S. Erb, R. & F. Sieker [Hrsg.] (2001): *Hochwasserschutz heute – Nachhaltiges Wassermanagement. – Initiativen zum Hochwasserschutz, Band 31, Berlin.* – 197-217.
- ASSMANN, A., FRIEDEL, B., GÜNDRA, H., SCHUKRAFT, G. & A. SCHULTE (1996): Dezentraler Hochwasserschutz als Alternative zu großen Rückhaltebecken? – in: *Der Bürger im Staat, Heft 1.* – 60-64.
- ATV (1983): *Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik.* – 3., überarbeitete Auflage. – Berlin und München.
- ATV-DVWK (2000): Merkblatt ATV-DVWK-M 153 – Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser. – in: ATV-DVWK (2001): *Taschenbuch zum ATV-DVWK-Regelwerk Abwassertechnik.* – Hennef. – 289-324.
- ATV-DVWK (2001): *Taschenbuch zum ATV-DVWK-Regelwerk – Abwassertechnik.* – Hennef.
- ATV-DVWK (2002): *Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 138 – Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser.* – Hennef.
- BÁRDOSSY, A. & Y. HUNDECHA (2002): Regionalization of parameters of a conceptual rainfall runoff model for the purpose of estimating the impact of land use changes on the runoff. – Final report of IRMA-LAHoR-Project, Institut für Wasserwirtschaft, Universität Stuttgart.
- BÁRDOSSY, A. (2005): Mögliche Entwicklungen der Hochwasserextreme in den nächsten Jahrzehnten. – in: Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg (2005): *Dezentraler Hochwasserschutz in kleinen bewaldeten Einzugsgebieten: Beiträge zum Kolloquium am 05. und 06. März 2004 an der Fachhochschule Rottenburg.* – Rottenburg. – 3-50.
- BARTELS, H., KOLOKOTRONIS, V. & L. ZIMMERMANN (2006): Klimaentwicklung und Hochwasserschutz. – in: DWD [Hrsg.]: *Klimastatusbericht 2005.* – Offenbach am Main. – 33-43. – http://www.dwd.de/de/Funde/Klima/KLIS/prod/KSB/ksb05/03_2005.pdf.
- BECKER, M., BECKEREIT, M. & U. RAASCH (2004): Ökonomische Aspekte einer zukunftsfähigen Regenwasserbewirtschaftung im Emschergebiet. – in: *GWF Wasser, Abwasser*, 145, Nr. 12. – 867-873.
- BENEKE, G. (1996): Akzeptanz einer dezentralen Regenwasserbewirtschaftung in der Wohnbevölkerung. – in: *Ökologischer Wasserhaushalt.* – Schriftenreihe der Kommunalen Umwelt-Aktion U.A.N., Heft 29/1996 – Hannover. –

- <http://www.difu.de/cgi/stadtoekologie/frames.cgi?http://www.difu.de/stadtoekologie/dokumente/online/wasser/beneke1.shtml>. – abgerufen am: 22.08.06.
- BENEKE, G. (1999): Ökologisches Bauen und Wohnen – ein endloses Projekt? – Überlegungen zu Organisations- und Verfahrensstrukturen. – in: Selle, K. [Hrsg.]: Arbeits- und Organisationsformen für eine nachhaltige Entwicklung, Band 4. – Verständigungen über Planung und Kooperation. Erörterungen und Erfahrungsberichte. – Dortmund. – 146-154.
- BERNE, A., DELRIEU, G., CREUTIN, J.-D. & C. OBLED (2004): Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. – in: *Journal of Hydrology*, Volume 299, Issue 3-4. – 166-179.
- BGHPLAN (Bielefeld – Gillich – Heckel) (2002): Teil A: Rückhalte- und Versickerungsanlagen für Oberflächenwasser – in: *Stadtentwässerung Trier* [Hrsg.] (2002): Städtebauliche Entwicklungsmaßnahme Petrisberg – Genehmigungsplan Entwässerung. – Trier. – 1-42. – unveröffentlicht.
- BINLEY, A., CASSIANI, G., MIDDLETON, R. & P. WINSHIP (2002): Vadose zone flow model parameterisation using cross-borehole radar and resistivity imaging. – in: *Journal of Hydrology*, 267. – 147-159.
- BINLEY, A., WINSHIP, P., WEST, J. L., POKAR, M. & R. MIDDLETON (2002): Seasonal variations of moisture content in unsaturated sandstone inferred from borehole radar and resistivity profiles. – in: *Journal of Hydrology*, 267. – 160-172.
- BLETTGEN, M. & W. BURGHARDT (1999): Untersuchungen zur Bemessung und Gestaltung der Regenwasserversickerung in bestehenden Wohngebieten. – in: *Regenwasserversickerung und Bodenschutz*. – BVB-Materialien Band 2. – Berlin. – 98-103.
- BMBF-PROJEKTGRUPPE "Möglichkeiten einer naturnahen Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten" (1997): Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung als Maßnahme zur Optimierung des innerstädtischen Wasserkreislaufs. – in: *Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS): TA-Datenbank-Nachrichten* Nr. 3/4. – <http://www.itas.fzk.de/deu/TADN/TADN397/rub.htm#rubtop>.
- BOHLEN, J. (2003): Regenwasserbewirtschaftung auf Siedlungsflächen in Neubaugebieten. – Eine gesamtgesellschaftliche Betrachtung im Spannungsfeld zwischen technischen, rechtlichen und sozioökonomischen Aspekten. – Universität Trier, unveröffentlichte Diplomarbeit.
- BOLD, S. & B. SPENGLER (2006): Einfluss befestigter Flächen auf den Hochwasserabfluss der Emscher. – in: *DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. [Hrsg.] (2006): Dezentraler Hochwasserschutz*. – Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz. – Hennef. – 75-82.
- BROCKHAUS (1998): *Die Enzyklopädie in 24 Bänden*. – 20., überarbeitete und aktualisierte Auflage. – Mannheim.
- Bronstert A., Bárdossy A., Bismuth C., Buiteveld H., Busch N., Disse M., Engel H., Fritsch, U., Hundecha Y., Lammersen R., Niehoff D. & N. Ritter (2001): LAHoR – Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen an Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. – *Berichte der Kommission des Rheins II-18* – IRMA-Code3/DU/1/002. – <http://www.chr-khr.org/downloads/RapportII-18.pdf>.

- BRONSTERT, A. (2000): Unterlagen zu den Seminaren „Übersicht über hydrologische Modelle“ & „Mathematische Formulierung hydrologischer Prozesse“. – Potsdam. – <http://www.uni-potsdam.de/u/Geoökologie/institut/hydrologie/download.html>.
- BRONSTERT, A. [Hrsg.] (2005): Abflussbildung – Prozessbeschreibung und Fallbeispiele. – in: DWA: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 13.05. – Hennef.
- BUCHHOLZ, O. (2001): Hydrologische Modelle – Theorie der Modellbildung und Beschreibungssystematik. – RWTH Aachen, Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Band 122, Dissertation.
- BURGHARDT, W. (1999): Zur Konzeption der Bodenuntersuchungen für eine Regenwasserversickerung in Mulden. – in: Regenwasserversickerung und Bodenschutz. – BVB-Materialien Band 2. – Berlin. – 16-30.
- BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG SPOO & PITTNER GMBH (1999a): Endbericht Städtebauliche Entwicklungsmaßnahme Petrisberg, Bereich ehemalige französische Kasernen, 13.09.1999. – unveröffentlicht.
- BÜRO FÜR UMWELTPLANUNG SPOO & PITTNER GMBH (1999b): Endbericht Gefahrerforschung auf der Liegenschaft „FFA Stalag“, Trier-Petrisberg, 27.10.1999. – unveröffentlicht.
- CASPARY, H.J. (1998): Hochwasserverschärfung infolge von Klimaänderungen. – in: Lozán, J.L., Graßl, H. & P. Hupfer [Hrsg.]: Warnsignal Klima. – 259-264. – Hamburg. – in: Licht, K. (2005): Die raumzeitliche Ausprägung des Klimas in der Region Trier in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts – Eine regionalklimatische Analyse mit Trenduntersuchungen zum Nachweis einer Klimaänderung. – Aachen.
- CASPER, M. (2002): Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald). – in: Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH), Heft 210.
- CLOB, H.-M. (1979): Die Klimasituation im Regierungsbezirk Trier. – in: Friedrich, L., Laufner, R., Rothenberger, K.-H., Schuhn, W. & O. Werle [Hrsg.]: Beiträge zur Trierischen Landeskunde – Unterrichtsmaterialien für Geschichte und Geographie. – Trier. – 362-380.
- DAVID, F., EURSCH, A., LEIBER, M., REINERS, F. & W. WACHTER (2003): Alternative Regenwasserbewirtschaftung – Grenzen und Möglichkeiten der Umsetzung. – in: Bayerische EliteAkademie [Hrsg.] (2003): Wasser – die künftig knappste Ressource. – München. – 259-333. – Pressenachricht 21.11.2003. – <http://www.eliteakademie.de/pdf/Gruppe1Pressemitteilung.pdf>.
- DELTAU, G. (Saar-Lor-Lux Umweltzentrum der Handwerkskammer Trier [Hrsg.]) (1997): Hinweise und Empfehlungen zum Umgang mit Regenwasser. – Trier.
- DEUTSCHER BUNDESTAG (1989): Hochwasserkatastrophen – Ursachen und umweltpolitische Konsequenzen. – Antwort der Regierung auf eine große Anfrage. – Drucksache 11/4314.
- DILLIG, J.M. (1994): Neue Wege in der Regenwasserbehandlung. – in: Wasser & Boden, 11. – 27-33.
- DORNAUF, C. & W. BURGHARDT (1999): Auswirkungen von mechanischer Belastung durch Bautätigkeit auf die Versickerungsleistung eines lehmig-sandigen Bodens. – in: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 91/II. – Göttingen. – 965-968.

- DVWK [Hrsg.] (1982): Ermittlung des nutzbaren Grundwasserdargebots. – 1. Teilband. – in: Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. – Heft 58/1 und 58/2. – Berlin.
- DWA [Hrsg.] (2005): Arbeitsblatt DWA-A 138 – Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser. – Hennef.
- DWA [Hrsg.] (2006a): Dezentraler Hochwasserschutz. – Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz. – Hennef.
- DWA [Hrsg.] (2006b): DWA-Themen – Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. – Hennef.
- DWA [Hrsg.] (2006c): Mitgliederrundbrief. – Mai 2006. – Mainz.
- DWD (2005): KOSTRA-DWD-2000. – Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 – 2000) – Grundlagenbericht – Offenbach. – http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Hydrometeorologie/a_href_pages/KOSTRA-DWD-2000/Grundlagenbericht.pdf.
- DWD (2005): Mittelwerte der Periode 1961 bis 1990 – Download der Mittelwerte getrennt nach Elementen – Niederschlag. – http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/index_mittelwerte.htm.
- DWD (2007): 24.04.2007 Pressemitteilung: Deutscher Wetterdienst: Neue Fakten zum Klimawandel in Deutschland. – Anpassung an Klimaveränderung muss frühzeitig beginnen. – <http://www.dwd.de/de/Zusatzmenues/Presse/Mitteilungen/20070424.htm>.
- DWD (2007): Der KLIMA-Report 2006. – Offenbach. – <http://www.dwd.de/de/Zusatzmenues/Presse/Mitteilungen/20070424f.pdf>.
- DWD (2003): Ausgabe der Klimadaten: Normalwerte. – 10609 Trier-Petrisberg. – URL: http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/daten/online/nat/ausgabe_normwerte.htm.
- DYCK, S. & G. PESCHKE (1995): Grundlagen der Hydrologie. – 3., stark bearbeitete Auflage. – Berlin.
- EGERT, M. & E. JEDICKE (2001): Akzeptanz von Windenergieanlagen. – in: Naturschutz und Landschaftsplanung, 33, Heft 12. – 373-380.
- ENGEL, H. (2006): Hydrologie heute ... (und morgen?). – in: bfg (2006): Veranstaltungen – Gewässerkundliche Untersuchungen für verkehrliche und wasserwirtschaftliche Planungen an Bundeswasserstraßen. – Kolloquium am 17. Januar 2006 in Koblenz. – Koblenz. – 101-106.
- FBR [Hrsg.] (2002): fbr-top8 – Betriebs- und Regenwassernutzung für kleine und mittelständische Betriebe: wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll! – Frankfurt a.M..
- FISCHER, H. (1989): Rheinland-Pfalz und Saarland – Eine geographische Landeskunde. – Bundesrepublik Deutschland und Berlin (West), IV. – Darmstadt.
- FLOODSCAPE (2006): Latest Reports – Final Report. – <http://www.floodscape.net/newsite/modules/startpage/>. – abgerufen am 15.05.2007.
- FRANZ T. & V. KÜHN (2002): Entscheidungskriterien der dezentralen Abwasserbeseitigung. – in: Kommunalwirtschaft, 12/2002. – 775-784.
- GANTNER, K. (2002): Nachhaltigkeit urbaner Regenwasserbewirtschaftungsmethoden. – in: Hegemann, W., Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Berlin [Hrsg.]: Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Nr. 20. – Berlin. – http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=967682495&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=967682495.pdf.

- GANTNER, K. (2003a): Nachhaltigkeit urbaner Regenwasserbewirtschaftungsmethoden – Teil I: Grundlagen. – in: GWF Wasser, Abwasser, 144, Nr.3. – 240-245.
- GANTNER, K. (2003b): Nachhaltigkeit urbaner Regenwasserbewirtschaftungsmethoden. – Teil II: Entscheidungsmatrix zur Nachhaltigkeit dezentraler Regenwasserbewirtschaftungsmethoden im Raum Berlin/Brandenburg. – in: GWF Wasser Abwasser, 144, Nr. 5. – 365-370.
- GEOTOMO: <http://www.geoelectrical.com>. – RES2DINV Description. – abgerufen am 04.03.2007.
- GIERTZ, S. (2004): Analyse der hydrologischen Prozesse in den sub-humiden Tropen Westafrikas unter besonderer Berücksichtigung der Landnutzung am Beispiel des Aguima-Einzugsgebietes in Benin. – Bonn, Dissertation.
- GIESELER, O. (2001): Vorbeugender Hochwasserschutz – dargestellt am Retentionskataster Hessen. – UBA-Texte 14/01: Workshop Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene. 13. und 14. Dezember 2000 in Dresden. – Berlin.
- Göbel, P., Stubbe, H., Weinert, M., Zimmermann, J., Fach, S., Dierkes, C., Kories, H., Messer, J., Mertsch, V., Geiger, W.F. & W.G. Coldewey (2004): Near-natural stormwater management and its effects on the water budget and groundwater surface in urban areas taking account of the hydrogeological conditions. – in: Journal of Hydrology, 299. – 267-283.
- GROTEHUSMANN, D. & M. UHL (2006): Versickerungsanlagen. – in: DWA [Hrsg.] (2006): Versickerung und dezentrale Rückhaltung von Regenabflüssen am 05. September 2006 in Hannover. – Hennef. – 1-16.
- GUJER, W. (2002): Siedlungswasserwirtschaft. – 2. Auflage. – Berlin.
- GUJER, W. (2007): Siedlungswasserwirtschaft. – 3., bearbeitete Auflage. – Berlin.
- GUTSCH, A. & F.-P. HEIDENREICH [Hrsg.] (2001): Deutsche Bundesstiftung Umwelt: Initiativen zum Umweltschutz, 23: Innovation Wasser – Beispielhafte Projekte aus den Bereichen Gewässer und Wasser. – Berlin.
- HAMACHER, R. (2000): Bau- und Betriebskosten von Anlagen zur Regenwasserversickerung. – in: KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall, Nr. 4. – 560-568.
- HARDER, A. (2000): Wetter und Witterung unter besonderer Berücksichtigung des Wetterzustandes (ww) aus synoptischen Meldungen der Station Trier-Petrisberg. – Universität Trier, unveröffentlichte Diplomarbeit.
- Hauck, C., Kurz, G., Schmalholz, J., Kneisel, C., Mayer, M., Hübner, C., Heidt, S., Königer, F., Schlaeger, S., Schuhmann, S., Kalthoff, N. & C. Kottmeier (2005): Vergleich elektrischer und dielektrischer Verfahren zur Bestimmung der Bodenfeuchte – das Projekt MESMERISE. – Proceedings 65th Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG), Graz, Austria. – 120-121.
- HEATH, R.C. (1988): Einführung in die Grundwasserhydrologie. – München, Wien, Oldenbourg.
- HEIDEN, S., ERB, R. & F. SIEKER [Hrsg.] (2001): Hochwasserschutz heute – Nachhaltiges Wassermanagement. – Initiativen zum Hochwasserschutz, Band 31, Berlin.
- HELBIG, A. (2002): Niederschlagsstruktur und Verdunstung im Raum Trier. – in: Müller, P., Rumpf, S. & H. Monheim [Hrsg.]: Umwelt und Region – Aus der Werkstatt des Sonderforschungsbereichs 522. – Trier. – 21-28.
- HELBIG, A. (2004): Analyse der raum-zeitlichen Struktur täglicher Niederschlagssummen in ausgewählten Teileinzugsgebieten des Rheins unter besonderer Berücksichtigung der

- Hochwasserereignisse im Zeitraum 1961 -1998. – in: KHR: Bericht I-21, Teil A2.1, Lelystad. – A2.1-1-A2.1-23.
- HELBIG, A., LICHT, K., JUNK, J., BAREISS, J. & J. LÜERS (2002): Regionalklima, Strömungsfeld und Ausbreitungsbedingungen im Raum Trier. – in: Umwelt und Region – Umweltanalyse und Umweltmanagementstrategien für eine Nachhaltige Entwicklung im ländlichen Raum – Ergebnisbericht der ersten Förderphase 1999/2 – 2002/1. – http://www.uni-trier.de/~sfb522/publikationen/ergebnis/B1_Helbig.pdf.
- HERPERTZ, D. & P. KRAHE (2004): Ein konzeptioneller mesoskaliger Niederschlag-Abfluss-Modellansatz im oberen Einzugsgebiet der Blies. – in: KHR: Bericht I-21, Teil A3.1, Lelystad. – A3.3-1-A3.3-13.
- HERZOG, J. & G. MÜLLER-WESTERMEIER (1998): Homogenitätsprüfung und Homogenisierung klimatologischer Messreihen im Deutschen Wetterdienst. – in: DWD [Hrsg.]: Berichte des Deutschen Wetterdienstes, Heft 202, Offenbach am Main.
- HEYER (Heyer Umwelt- und Geotechnik GmbH) (2001). Städtebauliche Entwicklung Petrisberg, Stadt Trier – Untersuchungen zur Versickerungsfähigkeit des oberflächennahen und tieferen Untergrundes. – Konz, unveröffentlichter Bericht.
- HIERLMEIER, R. (2004): Regenwasserbewirtschaftung auf dem Petrisberg in Trier – wasserwirtschaftliche Planung im Spannungsfeld von Funktionssicherheit, Naturnähe und Gestaltungsansprüchen. – in: ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. [Hrsg.]: 3. Regenwassertage – 14.-15.06.2004 in Trier. – Hennef. – 189-204.
- HILLENBRAND, T. & E. BÖHM (2004): Kosten-Wirksamkeit von Maßnahmen im Bereich der Regenwasserbehandlung und -bewirtschaftung. – in: KA – Abwasser, Abfall. Nr. 8. – 837-844.
- HILLENBRAND, T. & H. HIESSL (2006): Sich ändernde Planungsgrundlagen für Wasserinfrastruktursysteme – Teil 1: Klimawandel, demographischer Wandel, neue ökologische Anforderungen. – in: KA Abwasser Abfall, Nr. 12. – 1265-1271.
- HIRSCHMANN, F.G. (2004): Der Ausbau des Petrisbergs im 19. und 20. Jahrhundert. – in: Hirschmann, F.G., Benner, S., Bollmann, J., Clemens, L., Eitel, J., Escher-Apsner, M., Löhr, H., Müller, A. & R. Vollmer (2004): Der Petrisberg – Triers Ursprung und Zukunft. – Trier. – 19-25.
- HOFFMANN, A. (2001): Wasserwirtschaft im Wandel. – in: Kasseler Wasserbau-Mitteilungen Heft 12. – <http://www.upress.uni-kassel.de/publi/abstract.php?978-3-930150-22-9>.
- HÖLTING, B. (1996): Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. – 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. – Stuttgart.
- IFS (2002): erwin Regenwasserbewirtschaftung. – Programmhandbuch. – Hannover.
- IKT (2001): Durchflussmesseinrichtungen von Regenentlastungsbauwerken – Abschlussbericht. – Gelsenkirchen. – <http://www.ikt.de/down/f0036langbericht.pdf>.
- JACOBITZ, K. (1995): Regenwasserbewirtschaftung – ein Mittel zum Ausgleich menschlicher Eingriffe in den Wasserkreislauf. – in: Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz [Hrsg.] (1995): Symposium Regenwassernutzung – Ökologisch sinnvoll oder Umweltschutz um jeden Preis? – Mainz. – 9-26.
- KA (1999): Arbeitsbericht der ATV-AG „Hydrologie der Stadtentwässerung“. – in: Korrespondenz Abwasser, 46, Nr.4. – 575-580.

- KAISER, O. (2004): Das Bürgerprojekt „StadtGewässer“ – Neue Ansätze zur Bewertung und Entwicklung urbaner Fließgewässer. – in: Regio Basiliensis, Basler Zeitschrift für Geographie. – 45. Jahrgang, Heft 3, 2004. – 163-174.
- KATZENMAIER, D., FRITSCH, U. & A. BRONSTERT (2001): Quantifizierung des Einflusses von Landnutzung und dezentraler Versickerung auf die Hochwasserentstehung. – in: Heiden, S., Erb, R. & F. Sieker [Hrsg.] (2001): Hochwasserschutz heute – Nachhaltiges Wassermanagement. – Initiativen zum Hochwasserschutz, Band 31, Berlin. – 327-367.
- KAUSCH, B. (2006): Geoarchäologische Untersuchungen an Schwemmfächern als korrelierte Sedimentkörper holozäner Bodenerosion zur Erfassung morphodynamischer Prozessphasen in der Region Trier. – Trier, Dissertation. – http://ubt.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2006/370/pdf/Dissertation_Kausch.pdf.
- KHR (2004): Entwicklung einer Methodik zur Analyse des Einflusses dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen auf den Abfluss des Rheins. – Lelystad.
- KLEEBERG, H.-B. & K.-H. ROTHER (1996): Hochwasserflächenmanagement in Flusseinzugsgebieten. – in: Wasser & Boden, 48/2. – 24-32.
- KLEEBERG, H.-B. & W. WILLEMS (2001): Trends und Ursache-Wirkungs-Beziehung bei Hochwasser. – in: Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft [Hrsg.]: Wasser – Katastrophe – Mensch. – Internationales Wasserbausymposium Aachen 2001, 31. IWASA. – Aachen. – 29-48.
- KLEMEŠ, V. (1986): Operational testing of hydrological simulation models. – in: Hydrological Sciences Journal, 31. – 13-24.
- KLIWA 2006: Unser Klima verändert sich. Folgen – Ausmaß – Strategien. – Karlsruhe, Augsburg. – <http://www.kliwa.de/download/KLIWA.pdf>.
- KNEISEL, C. (2002): Anwendung geoelektrischer Methoden in der Geomorphologie – dargestellt anhand verschiedener Fallbeispiele. – Trierer Geographische Studien, 25. – 7-20.
- KNEISEL, C., MÜLLER, C. & S. WINTRICH (2007): Erfassung der Feuchteverteilung im Boden und einer Versickerungsmulde mit Hilfe der geoelektrischen Widerstandstomographie. – in: Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz [Hrsg.] (2007): "Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen". – in: Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 64/07. – Trippstadt. – 191-198.
- KNÖDEL, K., KRUMMEL, H. & G. LANGE (2005): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. – Band 3, Geophysik, 2. überarbeitete Auflage. – Berlin, Heidelberg.
- KOEHLER, G. & B. MARENBACH (2001): Wirkung von Retentionsmaßnahmen in den Talauen. – in: Heiden, S., Erb, R. & F. Sieker [Hrsg.] (2001): Hochwasserschutz heute – Nachhaltiges Wassermanagement. – Initiativen zum Hochwasserschutz, Band 31, Berlin. – 359-373.
- KOEHLER, G. (1992): Auswirkungen verschiedener anthropogener Veränderungen auf die Hochwasserabflüsse im Oberrheingebiet. – in: Wasser & Boden, 44/1. – 11-15.
- KOEHLER, G. (1998): Überörtliche Auswirkung der Abkopplung von Siedlungsflächen auf die Hochwasserabflüsse am Beispiel der Rems. – Workshop „Hochwasserreduzierung durch dezentrale Maßnahmen“ in Weiskirchen, Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

- KOEHLER, G. (2005): Vorbeugender Hochwasserschutz durch Maßnahmen in der Fläche. – in: ATV-DVWK [Hrsg.]: Internationales Symposium: Wasserwirtschaft in der Fläche. – 27./28. Januar 2005 im Europäischen Patentamt in München. – 117-122.
- KOEHLER, G. (2006): Dezentraler Hochwasserschutz – Einführung und Grundlagen. – in: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. [Hrsg.] (2006): Dezentraler Hochwasserschutz. – Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz. – Hennef. – 5-17.
- KOLLMANN, M. (1997): Die 6. Novelle zum Wasserhaushaltsgesetz. – in: Wasser & Boden, 1. – 7-11.
- KONZ, K. (2003): Sedimentologische Untersuchungen an holozänen Kolluvien im oberen Einzugsgebiet des Brettenbach auf dem Tarforster Plateau. – Trier, unveröffentlichte Diplomarbeit.
- KRAFT, H. (1984): Verdunstungsleistung von Limnophyten bei der Abwasserreinigung in hydrobotanischen Kläranlagen. – Wasser-Abwasser-Forschung, Heft 17. – 12-15.
- KRONEWIRTH, J. & S. WINTRICH (2007): Akzeptanz von Maßnahmen zur Retention von Niederschlagswasser in Siedlungsgebieten – Handlungsempfehlungen für Kommunen. – in: Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz [Hrsg.] (2007): "Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen". – in: Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 64/07. – Trippstadt. – 211-217.
- LAWA (1995): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. – Stuttgart.
- LAWA (2003): Instrumente und Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. – Düsseldorf.
- LEIBUNDGUT, CH. & S. UHLENBROOK (1997): Abflußbildung bei Hochwasser. – in: Ministerium für Umwelt und Forsten [Hrsg.]: Materialien zum Hochwasserschutz am Rhein. – Mainz.
- LEONHARDT, S. (1998): Einsatz des Mulden-Rigolen-Systems in einem schichtenwassergefährdeten Gebiet. – Dresden, Diplomarbeit.
- LICHT, K. (2005): Die raumzeitliche Ausprägung des Klimas in der Region Trier in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts – Eine regionalklimatische Analyse mit Trenduntersuchungen zum Nachweis einer Klimaänderung. – Aachen.
- LOHAUS, I. (2006): Dezentrale Rückhaltung und verzögerte Ableitung – Gestaltungspotentiale. – in: DWA (2006): Versickerung und dezentrale Rückhaltung von Regenabflüssen am 05. September 2006 in Hannover.
- LÖHR, H. (1998): Drei Landschaftsbilder zur Natur- und Kulturgeschichte der Trierer Talweite. – in: Rheinisches Landesmuseum Trier [Hrsg.] (1998): Funde und Ausgrabungen im Bezirk Trier. – Band 30, Trier. – 7-27.
- LÖHR, H. (2004): Archäologie. – in: Hirschmann, F.G., Benner, S., Bollmann, J., Clemens, L., Eitel, J., Escher-Apsner, M., Löhr, H., Müller, A. & R. Vollmer (2004): Der Petrisberg – Triers Ursprung und Zukunft. – Trier. – 1-4.
- LONDONG, D. (1993): Strategien zur Dämpfung des Hochwasserabflusses beim Umbau des Emschersystems. – in: TB 51 des Instituts für Wasserbau der TH Darmstadt. – 115-137.

- LONDONG, D. (1999): Die finanzielle Seite – Kosten und Finanzierung. – in: Londong, D. & A. Nothnagel [Hrsg.] (1999): Bauen mit dem Regenwasser – Aus der Praxis von Projekten. – München, Wien, Oldenbourg. – 116-122.
- LÜERS, J. (2003): Agrarklimatologische und phänologische Auswertungen für das Mittlere Moseltal – Auswirkungen des Klimawandels auf die Weinrebe im Moselraum. – Dissertation, Trier.
- MAHABADI, M. (2001): Regenwasserversickerung in Stichworten – Planungsgrundsätze und Bauweisen. – Braunschweig.
- MANIAK, U. (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft. – Eine Einführung für Ingenieure. – 5., bearbeitete und erweiterte Auflage. – Berlin, Heidelberg.
- MARENBACH, B. & G. KOEHLER (2003): Örtliche und überörtliche Wirkung zentraler und dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. – in: Wasser & Boden, 55/7+8. – 22-26.
- MATTHEß, G. & K. UBELL (2003): Lehrbuch der Hydrogeologie. – Band 1: Allgemeine Hydrogeologie – Grundwasserhaushalt. – 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. – Berlin, Stuttgart.
- MEIJERING, M.P.D. (1995): Hochwasserrückführung im Gelstertal – Schlußfolgerungen aus einer Einzugsgebietsanalyse. – Hochwasserschutz; Kasseler Wasserwirtschaftliches Symposium 1994, Mitteilungen, Heft 2/1995. – 195-203.
- MENDEL, H.G. (1996): Hochwasser. – Gedanken über Ursachen und Vorsorge aus hydrologischer Sicht. – Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG-1022, Koblenz.
- MENDEL, H.G. (2000): Elemente des Wasserkreislaufs – Eine kommentierte Bibliographie zur Abflußbildung. – Berlin.
- MENDEL, H.-G. (2005): Hochwasser in bewaldeten Einzugsgebieten – Eine Bestandsaufnahme. – in: Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg [Hrsg.]: Dezentraler Hochwasserschutz in kleinen bewaldeten Einzugsgebieten – Beiträge zum Kolloquium am 05. und 06. März 2004 an der Fachhochschule Rottenburg. – Rottenburg. – 3-50.
- MICHALSKI, J. (2005): Umgesetzte Maßnahmen zur Retention von Niederschlagswasser in Siedlungsgebieten. – Eine Akzeptanzstudie am Beispiel der Neubaugebiete BU 11 – Östlich Olbeschgraben, Trier-Tarforst und Langenberg IV, Konz-Roscheid. – Universität Trier, unveröffentlichte Diplomarbeit.
- MILKE, H. (1995): Erfahrungen bei Planung und Bau von Mulden-Rigolen-Systemen. – in: Korrespondenz Abwasser, 42. – 919-928.
- MUF RLP [Hrsg.] (1996): Luftreinhalteplan Trier-Konz. – Mainz. – 1990-1996.
- MÜLLER, M., MOHNKE, O. SCHMALHOLZ, J. & U. YARAMANCI (2003): Moisture assessment with small-scale geophysics – The Interurban Project. – Near Surface Geophysics, 1, No. 4. – 173-181.
- MÜLLER, M.J. (1976): Untersuchungen zur pleistozänen Entwicklungsgeschichte des Trierer Moseltals und der „Wittlicher Senke“. – Zentralausschuß für deutsche Landeskunde [Hrsg.]: Forschungen zur deutschen Landeskunde, Band 207. – Trier.
- MÜLLER, M.J. (1979): Die Reliefentwicklung im Trierer Raum. – in: Beiträge zur Trierischen Landeskunde – Unterrichtsmaterialien für Geschichte und Geographie. – Trier. – 345-352.
- MÜLLER-WESTERMEIER, G. & W. RIECKE (2005): Die Witterung in Deutschland. – in: DWD [Hrsg.]: Klimastatusbericht 2005. – Offenbach. – 75-86. – http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/KSB/ksb05/01g_2005.pdf.

- NEGENDANK, J.F.W. (1983): Trier und Umgebung. – Sammlung geologischer Führer, Band 60. – Berlin.
- NEY (2003): Naturnahe Aufbereitung von gereinigtem Abwasser zur Revitalisierung von Fließgewässern und Auen und zur Effizienzsteigerung der Abwasserbehandlung. – Trier, Dissertation.
- NEY, A. & A. SIEGL (2003): Stofffrachten als Grundlage der Bewertung von Pflanzenkläranlagen. Eingereicht bei Wasser & Boden. – in: Ney, A. (2003): Naturnahe Aufbereitung von gereinigtem Abwasser zur Vitalisierung von Fließgewässern und Auen und zur Effizienzsteigerung der Abwasserbehandlung. – Dissertation, Universität Trier.
- NIEHOFF, D. (2002): Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala. – in: Brandenburgische Umweltberichte, 11, Potsdam.
- NÜTZMANN, G. (o. J.): Skript „Einführung in die Hydrologie“ – Kapitel 4 – Abfluss und Oberflächenengewässer. – <http://www.igb-berlin.de/abt1/mitarbeiter/nuetzmann/skript/kap4.pdf>.
- OSTROWSKI, M.W. (2001): Modellierung hydrologischer Prozesse in urbanen Gebieten in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen. – in: Heiden, S. Erb, R. & F. Sieker [Hrsg.] (2001): Hochwasserschutz heute – Nachhaltiges Wassermanagement. – Initiativen zum Hochwasserschutz, Band 31, Berlin. – 181-196.
- ØVERLAND, H. (2005): Gesamträumliche Koordination dezentraler Maßnahmen zum vorbeugenden Hochwasserschutz in der Regionalen Landentwicklung Auerbergland. – in: Berichte zur Ländlichen Entwicklung, 83. – 50-60.
- PATT, H. [Hrsg.] (2001): Hochwasser-Handbuch – Auswirkungen und Schutz. – Berlin, Heidelberg.
- RAPP, J. & C.-D. SCHÖNWIESE (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. – Frankfurter geowissenschaftliche Arbeiten, Serie B, Meteorologie und Geophysik, Band 5. – 2., korrigierte Auflage. – Frankfurt a.M..
- REFSGAARD, J. C. (1997): Parametrisation, calibration and validation of distributed hydrological models. – in: Journal of Hydrology, 198. – 69-97.
- REFSGAARD, J.C. & B. STORM (1996): Construction, Calibration and Validation of Hydrological Models. – in: Abbott, M. B. & J. C. Refsgaard [Hrsg.]: Distributed Hydrological Modelling. – Kluwer, Dordrecht. – 41-54.
- REFSGAARD, J.C. (1996): Terminology, modelling protocol and classification of hydrological models code. – in: Abbott, M.B. & J.C. Refsgaard [Hrsg.]: Distributed Hydrological Modelling. – Dordrecht. – 17-39.
- REMBIERZ, W. (2000): Vorbeugender Hochwasserschutz – Handlungsmöglichkeiten der Gemeinden. – in: UBA [Hrsg.] (2001): UBA-Texte 14/01 – Workshop "Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene", 13./14.12.2000 in Dresden. – 5-13.
- REMMLER, F., HÜTTER, U. & A. STECKER (1998): Hydraulische Untersuchungen an einem Mulden-Rigolen-System. – in: Korrespondenz Abwasser, 45, Nr.4. – 657-669.
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. – in: DWD [Hrsg.]: Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 194, Offenbach am Main.
- RICHTER, G. (1984): Der Landschaftsraum Trier. – in: Jätzold, R. [Hrsg.]: Der Trierer Raum und seine Nachbargebiete. – Trierer Geographische Studien, Sonderheft 6. – Trier. – 11-27.
- RICHTER, W. & W. LILICH (1975): Abriß der Hydrogeologie. – Stuttgart.

- RIPL, W. & K.-D. WOLTER (2003): Intakter Wasserhaushalt und Hochwasserschutz. – in: *Wasser & Boden*, 55/7+8. – 15-21.
- ROTHER, K.-H. (2006): Auswirkungen von Klimaänderungen und Hochwasserschutz. – in: *Bundesanstalt für Gewässerkunde Hrsg.]: Gewässerkundliche Untersuchungen für verkehrliche und wasserwirtschaftliche Planungen an Bundeswasserstraßen. – Kolloquium am 17. Januar 2006 in Koblenz. – Koblenz.*
- RÖTTCHER, K. (2005): Dezentrale und zentrale Rückhaltmaßnahmen für den Hochwasserschutz – Untersuchungen am Beispiel der Erpe. – in: *Wasser und Abfall*, 5. – 11-15.
- RÖTTCHER, K. (2006): Bewertung und Kosten dezentraler Hochwasserschutzkonzepte. – in: *DWA [Hrsg.] (2006): Dezentraler Hochwasserschutz. – Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz. – Hennef. – 99-110.*
- RÖTTCHER, K., KLEEBERG, H.-B. & G. KOEHLER (2006): Vorwort. – in: *DWA [Hrsg.] (2006): Dezentraler Hochwasserschutz. – Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz. – Hennef. – 1-2.*
- SARTOR, J. (2001): Die Bedeutung der Wasserbilanz in der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. – in: *Heiden, S., Erb, R. & F. Sieker [Hrsg.] (2001): Hochwasserschutz heute – Nachhaltiges Wassermanagement. – Initiativen zum Hochwasserschutz, Band 31, Berlin. – 287-308.*
- SARTOR, J. (2002): Ist die Regenwasserversickerung von bebauten Flächen wirklich naturnah? – http://www.fh-trier.de/fileadmin/groups/11/bauingenieurwesen/Personen/sartor/Forschung/V_24_1_Regenwasservers.pdf.
- SCHEID, A. (2007): N-A-Modellierung auf dem Petrisberg? Herausforderungen und Lösungsansätze. – Trier, unveröffentlichte Diplomarbeit.
- SCHLICK, C. (2007): Demonstrationsanlage zur Veranschaulichung naturnaher Regenwasserbewirtschaftung – Im Spannungsfeld von Umweltbildung und wissenschaftlichen Anspruch. – Trier, unveröffentlichte Diplomarbeit.
- SCHLOTTMANN, P., SIEKER, H., ZWEYNERT, U. & F. SIEKER (2007): Zielgrößen und Anforderungen an die künftige Regenwasserbewirtschaftung in Neubau-, Erweiterungs- und Sanierungsgebieten – Teil II: Ökologisch-Ökonomischer Vergleich zwischen der konventionellen Regenwasserentsorgung und der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung. – in: *GWF Wasser, Abwasser*, 148, Nr.1. – 59-70.
- SCHMITT, T. G. (2001): Regenwasserbewirtschaftung als Beitrag der Siedlungswasserwirtschaft zur ökologischen Stadtentwicklung. – in: *Koch, M. [Hrsg.]: Ökologische Stadtentwicklung. – Innovative Konzepte für Städtebau, Verkehr und Infrastruktur. – Stuttgart, Berlin, Köln. – 78-87.*
- SCHMITT, T. G. (2002): Standortbestimmung zur Regenwasserbehandlung. – in: *35. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. – GWA Heft 188, Essen. – 22/1-22/22.*
- SCHMITT, T. G. (2006): Klimaveränderungen – Konsequenzen für die Siedlungsentwässerung? – in: *Wasser Abwasser*, 147, 3. – 210-214.
- SCHNEIDER, F. (1999): Meßtechnische Untersuchung und modelltechnische Beschreibung des Speicher- und Abflußverhaltens von Mulden-Rigolen-Systemen. – in: *Verworn, H.-R. [Hrsg.]: Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Heft 20. – Hannover.*
- SCHNEIDER, F., HOLTZ, S. & R. MASBERG (1998): Investigation and development of alternative stormwater management: modelling the waterflow of trough-trench-systems. –

- NOVATECH 1998: les nouvelles technologies en assainissement pluvial (Lyon, 4-6 mai 1998) (Innovative technologies in urban storm drainage). – Kongressbeitrag.
- SCHNEIDER, R., TRESSEL, E. & D. SCHRÖDER (2005): Böden im Trierer Raum unter bodenschonender Nutzung und ihre Bedeutung für den Wasserrückhalt in der Fläche. – in: Geographische Gesellschaft Trier [Hrsg.] (2005): Trierer Geographische Studien, Heft 28. – Becker, C. [Hrsg.]: GrenzTouren – Exkursionen zwischen Maas, Mosel, Saar und Rhein. – Trier. – 77-112.
- SCHNEIDER, W. (1999): Vom Modellprojekt zur Routine – Das Thema Regenwasser im Projektmanagement. – in: Londong, D. & A. Nothnagel [Hrsg.] (1999): Bauen mit dem Regenwasser – Aus der Praxis von Projekten. – München, Wien, Oldenbourg. – 30-38.
- SCHOBEL, S., ALTMEIER, J., SCHNEIDER R. & D. SCHRÖDER (2002): Infiltrations- und Bodenabflussprozesse bei unterschiedlicher Landnutzung und verschiedenen Substraten. – in: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 96. – 119-120.
- SCHRÖDER, D. (1983): Böden des Trierer Raumes. – in: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. – Exkursionsführer zur Jahrestagung 1983 in Trier. – Band 37, Trier. – 159-284.
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. – in: Zürcher Geographische Schriften, Heft 69, Zürich.
- SCHWANDT, D. (2004): Abflußentwicklung in Teileinzugsgebieten des Rheins – Simulationen für den Ist-Zustand und für Klimaszenarien. – Potsdam, Dissertation. – <http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr88.pdf>.
- SCHWEIZER, P. (1996): Psychologische Faktoren bei der Nutzung regenerativer Energien: Eine Studie zum Einsatz von Solartechnik im Zentralen Himalaya. – Heidelberg.
- SDF: Arbeitsgruppe 3 "Kommunikation und Bürgerbeteiligung" (WG 3). – <http://www.sdfproject.nl> /portal/alias__Rainbow/lang__de-DE/tabID__3355/DesktopDefault.aspx. – und: http://www.sdfproject.nl/_Rainbow/Documents/SDF_Floodplains_Duits.pdf. – 8-9. – abgerufen am: 28.12.2006.
- SEVRUK, B. (1981): Methodische Untersuchungen des systematischen Messfehlers der Hellmann-Regenmesser im Sommerhalbjahr in der Schweiz. – Zürich, Dissertation.
- SIEKER, F. (1996a): Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung als Beitrag der Siedlungswasserwirtschaft zur Hochwasserdämpfung. – noch unveröffentlichtes Manuskript des IFW der Universität Hannover.
- SIEKER, F. (1996b): Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten – Ein Beitrag zur Dämpfung extremer Hochwasserereignisse? – in: Geowissenschaften, 14, Heft 12. – 531-538.
- SIEKER, F. (2000): Hochwasservorsorge durch dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten – Empfehlungen an die Kommunen. – Beitrag zum Workshop "Vorbeugender Hochwasserschutz auf kommunaler Ebene" 13./14.12.2000 in Dresden. – 70-77.
- SIEKER, F. (2001a): Evolution in der Siedlungswasserwirtschaft: Das Zeitalter der strikten Regenwasserableitung geht zu Ende. – in: Heiden, S., Erb, R. & F. Sieker [Hrsg.] (2001): Hochwasserschutz heute – Nachhaltiges Wassermanagement. – Initiativen zum Hochwasserschutz, Band 31, Berlin. – 29-56.

- SIEKER, F. (2001b): Innovative Hochwasserreduzierung durch dezentrale Maßnahmen am Beispiel der Saar. – DBU Projekt AZ07147, Endbericht.
- SIEKER, F. (2001c): Generelle Planung der Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten. – in: Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt, Heft 116, Darmstadt.
- SIEKER, F. (2004): Regen(ab)wasserbehandlung und -bewirtschaftung unter Berücksichtigung der Anforderungen nach § 7a WHG und einer möglichst ortsnahen Versickerung. – UBA-Texte 09/04. – Berlin.
- SIEKER, F. (2005): Dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen in Siedlungsgebieten können sich auch auf extreme Hochwasser signifikant mindernd auswirken und zwar hinsichtlich der Rückhaltekapazität in der gleichen Größenordnung wie übliche flussbauliche Maßnahmen (Polder, Deichrückverlegungen etc.). – <http://www.sieker.de/uploads/54bcc24e-53c6-ac9a.pdf>.
- SIEKER, F., KAISER, M. & H. SIEKER (2006): Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung im privaten, gewerblichen und kommunalen Bereich. – Grundlagen und Ausführungsbeispiele. – Stuttgart.
- SIEKER, F., SIEKER, H., BANDERMANN, S., HUHN, V. & A. STECKER (2003): Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten. – Grundlagen und Anwendungsbeispiele – Neue Entwicklungen. – 3. Auflage. – Renningen.
- SIEKER, F., SIEKER, H., ZIMMERMAN, U. & H. SOMMER (2004): Vorbeugender Hochwasserschutz als Nebenwirkung dezentraler Regenwasser-Bewirtschaftungsmaßnahmen in Siedlungsgebieten. – in: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 5. – 185-189.
- SIEKER, F., ZIMMERMAN, U. & H. SOMMER (2005): Entwicklung eines Planungsinstrumentes zur flächenbezogenen Regenwasserbewirtschaftung unter besonderer Berücksichtigung des vorbeugenden Hochwasserschutzes. – in: Wasserwirtschaft, 3. – 7-14.
- SIEKER, H. & D. WILCKE (2006): Möglichkeiten der Hochwasserminderung im urbanen Bereich. – in: DWA [Hrsg.] (2006): Dezentraler Hochwasserschutz. – Beiträge zum Seminar am 16./17. Oktober 2006 in Koblenz. – Hennef. – 19-32.
- SIEKER, H., FÖRSTER, M., SCHEIBEL, M. & U. ZIMMERMANN (2005): DAYWATER – ein Entscheidungshilfesystem für die Bewirtschaftung von Regenwasser. – in: WasserWirtschaft, 3/2005. – 15-22.
- SOMMER, H., ENGEL, N., REHFELD-KLEIN, M. & F. SIEKER (2002): Messtechnische Untersuchungen zur Funktion eines Mulden-Rigolen-Systems. – in: GWF Wasser Abwasser, 143, Nr. 12. – 864-871.
- STADT TRIER (2002): 49. Flächennutzungsplanänderung im Bereich „Petrisberg“ – Erläuterungsbericht. – http://www.trier.de/dezernat5/dezernat5/archiv/fnp49_erlaeuterungsbericht.pdf.
- STADT TRIER (2003): Bebauungsplan BU 18 “Konversion Petrisberg Belvedere-Süd“ – Begründung gem. § 9 Abs. 8 BauGB – Städtebaulicher Teil (Teil 1).
- STADT TRIER, AMT FÜR STADTENTWICKLUNG UND STATISTIK (2001): Bürgerbeteiligung zum Stadtteilrahmenplan Tarforst – Bürgergutachten Tarforst. – Trier. – http://www.trier.de/ortsbezirke/download/tarforst/bga_tarforst.pdf.
- STEINBERG, O. & W. BURGHARDT (1999): Vergleichende Untersuchung zur Varianz von Infiltrationsraten auf einem Sandboden in Abhängigkeit der Flächengröße des Überstauungsbereiches. – in: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 91/II. – 1116-1119.

- SYMADER, W. (2004): Was passiert, wenn der Regen fällt? – Einführung in die Hydrologie. – Stuttgart.
- THIEL, C. (2000): Vergleichende hydrologische Modellierung zweier Flusseinzugsgebiete unterschiedlicher Hydrodynamik (Zeulenroda, Thüringen & Mulargia, Sardinien) mit dem Modellsystem MMS/PRMS unter integrativer Verwendung von Geoinformationssystemen und Fernerkundungsdaten. – Friedrich-Schiller-Universität Jena, Diplomarbeit. – http://www.geogr.uni-jena.de/fileadmin/Geoinformatik/Lehre/Diplomarbeiten/DA_Thiel.pdf.
- TÖNSMANN, F. (1995): Studie zum Hochwasserschutz an der Bauna. – Materialien Band 3, Kassel.
- TÖPFER, K. (2005): Wie schafft eine Kommune Akzeptanz für ungewohnte Lösungen? – in: König, K.W. [Hrsg.]: Regenwasser dezentral bewirtschaften – Ratgeber für Kommunen und Planungsbüros. – Donaueschingen. – 20.
- TOURBIER, J.T. (2001): Ökologisch nachhaltige Niederschlagswasserbewirtschaftung als vorbeugender Hochwasserschutz und für die Aufwertung der Umwelt im städtischen Bereich. – in: Heiden, S., Erb, R. & F. Sieker [Hrsg.] (2001): Hochwasserschutz heute – Nachhaltiges Wassermanagement. – Initiativen zum Umweltschutz, Band 31. – Berlin. – 309-326.
- TWER, D. & W. BURGHARDT (1999): Auswirkungen von oberflächennahen Bodenverdichtungen auf die Infiltrationsleistung einer Regenwasserversickerungsmulde auf einem Lößlehm- und einem Sandboden. – in: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Bd.91/II. – Göttingen. – 1140-1143.
- UBA (2002): Leitfaden zur Beteiligung der Öffentlichkeit in Bezug auf die Wasserrahmenrichtlinie. – Aktive Beteiligung, Anhörung und Zugang der Öffentlichkeit zu Informationen (Übersetzung der englischen Originalfassung) – http://www.wrrl-info.de/docs/Leitfaden_Partizipation.pdf.
- UBA (2004): Hintergrundpapier: Flächenverbrauch, ein Umweltproblem mit wirtschaftlichen Folgen. – Berlin.
- UBA (2006): Übersicht über die Länderregelungen zur Versickerung von Niederschlagswasser (§ 33 Abs. 2 Nr. 3 WHG). – <http://www.umweltbundesamt.de/wasser/themen/gewschr/Matrix-Niederschlagswasser.pdf>.
- UHLENBROOK, S. & C. LEIBUNDGUT (1997): Abflußbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen. – in: Wasser & Boden, 9. – 13-22.
- URBAN WATER (2006): Nachhaltige Wasserwirtschaft im Ballungsraum. – UrbanWater - Ein europäisches Gemeinschaftsprojekt im Rahmen des INTERREG IIIB NWE-Programms. – Stadtentwicklung, Wasserwirtschaft und Kommunikationsstrategien integrieren. – http://www.urban-water.org/uploads/media/Brochure_Urban_Water_de.pdf.
- VERWORN, H.-R. & R.W. HARMS (1984): Urbanisierung und Hochwasserabfluß. – in: Wasser & Boden, 9. – 418-425.
- VERWORN, H.-R. (2000): Langzeitsimulation – Regendaten und Vorgehensweise. – in: Kleeberg, H.-B. [Hrsg.]: Niederschlag – Input für hydrologische Berechnungen, Neuauflage, Beiträge zum Seminar am 26./27. April in Magdeburg. – DWA-Heft 14.06. – Hennef.

- VISCHER, D. (1993): Versiegelung der Landschaft – größere Hochwässer? – in: gwa, 73, 4. – 280-283.
- VOGELANG, D. (1998): Grundwasser. – Berlin, Heidelberg.
- WEGNER, H. (1992): Dezentraler Hochwasserschutz. – in: Wasser & Boden, 1. – 6-10.
- WEIDENFELLER, M., LÖHR, H. & L. ZÖLLER (1994): Das Lößprofil Issel und seine Bedeutung für die Stratigraphie des jüngeren Quartärs der Mittelmosel. – in: Mainzer geowissenschaftliche Mitteilungen. – Band 23. – 139-152.
- WERBAN, U. (2005): Geophysikalische Erfassung von Feuchte- und Substratheterogenitäten im Boden auf unterschiedlichen Skalen. – Kiel, Dissertation.
- WERLE, O. (1979): Die naturräumliche Gliederung des Trierer Raumes. – in: Friedrich, L., Laufner, R., Rothenberger, K.-H., Schuhn, W. & O. Werle [Hrsg.]: Beiträge zur Trierischen Landeskunde – Unterrichtsmaterialien für Geschichte und Geographie –Trier. – 339-344.
- WILCKE, D., SIEKER, F., ZHENGYUE, J. & H. SIEKER (2007): Nachweis des Rückhaltevermögens dezentraler Regenwasserbewirtschaftungsanlagen in Siedlungsgebieten bei hochwasserverursachenden Niederschlägen – Dargestellt am Beispiel der sächsischen Mulde. – in: KA Abwasser, Abfall, 54, Nr. 3. – 247-259.
- WINTRICH, S. (2007): Informationsmedien zur Erhöhung der Akzeptanz von naturnaher Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten am Beispiel Trier-Petrisberg. – in: Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz [Hrsg.] (2007): "Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen". – in: Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 64/07. – Trippstadt. – 203-210.
- WINZIG, G. (1997): Untersuchung der Funktionsfähigkeit von dezentralen Regenwasserversickerungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Bodenwasserhaushaltes. – Aachen, Dissertation.
- WINZIG, G. (1999): Leistungsfähigkeit und Beeinträchtigung von Mulden-Rigolen-Systemen – Ein wissenschaftlicher Beitrag. – in: Londong, D. & A. Nothnagel [Hrsg.]: Bauen mit dem Regenwasser – Aus der Praxis von Projekten. – Minden. – 128-132.
- WINZIG, G., TÜSELMANN, J. & W. BURGHARDT (1999): Ermittlung der Versickerungsleistung von Böden als Grundlage für die Niederschlagsversickerung. – in: Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 91/II. – 1148-1151.
- WITTKKE, M. (1991): Instrumente des Konfliktmanagements, Tagungsunterlagen zum Seminar Umweltkonfliktmanagement, 07./08.02.1991. – Berlin.
- ZAHN, G. (1993): Analyse von Akzeptanzproblemen bei der Errichtung von Entsorgungsanlagen. – Bochum.
- ZIMMERMANN, U. (2001): Auswirkungen der Niederschlagswasserbewirtschaftung auf Hochwasserereignisse in großen Einzugsgebieten am Beispiel der Oberen Blies. – in: Heiden, S., Erb, R. & F. Sieker [Hrsg.] (2001): Hochwasserschutz heute – Nachhaltiges Wassermanagement. – Initiativen zum Hochwasserschutz, Band 31, Berlin. – 265-286.

Karten

NEGENDANK, J.F.W., FUCHS, G. & H.G. MITTMEYER (1983): Geologische Übersichtskarte – Rheinisches Schiefergebirge SW-Teil – Hochschulumgebungskarte Trier 1:100.000. – Stuttgart.

BÜRO ERNST (2003): Schnitt durch zwei Versickerungsterrassen und eine Gabionenmauer im Maßstab 1:50.

BGHPLAN (2005): Plan 2: Auszug Genehmigungsplanung Entwässerung, Entwässerungskonzept – 1. Änderung.

EGP (2005): Städtebauliches Gesamtkonzept.

Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abb. I:	2D-Widerstandstomogramme aus der oberen Quellmulde (Profil 8); gemessen am 05.05.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).....	160
Abb. II:	2D-Widerstandstomogramme von der oberen in die mittlere Quellmulde (Profil 2); gemessen am 20.03.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).	160
Abb. III:	2D-Widerstandstomogramm aus der mittleren Quellmulde (Profil 5); gemessen am 23.03.06 mit der Dipol-Dipol-Konfiguration.	161
Abb. IV:	2D-Widerstandstomogramme aus der mittleren Quellmulde (Profil 1); gemessen am 20.03.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).....	161
Abb. V:	2D-Widerstandstomogramme aus der mittleren Quellmulde (Profil 6); gemessen am 23.03.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).....	162
Abb. VI:	2D-Widerstandstomogramme aus der unteren Quellmulde (Profil 3); gemessen am 23.03.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).....	162
Abb. VII:	2D-Widerstandstomogramme aus der unteren Quellmulde (Profil 4); gemessen am 23.03.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).....	163
Abb. VIII:	2D-Widerstandstomogramme von der mittleren in die untere Quellmulde (Profil 7); gemessen am 05.05.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).	163
Abb. IX:	Zehn ausgewählte Niederschlagsereignisse aus dem Zeitraum 1967 - 1997. Links fünf Ereignisse aus den Winterhalbjahren, rechts fünf Ereignisse aus den Sommerhalbjahren.	164
Abb. X:	Häufigkeiten unterschiedlicher Füllstände in den Kaskadenmulden.	165
Abb. XI:	Nasser Oberboden der mittleren Quellmulde, 27.02.2006.	166
Abb. XII:	Sattes Grün nahe der Gabionenmauer mit <i>Lychnis flos-cuculi</i> als Wechselfeuchtezeiger, 30.05.2006.	166
Abb. XIII:	Verlauf der Grundwasserganglinien der Pegel P1 - P8 und die visuell ermittelte Einteilung in hydrologisches Winter- und Sommerhalbjahr.	167
Abb. XIV:	Gemessene und simulierte Ganglinien für PBD1 (oben) und PBD2 (unten) im hydrologischen Sommerhalbjahr 2005. (schwarz: gemessener Abfluss, rot: simulierter Abfluss bei PBD1, grün: simulierter Abfluss bei PBD2, blau: Niederschlag, schwarze Kreuze: fehlende Niederschlagsdaten).	168
Abb. XV:	Gemessene und simulierte Ganglinien für PBD1 (oben) und PBD2 (unten) im hydrologischen Winterhalbjahr 2005/2006. (schwarz: gemessener Abfluss, rot: simulierter Abfluss bei PBD1, grün: simulierter Abfluss bei PBD2, blau: Niederschlag, schwarze Kreuze: fehlende Niederschlagsdaten).	169
Abb. XVI:	Gemessene und simulierte Ganglinien für PBD1 (oben) und PBD2 (unten) im hydrologischen Sommerhalbjahr 2006. (schwarz: gemessener Abfluss, rot: simulierter Abfluss bei PBD1, grün: simulierter Abfluss bei PBD2, blau: Niederschlag, schwarze Kreuze: fehlende Niederschlagsdaten).	170

Abb. XVII:	Ausbauskizze des Pegels P1.....	171
Abb. XVIII:	Bohrprofil des Pegels P1.....	172
Abb. XIX:	Ausbauskizze des Pegels P2.....	174
Abb. XX:	Bohrprofil des Pegels P2.....	175
Abb. XXI:	Ausbauskizze des Pegels P3.....	177
Abb. XXII:	Bohrprofil des Pegels P3.....	178
Abb. XXIII:	Ausbauskizze des Pegels P4.....	180
Abb. XXIV:	Bohrprofil des Pegels P4.....	181
Abb. XXV:	Ausbauskizze des Pegels P5.....	184
Abb. XXVI:	Bohrprofil des Pegels P5.....	185
Abb. XXVII:	Ausbauskizze des Pegels P6.....	187
Abb. XXVIII:	Bohrprofil des Pegels P6.....	188
Abb. XXIX:	Ausbauskizze des Pegels P7.....	190
Abb. XXX:	Bohrprofil des Pegels P7.....	191
Abb. XXXI:	Ausbauskizze des Pegels P8.....	194
Abb. XXXII:	Bohrprofil des Pegels P8.....	195

Tabellenverzeichnis

Tab. I:	Schichtenverzeichnis des Pegels P1.....	173
Tab. II:	Schichtenverzeichnis des Pegels P2.....	176
Tab. III:	Schichtenverzeichnis des Pegels P3.....	179
Tab. IV:	Schichtenverzeichnis des Pegels P4.....	182
Tab. V:	Schichtenverzeichnis des Pegels P5.....	186
Tab. VI:	Schichtenverzeichnis des Pegels P6.....	189
Tab. VII:	Schichtenverzeichnis des Pegels P7.....	192
Tab. VIII:	Schichtenverzeichnis des Pegels P8.....	196
Tab. IX:	Schichtenverzeichnis des Pegels P9.....	198
Tab. X:	Schichtenverzeichnis des Pegels P10.....	199
Tab. XI:	Schichtenverzeichnis des Pegels P11.....	201
Tab. XII:	Schichtenverzeichnis des Pegels P12.....	202
Tab. XIII:	Schichtenverzeichnis des Pegels P13.....	203
Tab. XIV:	Übersicht über die Anzahl der Tage, an denen die Pegel infolge Einstau unter Wasser lagen (Betrachtungszeitraum: 01.11.2005-31.10.2006).....	204
Tab. XV:	Korrelationen zwischen den Pegeln.....	205
Tab. XVI:	Ermittlung des Grundwasserspiegelanstiegs anhand der Grundwasserstandsganglinien.....	206
Tab. XVII:	Simulationsergebnisse für den Zeitraum 1967 - 1997.....	207
Tab. XVIII:	Simulationsergebnisse für den Zeitraum 2005 - 2006.....	214

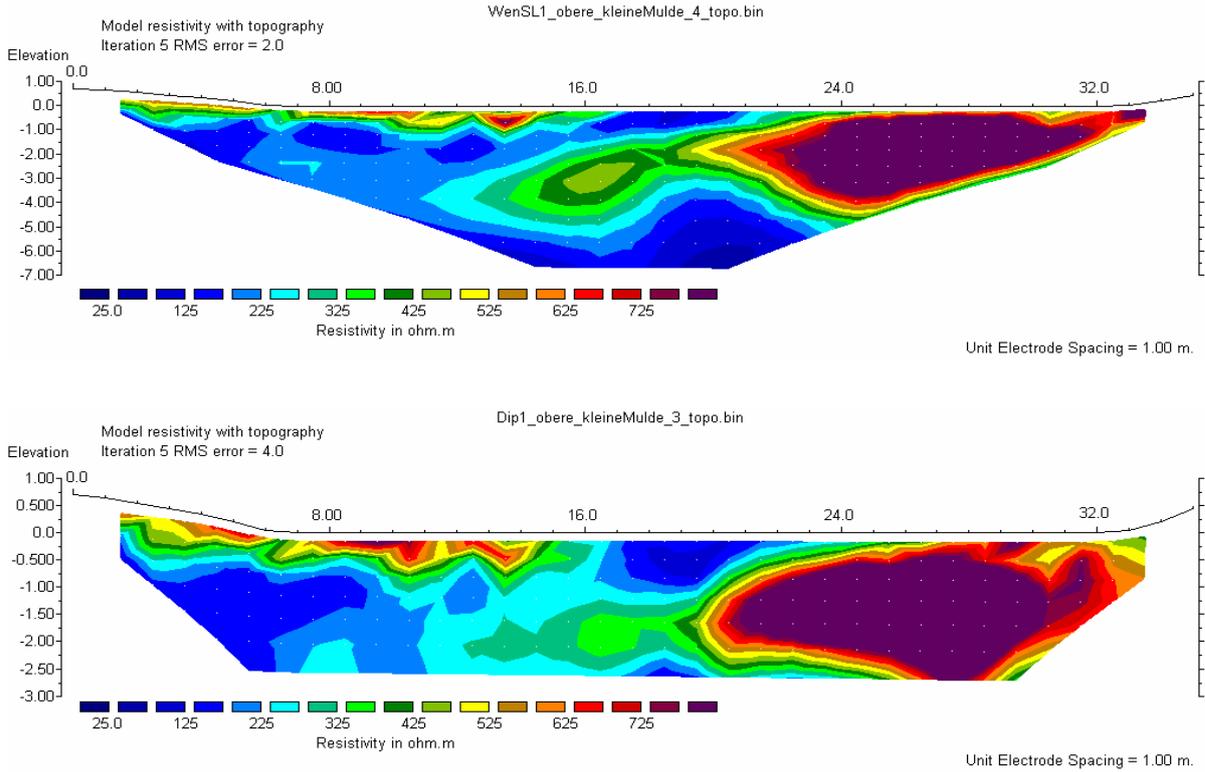


Abb. I: 2D-Widerstandstomogramme aus der oberen Quellmulde (Profil 8); gemessen am 05.05.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).

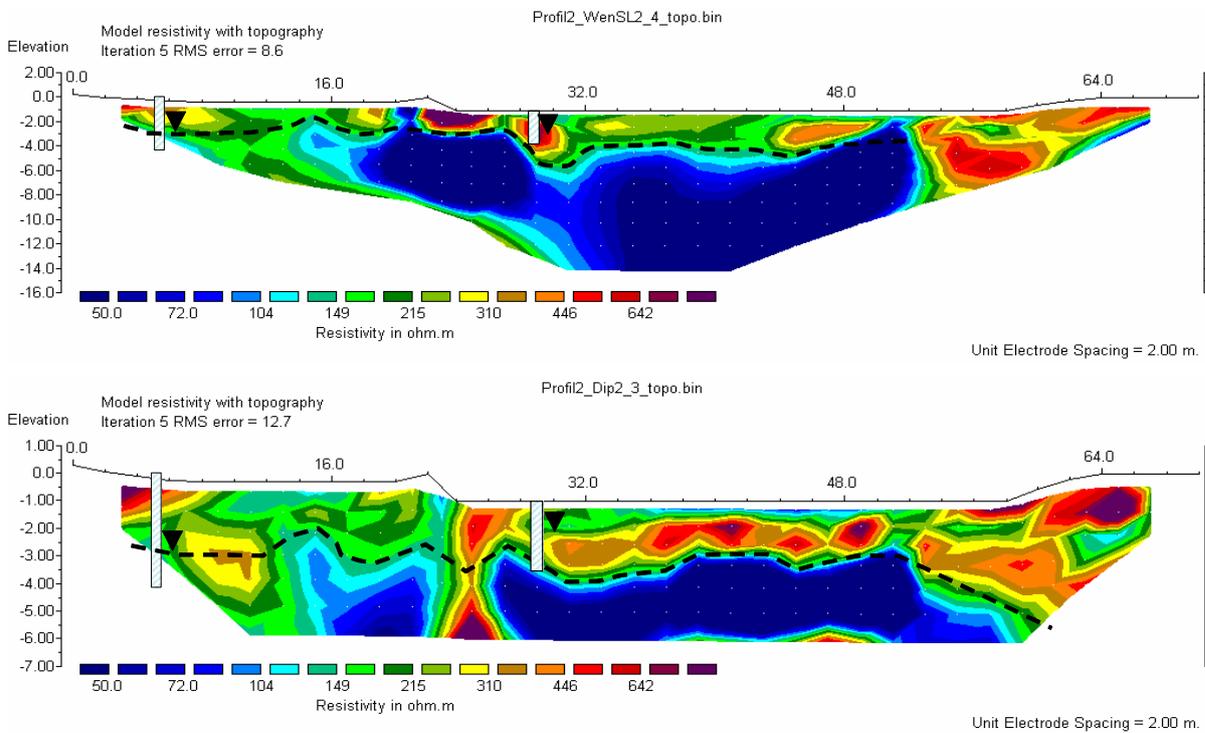


Abb. II: 2D-Widerstandstomogramme von der oberen in die mittlere Quellmulde (Profil 2); gemessen am 20.03.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).

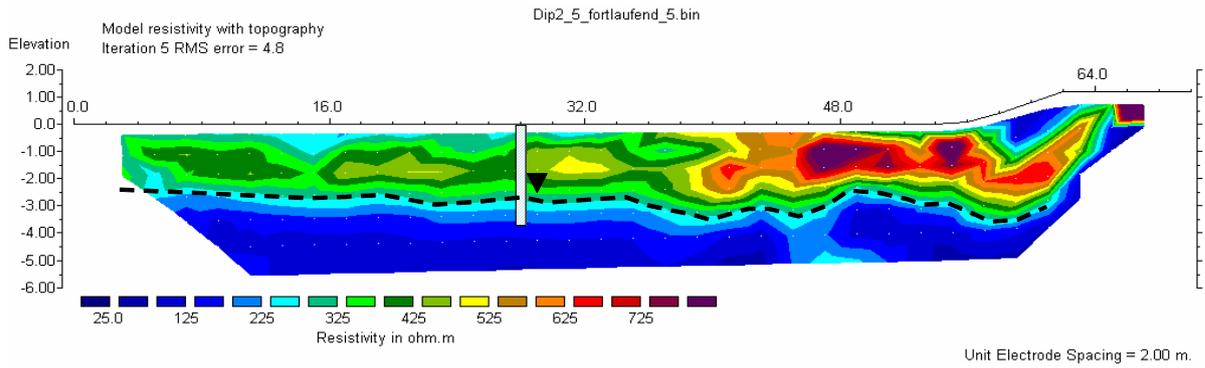


Abb. III: 2D-Widerstandstomogramm aus der mittleren Quellmulde (Profil 5); gemessen am 23.03.06 mit der Dipol-Dipol-Konfiguration.

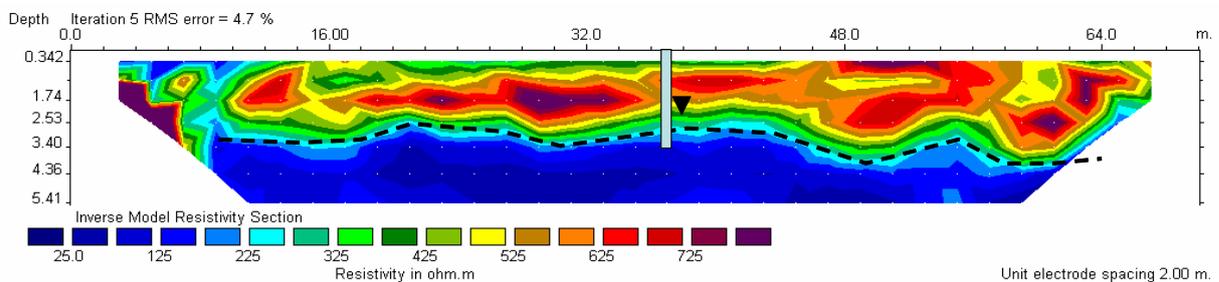
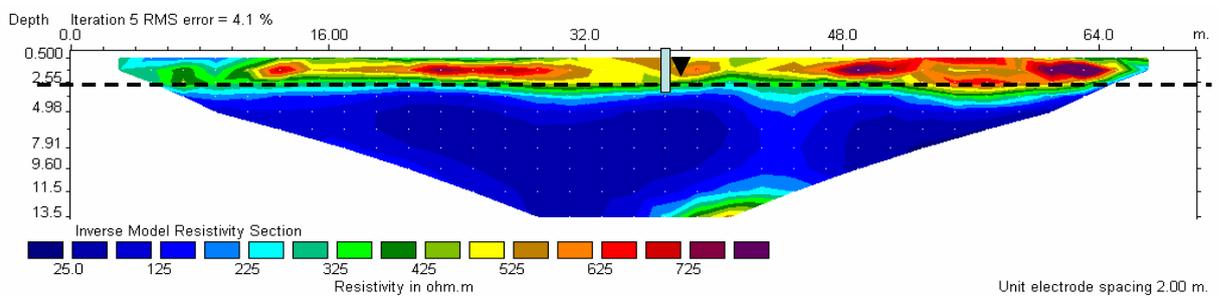


Abb. IV: 2D-Widerstandstomogramme aus der mittleren Quellmulde (Profil 1); gemessen am 20.03.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).

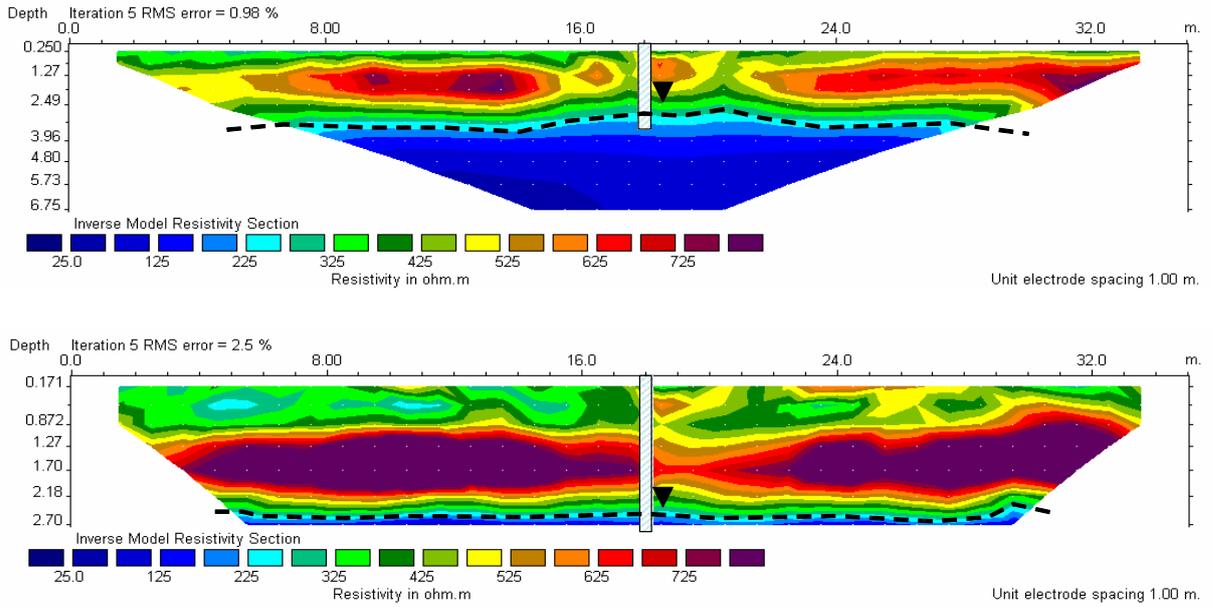


Abb. V: 2D-Widerstandstomogramme aus der mittleren Quellmulde (Profil 6); gemessen am 23.03.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).

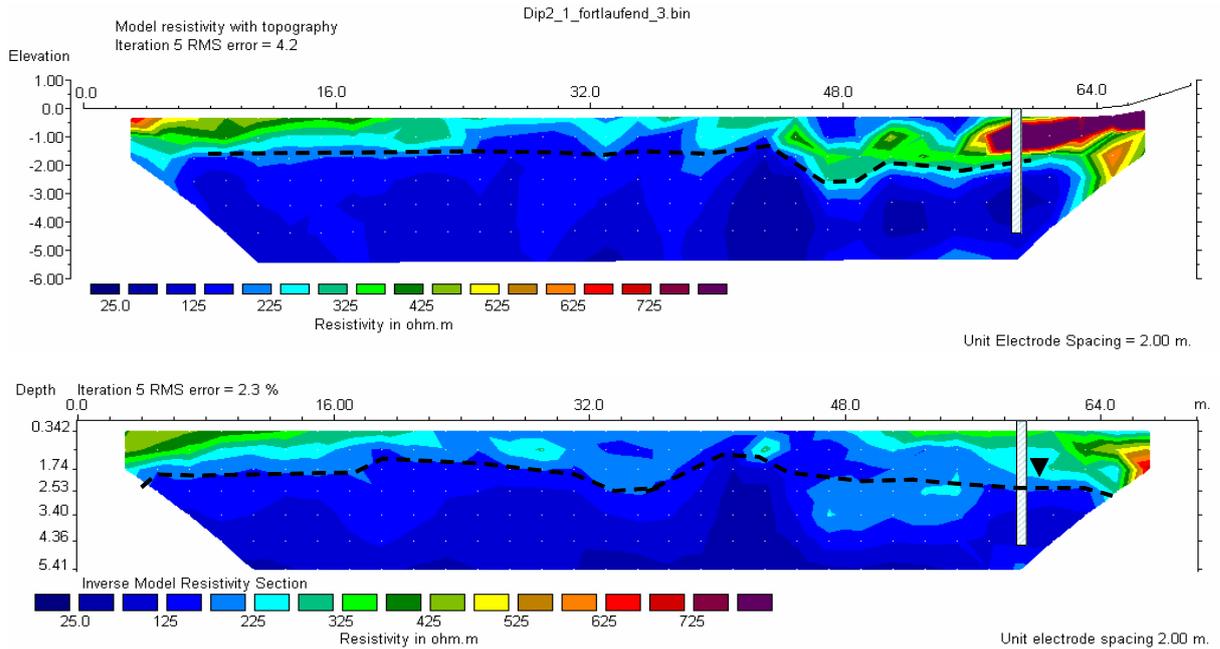


Abb. VI: 2D-Widerstandstomogramme aus der unteren Quellmulde (Profil 3); gemessen am 23.03.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).

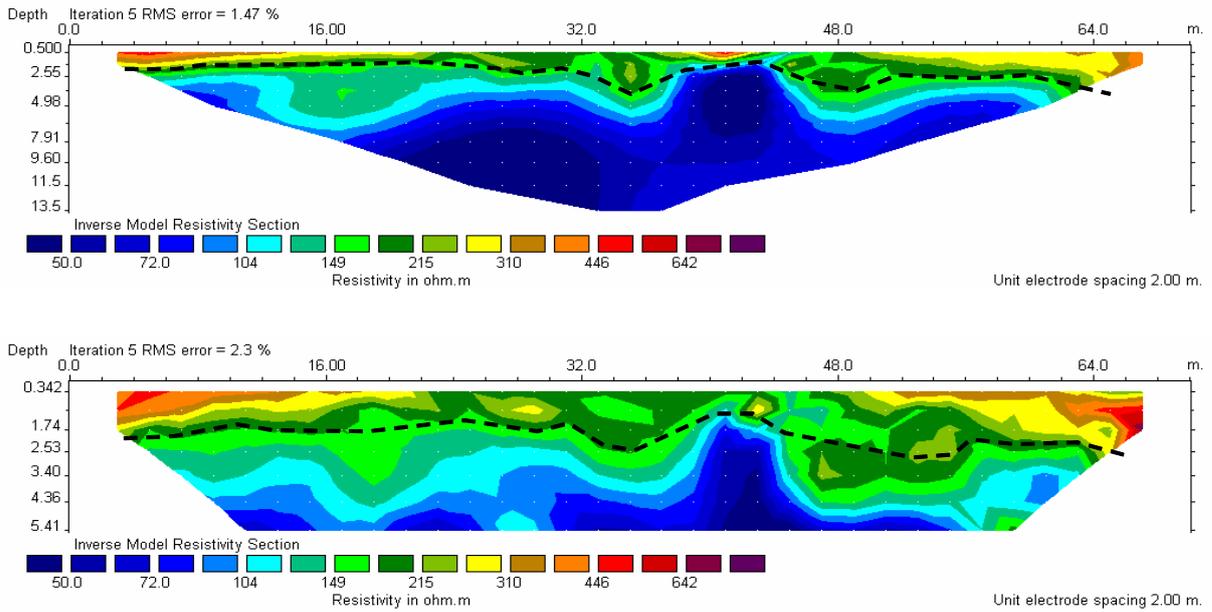


Abb. VII: 2D-Widerstandstomogramme aus der unteren Quellmulde (Profil 4); gemessen am 23.03.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).

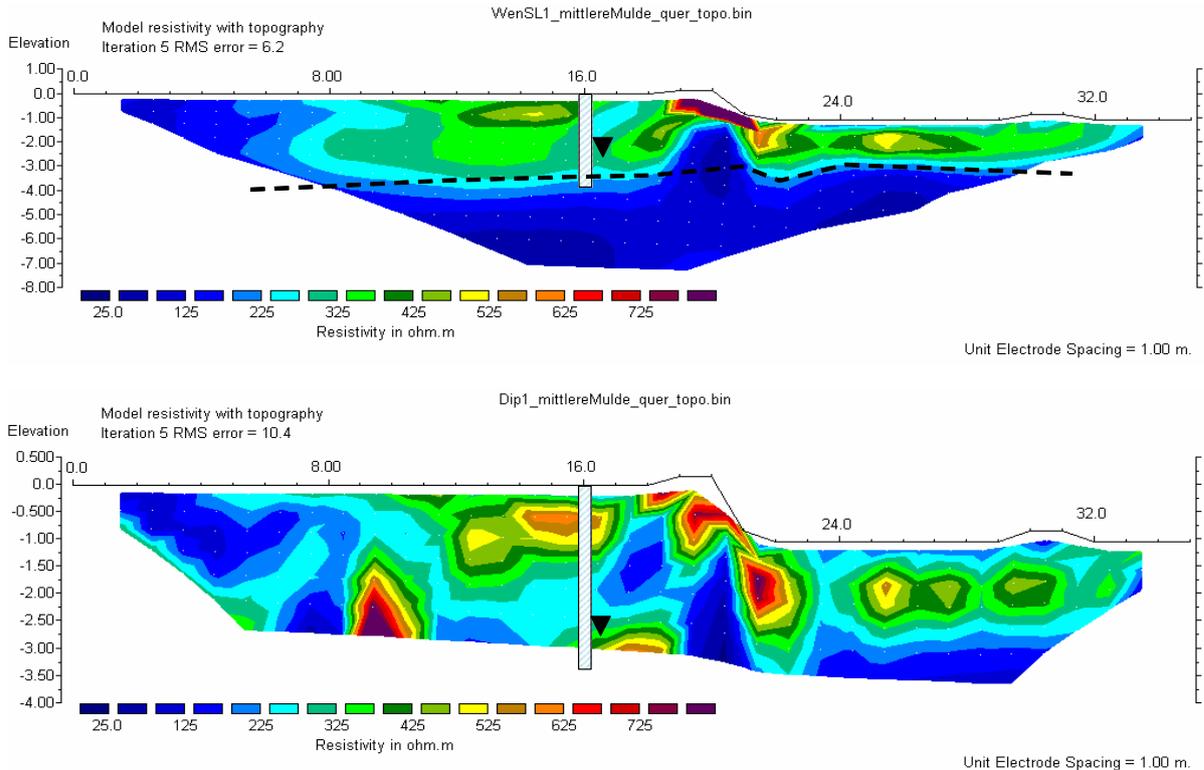


Abb. VIII: 2D-Widerstandstomogramme von der mittleren in die untere Quellmulde (Profil 7); gemessen am 05.05.06 mit der Wenner-Schlumberger- (oben) und der Dipol-Dipol-Konfiguration (unten).

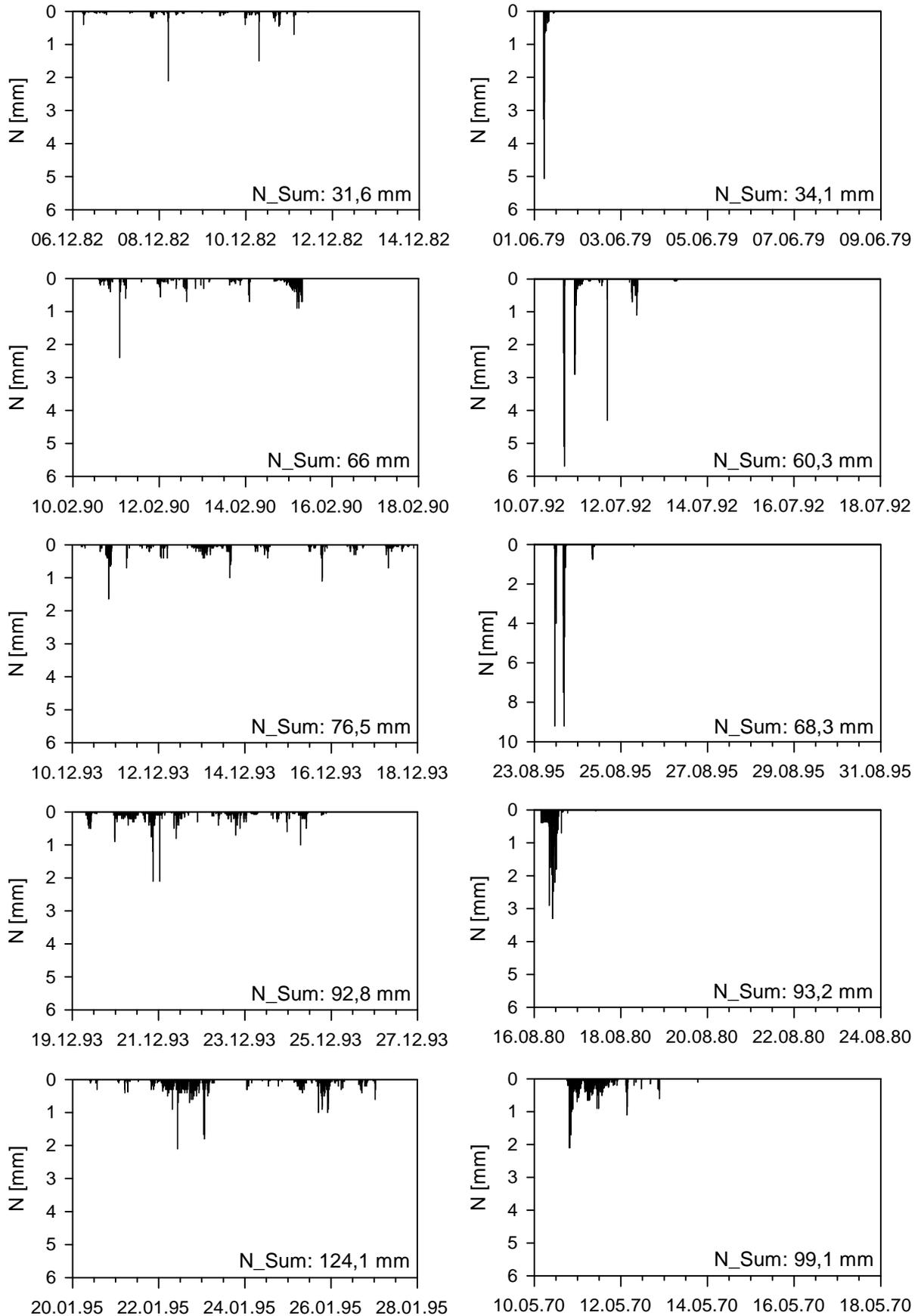


Abb. IX: Zehn ausgewählte Niederschlagsereignisse aus dem Zeitraum 1967 - 1997. Links fünf Ereignisse aus den Winterhalbjahren, rechts fünf Ereignisse aus den Sommerhalbjahren.

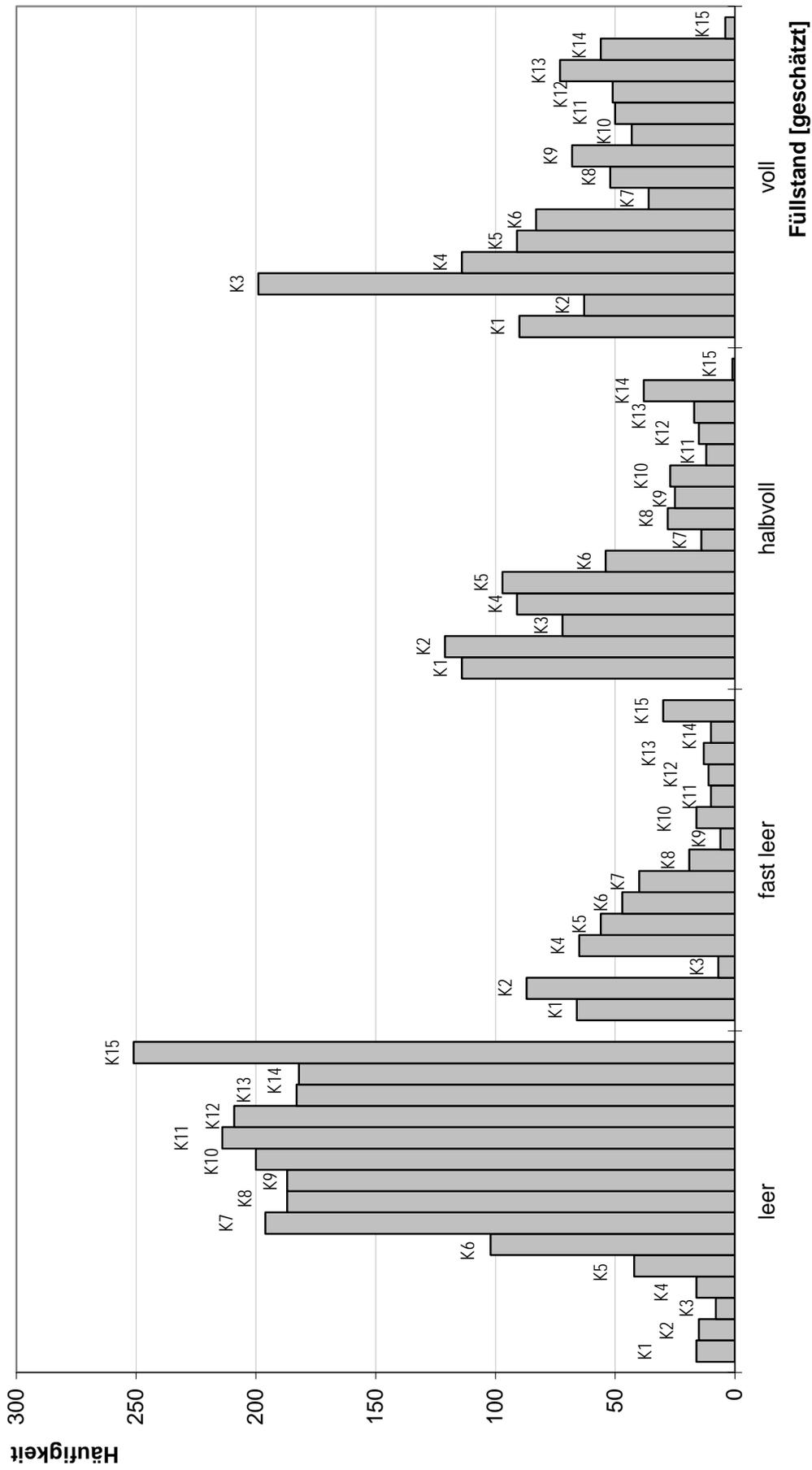


Abb. X: Häufigkeiten unterschiedlicher Füllstände in den Kaskadenmulden.



Abb. XI: Nasser Oberboden der mittleren Quellmulde, 27.02.2006.



Abb. XII: Sattes Grün nahe der Gabionenmauer mit *Lychnis flos-cuculi* als Wechselfeuchtezeiger, 30.05.2006.

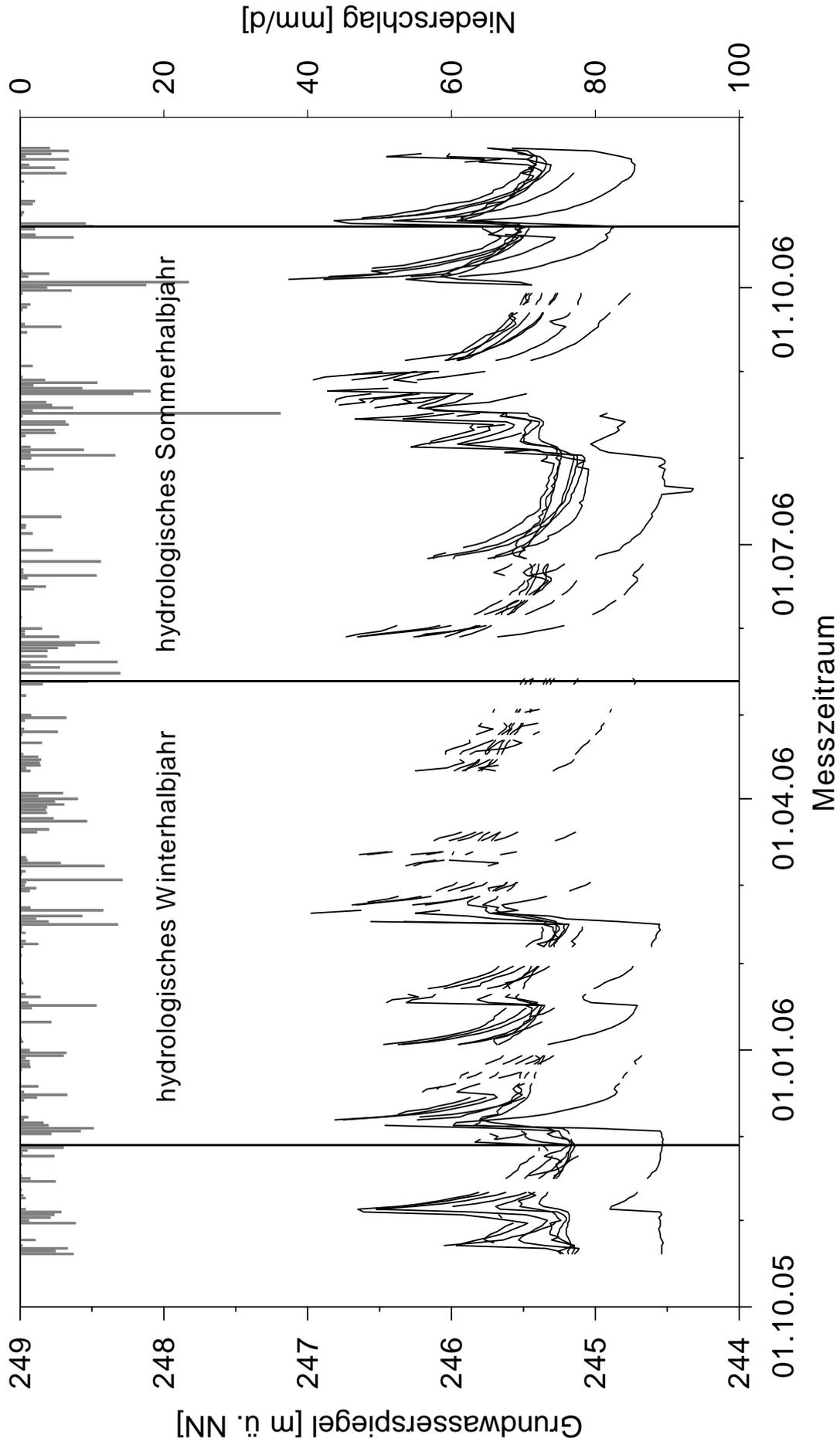


Abb. XIII: Verlauf der Grundwasserganglinien der Pegel P1 - P8 und die visuell ermittelte Einteilung in hydrologisches Winter- und Sommerhalbjahr.

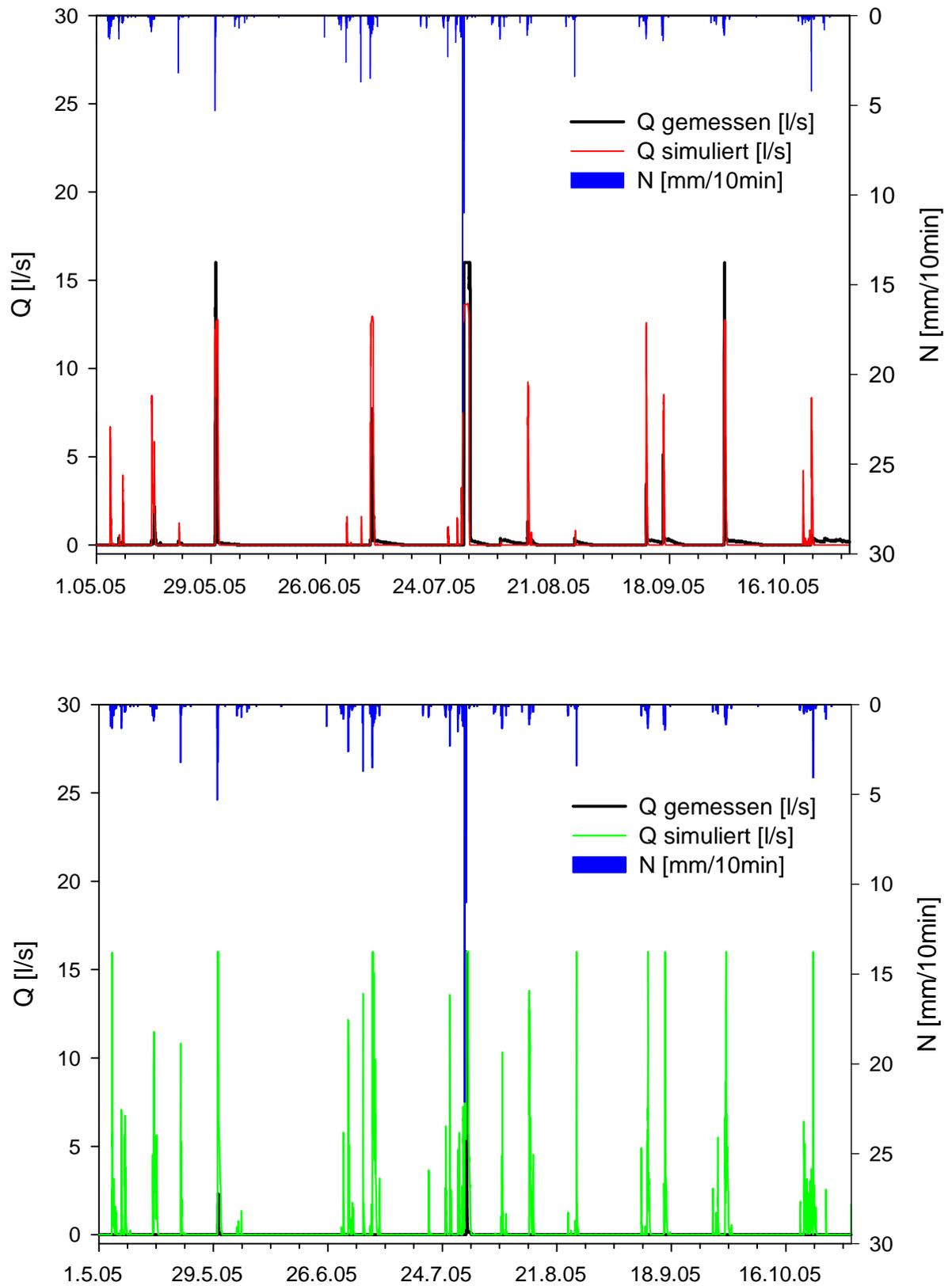


Abb. XIV: Gemessene und simulierte Ganglinien für PBD1 (oben) und PBD2 (unten) im hydrologischen Sommerhalbjahr 2005. (schwarz: gemessener Abfluss, rot: simulierter Abfluss bei PBD1, grün: simulierter Abfluss bei PBD2, blau: Niederschlag, schwarze Kreuze: fehlende Niederschlagsdaten).

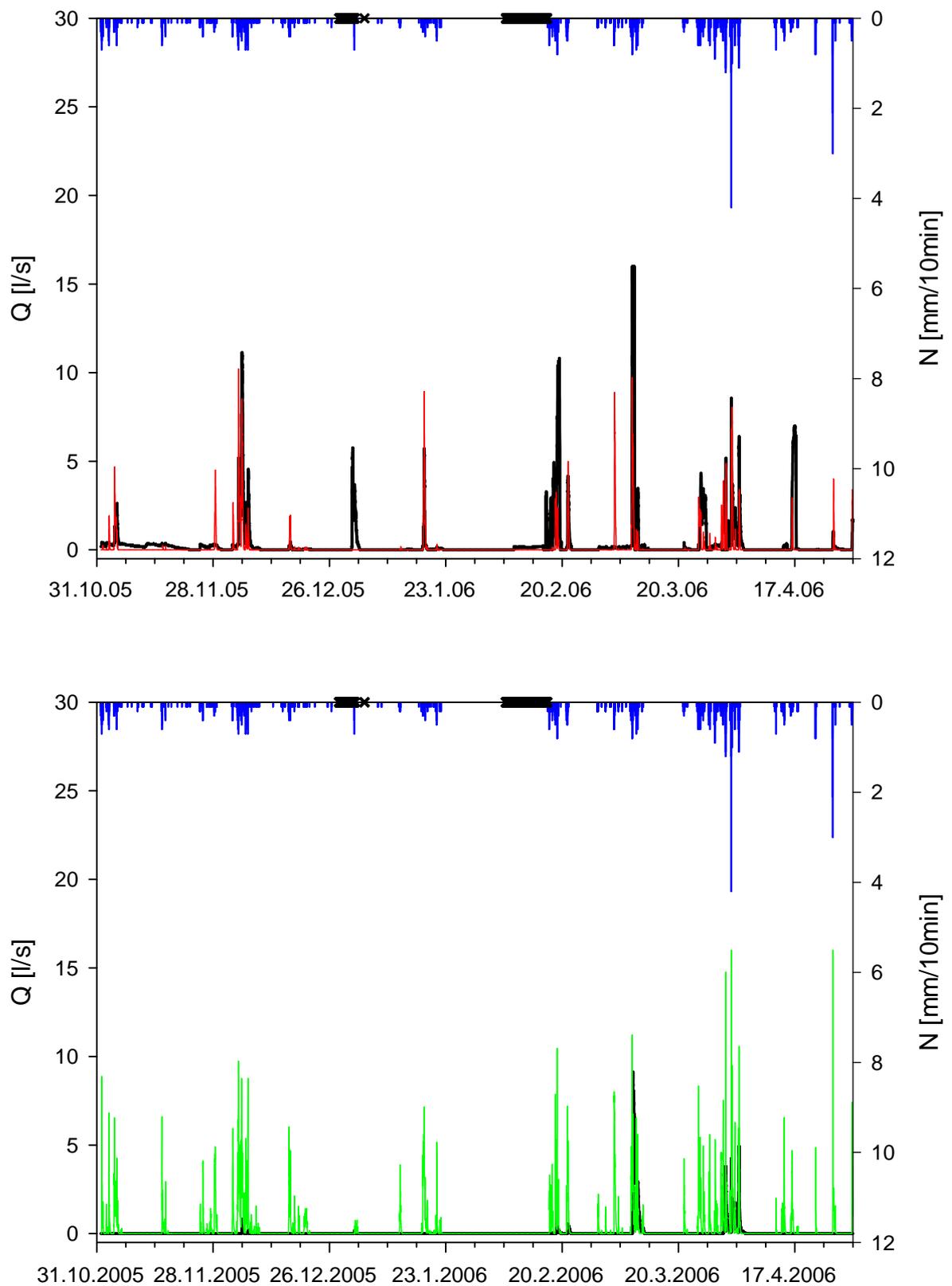


Abb. XV: Gemessene und simulierte Ganglinien für PBD1 (oben) und PBD2 (unten) im hydrologischen Winterhalbjahr 2005/2006. (schwarz: gemessener Abfluss, rot: simulierter Abfluss bei PBD1, grün: simulierter Abfluss bei PBD2, blau: Niederschlag, schwarze Kreuze: fehlende Niederschlagsdaten).

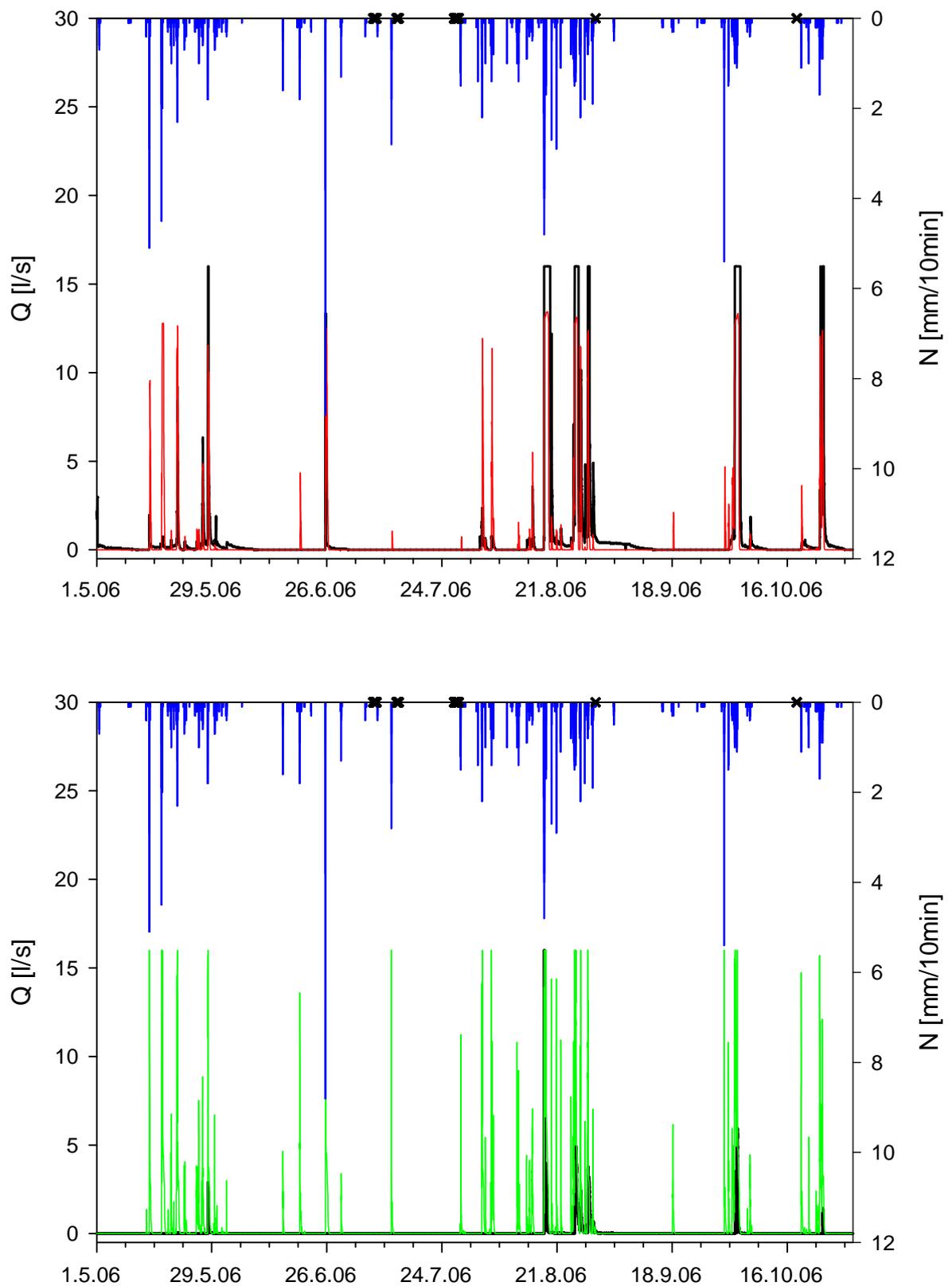


Abb. XVI: Gemessene und simulierte Ganglinien für PBD1 (oben) und PBD2 (unten) im hydrologischen Sommerhalbjahr 2006. (schwarz: gemessener Abfluss, rot: simulierter Abfluss bei PBD1, grün: simulierter Abfluss bei PBD2, blau: Niederschlag, schwarze Kreuze: fehlende Niederschlagsdaten).

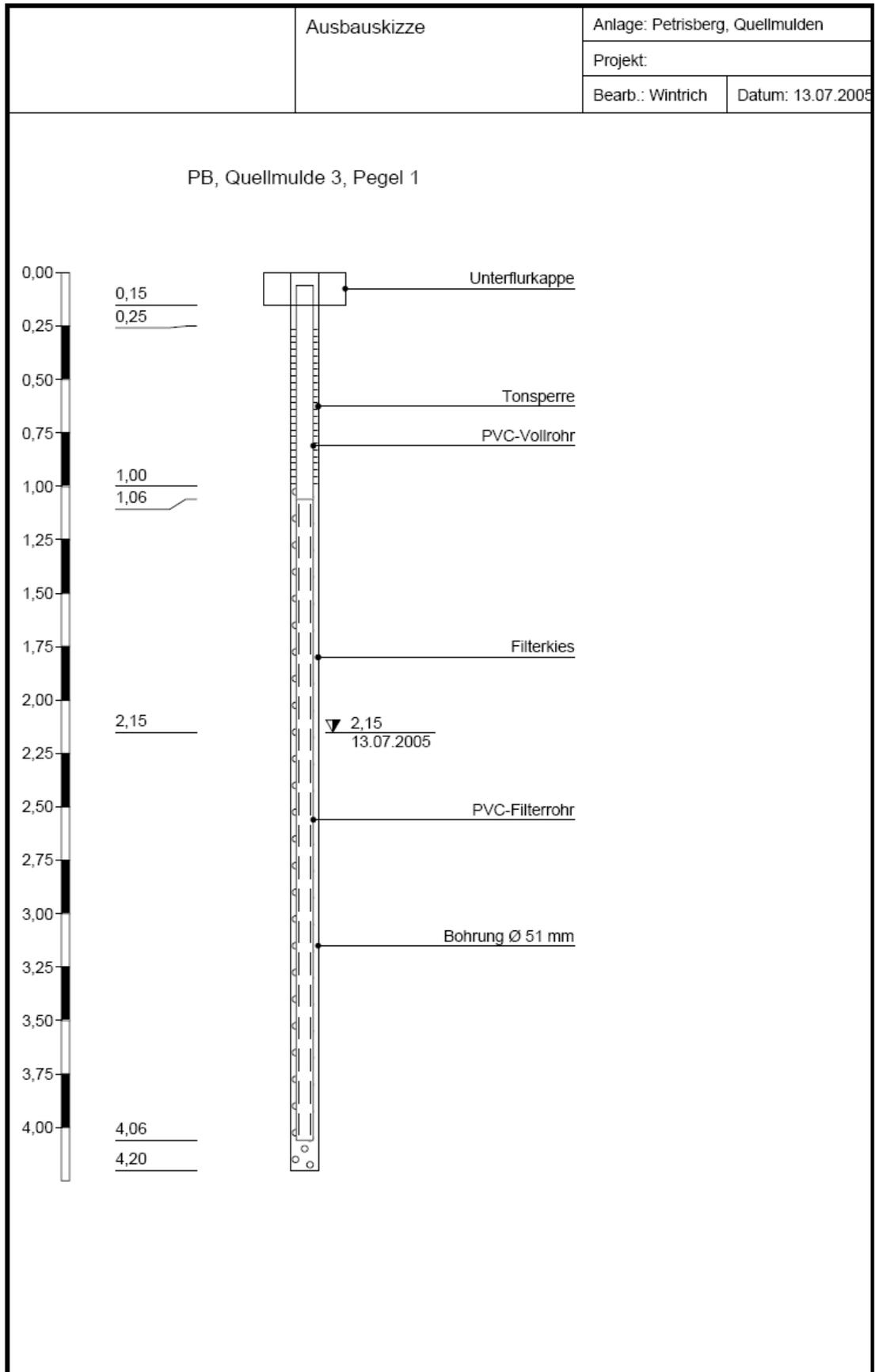


Abb. XVII: Ausbauskizze des Pegels P1.

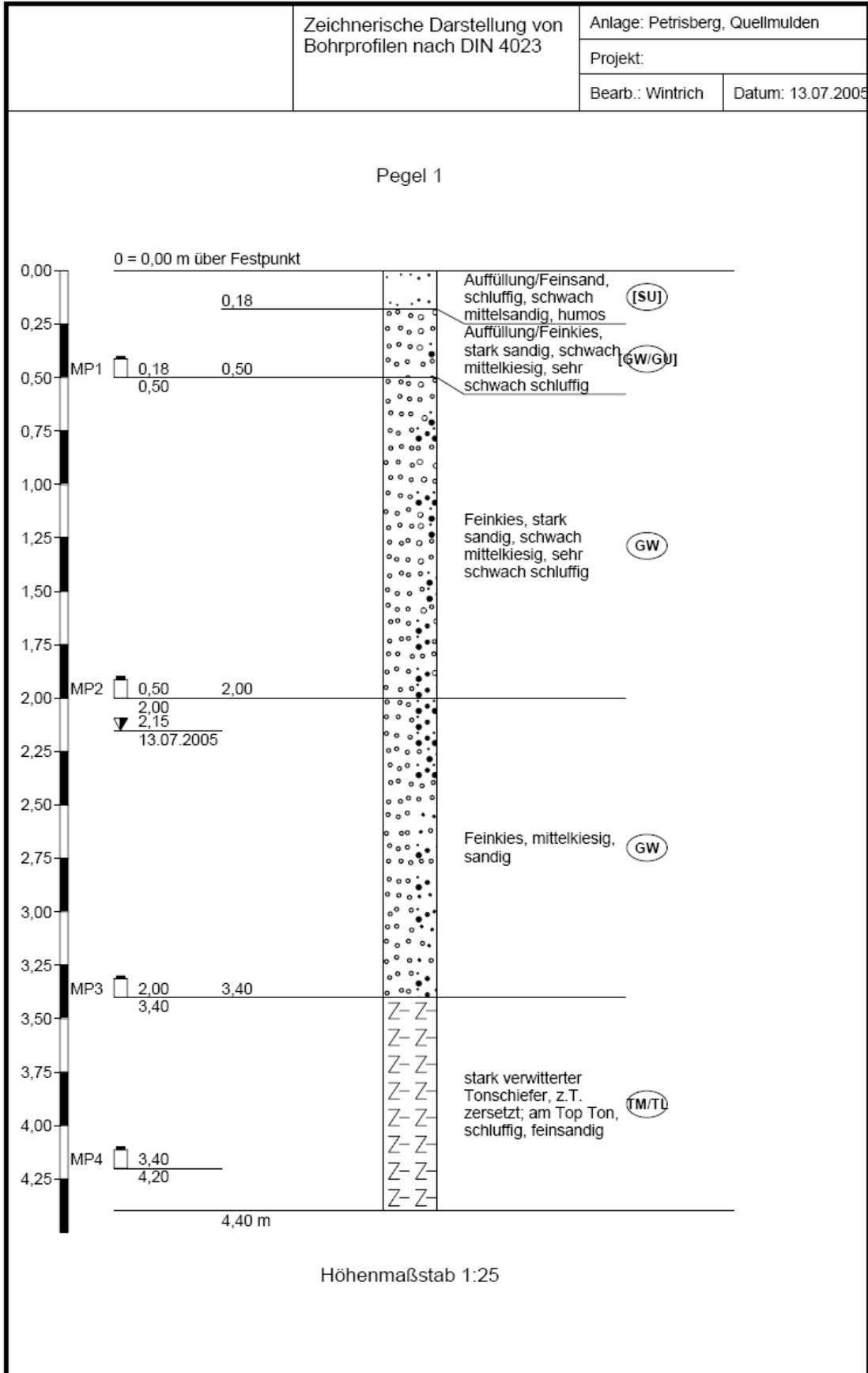


Abb. XVIII: Bohrprofil des Pegels P1.

Tab. I: Schichtenverzeichnis des Pegels P1.

		Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis				Anlage		
						Bericht:		
						Az.:		
Bauvorhaben:						Datum:		
Bohrung Nr Pegel 1 /Blatt 1					13.07.2005			
1	2				3	4	5	6
Bis ... m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben			
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾				Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)	
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe					
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe		i) Kalk- gehalt			
0,18	a) Auffüllung/Feinsand, schluffig, schwach mittelsandig, humos			trocken				
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) dunkelbraun					
	f)	g) Auffüllung	h) [SU]					i) 0
0,50	a) Auffüllung/Feinkies, stark sandig, schwach mittelkiesig, sehr schwach schluffig			trocken-erdfeuc ht	MP	1	0,50	
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) braun					
	f)	g) Auffüllung	h) [GW /GU]					i) 0
2,00	a) Feinkies, stark sandig, schwach mittelkiesig, sehr schwach schluffig			erdfeucht	MP	2	2,00	
	b)							
	c) locker-mitteldicht	d) leicht zu bohren	e) braun					
	f)	g) Quartär	h) GW					i) 0
3,40	a) Feinkies, mittelkiesig, sandig			bis 2,50m erdfeucht, ab 2.50m nass, Grundwasser nach Bohrende bei 2,15m	MP	3	3,40	
	b)							
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) rotbraun/bunt					
	f)	g) Quartär	h) GW					i) 0
4,40	a) stark verwitterter Tonschiefer, z.T. zersetzt; am Top Ton, schluffig, feinsandig			erdfeucht	MP	4	4,20	
	b)							
	c) steif-halbfest	d) leicht zu bohren	e) rotbraun/grau					
	f)	g) Devon	h) TM/ TL					i) 0

¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

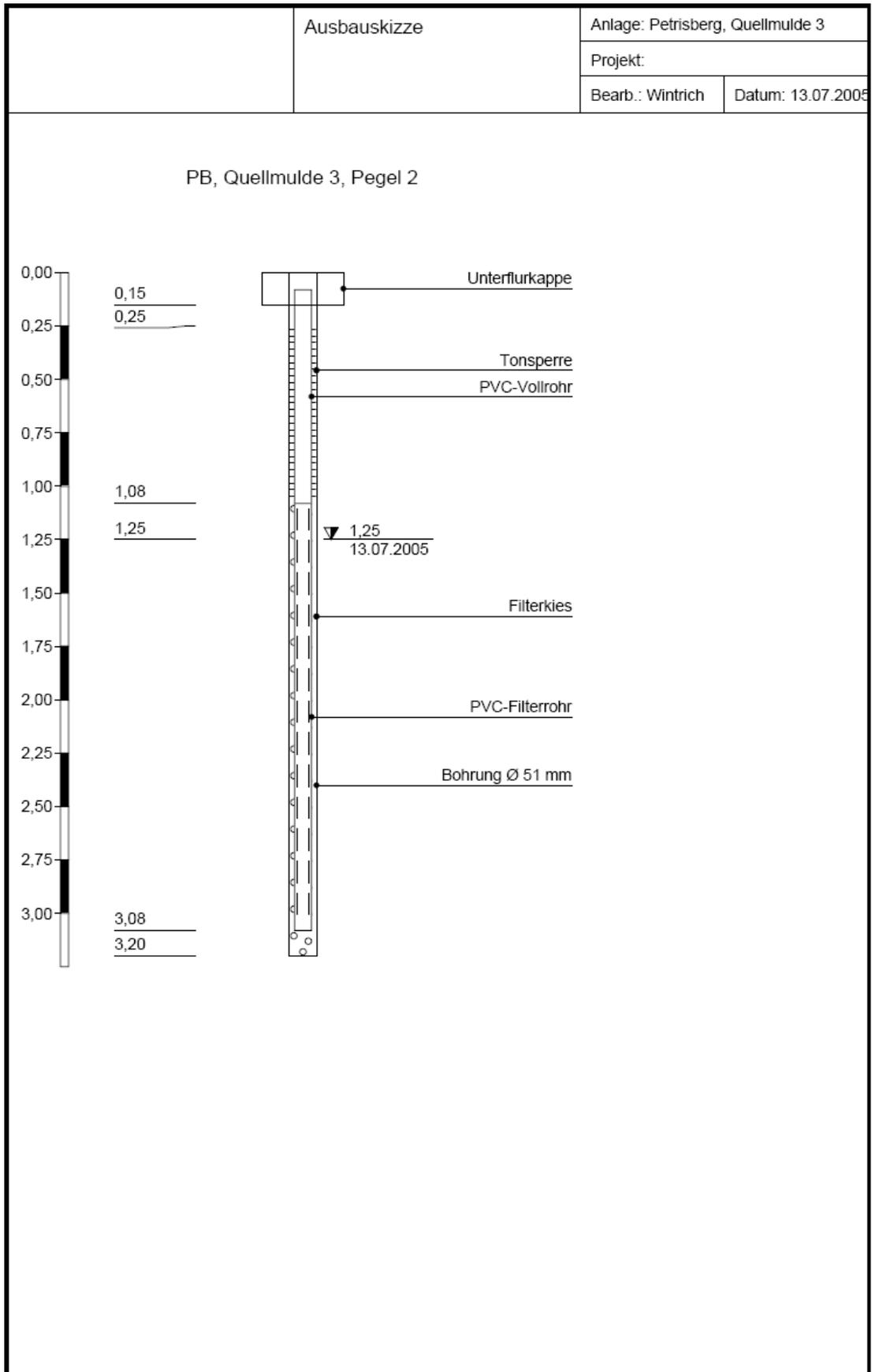


Abb. XIX: Ausbauskizze des Pegels P2.

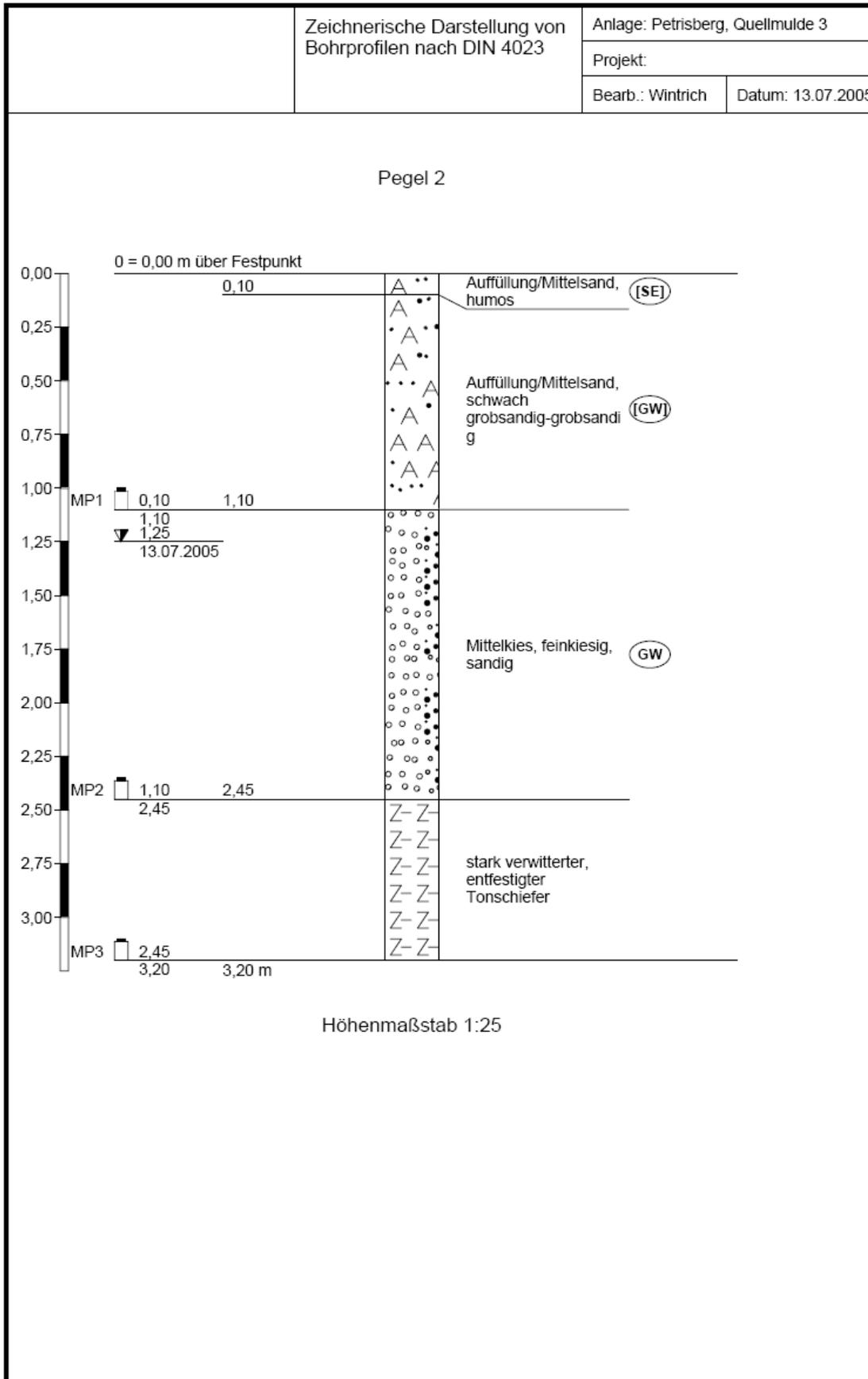


Abb. XX: Bohrprofil des Pegels P2.

Tab. II: Schichtenverzeichnis des Pegels P2.

		Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis				Anlage		
						Bericht:		
						Az.:		
Bauvorhaben:								
Bohrung Nr Pegel 2 /Blatt 1						Datum: 13.07.2005		
1	2				3	4	5	6
Bis ... m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben			
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾				Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)	
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe					
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe	i) Kalk- gehalt				
0,10	a) Auffüllung/Mittelsand, humos			trocken-erdfeucht				
	b)							
	c)	d) leicht zu bohren	e) dunkelbraun					
	f) Oberboden	g) Auffüllung	h) [SE]					i) 0
1,10	a) Auffüllung/Mittelsand, schwach grobsandig-grobsandig			erdfeucht	MP	1	1,10	
	b) vereinzelt Kieseinstreuung							
	c)	d) leicht zu bohren	e) braun-hellbraun					
	f)	g) Auffüllung	h) [GW]					i) 0
2,45	a) Mittelkies, feinkiesig, sandig			bis 1,20m erdfeucht ab 1,30m nass	MP	2	2,45	
	b)							
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) rotbraun/bunt					
	f)	g) Quartär	h) GW					i) 0
3,20	a) stark verwitterter, entfestigter Tonschiefer			erdfeucht	MP	3	3,20	
	b) Top als Ton, schluffig, feinsandig ausgebildet							
	c) steif-halbfest	d) schwer zu bohren	e)					
	f) Verwitterungsge- stein	g) Devon	h)					i) 0
	a)							
	b)							
	c)	d)	e)					
	f)	g)	h)					i)

¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

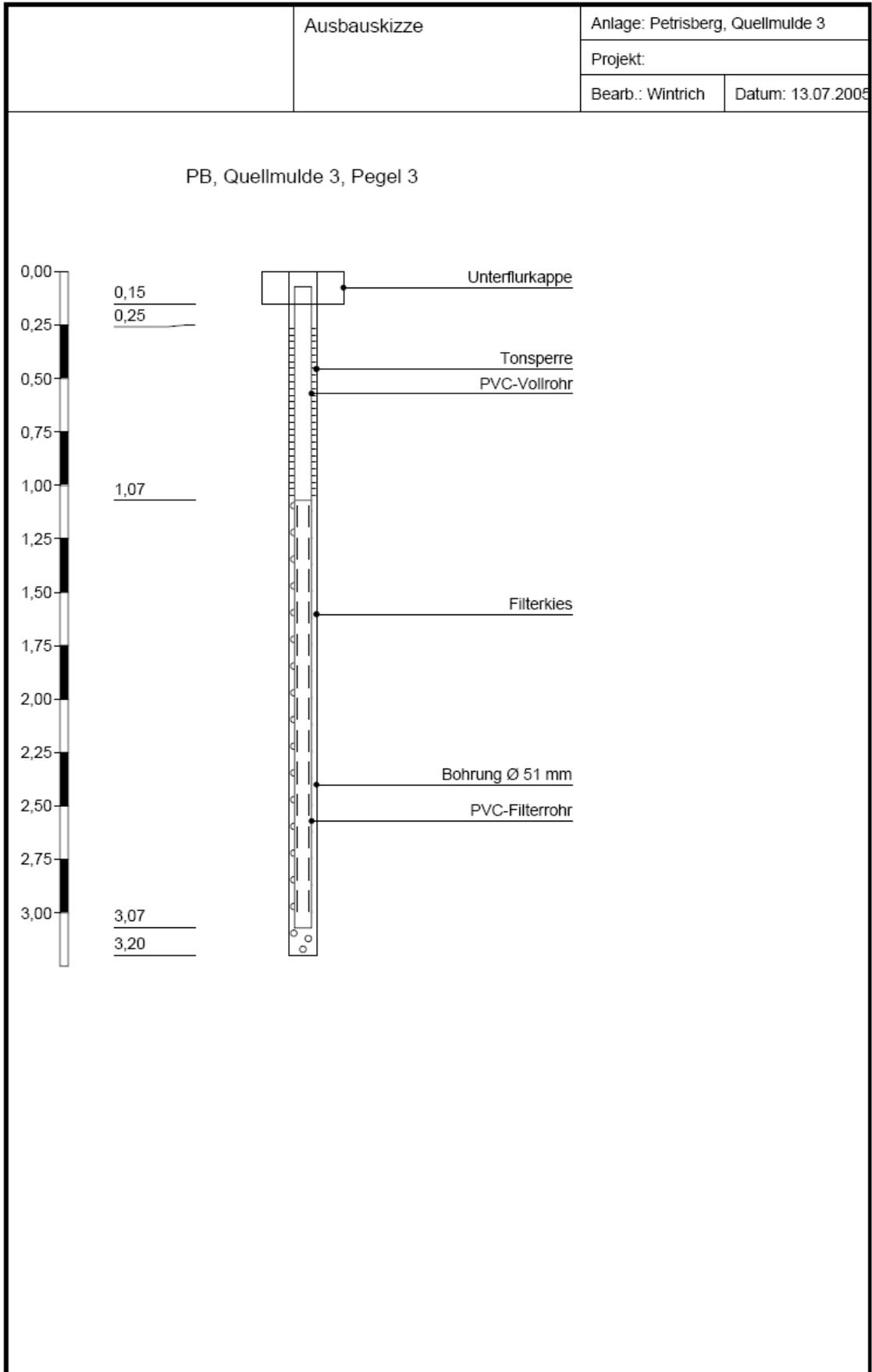


Abb. XXI: Ausbauskizze des Pegels P3.

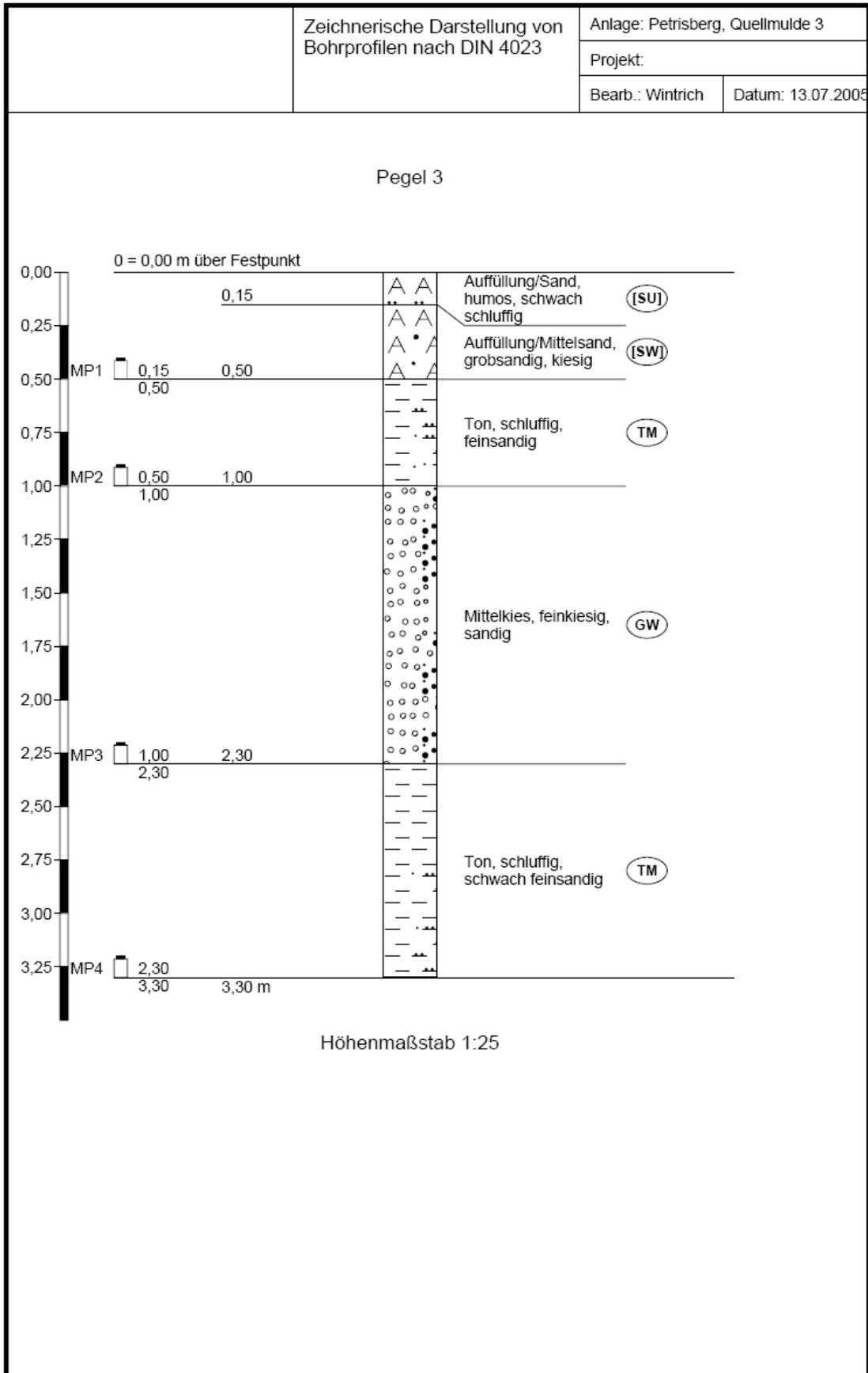


Abb. XXII: Bohrprofil des Pegels P3.

Tab. III: Schichtenverzeichnis des Pegels P3.

		Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis				Anlage		
						Bericht:		
						Az.:		
Bauvorhaben:						Datum:		
Bohrung Nr Pegel 3 /Blatt 1					13.07.2005			
1	2				3	4	5	6
Bis ... m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen				Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾					Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe					
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe	i) Kalk- gehalt				
0,15	a) Auffüllung/Sand, humos, schwach schluffig				trocken-erdfeucht			
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) braun					
	f) Oberboden	g) Auffüllung	h) [SU]	i) 0				
0,50	a) Auffüllung/Mittelsand, grobsandig, kiesig				erdfeucht	MP	1	0,50
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) braun					
	f)	g) Auffüllung	h) [SW]	i) 0				
1,00	a) Ton, schluffig, feinsandig				erdfeucht	MP	2	1,00
	b) mit Tonschieferbruchstücken							
	c) steif	d) leicht zu bohren	e) rotbraun					
	f) Decklehm	g) Quartär	h) TM	i) 0				
2,30	a) Mittelkies, feinkiesig, sandig				bis 1,40m erdfeucht ab 1,40m nass	MP	3	2,30
	b)							
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) rotbraun/bunt					
	f)	g) Quartär	h) GW	i) 0				
3,30	a) Ton, schluffig, schwach feinsandig				erdfeucht	MP	4	3,30
	b)							
	c) steif-halbfest	d) schwer zu bohren	e) rotbraun/bunt					
	f) Verwitterungslehm	g) Tertiär	h) TM	i) 0				
¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.								

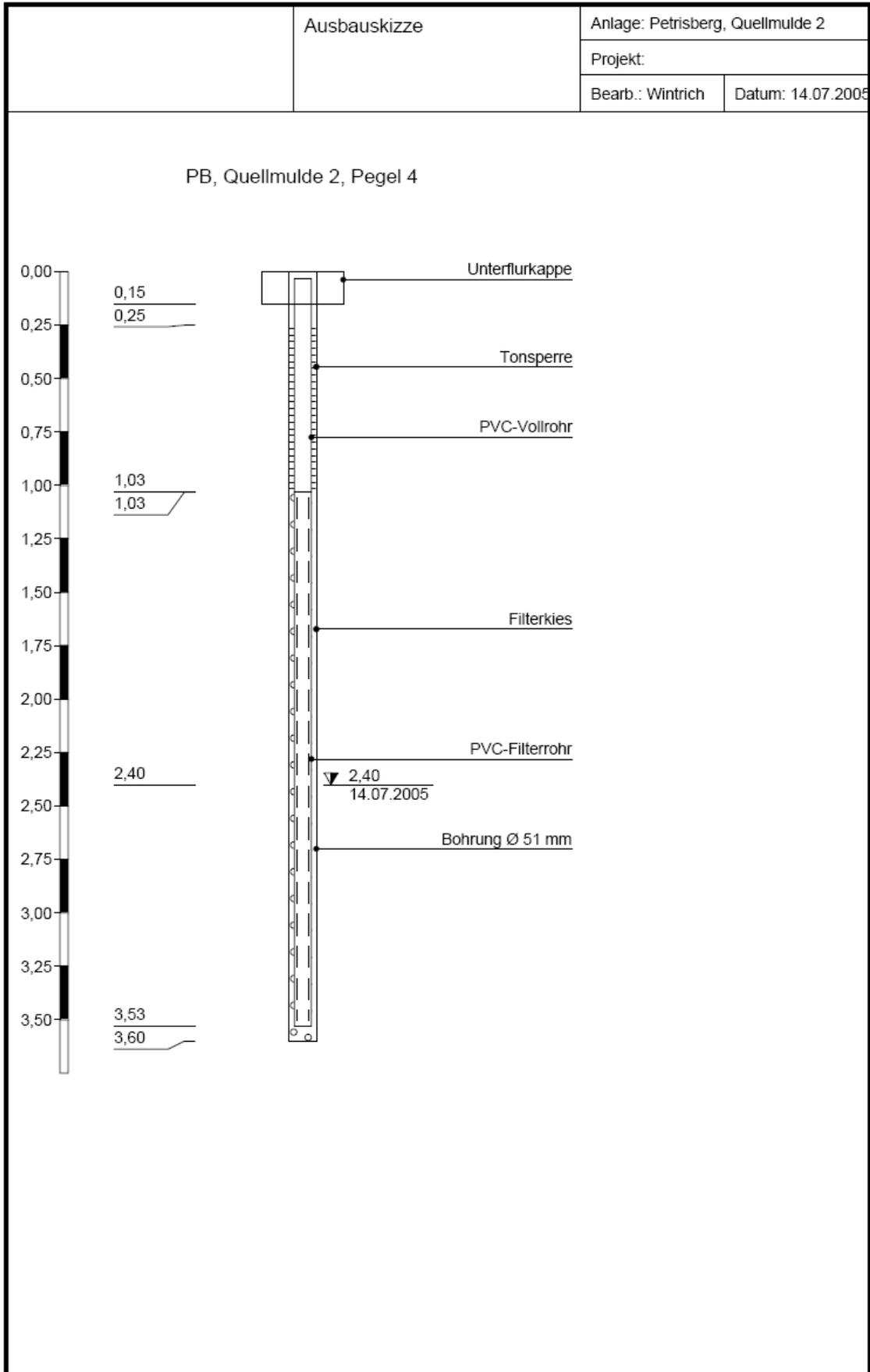


Abb. XXIII: Ausbauskizze des Pegels P4.

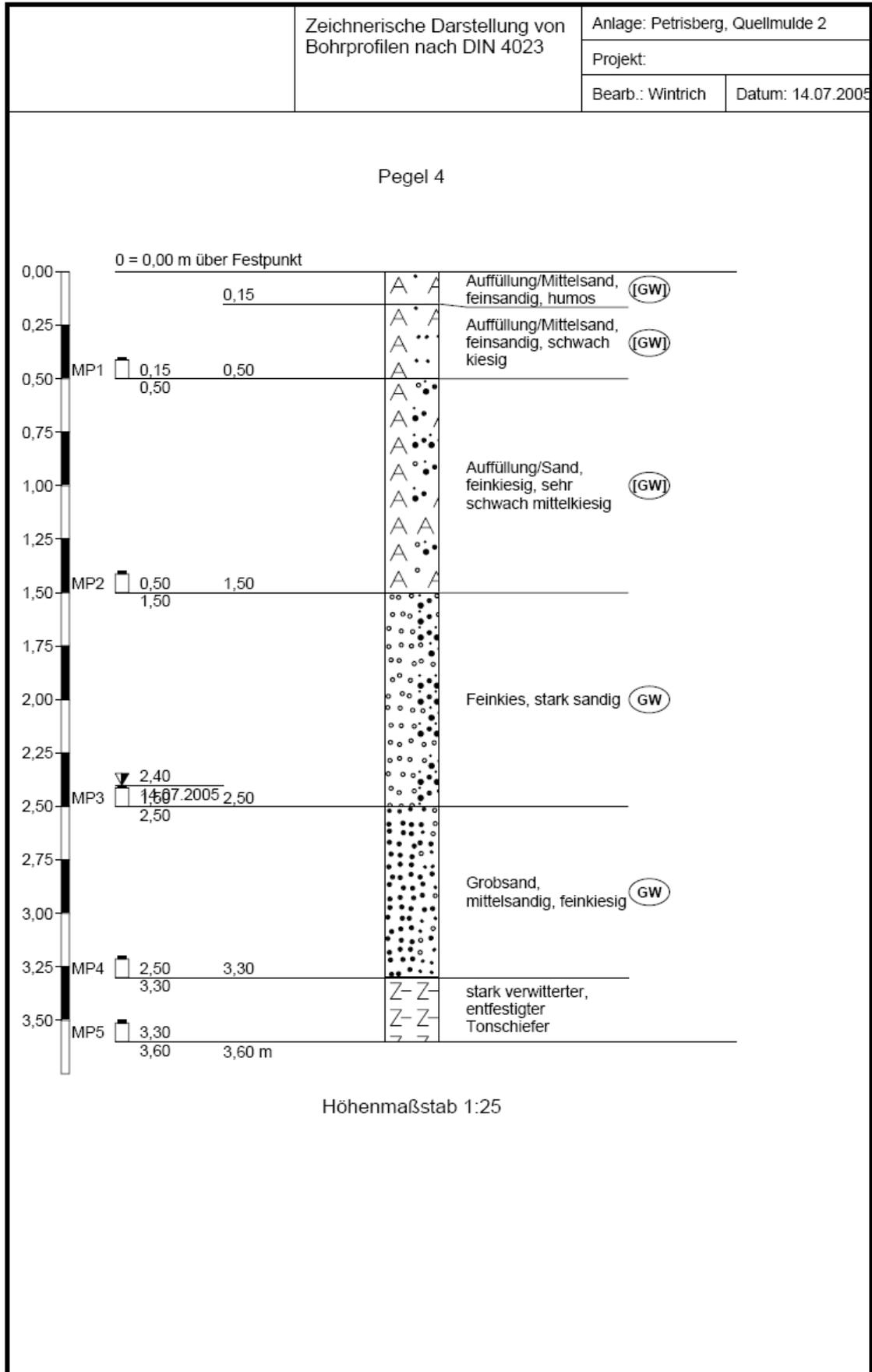


Abb. XXIV: Bohrprofil des Pegels P4.

Tab. IV: Schichtenverzeichnis des Pegels P4.

		Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis				Anlage		
						Bericht:		
						Az.:		
Bauvorhaben:						Datum:		
Bohrung Nr Pegel 4 /Blatt 1					14.07.2005			
1	2				3	4	5	6
Bis ... m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben			
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾				Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)	
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe					
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe		i) Kalk- gehalt			
0,15	a) Auffüllung/Mittelsand, feinsandig, humos							
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) hellbraun					
	f)	g) Auffüllung	h) [GW]					i) 0
0,50	a) Auffüllung/Mittelsand, feinsandig, schwach kiesig			erdfeucht	MP	1	0,50	
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) hellbraun					
	f)	g) Auffüllung	h) [GW]					i) 0
1,50	a) Auffüllung/Sand, feinkiesig, sehr schwach mittelkiesig			erdfeucht	MP	2	1,50	
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) braun					
	f)	g) Auffüllung ?	h) [GW]					i) 0
2,50	a) Feinkies, stark sandig			erdfeucht	MP	3	2,50	
	b) vereinzelt Mittelkies-Einlagerung							
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) hellbraun					
	f)	g) Quartär	h) GW					i) 0
3,30	a) Grobsand, mittelsandig, feinkiesig			an Basis Mittelkies verbacken nass	MP	4	3,30	
	b)							
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) helbraun I					
	f)	g) Quartär	h) GW					i) 0

¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

Fortsetzung: Schichtenverzeichnis des Pegels P4.

		Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis				Anlage		
						Bericht:		
						Az.:		
Bauvorhaben:						Datum:		
Bohrung Nr Pegel 4 /Blatt 2					14.07.2005			
1	2				3	4	5	6
Bis ... m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen				Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾					Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe					
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe	i) Kalk- gehalt				
3,60	a) stark verwitterter, entfestigter Tonschiefer				erdfeucht	MP	5	3,60
	b) Top zersetzt							
	c) halbfest	d) schwer zu bohren	e) rotviolett					
	f)	g) Devon	h)	i) 0				
	a)							
	b)							
	c)	d)	e)					
	f)	g)	h)	i)				
	a)							
	b)							
	c)	d)	e)					
	f)	g)	h)	i)				
	a)							
	b)							
	c)	d)	e)					
	f)	g)	h)	i)				
	a)							
	b)							
	c)	d)	e)					
	f)	g)	h)	i)				
¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.								

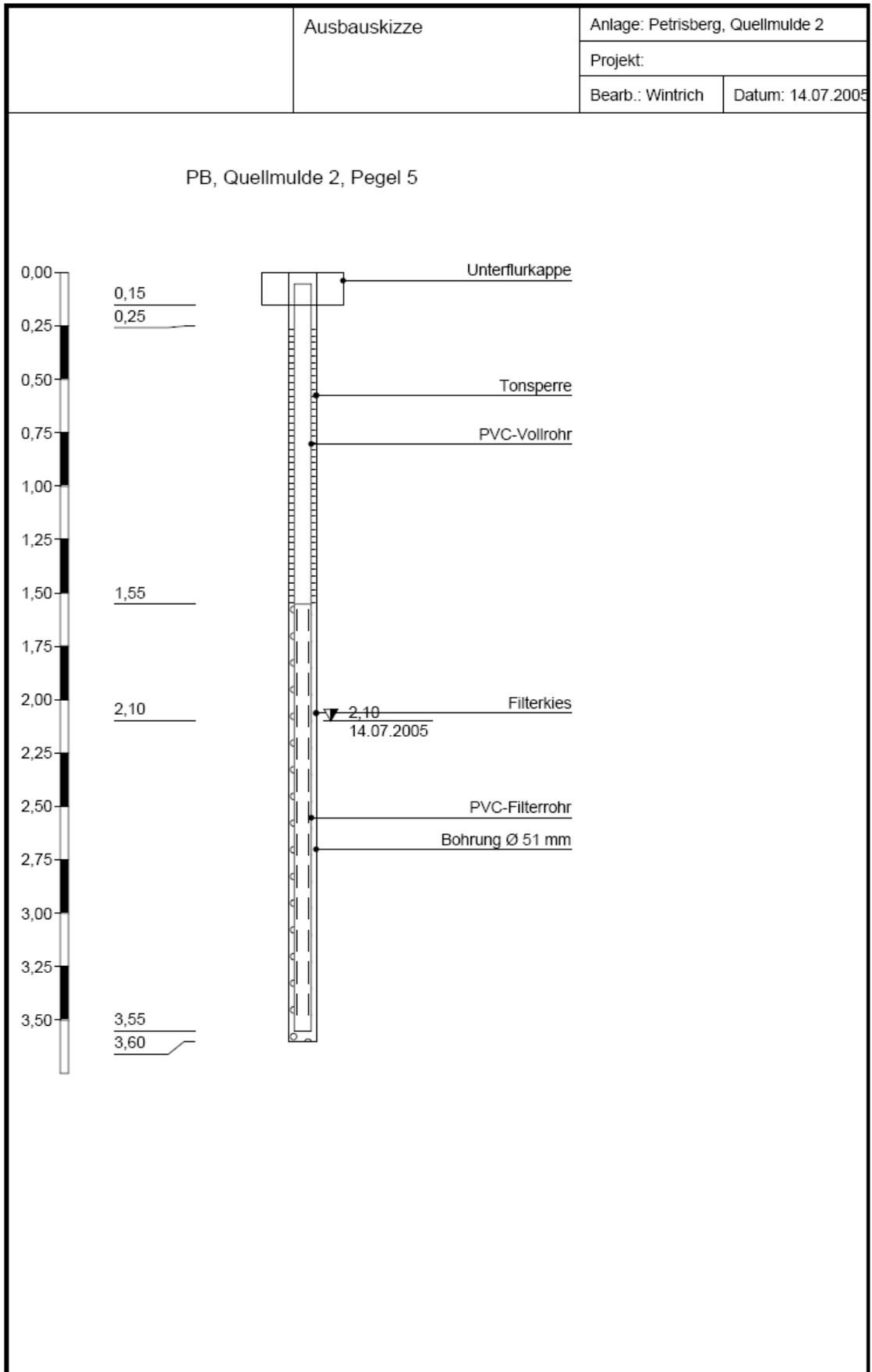


Abb. XXV: Ausbauskizze des Pegels P5.

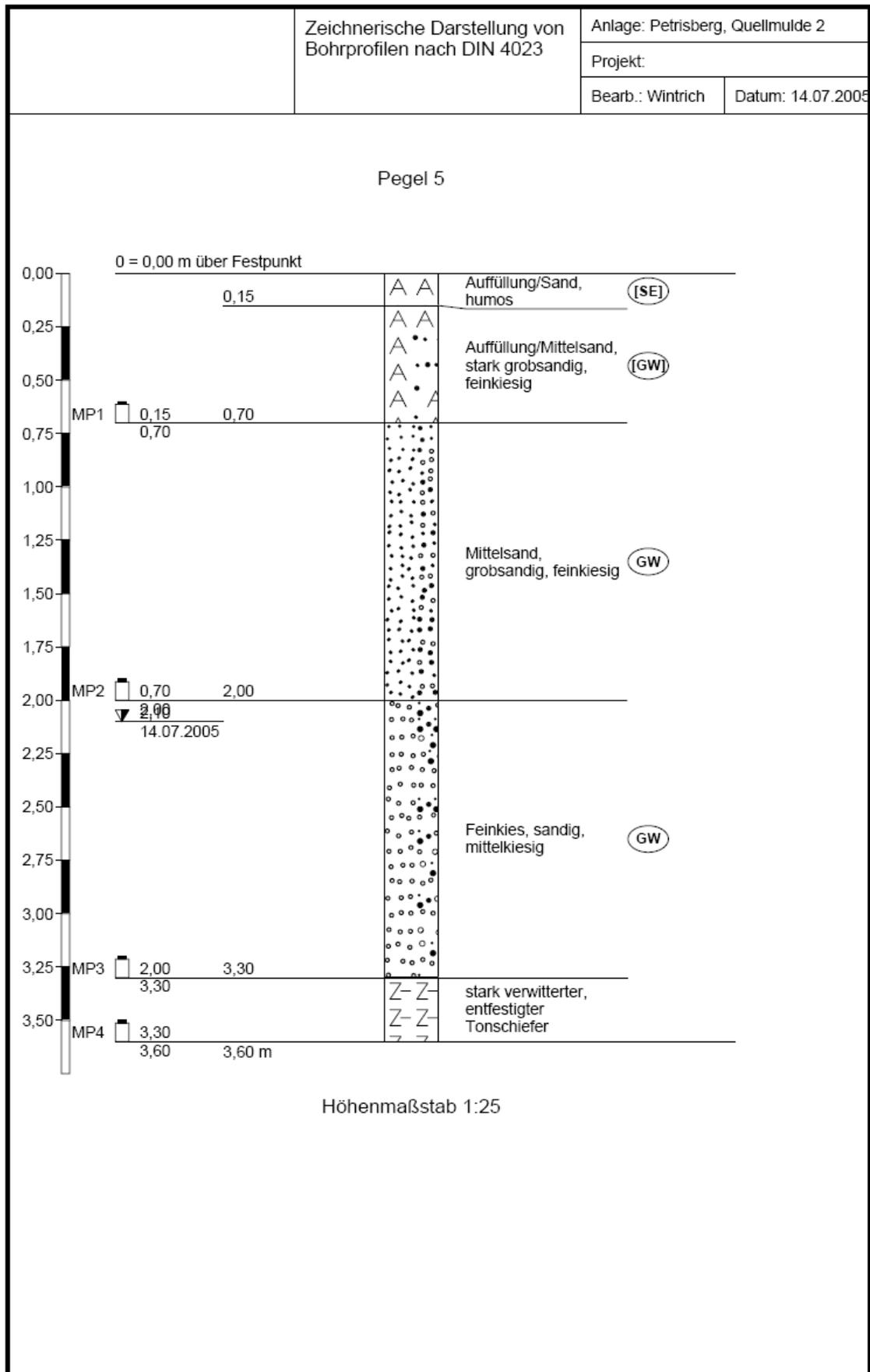


Abb. XXVI: Bohrprofil des Pegels P5.

Tab. V: Schichtenverzeichnis des Pegels P5.

		Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis				Anlage Bericht: Az.:		
Bauvorhaben:								
Bohrung Nr Pegel 5 /Blatt 1						Datum: 14.07.2005		
1	2			3		4	5	6
Bis ... m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges		Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾					Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe					
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe			i) Kalk- gehalt		
0,15	a) Auffüllung/Sand, humos			trocken-erdfeuc ht				
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) dunkelbraun					
	f) Oberboden	g) Auffüllung	h) [SE] i) 0					
0,70	a) Auffüllung/Mittelsand, stark grobsandig, feinkiesig			erdfeucht		MP	1	0,70
	b) vereinzelt Mittelkieseinstreuung							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) hellbraun					
	f)	g) Auffüllung	h) [GW] i) 0					
2,00	a) Mittelsand, grobsandig, feinkiesig			erdfeucht		MP	2	2,00
	b)							
	c) mitteldicht	d) leicht-schwer zu bohren	e) hellbraun					
	f)	g) Quartär	h) GW i) 0					
3,30	a) Feinkies, sandig, mittelkiesig			bis 2,20m feucht ab 2,20m nass		MP	3	3,30
	b) an Basis Geröll							
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) braun, bunt					
	f)	g) Quartär	h) GW i) 0					
3,60	a) stark verwitterter, entfestigter Tonschiefer			erdfeucht		MP	4	3,60
	b)							
	c) halbfest	d) schwer zu bohren	e) rotviolett					
	f) Verwitterungsge stein	g) Devon	h) i) 0					

1) Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

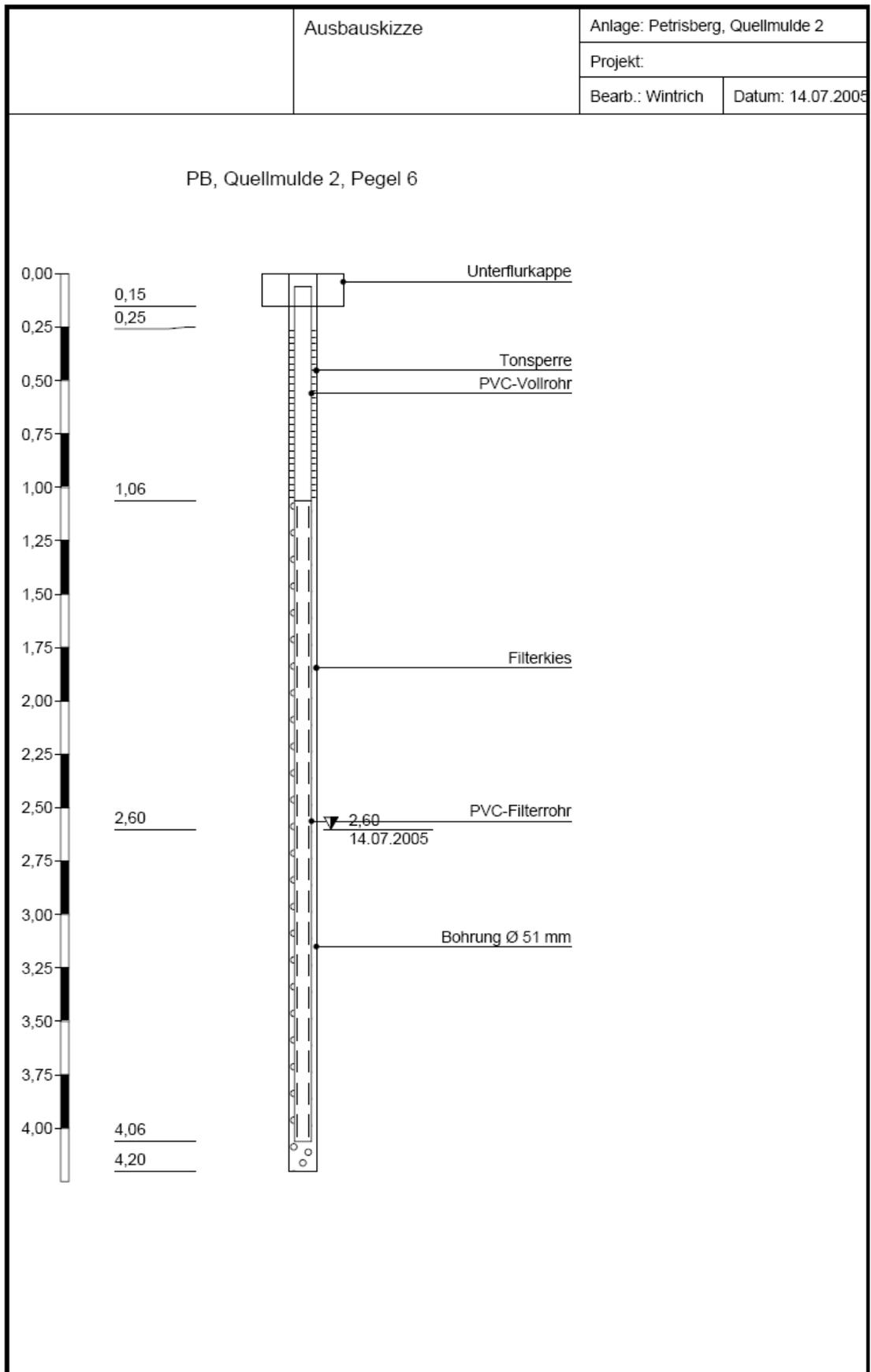


Abb. XXVII: Ausbauskizze des Pegels P6.

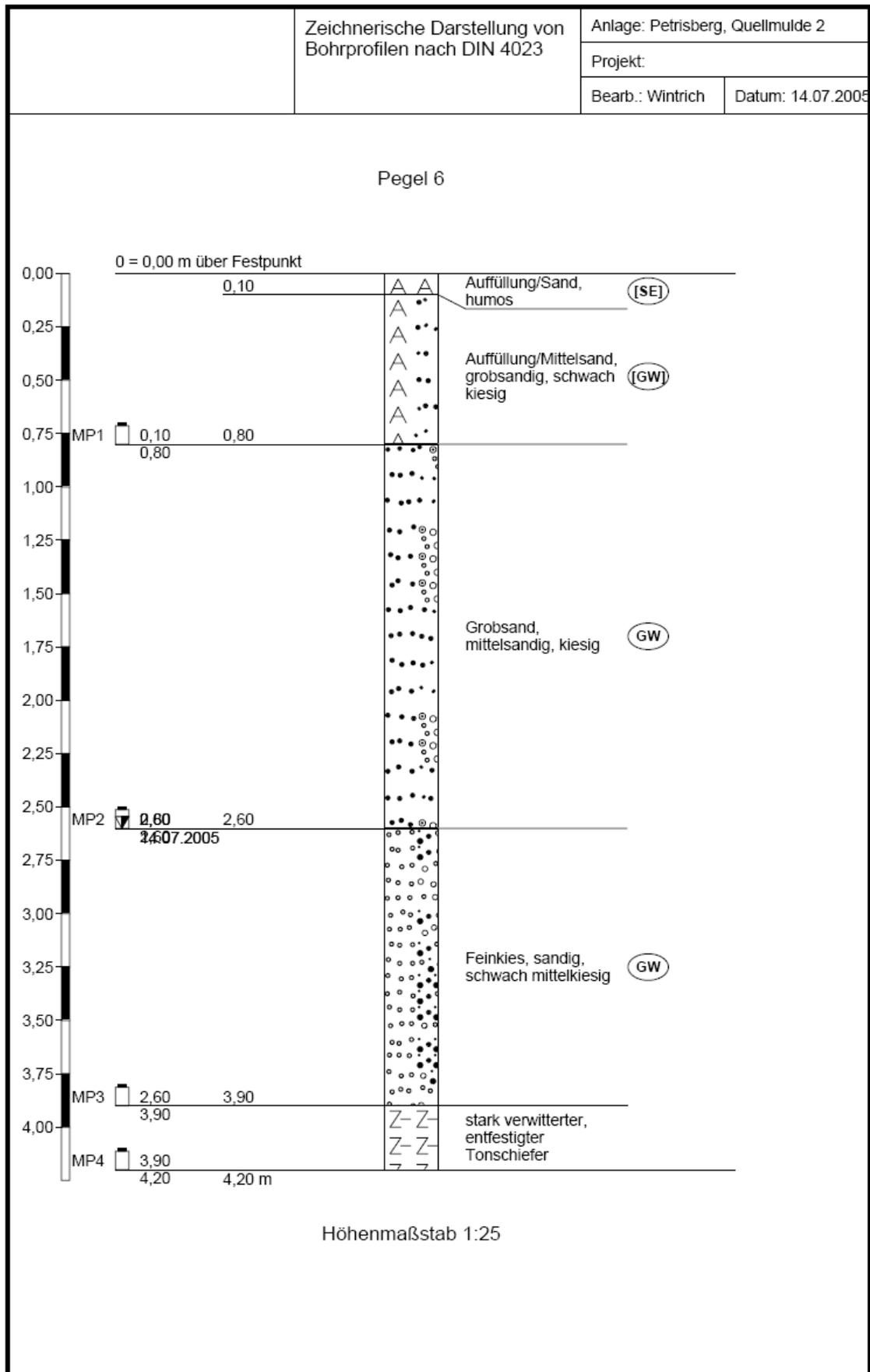


Abb. XXVIII: Bohrprofil des Pegels P6.

Tab. VI: Schichtenverzeichnis des Pegels P6.

		Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis				Anlage		
						Bericht:		
						Az.:		
Bauvorhaben:								
Bohrung Nr Pegel 6 /Blatt 1						Datum: 14.07.2005		
1	2			3		4	5	6
Bis ... m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges		Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾					Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe					
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe			i) Kalk- gehalt		
0,10	a) Auffüllung/Sand, humos			trocken-erdfeuc ht				
	b)							
	c)	d) leicht zu bohren	e) dunkelbraun					
	f) Oberboden	g) Auffüllung	h) [SE] i) 0					
0,80	a) Auffüllung/Mittelsand, grobsandig, schwach kiesig			erdfeucht		MP	1	0,80
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) hellbraun					
	f)	g) Auffüllung	h) [GW] i) 0					
2,60	a) Grobsand, mittelsandig, kiesig			erdfeucht		MP	2	2,60
	b)							
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) braun, bunt					
	f)	g) Quartär	h) GW i) 0					
3,90	a) Feinkies, sandig, schwach mittelkiesig			bis 2,70m feucht ab 2,70m nass		MP	3	3,90
	b)							
	c) mitteldicht	d) schq	e) braun, bunt					
	f)	g) Quartär	h) GW i) 0					
4,20	a) stark verwitterter, entfestigter Tonschiefer			erdfeucht		MP	4	4,20
	b)							
	c) halbfest	d) schwer zu bohren	e) violett					
	f)	g) Devon	h) i) 0					

¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

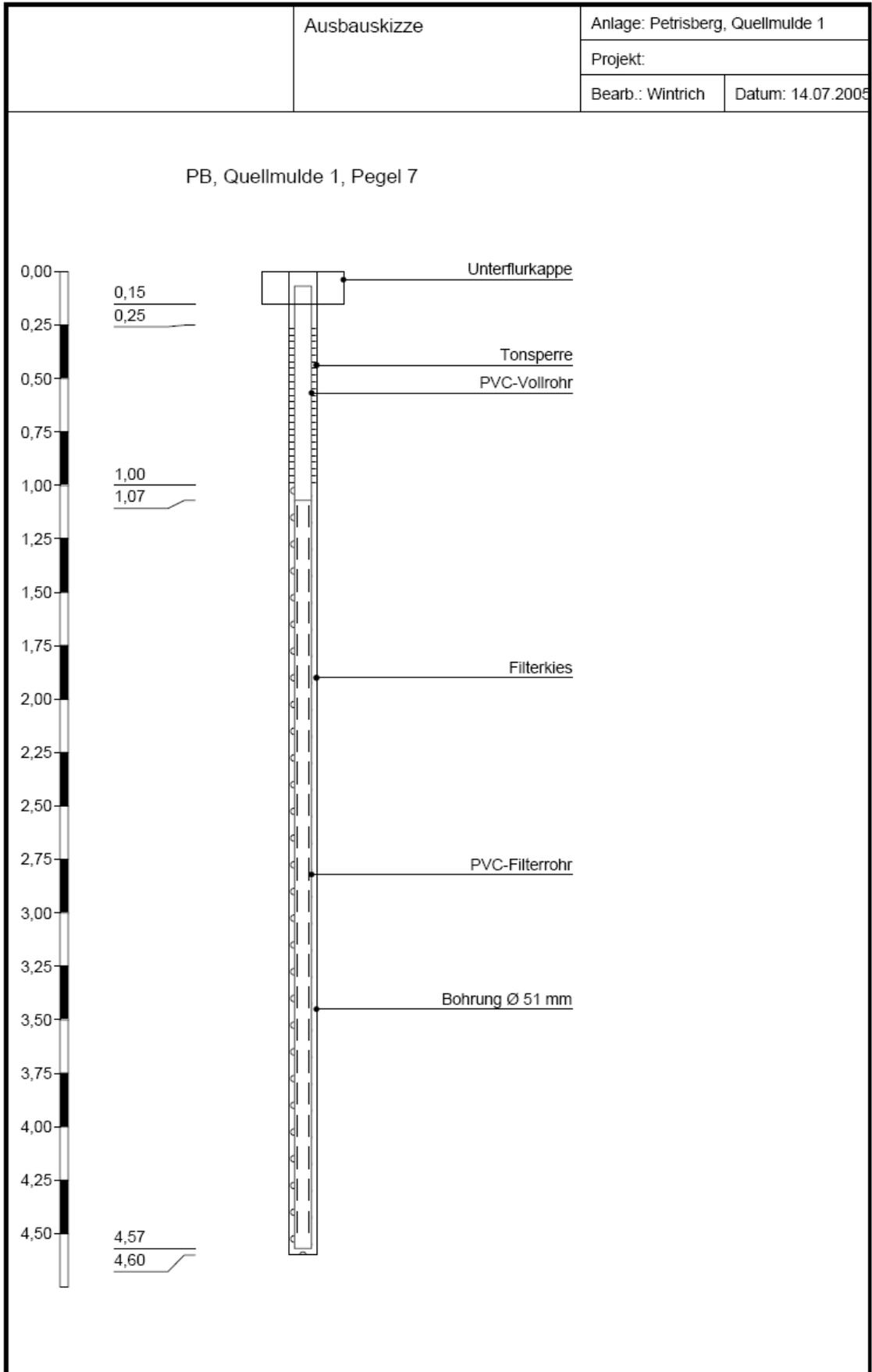


Abb. XXIX: Ausbauskizze des Pegels P7.

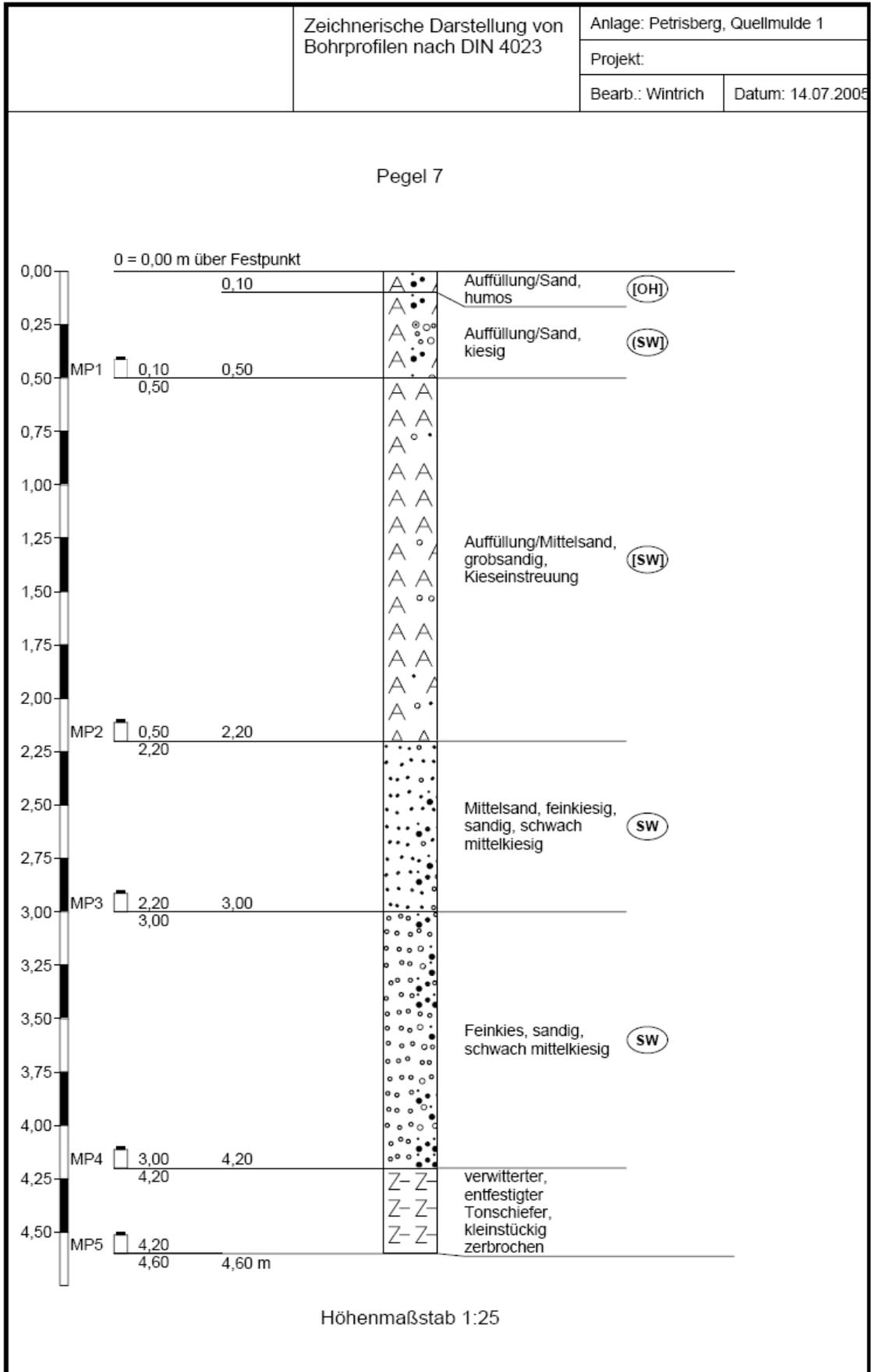


Abb. XXX: Bohrprofil des Pegels P7.

Tab. VII: Schichtenverzeichnis des Pegels P7.

		Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis				Anlage		
						Bericht:		
						Az.:		
Bauvorhaben:						Datum:		
Bohrung Nr Pegel 7 /Blatt 1					14.07.2005			
1	2				3	4	5	6
Bis ... m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen				Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾					Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe					
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe	i) Kalk- gehalt				
0,10	a) Auffüllung/Sand, humos				trocken			
	b)							
	c)	d) leicht zu bohren	e) dunkelbraun					
	f) Oberboden	g) Auffüllung	h) [OH]	i) 0				
0,50	a) Auffüllung/Sand, kiesig				erdfeucht	MP	1	0,50
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) braun					
	f)	g) Auffüllung	h) (SW]	i) 0				
2,20	a) Auffüllung/Mittelsand, grobsandig, Kieseinstreuung				erdfeucht	MP	2	2,20
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) gelbbraun					
	f)	g) Auffüllung	h) [SW]	i) 0				
3,00	a) Mittelsand, feinkiesig, sandig, schwach mittelkiesig				erdfeucht	MP	3	3,00
	b)							
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) hellbraun, bunt					
	f)	g) Quartär	h) SW	i) 0				
4,20	a) Feinkies, sandig, schwach mittelkiesig				erdfeucht	MP	4	4,20
	b) mit Manganausscheidungen							
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) braunschwarz					
	f)	g) Quartär	h) SW	i) 0				
¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.								

Fortsetzung: Schichtenverzeichnis des Pegels P7.

		Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis				Anlage	
						Bericht:	
						Az.:	
Bauvorhaben:						Datum:	
Bohrung Nr Pegel 7 /Blatt 2					14.07.2005		
1	2			3	4	5	6
Bis m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾				Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe				
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe		i) Kalk- gehalt		
4,60	a) verwitterter, entfestigter Tonschiefer, kleinstückig zerbrochen			trocken	MP	5	4,60
	b)						
	c) mürbe	d) schwer zu bohren	e) dunkelgrau, violett				
	f)	g) Devon	h) i) 0				
	a)						
	b)						
	c)	d)	e)				
	f)	g)	h) i)				
	a)						
	b)						
	c)	d)	e)				
	f)	g)	h) i)				
	a)						
	b)						
	c)	d)	e)				
	f)	g)	h) i)				
	a)						
	b)						
	c)	d)	e)				
	f)	g)	h) i)				

¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

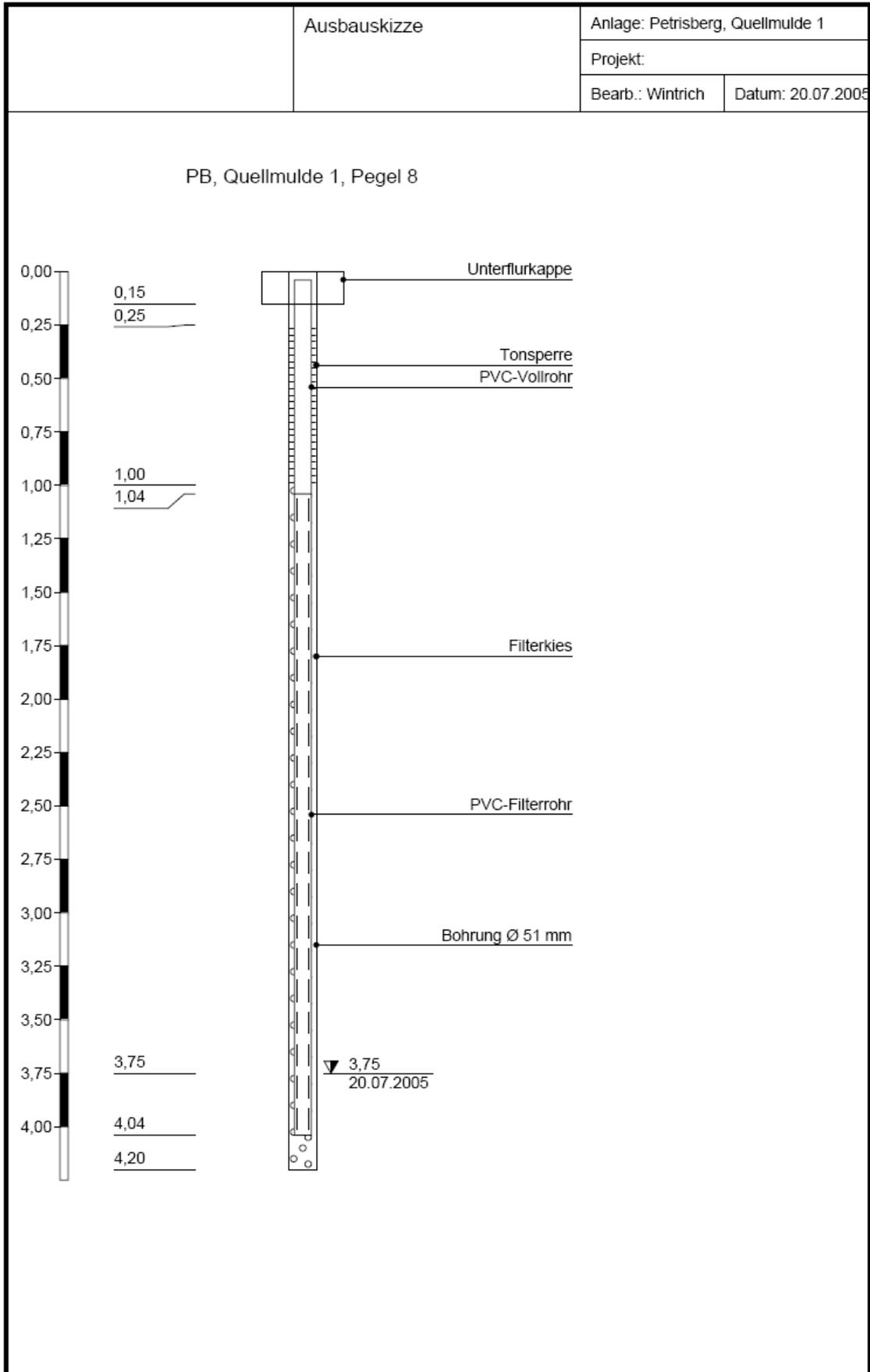


Abb. XXXI: Ausbauskizze des Pegels P8.

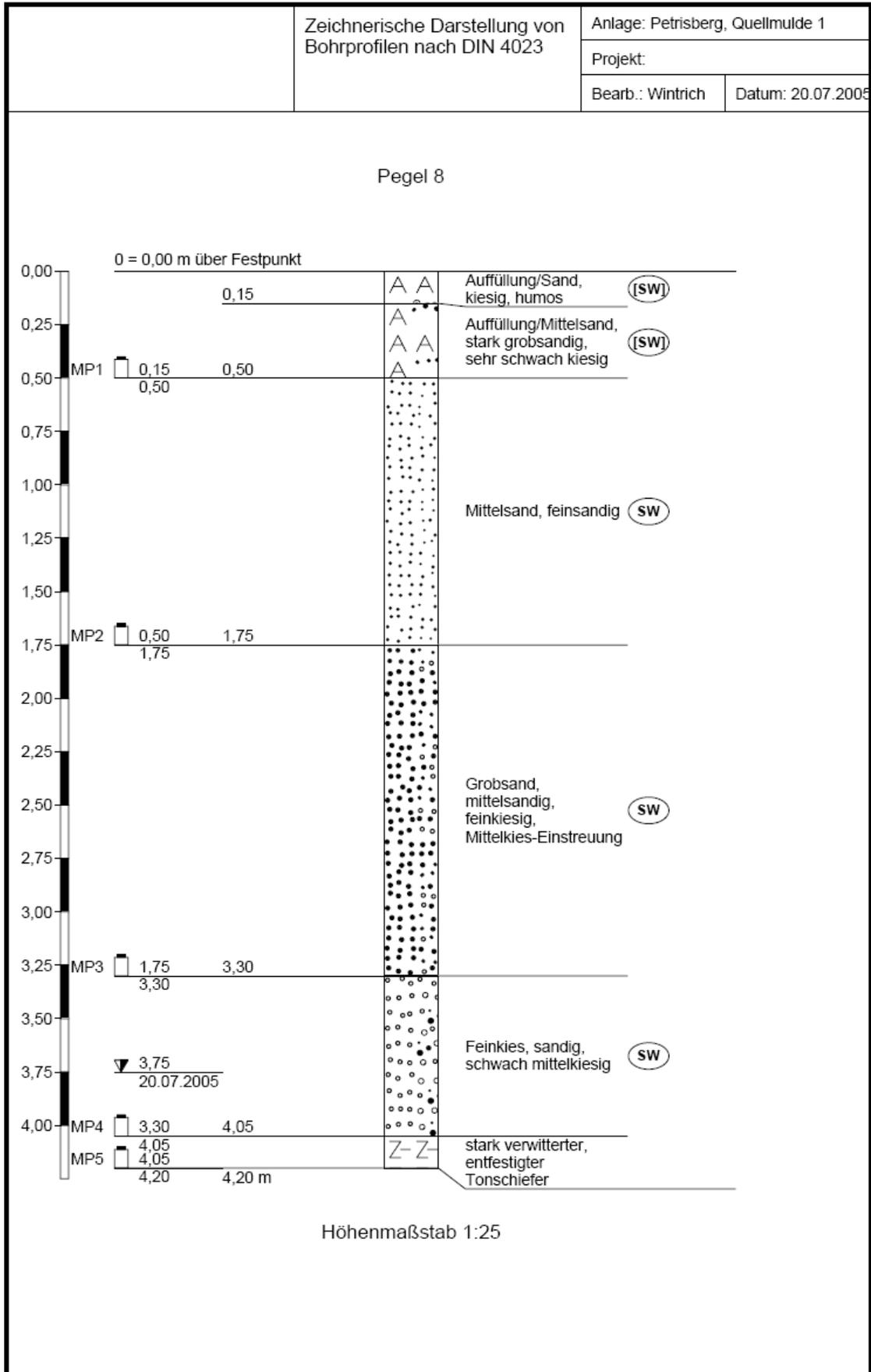


Abb. XXXII: Bohrprofil des Pegels P8.

Tab. VIII: Schichtenverzeichnis des Pegels P8.

		Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis				Anlage		
						Bericht:		
						Az.:		
Bauvorhaben:								
Bohrung Nr Pegel 8 /Blatt 1						Datum: 20.07.2005		
1	2			3		4	5	6
Bis ... m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges		Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾					Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe					
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe			i) Kalk- gehalt		
0,15	a) Auffüllung/Sand, kiesig, humos			trocken				
	b)							
	c)	d) leicht zu bohren	e) dunkelbraun					
	f) Oberboden	g) Auffüllung	h) [SW]					
0,50	a) Auffüllung/Mittelsand, stark grobsandig, sehr schwach kiesig					MP	1	0,50
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) braun					
	f)	g) Auffüllung	h) [SW]					
1,75	a) Mittelsand, feinsandig			erdfeucht		MP	2	1,75
	b)							
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) rotbraun					
	f)	g) Quartär ?	h) SW					
3,30	a) Grobsand, mittelsandig, feinkiesig, Mittelkies-Einstreuung			erdfeucht		MP	3	3,30
	b)							
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) rotbraun, bunt					
	f)	g) Quartär	h) SW					
4,05	a) Feinkies, sandig, schwach mittelkiesig			bis 3,50m erdfeucht ab 3,60m nass		MP	4	4,05
	b)							
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) hellbraun/bei ge/bunt					
	f)	g) Quartär	h) SW					

¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

Fortsetzung: Schichtenverzeichnis des Pegels P8.

		Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis				Anlage Bericht: Az.:		
Bauvorhaben:								
Bohrung Nr Pegel 8 /Blatt 2						Datum: 20.07.2005		
1	2				3	4	5	6
Bis ... m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen				Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen 1)					Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe					
	f) Übliche Benennung	g) Geologische 1) Benennung	h) 1) Gruppe	i) Kalk- gehalt				
4,20	a) stark verwitterter, entfestigter Tonschiefer				erdfeucht	MP	5	4,20
	b)							
	c) mürbe	d) schwer zu bohren	e) rötlich violett					
	f) Verwitterungsge- stein	g) Devon	h)	i) 0				
	a)							
	b)							
	c)	d)	e)					
	f)	g)	h)	i)				
	a)							
	b)							
	c)	d)	e)					
	f)	g)	h)	i)				
	a)							
	b)							
	c)	d)	e)					
	f)	g)	h)	i)				
	a)							
	b)							
	c)	d)	e)					
	f)	g)	h)	i)				

1) Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

Tab. IX: Schichtenverzeichnis des Pegels P9.

Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis		Anlage Bericht: Az.:					
Bauvorhaben:							
Bohrung Nr Pegel 9					Datum: 20.07.2006		
1	2			3	4	5	6
Bis m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾				Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe				
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe		i) Kalk- gehalt		
0,25	a) Schluff, feinsandig			erdfeucht Hilfsver- rohrung	MP	1	0,25
	b) Schlammfang						
	c) steif	d) leicht zu bohren	e) rötlich braun				
	f)	g) Quartär	h) i) 0				
1,2	a) Mittelkies, feinkiesig, sandig, schluffig			erdfeucht	MP	2	1,2
	b)						
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) rötlich braun				
	f)	g) Quartär	h) i) 0				
4,2	a) Feinkies, schwach mittelkiesig			ab 2,8 erdfeucht	MP	3	4,2
	b)						
	c) mitteldicht	d) leicht zu bohren	e) braun gelblich				
	f)	g) Quartär	h) i) 0				
4,4	a) Ton, schluffig, feinsandig			erdfeucht - trocken	MP	4	4,4
	b) Tonschieferbruch, mürbe						
	c) halbfest	d)	e) rötlich				
	f) Verwitte- rungszone	g) Tertiär	h) i) 0				

¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

Tab. X: Schichtenverzeichnis des Pegels P10.

Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis		Anlage Bericht: Az.:					
Bauvorhaben:							
Bohrung Nr Pegel 10					Datum: 24.07.2006		
1	2			3	4	5	6
Bis m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾				Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe				
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe		i) Kalk- gehalt		
0,1	a) Auffüllung (Rindenmulch)			Ø 80 mm Hilfsver- rohrung 1 ¼" Pegel			
	b)						
	c) locker	d)	e) braun				
	f)	g) Auffüllung	h) i) 0				
0,25	a) Auffüllung (Beton)			trocken			
	b) Rückenstütze Bordstein						
	c) hart	d) schwer zu bohren	e) grau				
	f)	g) Auffüllung	h) i) 0				
0,9	a) Auffüllung (Splitt, schwach sandig)			trocken			
	b)						
	c) locker	d) schwer zu bohren	e) grau				
	f)	g) Auffüllung	h) i) 0				
1,2	a) Auffüllung (Schluff, sandig, schwach kiesig, schwach steinig)			erdfeucht – trocken umgelagerter Boden			
	b) Bauschuttreste						
	c)	d)	e) rotbraun				
	f)	g) Auffüllung	h) i) 0				
2,4	a) Schluff, feinsandig, Feinsand, schluffig			erdfeucht - trocken	MP	1	2,4
	b)						
	c) steif	d) locker zu bohren	e) rotbraun				
	f)	g) Quartär	h) i) 0				
5,4	a) Feinsand, schwach mittelsandig			erdfeucht	MP	2 3	3,2 5,4
	b) ab 3,2m vereinzelt Kiesbänder						
	c)	d) schwer zu bohren	e) rötlich braun				
	f)	g) Tertiär	h) i) 0				

¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

Fortsetzung: Schichtenverzeichnis des Pegels P9.

7,0	a) Feinkies, mittelkiesig, sandig			erdfeucht	MP	4	7,0
	b) Mangan-Ausscheidungen						
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) gelbbraun – dunkelbraun schwarz				
	f)	g) Quartär	h) i) 0				
1) Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.							

Tab. XI: Schichtenverzeichnis des Pegels P11.

Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis		Anlage Bericht: Az.:					
Bauvorhaben:							
Bohrung Nr Pegel 11					Datum: 24.07.2006		
1	2			3	4	5	6
Bis m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾				Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe				
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe		i) Kalk- gehalt		
0,1	a) Auffüllung (Rindenmulch)			Ø 80 mm Hilfsver- rohrung 1 ¼" Pegel			
	b)						
	c) locker	d)	e) braun				
	f)	g) Auffüllung	h) i)				
2,1	a) Auffüllung (Schluff, feinsandig, schwach tonig, schwach steinig)				MP	1	2,1
	b) Bauschuttreste, vereinzelt bei 1,4 – 1,7 m Schlacken						
	c) steif	d) locker zu bohren	e) rotbraun				
	f)	g) Auffüllung	h) i) 0				
3,0	a) Feinsand, sehr schwach mittelsandig, sehr schwach schluffig			erdfeucht	MP	2	3,0
	b)						
	c) mitteldicht	d) leicht – schwer zu bohren	e) braun				
	f)	g) Quartär	h) i)				
4,8	a) Feinsand, mittelsandig			erdfeucht	MP	3	4,8
	b) lokal dünne Kiesbänder						
	c) mitteldicht	d) locker – schwer zu bohren	e) braun				
	f)	g) Quartär	h) i)				
5,5	a) Mittelkies, grobkiesig, sandig, schluffig			erdfeucht verlehnte Terrasse	MP	4	5,5
	b) Manganausscheidungen, dunkelbraun						
	c) dicht	d) schwer zu bohren	e) beige, bunt				
	f) HT	g) Quartär	h) i) 0				
	a)						
	b) ab 5,5 m kein Bohrfortschritt, Quarzgeröll → Abbruch der Bohrung						
	c)	d)	e)				
	f)	g)	h) i)				

¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

Tab. XII: Schichtenverzeichnis des Pegels P12.

Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis		Anlage Bericht: Az.:					
Bauvorhaben:							
Bohrung Nr Pegel 12					Datum: 24.07.2006		
1	2			3	4	5	6
Bis m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾				Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe				
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe		i) Kalk- gehalt		
0,9	a) Auffüllung (Schluff, Sand, Kies)			trocken Ø 80 mm Hilfsver- rohrung	MP	1	0,9
	b)						
	c) halbfest	d) schwer zu bohren	e) rotbraun, bunt				
	f)	g) Auffüllung	h) i)				
1,9	a) Schluff (tonig, sandig, schwach kiesig)			erdfeucht	MP	2	1,9
	b)						
	c) steif	d) schwer zu bohren	e) rotbraun				
	f) Decklehm	g) Quartär	h) i)				
2,8	a) Mittelkies, feinkiesig, sandig			nass, Wasserstand nach Bohrende bei 2,4 m	MP	3	2,8
	b)						
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) grau, bunt				
	f)	g) Quartär	h) i)				
3,2	a) Ton, schluffig, feinsandig			erdfeucht	MP	4	3,2
	b) aufgearbeiteter Tonschiefer						
	c) halbfest	d) schwer zu bohren	e) rotviolett				
	f)	g) Tertiär	h) i)				

¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

Tab. XIII: Schichtenverzeichnis des Pegels P13.

Schichtenverzeichnis Schichtenverzeichnis		Anlage Bericht: Az.:					
Bauvorhaben:							
Bohrung Nr Pegel 13					Datum: 24.07.2006		
1	2			3	4	5	6
Bis m unter Ansatz- punkt	a) Benennung der Bodenart und Beimengungen			Bemerkungen Sonderprobe Wasserführung Bohrwerkzeuge Kernverlust Sonstiges	Entnommene Proben		
	b) Ergänzende Bemerkungen ¹⁾				Art	Nr.	Tiefe in m (Unter- kante)
	c) Beschaffenheit nach Bohrgut	d) Beschaffenheit nach Bohrvorgang	e) Farbe				
	f) Übliche Benennung	g) Geologische ¹⁾ Benennung	h) ¹⁾ Gruppe		i) Kalk- gehalt		
0,1	a) Schluff, feinsandig, humos			trocken Ø 80 mm Hilfsver- rohrung			
	b) Oberboden						
	c) locker	d) leicht zu bohren	e) dunkel- braun				
	f)	g) Quartär	h) i)				
1,1	a) Schluff, feinsandig			trocken	MP	1	1,1
	b)						
	c) halbfest	d) schwer zu bohren	e) hellbraun				
	f)	g) Quartär	h) i) 0				
2,4	a) Schluff, tonig, sandig			erdfeucht	MP	2	2,4
	b) Tonschieferbruch						
	c) steif	d) leicht zu bohren	e) rotbraun				
	f) Decklehm	g) Quartär	h) i)				
4,15	a) Feinkies, schwach mittelkiesig, schwach schluffig			feucht	MP	3	4,2
	b) Tonschieferbruchbeimengung						
	c) mitteldicht	d) schwer zu bohren	e) rotbraun				
	f)	g) Quartär	h) i)				
4,2	a) Ton, schluffig, feinsandig			erdfeucht			
	b) Tonschieferbruchstückchen						
	c) halbfest	d) schwer zu bohren	e) rot, beige				
	f)	g) Tertiär	h) i)				

¹⁾ Eintragung nimmt der wissenschaftliche Bearbeiter vor.

**Tab. XIV: Übersicht über die Anzahl der Tage, an denen die Pegel infolge Einstau unter Wasser lagen
(Betrachtungszeitraum: 01.11.2005-31.10.2006).**

Pegel-ID	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Anzahl der Tage mit Überstau	5	23	55	18	58	8	1	2	-	-	-	-	6

Tab. XV: Korrelationen zwischen den Pegeln.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P12	P13
P1	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	1	,844(**)	,834(**)	,891(**)	,979(**)	,925(**)	,881(**)	,871(**)	,856(**)	,918(**)
	N	284	234	270	231	280	283	284	80	80	79
P2	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,875(**)	1	,948(**)	,987(**)	,920(**)	,700(**)	,752(**)	,929(**)	,945(**)	,822(**)
	N	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
P3	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,844(**)	,948(**)	1	,956(**)	,866(**)	,678(**)	,739(**)	,964(**)	,941(**)	,705(**)
	N	,000	1	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
P4	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,834(**)	,972(**)	,971(**)	1	,867(**)	,666(**)	,692(**)	,939(**)	,949(**)	,788(**)
	N	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
P5	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,891(**)	,987(**)	,956(**)	,981(**)	1	,746(**)	,810(**)	,951(**)	,974(**)	,806(**)
	N	270	271	229	229	271	271	271	80	80	79
P6	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,979(**)	,866(**)	,867(**)	,932(**)	,932(**)	,919(**)	,902(**)	,859(**)	,860(**)	,959(**)
	N	,000	,000	,000	,000	1	,000	,000	,000	,000	,000
P7	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,925(**)	,700(**)	,678(**)	,746(**)	,919(**)	1	,941(**)	,735(**)	,750(**)	,916(**)
	N	,000	,000	,000	,000	,000	1	,000	,000	,000	,000
P8	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,881(**)	,752(**)	,739(**)	,692(**)	,810(**)	,941(**)	1	,746(**)	,805(**)	,914(**)
	N	283	265	233	271	230	288	286	85	85	79
P9	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,871(**)	,929(**)	,964(**)	,939(**)	,951(**)	,735(**)	,746(**)	1	,955(**)	,789(**)
	N	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1	,000	,000
P12	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,856(**)	,945(**)	,941(**)	,974(**)	,860(**)	,750(**)	,805(**)	,955(**)	1	,821(**)
	N	80	72	66	80	81	85	83	85	85	79
P13	Korrelation nach Pearson Signifikanz (2-seitig)	,918(**)	,822(**)	,705(**)	,788(**)	,806(**)	,916(**)	,914(**)	,789(**)	,821(**)	1
	N	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	79	72	66	79	63	79	79	79	79	79

** Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Tab. XVI: Ermittlung des Grundwasserspiegelanstiegs anhand der Grundwasserstandsganglinien.

Winterhalbjahr 1.11.05-30.4.06				
	27.11.05	13.05.06	m	cm
P1	244,54	244,72	0,18	18
P2	245,17	245,30	0,13	13
P3	245,46	245,13	-0,33	-33
P4	245,35	245,33	-0,02	-2
P5	245,39	245,51	0,12	12
P6	245,15	245,35	0,21	21
P7	245,17	245,44	0,27	27
P8	245,21	245,47	0,26	26
			Mittel	10

Sommerhalbjahr 1.05.06-31.10.06				
	13.05.06	23.10.06	m	cm
P1	244,72	244,86	0,14	14
P2	245,30	245,50	0,20	20
P3	245,13	245,46	0,33	33
P4	245,33	245,63	0,30	29,5
P5	245,51	245,79	0,28	28
P6	245,35	245,46	0,11	11
P7	245,44	245,52	0,08	8
P8	245,47	245,54	0,07	7
			Mittel	19

Abflussjahr 1.11.05-31.10.06				
	27.11.05	23.10.06	m	cm
P1	244,54	244,86	0,32	32
P2	245,17	245,50	0,33	33
P3	245,46	245,46	0,00	0
P4	245,35	245,63	0,28	28
P5	245,39	245,79	0,40	40
P6	245,15	245,46	0,31	31
P7	245,17	245,52	0,35	35
P8	245,21	245,54	0,33	33
			Mittel	29

Tab. XVII: Simulationsergebnisse für den Zeitraum 1967 - 1997.

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
17.8.1972	10,1	57	89
17.7.1981	10,1	57	89
6.6.1986	10,1	61	87
11.6.1988	10,1	62	89
23.9.1988	10,1	68	92
15.8.1993	10,1	55	88
10.8.1974	10,2	70	93
16.1.1981	10,2	56	83
10.5.1986	10,2	54	85
25.11.1987	10,2	66	79
14.9.1989	10,2	60	85
20.10.1992	10,2	67	88
25.8.1973	10,3	57	89
7.12.1973	10,3	50	84
11.7.1975	10,3	62	85
24.6.1985	10,3	60	89
13.8.1986	10,3	55	87
26.5.1994	10,3	62	86
22.7.1995	10,3	57	85
3.11.1968	10,4	56	83
19.8.1970	10,4	53	86
9.9.1970	10,4	71	89
8.6.1978	10,4	57	90
27.3.1979	10,4	65	90
2.3.1984	10,4	66	90
03.03.1997	10,4	67	83
2.2.1970	10,5	55	78
10.3.1970	10,5	54	87
31.3.1970	10,5	62	89
2.10.1970	10,5	69	91
22.5.1973	10,5	69	90
17.3.1977	10,5	61	85
25.11.1980	10,5	57	82
20.8.1981	10,5	55	82
21.6.1993	10,5	55	87
16.9.1995	10,5	55	86
16.8.1970	10,6	57	84
7.8.1977	10,6	56	90
3.9.1983	10,6	62	90
14.5.1987	10,6	64	87
9.8.1987	10,6	55	81
12.9.1994	10,6	62	85
11.7.1969	10,7	53	78
28.7.1979	10,7	55	88
30.5.1981	10,7	51	83
8.10.1985	10,7	56	85
22.11.1994	10,7	56	79
4.12.1970	10,8	50	83
27.9.1976	10,8	58	82

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
11.12.1977	10,8	61	85
19.12.1988	10,8	60	89
2.11.1989	10,8	57	88
10.6.1991	10,8	63	90
19.6.1969	10,9	54	80
9.6.1971	10,9	54	88
25.9.1974	10,9	61	90
16.3.1981	10,9	61	82
26.9.1981	10,9	54	80
23.10.1981	10,9	61	88
10.4.1984	10,9	52	82
27.6.1988	10,9	62	87
8.1.1992	10,9	71	83
20.5.1993	10,9	65	86
29.11.1996	10,9	60	83
28.12.1967	11	62	92
2.9.1968	11	60	86
2.3.1970	11	53	76
25.3.1979	11	63	90
10.2.1987	11	57	86
8.8.1991	11	60	84
16.05.1997	11	59	85
22.5.1968	11,1	55	86
7.1.1974	11,1	54	80
17.7.1974	11,1	58	87
17.6.1978	11,1	55	87
13.5.1984	11,1	65	87
7.12.1994	11,1	59	86
20.06.1996	11,1	58	82
20.06.1997	11,1	53	88
1.2.1979	11,2	55	67
4.5.1981	11,2	63	85
14.9.1984	11,2	52	82
26.6.1985	11,2	49	80
23.3.1987	11,2	66	82
21.11.1977	11,3	58	87
8.12.1978	11,3	59	84
3.7.1982	11,3	55	86
18.5.1986	11,3	58	89
30.12.1967	11,4	65	82
28.11.1971	11,4	55	63
18.2.1975	11,4	54	84
9.1.1981	11,4	60	80
21.5.1983	11,4	53	84
13.6.1983	11,4	53	87
25.12.1983	11,4	55	86
22.8.1994	11,4	52	87
20.10.1996	11,4	65	86
21.2.1973	11,5	70	89

Fortsetzung von Tab. XVII: Simulationsergebnisse für den Zeitraum 1967 - 1997.

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
24.7.1988	11,5	56	81
15.7.1973	11,6	48	85
3.4.1977	11,6	60	85
7.11.1982	11,6	60	86
21.5.1971	11,7	53	86
11.2.1972	11,7	57	85
18.7.1978	11,7	54	88
17.5.1979	11,7	62	82
15.6.1981	11,7	51	89
6.6.1984	11,7	61	87
14.4.1969	11,8	69	92
4.1.1980	11,8	66	77
7.5.1983	11,8	60	87
9.7.1972	11,9	52	89
26.05.1996	11,9	56	85
15.11.1967	12	52	76
11.3.1969	12	57	86
16.6.1972	12	56	88
14.3.1979	12	64	81
2.7.1984	12	65	87
24.8.1988	12	55	86
16.1.1975	12,1	65	90
9.1.1977	12,1	59	80
6.7.1985	12,1	53	90
6.6.1991	12,1	69	90
6.4.1970	12,2	48	80
16.6.1986	12,2	64	88
11.8.1994	12,2	68	88
12.2.1977	12,3	55	84
1.10.1977	12,3	63	86
31.1.1980	12,3	59	76
23.3.1983	12,3	62	87
26.4.1983	12,3	61	86
3.6.1986	12,3	49	85
18.02.1997	12,3	49	81
10.5.1972	12,4	62	88
6.3.1980	12,4	60	84
9.9.1980	12,4	55	86
11.8.1985	12,4	53	81
13.9.1995	12,4	47	80
22.11.1974	12,5	54	83
14.4.1975	12,5	50	85
27.2.1987	12,5	63	91
6.10.1992	12,5	51	84
1.10.1976	12,6	49	82
1.1.1981	12,6	65	90
25.8.1987	12,6	63	85
2.6.1990	12,6	53	88
20.2.1993	12,6	67	92

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
03.10.1995	12,6	54	81
25.04.1997	12,6	57	86
8.6.1974	12,7	59	82
23.3.1978	12,7	46	77
8.11.1979	12,7	42	80
10.1.1986	12,7	62	85
1.3.1987	12,7	61	83
22.9.1993	12,7	61	87
2.2.1994	12,7	64	88
13.11.1994	12,7	54	85
3.12.1994	12,7	61	84
16.12.1968	12,8	62	86
1.1.1976	12,8	71	88
7.5.1978	12,8	46	78
14.4.1986	12,8	52	83
25.5.1992	12,8	52	89
18.3.1994	12,8	55	77
10.9.1994	12,8	56	80
29.5.1995	12,8	63	87
15.11.1969	12,9	64	87
20.9.1979	12,9	56	89
06.11.1996	12,9	58	88
24.3.1970	13	48	86
2.4.1989	13	56	80
11.11.1991	13	49	75
31.1.1969	13,1	58	85
30.6.1971	13,1	47	79
12.5.1972	13,1	53	81
26.3.1975	13,1	63	90
5.9.1975	13,1	48	82
13.6.1977	13,1	48	80
25.4.1987	13,1	53	83
18.2.1989	13,1	61	85
14.2.1968	13,2	52	79
27.5.1971	13,2	56	85
18.6.1977	13,2	53	85
11.1.1978	13,2	45	69
30.6.1983	13,2	51	79
22.12.1989	13,2	44	73
19.3.1991	13,2	53	80
11.06.1997	13,2	44	85
28.6.1982	13,3	56	81
15.4.1992	13,3	54	81
4.11.1967	13,4	50	86
15.11.1974	13,4	67	91
9.11.1976	13,4	62	82
1.3.1982	13,4	51	82
18.5.1982	13,4	49	82
17.7.1988	13,4	52	82

Fortsetzung von Tab. XVII: Simulationsergebnisse für den Zeitraum 1967 - 1997.

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
5.7.1990	13,4	55	87
17.3.1995	13,4	50	78
18.12.1980	13,5	47	79
30.12.1981	13,5	48	78
12.5.1987	13,5	56	81
14.9.1994	13,5	58	85
27.09.1995	13,5	45	83
24.4.1968	13,6	56	79
2.4.1973	13,6	46	79
9.2.1992	13,6	65	89
6.7.1968	13,7	58	87
13.8.1968	13,7	50	85
15.9.1969	13,7	53	81
28.4.1973	13,7	63	88
28.7.1985	13,7	54	81
19.5.1973	13,8	50	84
16.12.1974	13,8	52	81
1.2.1978	13,8	48	85
27.3.1980	13,8	61	88
5.2.1983	13,8	65	88
22.9.1984	13,8	59	81
19.11.1988	13,8	51	79
07.10.1997	13,8	51	88
28.6.1971	13,9	45	78
20.9.1973	13,9	52	81
30.4.1968	14	61	87
1.11.1975	14	49	82
19.5.1978	14	47	83
22.6.1978	14	49	80
26.6.1987	14	53	86
2.6.1993	14	48	85
17.12.1968	14,1	56	87
26.4.1971	14,1	45	78
27.12.1977	14,1	54	83
20.3.1991	14,1	49	81
21.1.1976	14,2	59	89
23.4.1977	14,2	58	89
9.8.1978	14,2	49	83
2.6.1992	14,2	52	85
30.3.1969	14,3	59	82
26.6.1971	14,3	50	80
2.9.1988	14,3	46	80
18.3.1970	14,4	60	84
3.2.1977	14,4	70	89
1.5.1977	14,4	47	73
23.10.1980	14,4	61	82
2.10.1981	14,4	55	83
12.7.1973	14,5	51	84
24.6.1978	14,5	52	85

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
20.7.1980	14,6	53	86
27.7.1987	14,6	49	81
3.6.1990	14,6	48	85
19.8.1994	14,6	52	82
7.8.1995	14,6	51	81
28.1.1969	14,7	53	79
28.9.1973	14,7	55	88
24.11.1974	14,7	62	85
2.9.1976	14,7	46	76
24.9.1993	14,7	58	81
31.7.1968	14,8	47	85
4.4.1972	14,8	64	90
7.2.1979	14,8	52	84
26.3.1981	14,8	44	82
24.5.1986	14,8	47	81
25.4.1970	14,9	57	86
3.8.1971	14,9	49	80
10.4.1972	14,9	52	79
10.7.1968	15	52	81
24.12.1978	15	53	78
6.2.1987	15	47	79
14.7.1993	15	52	81
5.6.1971	15,1	47	86
12.12.1982	15,1	51	74
5.10.1991	15,1	47	81
18.1.1995	15,1	47	75
13.3.1969	15,2	59	87
17.3.1974	15,2	56	89
29.5.1975	15,2	52	88
12.10.1976	15,2	57	67
10.3.1982	15,2	57	89
7.3.1989	15,2	44	78
5.6.1992	15,2	55	82
10.11.1972	15,3	48	83
15.12.1982	15,3	58	82
18.12.1983	15,3	44	77
21.9.1982	15,4	41	80
4.9.1987	15,4	60	87
28.5.1988	15,4	56	88
24.7.1991	15,4	56	83
8.10.1968	15,5	62	84
6.8.1971	15,5	44	83
11.7.1974	15,5	54	85
10.2.1977	15,5	61	86
16.6.1970	15,6	45	80
30.11.1970	15,6	50	81
30.10.1976	15,6	45	85
2.3.1995	15,6	47	69
13.7.1981	15,7	52	85

Fortsetzung von Tab. XVII: Simulationsergebnisse für den Zeitraum 1967 - 1997.

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
17.10.1991	15,7	66	92
23.11.1969	15,8	53	67
9.8.1979	15,8	53	83
21.10.1974	15,9	48	69
11.9.1975	15,9	61	91
9.1.1982	15,9	50	87
17.3.1987	15,9	54	77
28.11.1992	15,9	49	72
12.4.1970	16	54	88
25.11.1992	16	54	82
19.5.1984	16,1	45	83
10.8.1989	16,1	51	85
16.1.1969	16,2	52	82
25.1.1985	16,2	56	85
7.8.1994	16,2	51	88
21.2.1968	16,3	59	82
25.3.1978	16,3	59	85
3.2.1981	16,3	54	78
6.7.1986	16,3	65	88
30.11.1988	16,3	52	85
3.11.1991	16,3	56	86
05.07.1996	16,3	53	86
21.12.1973	16,4	60	85
14.1.1981	16,4	44	76
3.8.1984	16,4	47	84
28.5.1969	16,5	48	78
20.8.1969	16,5	56	89
2.6.1987	16,5	62	89
27.10.1992	16,5	40	77
13.5.1978	16,6	63	85
22.1.1984	16,6	65	80
23.07.1996	16,6	47	80
14.7.1984	16,7	47	81
12.2.1976	16,8	57	79
1.11.1986	16,8	44	78
23.11.1977	16,9	45	77
31.3.1980	16,9	64	90
26.4.1980	16,9	42	81
8.2.1985	16,9	50	77
20.6.1973	17	55	87
25.2.1983	17	69	86
8.7.1970	17,1	49	83
27.11.1975	17,1	54	80
2.3.1981	17,2	49	82
13.1.1983	17,2	64	87
25.7.1984	17,2	44	84
20.05.1997	17,3	56	84
4.2.1970	17,4	54	84
19.11.1972	17,4	51	83

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
19.6.1990	17,4	49	86
11.12.1974	17,5	52	80
24.9.1994	17,5	49	80
12.2.1973	17,6	41	77
11.5.1992	17,6	46	77
26.2.1984	17,7	53	82
23.2.1995	17,7	59	83
27.7.1995	17,7	51	86
19.7.1993	17,8	48	82
18.1.1986	17,9	56	80
29.9.1974	18	53	87
8.3.1981	18	61	77
12.12.1986	18	61	87
29.7.1987	18	45	81
13.7.1991	18	43	79
12.10.1991	18	43	76
4.6.1982	18,1	39	85
4.9.1984	18,2	44	83
10.9.1993	18,2	55	87
18.7.1994	18,2	53	83
19.6.1985	18,3	44	77
6.11.1991	18,3	52	85
30.9.1970	18,4	53	83
23.8.1987	18,4	46	80
17.05.1997	18,4	41	80
1.1.1977	18,5	51	69
15.3.1985	18,6	59	86
17.9.1994	18,6	66	92
19.8.1971	18,7	49	81
16.3.1989	18,7	51	81
9.5.1993	18,7	42	82
16.5.1972	18,9	44	71
31.7.1978	18,9	48	79
9.3.1979	18,9	41	80
27.3.1987	18,9	53	83
13.7.1988	19	67	88
4.4.1994	19	60	86
17.12.1987	19,1	45	80
5.1.1968	19,2	56	86
16.8.1990	19,2	49	81
21.12.1968	19,3	53	80
12.2.1970	19,3	36	77
2.11.1976	19,3	49	85
21.1.1980	19,3	63	89
1.4.1984	19,3	45	76
27.11.1981	19,4	51	82
21.5.1984	19,4	40	80
8.9.1993	19,4	48	85
18.6.1971	19,5	43	76

Fortsetzung von Tab. XVII: Simulationsergebnisse für den Zeitraum 1967 - 1997.

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
10.2.1969	19,6	55	74
16.11.1975	19,6	47	73
9.6.1977	19,6	49	80
12.12.1978	19,6	51	79
27.6.1974	19,7	59	85
16.8.1975	19,7	48	83
7.7.1978	19,7	59	87
2.2.1980	19,7	52	85
16.3.1982	19,7	55	85
30.7.1991	19,7	40	84
5.2.1974	19,8	54	83
7.4.1982	19,8	47	77
27.1.1988	19,8	54	76
29.6.1988	19,8	66	88
27.9.1971	19,9	46	77
5.9.1980	19,9	41	83
24.04.1989	20	44	68
03.05.1987	20,1	49	80
25.01.1977	20,2	62	83
11.03.1981	20,2	57	86
19.11.1987	20,2	69	92
26.08.1969	20,3	50	81
12.08.1977	20,3	43	83
28.09.1978	20,3	57	86
21.07.1981	20,3	57	86
18.08.1987	20,3	44	82
23.09.1987	20,4	60	87
05.04.1989	20,4	50	84
21.04.1989	20,4	40	75
16.08.1969	20,6	47	79
06.06.1990	20,6	63	89
13.10.1993	20,6	50	79
19.03.1978	20,8	50	79
19.12.1982	20,8	38	73
25.09.1991	20,8	49	81
26.03.1984	20,9	62	90
18.03.1995	20,9	39	77
07.09.1995	20,9	54	84
28.06.1981	21	40	79
12.02.1996	21	41	77
12.11.1987	21,1	52	80
20.03.1968	21,2	51	82
14.07.1968	21,2	49	79
15.02.1995	21,3	55	81
12.12.1973	21,4	55	81
15.11.1992	21,4	53	85
07.12.1993	21,4	56	81
10.05.1983	21,5	57	81
23.07.1989	21,5	45	82

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
11.07.1984	21,6	39	83
26.03.1985	21,6	51	85
08.06.1997	21,6	39	78
18.12.1986	21,8	45	78
29.09.1984	21,9	62	90
23.07.1986	22	47	80
12.03.1992	22	48	77
02.12.1975	22,2	40	72
01.07.1980	22,2	49	79
29.11.1981	22,2	68	82
11.07.1995	22,2	40	83
24.02.1969	22,3	51	78
07.07.1969	22,4	40	83
05.10.1993	22,4	46	80
21.04.1969	22,6	54	84
16.11.1970	22,6	58	89
11.06.1982	22,6	54	85
14.06.1979	22,8	44	79
22.03.1981	23	55	81
30.01.1983	23	54	88
16.07.1987	23	44	82
03.07.1995	23	39	82
08.04.1994	23,1	56	80
09.06.1985	23,2	40	79
12.09.1989	23,4	43	85
14.03.1983	23,7	43	80
17.12.1984	23,7	50	67
17.12.1985	23,7	50	67
15.06.1987	23,7	51	79
05.06.1985	23,9	54	84
10.09.1972	24	38	77
04.02.1980	24,2	52	78
30.05.1988	24,3	48	86
20.10.1988	24,3	38	78
23.10.1982	24,5	40	71
05.05.1984	24,5	37	79
06.04.1985	24,5	50	80
29.03.1986	24,5	56	81
18.11.1986	24,5	57	86
28.10.1989	24,5	52	85
27.01.1975	24,6	54	82
28.06.1980	24,6	37	80
23.01.1994	24,6	56	83
02.04.1975	24,7	48	71
14.09.1988	24,7	53	80
14.09.1968	24,8	44	78
07.10.1980	24,9	48	79
06.10.1970	25	40	80
02.08.1987	25	50	81

Fortsetzung von Tab. XVII: Simulationsergebnisse für den Zeitraum 1967 - 1997.

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
29.07.1970	25,1	37	81
31.03.1994	25,1	54	81
29.08.1980	25,2	49	81
26.08.1982	25,3	35	83
10.08.1996	25,3	41	82
16.05.1995	25,5	50	81
22.03.1992	25,6	55	81
12.11.1972	25,8	46	77
28.10.1977	25,8	37	79
12.02.1987	25,8	62	81
22.09.1990	25,8	38	76
12.02.1997	25,8	47	78
29.10.1994	25,9	48	85
23.04.1979	26,1	54	85
30.04.1991	26,1	45	81
08.01.1995	26,2	56	79
13.12.1980	26,3	50	80
26.05.1972	26,4	55	90
26.06.1997	26,4	47	80
02.05.1980	26,5	41	78
04.10.1977	26,6	42	82
23.05.1979	26,7	50	78
09.09.1983	26,7	41	81
10.11.1992	26,7	51	84
26.03.1972	26,9	50	84
19.10.1974	26,9	41	78
09.01.1991	26,9	47	80
06.12.1976	27	52	85
25.10.1984	27	42	80
08.07.1989	27	46	83
01.08.1992	27	31	83
13.12.1979	27,1	48	78
05.05.1997	27,2	53	86
18.11.1996	27,3	49	78
05.06.1977	27,4	49	82
30.05.1984	27,7	35	79
22.03.1986	27,7	43	82
09.10.1981	27,8	44	84
15.11.1980	28	46	77
13.06.1997	28	36	79
21.07.1972	28,1	39	80
24.07.1972	28,1	31	82
22.06.1980	28,1	47	78
26.07.1985	28,1	27	83
16.06.1980	28,3	42	83
03.08.1981	28,3	37	82
27.07.1993	28,6	43	80
18.10.1984	29,2	45	82
01.01.1988	29,4	51	80

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
14.10.1981	29,5	34	80
28.06.1970	29,6	43	80
21.01.1986	29,6	56	85
23.06.1969	29,7	43	83
17.06.1997	29,7	33	77
26.08.1971	29,8	37	76
06.12.1981	29,8	47	77
03.06.1984	29,8	35	77
02.04.1979	29,9	51	82
07.09.1987	29,9	35	81
07.10.1974	30	44	76
17.03.1975	30,2	47	81
19.07.1987	30,3	48	83
29.05.1979	30,4	39	82
14.03.1978	30,5	45	79
01.05.1973	30,6	46	83
24.12.1974	30,6	47	79
17.12.1979	30,6	40	81
19.02.1970	30,9	53	84
27.11.1974	30,9	53	85
31.07.1985	30,9	34	83
29.06.1990	30,9	45	80
06.09.1994	30,9	50	80
21.04.1986	31	34	81
30.08.1968	31,1	36	76
01.05.1978	31,3	44	84
12.09.1986	31,5	40	73
04.01.1982	31,6	43	76
06.12.1982	31,6	57	84
11.10.1997	31,6	35	80
17.04.1995	31,7	52	88
12.05.1993	31,9	46	85
24.07.1970	32,1	32	83
02.11.1977	32,4	44	78
20.07.1976	32,6	42	83
04.05.1968	32,8	53	84
05.11.1973	32,9	34	82
05.07.1992	32,9	34	83
29.01.1984	33	52	77
11.11.1996	33,1	45	82
19.08.1985	33,3	31	82
08.06.1994	33,6	35	82
06.02.1984	34	42	79
01.06.1979	34,1	24	82
07.07.1980	34,1	55	86
12.07.1980	35	47	77
13.07.1979	35,1	35	81
04.11.1979	35,3	42	80
26.11.1967	35,4	45	80

Fortsetzung von Tab. XVII: Simulationsergebnisse für den Zeitraum 1967 - 1997.

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
26.09.1975	35,4	33	80
04.12.1988	35,4	39	77
13.11.1991	35,4	40	80
21.08.1977	35,7	28	82
02.07.1978	35,8	57	84
18.02.1996	36,1	40	78
07.08.1989	36,5	31	82
09.05.1989	36,8	51	86
14.11.1977	37	43	80
06.10.1982	37	34	77
22.10.1992	37,1	46	78
09.09.1979	37,2	29	82
05.08.1982	37,3	39	82
15.09.1986	37,5	39	79
22.03.1988	37,6	47	80
12.03.1988	37,7	57	81
23.02.1997	37,7	42	78
07.11.1969	37,9	46	80
01.10.1996	38	32	77
31.08.1992	38,3	44	82
24.06.1981	38,5	47	83
28.12.1993	38,5	41	80
23.01.1988	38,6	46	80
23.09.1968	38,9	35	79
23.01.1970	39,2	44	77
27.01.1995	39,7	41	78
15.08.1979	39,8	35	80
23.12.1967	39,9	37	82
07.02.1970	40	40	77
17.12.1989	40	44	82
02.01.1991	40,6	47	77
13.07.1974	41,3	31	82
21.09.1981	41,3	39	80
11.04.1989	41,7	45	78
14.08.1972	41,8	32	82
20.05.1994	41,8	49	81
20.12.1995	41,8	51	83
25.11.1983	42,2	43	78
13.01.1984	42,4	45	79
11.08.1992	43	44	82
21.06.1997	43	37	80
16.11.1972	43,3	31	78
28.12.1986	43,3	45	80
24.07.1977	43,6	36	79
21.08.1975	43,7	29	82
22.08.1986	44	38	80
27.09.1968	44,3	44	81
09.08.1981	44,3	38	77
26.02.1990	44,5	44	78

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
21.11.1984	44,7	43	82
21.11.1985	44,7	43	82
05.10.1987	44,9	38	82
02.06.1994	44,9	41	81
03.06.1981	45,7	34	81
18.11.1971	46,5	30	81
23.01.1990	46,8	38	76
22.10.1994	47,3	52	81
30.08.1990	47,5	32	79
27.10.1990	48	35	76
23.06.1992	48,5	32	83
03.08.1968	48,7	28	81
22.01.1971	48,7	52	79
19.02.1977	49	35	78
05.10.1988	49,1	38	82
03.09.1985	49,9	35	81
08.02.1988	50,1	44	78
12.10.1971	50,4	34	82
17.08.1977	50,7	35	80
01.02.1988	51,1	44	78
30.07.1993	51,2	27	82
09.12.1979	51,5	35	82
11.06.1987	53,5	35	81
15.10.1973	55,5	33	82
26.12.1994	56	54	82
27.12.1978	57,7	37	78
09.01.1993	58,3	32	81
12.12.1989	58,9	32	78
24.02.1989	59,2	48	80
26.04.1981	59,7	31	74
10.07.1992	60,3	26	82
29.11.1976	60,4	37	80
09.10.1982	61	45	80
13.09.1993	61,1	35	79
05.04.1983	61,3	50	80
02.01.1994	61,5	41	80
16.12.1991	62,7	48	79
19.10.1986	63,5	36	82
06.09.1984	65,8	33	72
10.02.1990	66	41	79
23.08.1995	68,3	12	82
23.05.1983	70,5	36	72
11.10.1987	73	36	79
10.12.1993	76,5	43	80
19.12.1993	92,8	34	79
16.08.1980	93,2	13	12
10.05.1970	99,1	20	78
20.01.1995	124,1	28	78

Tab. XVIII: Simulationsergebnisse für den Zeitraum 2005 - 2006.

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
08.02.2005	3	87	86,4
24.01.2005	3,1	86	92,2
06.05.2005	3,1	87	96,7
20.04.2005	3,2	86	86,4
19.12.2005	3,3	84	90,4
12.11.2006	3,3	84	92,2
10.09.2005	3,3	86	93,1
20.08.2006	3,3	81	91,6
29.08.2006	3,3	86	95,5
06.10.2006	3,3	86	89,9
23.02.2005	3,4	84	87,0
29.06.2006	3,4	86	94,6
21.08.2006	3,4	84	93,4
05.04.2005	3,5	82	91,0
28.02.2006	3,5	85	89,5
16.12.2006	3,5	85	92,6
19.08.2006	3,6	82	91,4
27.03.2006	3,7	84	91,2
22.05.2006	3,7	85	91,0
01.10.2006	3,7	81	92,6
19.02.2005	3,8	84	88,1
29.05.2006	3,8	86	94,3
11.01.2006	3,9	84	86,9
28.03.2006	3,9	85	96,5
25.07.2005	3,9	81	92,5
25.04.2005	4,1	84	91,2
07.08.2005	4,1	84	91,9
02.11.2005	4,4	81	90,8
19.05.2006	4,4	84	92,7
21.03.2006	4,6	83	87,6
16.04.2006	4,7	75	84,7
02.12.2005	4,9	79	90,0
27.07.2005	4,9	80	93,9
04.07.2005	5	79	90,2
24.07.2005	5	83	91,4
25.08.2005	5	79	89,9
13.04.2006	5,1	83	90,3
25.11.2006	5,1	75	83,9
15.11.2005	5,3	83	90,4
18.09.2006	5,3	74	86,1
06.04.2005	5,5	75	91,1
26.04.2005	5,5	72	89,6
07.05.2005	5,5	72	88,1
11.07.2006	5,5	79	88,6
13.11.2006	5,6	78	88,5
16.02.2006	5,7	81	92,5
20.05.2005	5,7	76	91,7
28.07.2006	5,7	79	90,7
20.11.2006	5,9	73	88,2

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelabminderung (%)
30.4.2006	6,1	73	88
28.11.2005	6,4	64	70
17.11.2006	6,6	59	87
21.2.2006	7	64	87
16.12.2005	7,1	75	88
30.9.2006	7,3	67	89
19.10.2006	7,3	70	88
26.4.2006	7,6	70	88
19.6.2006	7,7	68	88
31.10.2005	7,8	69	88
30.6.2005	7,9	78	93
5.1.2005	8,1	70	88
18.2.2006	8,1	66	89
11.8.2006	8,5	75	91
19.04.2005	8,9	59	86
4.11.2005	9	67	85
21.2.2005	9,3	59	68
4.3.2006	9,3	60	82
30.12.2006	9,4	62	87
13.5.2006	9,4	58	89
4.5.2005	9,9	61	87
27.05.2006	10,4	50	81
16.9.2005	10,6	55	84
4.8.2006	10,8	55	83
20.1.2005	11,1	57	83
19.11.2006	11,1	55	80
17.1.2006	11,3	57	66
12.9.2005	11,3	53	79
13.08.2006	11,4	66	83
18.01.2005	12	52	77
24.3.2006	12,7	67	88
2.8.2006	13,1	52	79
20.5.2006	13,2	46	77
27.8.2006	13,3	45	70
3.12.2006	13,5	64	87
30.3.2006	13,7	61	85
14.8.2005	13,8	55	84
7.12.2006	14	53	77
25.5.2006	14,3	64	84
25.6.2006	15,5	46	85
29.3.2005	15,6	69	69
8.3.2006	15,9	59	84
14.5.2005	16	53	83
22.11.2006	16,4	42	78
1.4.2006	17	57	86
1.10.2005	18,5	41	76
16.5.2006	19,2	40	79
20.10.2005	19,9	62	84
22.10.2006	21,3	45	81

Fortsetzung von Tab. XVIII: Simulationsergebnisse für den Zeitraum 2005 - 2006.

Datum	N (mm)	Rückhalt (%)	Scheitelab- minderung (%)
29.05.2005	25,3	38	79,2
06.07.2005	25,8	37	81,8
10.02.2005	26,1	54	77,7
03.12.2005	26,5	53	81,0
17.08.2006	37,1	32	80,3
02.10.2006	40,6	34	75,0
24.08.2006	42,3	37	77,2
28.07.2005	55,7	29	81,8

Lebenslauf

Angaben zur Person

Vorname, Name	Sandra Wintrich
Geburtsdatum	15.02.1977
Familienstand	ledig

Berufserfahrung

03/2004 - 06/2007	Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Trier im Fach Physische Geographie, angestellt im EU Forschungsprojekt „Water Retention by Landuse – WaReLa“
04 - 06/2005	Freie Mitarbeiterin bei der Gesellschaft für regionale Umweltbildung QuerWeltein, Trier-Ruwer (Erlebnispädagogik)
02 - 07/2004	Freie Mitarbeiterin in der Ganztagschule Speicher (Umwelt-AG)

Studentische Tätigkeiten

03/2002 - 02/2004	Wissenschaftliche Hilfskraft im Fach Physische Geographie (Betreuung von Geländeübungen)
11/2000 - 06/2001	Wissenschaftliche Hilfskraft im Fach Kartographie (Tutorin für GIS-Kurse)
05/2000 - 07/2000	Wissenschaftliche Hilfskraft im Fach Geobotanik (Tutorin einer pflanzensoziologischen Übung)
01/2000 - 06/2001	Wissenschaftliche Hilfskraft im Fach Biogeographie (Analyse biologischer und chemischer Wasserparameter)

Ausbildungsweg

03/2004 - 10/2007	Doktorandin an der Universität Trier, Fachbereich VI, Geographie/Geowissenschaften
1997 - 2004	Studium der „Angewandten Umweltwissenschaften“ an der Universität Trier, Abschluss: Diplom-Umweltwissenschaftlerin Studienfächer: Bodenkunde, Geobotanik, Kartographie, Physische Geographie, Umweltrecht Thema der Diplomarbeit: „Möglichkeiten der Grund- und Regenwassernutzung im Trierer Walzwerk – unter Berücksichtigung der Konzeption prozessbezogener Umweltkennzahlen und einer Stoffstromanalyse“
1996 - 1997	Freiwilliges Ökologisches Jahr im Forstrevier Klausen
1987 - 1996	Angela-Merici-Gymnasium Trier, Abschluss: Abitur