

Leistungsfähigkeit und Zustand langjährig betriebener dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen (LEIREV)

Abschlussbericht



Gefördert durch das

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Bearbeitungszeitraum: 01.04.2014 - 30.06.2016

Hauptverantwortliche Autoren:

Dr.-Ing. Björn Kluge	TU-Berlin, FG Standortkunde & Bodenschutz, Berlin
Dr.-Ing. Harald Sommer	Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH, Hoppegarten
Dr.-Ing. Mathias Kaiser	KaiserIngenieure, Dortmund

Unter der Mitwirkung von:

Dipl.-Ing. Arvid Markert, Dipl.-Ing. Mathias Pallasch, Dipl.-Ing. Andreas Weise

Kurzfassung

Im Rahmen des Förderprogrammes „Ressourceneffiziente Abwasserbeseitigung NRW“ des MKULNV wurde das F+E Vorhaben „LEIREV“ - Leistungsfähigkeit und Zustand langjährig betriebener dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen - durchgeführt. Dieses beinhaltete eine umfassende betriebliche, hydraulische und stoffliche Überprüfung von dezentralen Versickerungsmulden mit einer Laufzeit von >10 Jahren.

Die Ergebnisse zeigen Defizite, deren Ursache oftmals in einer nicht ausreichend differenzierten Planung liegen. Diese sind oftmals Ursache betrieblicher Fehlentwicklungen und Schadensbilder.

Die betriebliche Leistungsfähigkeit ist bei der überwiegenden Mehrzahl der Anlagen, trotz Defiziten bei Wartung und Pflege gegeben. Bei Anlagen mit inzwischen rd. zwanzigjähriger Betriebszeit stehen z.T. aufwändigere Maßnahmen zum Erhalt oder der Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit an. Die in NRW zu diesem Zeitpunkt auslaufenden Wasserrechtlichen Erlaubnisse bieten den Wasserbehörden die Handhabe entsprechende Maßnahmen auf Betreiberseite einzufordern und durchzusetzen.

Die hydraulische Leistungsfähigkeit der untersuchten Versickerungsanlagen entspricht i.d.R. nach wie vor den Anforderungen nach DWA A-138.

Die stoffliche Belastung fällt dagegen differenziert aus, bei vielen Anlagen liegen die Gehalte der Schwermetalle Cd, Pb, Cu, Zn und PAK unterhalb der Vorsorgewerte der BBodSchV, bei einigen werden diese jedoch deutlich überschritten. Erhöhte Schadstoffgehalte treten häufig bei punktuellen Einläufen im direkten Einlaufbereich auf und nehmen i.d.R. zur Muldenmitte deutlich ab. In einigen Fällen sind erhöhte Schadstoffgehalte aber auch eindeutig auf unsachgemäßen Einbau oder fehlenden Abraum vorbelasteter Substrate/Böden zurückzuführen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis	14
1 Aufgabenstellung	15
2 Regelungsrahmen	16
3 Planung und Bemessung von Versickerungsanlagen	18
4 Stand der Wissenschaft und Forschung	20
4.1 Einleitung	20
4.2 Schadstoffbelastung von Niederschlägen	21
4.3 Reinigungsleistung dezentraler Versickerungsanlagen	23
4.4 Anforderungen an Muldensubstrate zum Schadstoffrückhalt	24
4.5 Grundwasserflurabstand	26
4.6 Versickerungsleistung	27
4.7 Abgeleiteter Untersuchungsrahmen.....	27
5 Methodik und Vorgehensweise	29
5.1 Auswahl der Anlagen	29
5.1.1 Allgemeine Auswahlgrundsätze	29
5.1.2 Auswahlkriterien	30
5.1.3 Übersicht der ausgewählten Anlagen	34
5.2 Bodenkundliche und stoffliche Parameter.....	36
5.2.1 Bodenansprache und Probenahme	36
5.2.2 Labormethoden	38
5.3 Prognose zukünftiger Sickerwasserkonzentrationen durch Aufbau eines Simulationsmodells	40
5.3.1 Allgemeine Beschreibung des Modells	40
5.3.2 Aufbau der Modellmulde und Inputparameter	41
5.4 Hydraulische Parameter.....	42
5.4.1 Bestimmung der Infiltrationsrate mit Ring- Infiltrometern	42
5.4.2 Bestimmung der Infiltrationsrate im Labor	43
5.4.3 Flutung	44
5.4.4 Berechnung von Einstauvolumina.....	45
5.5 Betriebliche Parameter.....	47
5.5.1 Untersuchungskriterien	47
5.5.2 Bestandsaufnahme und Dokumentation oberirdischer Anlagenteile.....	48

5.5.3	Bestandsaufnahme und Dokumentation unterirdischer Anlagenteile (Dränrohrinspektion)	49
5.5.4	Befragung von Anlagenbetreibern	50
6	Ergebnisse	51
6.1	Allgemeine bodenkundliche Eigenschaften	51
6.1.1	Partikelgrößenverteilung	51
6.1.2	pH-Wert	53
6.1.3	Elektrische Leitfähigkeit	54
6.1.4	Organischer Kohlenstoffgehalt	55
6.1.5	Schwefel-, Stickstoff- und Phosphorgehalt	57
6.2	Schwermetallgehalte im Bodenfeststoff der Mulden	59
6.3	Organische Schadstoffe im Bodenfeststoff	67
6.3.1	PAK und Benzo(a)pyren	67
6.3.2	PCB	69
6.4	Übertragung der Ergebnisse auf Flächennutzungstypen	70
6.5	Ex-Post-Analysen - Schwermetallakkumulation	72
6.5.1	Zeitliche Veränderung der Schwermetallgehalte Anlage Nr.9	72
6.5.2	Zeitliche Veränderung der Schwermetallgehalte der Anlage Nr. 21	75
6.6	Elutionsversuche im Labor	77
6.7	Prognose zukünftiger Sickerwasserkonzentrationen in einer Modellmulde (Sand) – numerische Simulation	80
6.8	Hydraulische Eigenschaften	83
6.8.1	Hydraulische Leitfähigkeit	83
6.8.2	Einstauvolumen	86
6.8.3	Ex-Post-Analyse - Hydraulischer Zustand	87
6.9	Auswertung der Untersuchungen zu Wartung und Betrieb	95
6.9.1	Erosionsschäden und Ausspülungen	100
6.9.2	Setzungen	101
6.9.3	Trittschäden und Verdichtung	102
6.9.4	Materialermüdung und -schäden an Bauteilen	103
6.9.5	Vegetation	106
6.9.6	Sedimentablagerung	107
6.9.7	Nutzungskonflikte	109
6.9.8	Unplanmäßige Nutzungs- und Gestaltungsveränderung	111
6.9.9	Planmäßige bauliche Veränderung	113
6.9.10	Pflege	114
6.10	Kritische Betriebspunkte	115
6.10.1	Fallrohr	119
6.10.2	Fallrohrkrümmer und Rinnenanschluss	120
6.10.3	Offene Rinne Gebäude	124
6.10.4	Übergang bef. Rinne zu Rasenrinne bzw. Mulde	126
6.10.5	Dezentrale Übergänge	131
6.10.6	Diffuse Übergänge	134

6.10.7 Muldenwall, -böschung	135
6.10.8 (Not-) Überlauf	138
6.10.9 Muldenüberläufe in Rigole	141
6.10.10 Dränrohr und Drossel im Schacht.....	144
6.10.11 Mutterbodenschicht bzw. Muldensohle.....	146
6.11 Ex-Post-Analyse – Betriebliche Aspekte.....	155
6.11.1 Ex-Post-Analyse: betriebliche Aspekte Anlage Nr. 21	160
6.11.2 Schlussfolgerung Ex-Post-Analyse	162
6.12 Übertragung der Ergebnisse auf Nutzungstypen	163
6.12.1 Gewerbe.....	163
6.12.2 Handel/Dienstleistung	165
6.12.3 Wohnen.....	166
6.12.4 Öffentliche Verkehrsflächen	166
6.13 Auswertung der Betreiberbefragung	168
6.13.1 Angaben der Betreiber	168
6.13.2 Zusammenfassung der Betreiberangaben.....	171
6.13.3 Vergleich der Betreiberangaben mit Beobachtungen in LEIREV	171
7 Handlungsempfehlungen	172
7.1 Stofflich	172
7.2 Betrieblich	173
8 Zusammenfassung Ergebnisse	175
8.1 Bodenkundlich / Stofflich.....	175
8.2 Betrieblich	177
8.3 Hydraulisch	178
8.4 Umweltnutzen	178
8.5 Restnutzungszeiten und Erneuerungszyklen.....	179
9 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf, offene Fragen.....	180
10 Literaturverzeichnis	182
A.1 Eingabeparameter Modellmulde.....	190
1.1 Niederschlag und Zuflussmengen.....	190
1.2 Parameter des Wassertransports	191
1.3 Sorptionseigenschaften.....	191
B.1 Fragebogen Betreiber	193
C.1 Fotodokumentation der Dränrohrinspektion.....	199
D.1 Übersicht der gemessenen Kf-Werte für alle Anlagen	200
Veröffentlichungen, Präsentationen LEIREV	201

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Siedlungsflächenanteile NRW in 2012	32
Abbildung 2: Bodenkundliche Aufnahme und Beprobung (Stechzylinderentnahme) im Straßenrandbereich	36
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Wasser- und Stofftransports in einer Mulde (nach Kübler, 2016, verändert)	41
Abbildung 4: Schematischer Aufbau der Mulde im Simulationsmodell	41
Abbildung 5: Doppelring-Infiltrometer (links) und Einzelring-Infiltrometer (rechts)	43
Abbildung 6 Haubenpermeameter zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit in Stechzylindern	44
Abbildung 7: Flutung der nördlichen Mulde am Standort Nr. 6	45
Abbildung 8: Punktshape der Vermessungspunkte	46
Abbildung 9: Erstelltes Raster für eingemessene Höhenwerte mit Zellgröße 1 cm	46
Abbildung 10: Prinzip der Volumenbestimmung mit ArcScene anhand der Mulde am Standort Anlage 1	46
Abbildung 11: Materialien zur Drainrohrinspektion.....	50
Abbildung 12: Körnungsdiagramm der untersuchten Bodenhorizonte nach (KA5) n=115.	52
Abbildung 13: pH-Werte der untersuchten Muldenbodenhorizonte mit der Bodenart Sand (links) und der Bodenart Lehm/Schluff (rechts). Dargestellt sind der Median, die Quartile (25-75%), der Bereich ohne Ausreißer, sowie Ausreißer.....	54
Abbildung 14: Elektrische Leitfähigkeit der untersuchten Bodenhorizonte mit der Bodenart Sand (links) und Lehm/Schluff (rechts). Dargestellt sind der Median, die Quartile (25-75%), der Bereich ohne Ausreißer, sowie Ausreißer.....	55
Abbildung 15: Organischer Kohlenstoffgehalt (C_{org}) der untersuchten Bodenhorizonte mit der Bodenart Sand (links) und Lehm/Schluff (rechts). Dargestellt sind der Median, die Quartile (25-75%) und Ausreißer.	56
Abbildung 16: Gesamtgehalte der untersuchten Bodenhorizonte für Stickstoff (Gesamt-N), Schwefel (Gesamt-S), Phosphor (Gesamt-P) der Bodenart Sand. Dargestellt sind der Median, die Quartile (25-75%) und Ausreißer.	57
Abbildung 17: Gesamtgehalte der untersuchten Bodenhorizonte für Stickstoff (Gesamt-N), Schwefel (Gesamt-S), Phosphor (Gesamt-P) der Bodenart Lehm/Schluff. Dargestellt sind der Median, die Quartile (25-75%) und Ausreißer.	58
Abbildung 18: Schwermetallgesamtgehalte im Bodenfeststoff von Cd, Pb, Zn, Cu, Ni sowie Cr in den Tiefen 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm und >30 cm aller beprobter Anlagen mit der Bodenart Sand. Die rote Linien zeigen den Vorsorgewert der BBodSchV für die Bodenart Sand, die blauen Linien die 90 Perzentile der Hintergrundwerte für Böden aus (Flugsand) Sandlöss in NRW - Ballungskern (0-30cm).....	61
Abbildung 19: Schwermetallgesamtgehalte im Bodenfeststoff von Cd, Cu, Zn, Cu, Ni sowie Cr in den Tiefen 0-10 cm, 10-20 cm und 20-30 cm aller beprobter Anlagen mit der Bodenart Lehm/Schluff. Die gestrichelte rote Linie zeigt den Vorsorgewert der BBodSchV für die Bodenart Lehm/Schluff, die blauen Linien die 90 Perzentile der Hintergrundwerte für Böden aus (Schwemm-)Löss in NRW - Ballungskern (0-30cm). Die Vorsorgewerte von Ni und Cr liegen außerhalb des Darstellungsbereiches.	64
Abbildung 20: PAK und Benzo(a)pyren Gesamtgehalte im Bodenfeststoff in den Tiefen 0-10 cm; 10-20 cm, 20-30 cm und >30 cm der Anlagen mit der Bodenart Sand. Die gestrichelten roten Linien zeigen den Vorsorgewert der BBodSchV für Summe nachgewiesener PAK (16) und Benzo(a)pyren, die blauen Linien die 90	

Perzentile der Hintergrundwerte von Benzo(a)pyren für Böden in NRW – Ballungsraum (0-30cm)	68
Abbildung 21: PAK und Benzo(a)pyren Gesamtgehalte im Bodenfeststoff in den Tiefen 0-10 cm, 10-20 cm und 20-30 cm aller beprobter Anlagen mit der Bodenart Lehm/Schluff. Die gestrichelten roten Linien zeigen den Vorsorgewert der BBodSchV für Summe nachgewiesener PAK(16) und Benzo(a)pyren, die blauen Linien die 90 Perzentile der Hintergrundwerte von Benzo(a)pyren für Böden in NRW - Ballungsraum (0-30cm).....	69
Abbildung 22: Statistische Auswertung der Metallkonzentrationen im Bodenfeststoff der untersuchten Muldenproben nach Tiefenstufen und Nutzungskategorien (n= Anzahl der Proben je Flächentyp und Tiefenbereich).....	71
Abbildung 23: Schwermetallgehalte im Bodenfeststoff der Versickerungsmulde der Anlage Nr.9 in verschiedenen Bodentiefen und Beprobungsjahren (1994, 1997, 2014). Mischprobe= 1,5m Entfernung vom Einlauf. Die rote Linie markiert die Vorsorgewerte der BBodSchV (1999) für die Bodenart Sand.	73
Abbildung 24: Schwermetallgehalte im Bereich mit Sedimentaufhöhung und außerhalb der Sedimentaufhöhung am Standort 21. Die rote Linie markiert die Vorsorgewerte der BBodSchV (1999) für die Bodenart Sand.	76
Abbildung 25: S4 Elutionen von ausgewählten Oberbodenhorizonten (0-10 cm) der Mulden mit verschiedenen Feststoffkonzentrationen. In den Textkästen sind die Prüfwerte für den Pfad Boden-Grundwasser der BBodSchV (1999) aufgeführt.78	
Abbildung 26: Simulation der Sickerwasserkonzentrationen in einer Modellmulde mit Zulaufkonzentrationen einer Wohnstraße über einen Zeitraum von 40 Jahren. In den schwarzen Textfelder sind die Prüfwerte der BBodSchV (1999) für den Pfad Boden-Grundwasser dargestellt.	81
Abbildung 27 Ergebnisse zur Hydraulischen Leitfähigkeit in Versickerungsanlagen unterteilt nach der Hauptbodenart Sand oder Schluff/Lehm.....	85
Abbildung 28: Mulde Anlage 8, links Raster aus vermessenen Punkten, rechts Raster aus Planungsunterlagen. Zwischen den beiden Aufnahmen liegt eine Nutzung von 16 Jahren.	88
Abbildung 29 Einstauvolumen einer Mulde in Abhängigkeit der Einstauhöhe. Die Berechnung erfolgte auf Basis von digitalisierten Vermessungsdaten.....	88
Abbildung 30: Abweichungen des Muldenvolumens am Standort Anlage 1. Volumina basieren von links nach rechts auf Vermessung Ist-Zustand ①, Revisionsaufmaß ② und Bauplanungsunterlagen ③. Unterschiede zwischen ① und ② in Folge von Alterungsprozessen während einer Nutzungsdauer von 17 Jahren. Unterschiede zwischen ② und ③ lassen auf abweichende Bauausführung schließen.	89
Abbildung 31: Vergleich Volumenkennlinie Ist-Zustand und Planzustand Anlage 8	91
Abbildung 32: Vergleich Volumenkennlinie Ist-Zustand, Nachvermessung und Planzustand Anlage 1	91
Abbildung 33: Längsschnitt und Draufsicht Anlage 8 im Ist-Zustand (2015). Einlaufbereich ist rot markiert	92
Abbildung 34: Änderung von Muldenquerschnitten am Standort Anlage 8. Die Sohlbreite reduziert sich von 0,6- 1,6 m im Plan-Zustand auf 0- 0,6 m im IST-Zustand. Eine gleichartige Skalierung der Höhen und Breiten ist auf Grund unterschiedlicher Bezugspunkte nicht möglich	93
Abbildung 35: Veränderung der Muldenböschung bei 15 Jahren Laufzeit an Anlage 194	
Abbildung 36: Übersicht Status der Anlagen.....	97
Abbildung 37 Auswertung der Untersuchungen zu Wartung und Abbildung 38 Auswertung der Untersuchungen zu Wartung und Betrieb (Erosionsschäden, Setzungen, Trittschäden, Materialermüdung, Sohlvegetation, Sedimentablagerung)	98

Abbildung 39: Mit Gras zugewachsene Schachtabdeckung eines Drosselschachts im Bereich der Mulden.....	104
Abbildung 40: Aufnahmen von Drainagerohren mit der Inspektionskamera. Schadensfrei (links), Einwuchs von Feinwurzel (rechts)	104
Abbildung 41: Baustelleneinrichtung in Versickerungsmulde, Anlage 7	110
Abbildung 42: Trampelpfad in Versickerungsmulde zum Erreichen des Hauseingangs, Anlage 7.....	111
Abbildung 43: Umnutzung von Vorgartenflächen zu Stellplätzen, Bochum-Linden	112
Abbildung 44: Anlage Nr. 60 Zustand vor Erweiterung der befestigten Betriebsflächen 2010 (linkes Bild) und nach Erweiterung der befestigten Betriebsflächen 2015 (rechtes Bild) (Google Earth)	113
Abbildung 45: Diagramm Betriebspunkte der Zuleitungselemente	115
Abbildung 46: Diagramm Betriebspunkte Mulde	116
Abbildung 47: Diagramm Kategorisierte Mängel an relevanten Betriebspunkten	118
Abbildung 48: Schematische Darstellung ausgewählter relevanter Betriebspunkte ...	118
Abbildung 49: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte a) Fallrohr	119
Abbildung 50: Vernässte Gebäudewand durch abgerutschtes Fallrohr	120
Abbildung 51: RW schießt seitlich sogar über einen 4 cm hohen Kantenstein aus der Rinne und vernässt den gebäudenahen Bereich.....	121
Abbildung 52: Unterspülte offene Rinne mit Setzungsschaden 2/3 Rinnenelement und geänderter Abflussrichtung.....	121
Abbildung 53: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte d) Fallrohrkrümmer	123
Abbildung 54: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte e) Rinnenanschluss	123
Abbildung 55: An Rinne befestigtes Rohrendstück.....	124
Abbildung 56: Veränderter Fließweg auf abgesackter Pflasterfläche vor Kellertreppe	125
Abbildung 57: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte f) Offene Rinne Gebäude.....	125
Abbildung 58: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte i) Übergang bef. Rinne zu Rasenrinne/Mulde	126
Abbildung 59: Rinne und Muldeneinlaufbereich mit Sedimentablagerungen.....	127
Abbildung 60: Aufhöhung um Muldeneinlaufbereich durch eingetragenes Laub	128
Abbildung 61: Aufhöhung in Folge Ablagerungen im Einlaufbereich Schnittdarstellung Mulden-Rigolen-Element B2 (siehe vorherige Abbildung), Anlage 10.....	128
Abbildung 62: Aufhöhungen in Folge Ablagerungen im Einlaufbereich. Lageplanskizze Mulden-Rigolen-Element B2, Anlage 10.....	129
Abbildung 63: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte j) Rasenrinne	130
Abbildung 64: Freigelegter, teilweise zugesetzter Grundleitungseinlauf.....	131
Abbildung 65: Umgefahrener Hochbord.....	132
Abbildung 66: Einbau Betonpflasterstein zwischen Hochborden	132
Abbildung 67: hydraulisch überlastete Mulde im Tiefpunkt, Vegetationsschädigung in Folge Eintrag von Feinstoffe und zu häufigem Überstau zieht Infiltrationsstörung nach sich, Anlage 5	133
Abbildung 68: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte k) Dezentrale Übergänge	133
Abbildung 69: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte l) Diffuse Übergänge	134

Abbildung 70: Punktueller Abschalen der Wulstbildung zur Vermeidung von Rückstau auf die Fahrbahn, Wulstbildung an Muldenzulaufsteinen mit Verhinderung des Einlaufens von Niederschlagswasser	135
Abbildung 71: Erosionsschäden in Folge Wühltätigkeiten von Nagetieren	136
Abbildung 72: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte m) Muldenwall, -böschung	137
Abbildung 73: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte n) (Not-) Überlauf	138
Abbildung 74: Erosion der Muldenböschung an Überlaufelement	139
Abbildung 75: Verwitterte Böschungssicherung aus Holz an Überlauf	140
Abbildung 76: Erodierte Muldenwälle	141
Abbildung 77: Muldenüberlauf direkt in Drosselschacht, kommuniziert mit Rigole. Drosselablauf in Ablauf des Schachtes (oben). Muldenüberlauf, etwas zu flach montiert (unten)	142
Abbildung 78: Muldenüberlauf (Aufsicht) mit gepflasterter Umrahmung, Vlieseinsatz zur Verhinderung des Eintrages von Feinstoffen in die Rigole	143
Abbildung 79: Muldenüberlauf mit Tauchwandprinzip zur Verhinderung des Eintrages Schwimm- und Feinstoffen in die Rigole	143
Abbildung 80: links: Erste Drossel mit verdrehenden Rohren, rechts: Drossel im Überlaufschacht im Ablauf des Schachtes montiert	144
Abbildung 81: links: Kegeldrossel, rechts: Lochblendendrossel	144
Abbildung 82: Dränrohr mit Feinwurzeleinwachsen	145
Abbildung 83: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte r) Mutterbodenschicht bzw. Muldensohle	146
Abbildung 84: Bolzplatz in Versickerungsmulde	146
Abbildung 85: Zentrale Versickerungsfläche Wohngebiet (Anlage 40)	147
Abbildung 86: Trittschaden straßenbegleitende Mulde vor Ärztehaus, Anlage 7	148
Abbildung 87: Durchfahrene Mulde	148
Abbildung 88: Folgeschäden durch falsch durchgeführte Pflegemaßnahmen	149
Abbildung 89: Ausbildung feuchteresistenter Vegetation	151
Abbildung 90: Brombeerbefall von Muldensegmenten	152
Abbildung 91: Aufwuchs von Kleingehölzen	152
Abbildung 92 Aufwuchs von Gehölzen	153
Abbildung 93: Verschattungsfolgen	153
Abbildung 94: Befestigte Flächen und Versickerungsanlage, Anlage 20	156
Abbildung 95: Fließschema Muldenkaskade Anlage Nr. 20	157
Abbildung 96: Gehölzaufwuchs und Verschattung Mulden (türkise Linie) 2002, 8 Jahre nach Inbetriebnahme (Quelle: Google Earth, verändert)	158
Abbildung 97: Gehölzaufwuchs und Verschattung Mulden (türkise Linie) 2015, 21 Jahre nach Inbetriebnahme (Quelle: Google Earth, verändert)	159
Abbildung 98: Ausfall Vegetation Muldensohle und -wall wegen Gehölzaufwuchs (Verschattung und Laubfall)	161
Abbildung 99: Muldenversickerung, Anlage Nr. 20	164
Abbildung 100: Versickerungsmulde, Anlage 52	165
Abbildung 101: Straßenbegleitende Muldenkaskade, Anlage 13	167
Abbildung 102: Angaben der Betreiber zu Anlagentypen, Flächentypen, Lage, Bepflanzung, Drosselart und Füllmaterialien an Versickerungsanlagen	169

Abbildung 103: Angaben der Betreiber zu Umbauten, Straßenreinigung, Problempunkten, Einsatz von Streu/Splitt, Wasserrechtlichen Genehmigungen und Abschlussvermessungen an Versickerungsanlagen	170
---	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Repräsentative mittlere Konzentrationen von 22 Stoffen von 12 Oberflächenabflusstypen nach Göbel et al., 2007, verändert.....	22
Tabelle 2: Übersicht des erreichbaren Rückhaltes mit dezentralen Versickerungsanlagen für verschiedene Parameter. Literaturangaben verschiedener Autoren.	24
Tabelle 3: Bodeneigenschaften zur Förderung des Schadstoffrückhaltevermögens (nach Sieker et. al., 1999, DWA-A 138, 2005).....	25
Tabelle 4: Angaben der UWBs zu Anlagenstandorten in NRW	33
Tabelle 5: Übersicht der untersuchten Anlagen	35
Tabelle 6: Szenariobeschreibung und simulierte Eigenschaften der Modell- Mulde	42
Tabelle 7: Wartung und Betrieb - Kategorien und Definitionen	48
Tabelle 8: Übersicht und Anzahl der Bodenarten in den beprobten Muldenhorizonten	52
Tabelle 9: Anzahl der Überschreitungen der Vorsorgewerte nach BBodSchV für die Bodenart Sand.....	62
Tabelle 10: Zuordnungswert (Z0) der LAGA (2003) für das Einbausubstrat und Vorsorgewerte für Böden der BBodSchV (1999).....	62
Tabelle 11: Hintergrundwerte für das Ausgangssubstrat Sand/Sandlöss in Nordrhein-Westfalen (0-30 cm) - (P90)= 90 Perzentile und (P50)= 50 Perzentile (LABO, 2003).....	63
Tabelle 12: Hintergrundwerte für das Ausgangssubstrat (Schwemm-) Löss in Nordrhein-Westfalen (0-30 cm) - (P90)= 90 Perzentile und (P50)= 50 Perzentile (LABO 2003).....	65
Tabelle 13: Anzahl der Überschreitungen der Vorsorgewerte nach BBodSchV für die Bodenart Lehm/Schluff	65
Tabelle 14: pH-Wert, C _{org} Gehalte und Schwermetallgesamtgehalte sowie Eluatkonzentrationen nach S4 Elution ausgewählter Anlagen in verschiedenen Tiefen.....	79
Tabelle 15: Messmethoden der hydraulischen Leitfähigkeit	84
Tabelle 16: Korrekturfaktoren zur Festlegung des Bemessungs- K _f -Wertes nach DWA-A 138.....	86
Tabelle 17: Berechnung von Muldenvolumina im Ist- und Plan-Zustand, sowie auf Basis von Revisionsaufmaßen	90
Tabelle 18: Abschätzung der aktuellen Überstauhäufigkeit von ausgewählten Anlagen	94
Tabelle 19: Kriterien zur Risikobewertung gemäß Gefährdungspotential vor Ort	96
Tabelle 20: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Erosionsschäden ..	100
Tabelle 21: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Setzungen.....	102
Tabelle 22: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Trittschäden und Verdichtung.....	103
Tabelle 23: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Materialermüdung.	105
Tabelle 24: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Sohlvegetation	107
Tabelle 25: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Sedimentablagerung	108

Tabelle 26: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Nutzungskonflikten	109
Tabelle 27: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Nutzungs- und Gestaltungsveränderung	112
Tabelle 28: Schadensrisiko und Untersuchungsrelevanz Betriebspunkte offene Ableitung	117
Tabelle 29: Schadensrisiko und Untersuchungsrelevanz Betriebspunkten Versickerungsanlagen mit belebten Oberboden.....	117
Tabelle 30: Verschattungsgrad Muldensohlflächen Anlage Nr. 20	159
Tabelle 31: Gegenüberstellung Bemessungsergebnisse (Anlage Nr. 21)	160
Tabelle 32: Verschattungsgrad Muldensohlflächen Beispiel 2 (Anlage 21)	160

Abkürzungsverzeichnis

AFS	Abfiltrierbare Stoffe
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
LWG-NRW	Landeswassergesetz Nordrhein-Westfalen
MKUNLV-NRW	Ministerium f. Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein- Westfalen
RKBmD	Regenklärbecken mit Dauerstau
RKBoD	Regenklärbecken ohne Dauerstau
RBF	Retentionsbodenfilter
RdErl	Runderlass
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
F+E	Forschung und Entwicklung
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
PAKs	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCBs	Polychlorierte Biphenyle
CNS	Kohlenstoff-, Stickstoff-, Schwefelgehalte
EC	Elektrische Leitfähigkeit
TIN	Triangulated irregular network
C _{org}	Organischer Kohlenstoff
NW	Niederschlagswasser
KA 5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5.Auflage
W+BI	Wartung und Betrieb
UWB	Untere Wasserbehörde
WG	Wassergesetz für Baden-Württemberg
TSS	Total suspended solids (dt. Gesamtheit der gelösten Stoffe)
TOC	Total organic carbon
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe

1 Aufgabenstellung

Dezentrale Regenwasserbewirtschaftungsanlagen mit der Versickerung über einen bewachsenen Bodenkörper sind seit über 20 Jahren Stand der Technik und werden im urbanen wie im ländlichen Raum eingesetzt. Bemessung, Planung, Bau und Betrieb richten sich in der Praxis nach den Empfehlungen des DWA Arbeitsblattes A-138 und des Merkblattes M-153. Die darin enthaltenen Aussagen beziehen sich auf neu erstellte Versickerungsanlagen. Dagegen liegen bislang keine Erkenntnisse aus langjährigen Betriebserfahrungen vor, aus den Kriterien sowie Handlungsempfehlungen zur Erhaltung der Funktionsfähigkeit langfristig betriebener Anlagen abgeleitet werden können. Die bisherige Praxis hat die Frage aufgeworfen, ob die rahmengesetzlichen Vorgaben für den Betrieb dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen ausreichen um deren nachhaltige Funktionserfüllung sicherzustellen. Für konkrete Entscheidungen zum Bau neuer Anlagen, aber auch zum Weiterbetrieb bestehender Anlagen, fehlen in der Praxis belastbare Angaben zu Wartungs-, Pflege und Instandhaltungszyklen.

In welchem Umfang sich Schadstoffe im Bodenaufbau anreichern und ob es dadurch zu einer Erhöhung der Schadstoffe im Sickerwasser kommt, ist bisher kaum erforscht. Bei Erschließungs- und Entwässerungsplanungen werden bei Dimensionierung und angenommenen Lebensdauern dezentraler Anlagen oftmals hohe Sicherheitsabschläge angesetzt. Daher kommt es in der planerischen Praxis bei der Bewertung und Auswahl nach LAWA (Kostenvergleichsrechnung Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) oftmals zum Ausschluss dezentraler Versickerungsanlagen. Konventionelle Ableitungsvarianten werden in der Folge trotz ökologischer und ökonomischer Nachteile aufgrund höherer Planungssicherheit vorgezogen. Seitens der kommunalen Straßenbauverwaltung werden häufig Gefährdungspotenziale für das Grundwasser angeführt, deren Relevanz bisher nicht abschließend geklärt ist.

Um den Einsatz dezentraler Systeme weiter voranzutreiben und abzusichern, bedarf es daher einer systematischen Aufnahme und Bewertung langfristig betriebener Anlagen um zu einer Verbesserung der Planungssicherheit beizutragen. Ziele des Vorhabens sind daher die Erfassung der Leistungsfähigkeit bereits langfristig betriebener Anlagen sowie die Bewertung der hydraulischen und stofflichen Charakteristika. Weiterhin erfolgt eine Aufnahme und Bewertung hinsichtlich der bisherigen Anlagenentwicklung und des Betriebes. Die Ableitung erforderlicher Maßnahmen für den Erhalt der langfristigen Leistungsfähigkeit der Anlagen steht hierbei im Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit. Die zu untersuchenden Anlagen befinden sich vornehmlich in NRW, es wurden aber auch weitere aus dem übrigen Bundesgebiet ausgewählt, mit Hilfe derer ein breiter Querschnitt vorhandener Anlagen und Betriebserfahrungen mit dezentralen Versickerungsanlagen abgebildet wird.

2 Regelungsrahmen

Der Niederschlagsabfluss zu Versickerungsanlagen wird gefasst und ist damit im rechtlichen Sinne Abwasser (WHG). Allerdings heißt es im § 33 des WHG: „Die Länder können allgemein oder für einzelne Gebiete bestimmen, dass (...) für das Einleiten von Niederschlagswasser in das Grundwasser zum Zwecke seiner schadlosen Versickerung eine Erlaubnis nicht erforderlich ist“.

Einige Bundesländer haben von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht, beispielsweise Baden-Württemberg: „Für das Einleiten von Niederschlagswasser in das Grundwasser zum Zwecke seiner schadlosen Versickerung ist eine Erlaubnis nicht erforderlich, soweit die Anforderungen einer Rechtsverordnung nach § 45b Abs. 3 Satz 3 eingehalten werden.“ (§ 36 BWVG). Andere Länder, z.B. Niedersachsen, beschränken dies auf Dach-, Hof- oder Wegeflächen von Wohngrundstücken (Sieker, 2003). In Berlin gelten ähnliche Erlaubnisbefreiungen für Grundstücke unter 1000 m² außerhalb der Wasserschutzgebietszonen mit einem geringen Metalldachanteil.

Im § 51a des Wassergesetzes für das Land Nordrhein-Westfalen (LWG-NRW, 1995) wird die Versickerung von Regenwasser für Neubauvorhaben verbindlich vorgeschrieben:

(1) Niederschlagswasser von Grundstücken, die nach dem 1. Januar 1996 erstmals bebaut, befestigt oder an die öffentliche Kanalisation angeschlossen werden, ist vor Ort zu versickern, zu verrieseln oder ortsnah in ein Gewässer einzuleiten, sofern dies ohne Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit möglich ist. Die dafür erforderlichen Anlagen müssen den jeweils in Betracht kommenden Regeln der Technik entsprechen.

In der Verwaltungsvorschrift des Landes NRW zu „Anforderungen an die Niederschlagsentswässerung im Trennverfahren“ (MUNLV-NRW, 2004) wird ausdrücklich auf das Landeswassergesetz Bezug genommen. Die ortsnaher Einleitung erfolgt grundsätzlich im Trennverfahren. Es werden keine immissionsorientierten Zielgrößen genannt. Dafür werden sowohl Verfahren zur Behandlung des Niederschlagswassers als auch Kategorien für die Behandlungsbedürftigkeit eingeführt. Als Maßnahmen werden die gängigen Methoden der Versickerung (analog DWA-A138) bzw. zentrale Verfahren wie Regenklärbecken mit und ohne Dauerstau (RKBmD bzw. RKBod), Bodenfilter und Regenüberläufe im Trennverfahren angegeben. Allerdings werden Regenüberläufe nur als zeitlich begrenzte Übergangslösungen angesehen. Nicht ausdrücklich genannte Methoden können nach Nachweis der Reinigungsleistung zugelassen werden.

Kategorie I ist unbelastetes Niederschlagswasser. Dieses kann i.d.R. ohne Vorbehandlung in oberirdische Gewässer eingeleitet werden. Die Einleitung ins Grundwasser (Versickerung) ist gemäß des Runderlasses zur „Niederschlagswasserbeseitigung gemäß § 51a des Landeswassergesetzes“ (MUNLV-NRW, 1998) über Versickerungsanlagen zulässig.

Bei Kategorie II ist eine Vorbehandlung erforderlich. Diese kann über die Oberbodenzone (bei Versickerung) oder über zentrale Behandlungsanlagen erfolgen.

Stark verschmutztes Niederschlagswasser der Kategorie III muss einer Behandlungsanlage gemäß Anlage 2 des RdErl. (Abscheider, RKBmD, RKBoD, RBF, biologisch wirksame Anlage oder Kläranlage) zugeführt werden. Eine Versickerung bleibt in Ausnahmen nach Ziffer 14.3 und 15 des RdErl. zu §51a LWG (MURL-NRW, 1998) nach Vorbehandlung erlaubnisfähig.

Da die Wasserrechtliche Erlaubnis gem. WHG § 18 Absatz 1 grundsätzlich widerruflich ist, kann bei Nichterfüllung der ggfs. in der Wasserrechtlichen Erlaubnis festgeschriebenen Nebenbestimmungen (z.B. Anforderungen an Überwachung, Wartung, Pflege, ...), die gemäß WHG § 13 Absatz 1 auch nachträglich zulässig sind, die Wasserrechtliche Erlaubnis widerrufen, bzw. bei Auslaufen eine Neuerteilung verweigert werden. In der neuen Fassung des LWG NRW v. 16.07.2016 findet sich jedoch keine weiterführende Auslegung. Die Regelungen gemäß § 25 Absatz 2 b (LWG NRW bis 15.07.2016) wurden im Zuge der Novellierung 2016 gestrichen.

3 Planung und Bemessung von Versickerungsanlagen

Für die Bemessung von Versickerungsanlagen dient das Arbeitsblatt DWA-A138 „Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser“ als Grundlage. Die Bemessung erfolgt i. d. R. auf Überstauhäufigkeiten von $n = 0,2$ ($1/a$) (Sieker, 2003).

In dem Arbeitsblatt DWA-A138 werden verschiedene Versickerungsverfahren wie

- Flächenversickerung
- Muldenversickerung
- Rigolen- und Rohrversickerung
- Schachtversickerung

berücksichtigt.

Auch kombinierte Bewirtschaftungsverfahren wie Mulden-Rigolen-Systeme, die sowohl eine Versickerung sowie eine, wenn auch gedrosselte, Ableitung vorsehen, werden berücksichtigt. Damit wird auch der bisher genannte Einsatzbereich von Versickerungsanlagen (K_f -Wert zwischen $5 \cdot 10^{-3}$ m/s und $5 \cdot 10^{-6}$ m/s) wesentlich erweitert und die oberflächige Versickerung mit kontrollierter gedrosselter Ableitung verknüpft. Die Beschränkung auf die ausschließliche Versickerung hat in der Praxis immer wieder dazu geführt, dass kombinierte Bewirtschaftungsanlagen mit Versickerungsanteil nicht realisiert wurden, da ausschließlich der angegebene K_f -Wert-Bereich als Realisierungsmaßstab herangezogen wurde. Im Jahresverlauf können in Abhängigkeit der Versickerungsfläche aber auch bei geringeren Durchlässigkeiten hohe Versickerungsraten erzielt werden.

Die Bemessungsverfahren für das erforderliche Speichervolumen beruhen im Wesentlichen auf dem gleichen Prinzip, das auch zur Bemessung von Regenrückhaltebecken angewendet wird. Für komplexe, vernetzte Systeme werden Nachweisverfahren mit Langzeitsimulation vorgeschlagen. Für einzelne Anlagen kann das vereinfachte Verfahren verwendet werden.

In dem Arbeitsblatt DWA-A138 der DWA werden zudem Hinweise zu „Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser“ aufgeführt. Die Aussagen zum Bau gelten für neu gebaute dezentrale Anlagen. Für den Betrieb werden zwar Hinweise gegeben, diese stützen sich aber nicht auf systematische Erkenntnisse und Erfahrungen langjährig betriebener Anlagen, da diese zum Erstellungstermin noch nicht vorgelegen haben. In einem Arbeitsbericht der DWA Arbeitsgruppe ES (Entwässerungs-Systeme) 3.1 aus 2011 wurden prinzipielle neuere Erkenntnisse und Erfahrungen für die quantitative und qualitative Verbesserung des Bau und Betriebes sowie Hinweise aus Interviews verschiedener Betreiber gegeben. Es werden ebenfalls einige Hinweise zur Pflege gegeben.

Für konkrete Entscheidungen zum Bau neuer Anlagen, aber auch zum Weiterbetrieb bestehender Anlagen fehlen allerdings immer noch belastbare Angaben zu Lebensdauern, Erneuerungs- und Instandhaltungszyklen. In welchem Umfang sich Schadstoffe im Bodenaufbau angereichert haben und ob es nach Langzeitbetrieb zu einer Erhöhung der Schadstoffe im Sickerwasser von Mulden kommt, ist ebenfalls noch nicht abschließend geklärt.

Daher kommt es oft zum Ausschluss dezentraler Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen im Planungsprozess.

Weiterhin werden bei Erschließungs- und Entwässerungsplanungen die Lebensdauern dezentraler Anlagen mit hohen Sicherheitsabschlägen versehen. Dies wiederum führt häufig dazu, dass konventionelle Ableitungsvarianten trotz ökologischer und ökonomischer Nachteile aufgrund höherer Planungssicherheit vorgezogen werden. Zudem werden seitens der kommunalen Straßenbauverwaltung häufig Gefährdungspotenziale für das Grundwasser angeführt, deren Relevanz bisher nicht abschließend geklärt ist. Deshalb erfolgte im Rahmen dieses Forschungsvorhabens eine systematische Aufnahme und Bewertung langjährig betriebener Anlagen.

In der DIN 1986-100 (2008) wird der Überflutungsnachweis für private Flächenentwässerung größer 800 m² angeschlossener Fläche eingeführt. Anfallendes Niederschlagswasser soll auch bei einem 30-jährlichen Niederschlag schadlos auf dem Grundstück verbleiben. Bei Versiegelungsgraden von mehr als 70% und generell bei kritischer Infrastruktur gilt sogar ein 100-jährlicher Niederschlag. Die Berücksichtigung der Rückhaltung ist dort vorgesehen, allerdings nicht die Versickerung. Zu diesem Thema wurde von der DWA Arbeitsgruppe ES 3.7 der DWA im Jahre 2011 ein Bericht veröffentlicht, der die gleichzeitige gedrosselte Ableitung und Versickerung mit in den Überflutungsnachweis integriert. Ferner sind in diesem Bericht ergänzend zu den im Arbeitsblatt A138 gegebenen Hinweisen, erste Erfahrungen aus dem Betrieb der Anlagen und Hinweise für Bau und Betrieb gegeben. Allerdings liegen diesen Angaben keine systematischen Erhebungen zu Grunde.

4 Stand der Wissenschaft und Forschung

4.1 Einleitung

Aufgrund der schnellen Urbanisierung steigt die Flächeninanspruchnahme und Versiegelung durch Infrastruktur, private und gewerbliche Zwecke weltweit (García et al., 2014, Liu et al., 2014). Dies wiederum führt zu einer verminderten Regenwasserversickerung und Verdunstung und als Folge zu größeren Niederschlagsabflussmengen und Abflussspitzen in städtischen Gebieten (Davis et al., 2003; Fletcher et al., 2013). Der Niederschlagsabfluss im urbanen Raum enthält oft hohe Konzentrationen von Schadstoffen aus Straßen und Baustoffen, Fahrzeugkomponenten und Verkehr sowie Fäkalien wie z.B. Hundekot (Folkesson et al., 2009; Parker et al., 2010). Die bekanntesten Schadstoffe in Niederschlagsabflüssen sind Schwermetalle, PAKs, mikrobielle Verunreinigungen und Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor (Blanchard et al. 2001; Göbel et al., 2007; Ingvertsen et al., 2012a; Kayhanian et al., 2012; Li et al., 2014).

Um die zunehmende Menge des Niederschlagwassers zu verringern und die Verschmutzung der Vorfluter zu verhindern, fördern die Wasserbehörden in vielen Ländern strukturelle Regenwasserversickerungstechniken (Jagd et al., 2006; Marsalek et al., 2006; Lim et al., 2015). Die diffuse Infiltration des Abflusses von versiegelten Flächen oder Dächern in dezentrale Muldensysteme ist ein wichtiger Bestandteil dieser strukturellen Regenwasserversickerung, die vor allem in Geschäfts- und Wohnvierteln angewendet wird (Dietz, 2007; Davis et al., 2006; Boivin et al., 2008; Piguet et al., 2008). In den dezentralen Niederschlagsversickerungsanlagen spielt der Boden als natürlicher Filter eine wichtige Rolle, um die Niederschlagsabflussmengen über Bodenwasserspeicherung und Evapotranspiration zu reduzieren und eine Schadstoffbindung durch physikalische und chemische Retardierung zu gewährleisten. Er wird daher als wichtigster Teil des technischen Aufbaus dezentraler Anlagen angesehen.

Weltweit ist der technische Aufbau der dezentralen Anlagen sehr unterschiedlich, in der Regel werden jedoch verschiedene Boden- (Substrat) schichten eingebaut (Lundy et al. 2012, LeFevre et al., 2014; DWA-A138, 2005). Er besteht zumeist aus einer oberen Bodenfilter-schicht von 10 bis 30 cm mit einem ausreichenden Gehalt an organischer Bodensubstanz, welche als Wurzelraum, Bodenwasser- und Nährstoffspeicher für die Pflanzen und Mikroorganismen dient. Weithin unterstützt diese die mechanische, chemische und biologische Retardierung und den Abbau von Schadstoffen (Roy-Poirier, 2010, Davis et al., 2001, Le Fevre et al., 2014). Darunter folgt häufig eine Schicht mit hoher Infiltrationsleistung, die die Entwässerung des Ablaufwassers gewährleistet. Zwischen diesen beiden Substratschichten befindet sich meist eine weitere Substratschicht, welche die Migration von feinen Schmutzpartikeln in die untere Schicht begrenzt (Lundy et al., 2012).

In einigen Fällen sind zudem Rigolen installiert, um hohe Niederschlagsabflüsse bei gleichzeitig geringen Infiltrationsraten der vorliegenden Bodenverhältnisse gewährleisten zu können (Roy-Poirier 2010). Um Erosionsprozesse an den dezentralen Systemen zu vermeiden, werden sie mit Gras, kleinen Pflanzen, Sträuchern oder Bäumen bepflanzt.

4.2 Schadstoffbelastung von Niederschlägen

Die Schadstoffkonzentrationen von Niederschlagsabflüssen resultieren aus der Stoffbelastung des Niederschlags durch atmosphärische Feinpartikel und Aerosole und aus der zusätzlichen Belastung durch den Abflusssort.

Der Zufluss dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen besteht aus Niederschlägen, welche von teil- und vollversiegelten Flächen abgeführt wird. Dabei kann es sich z.B. um Abflüsse von Dach-, Hof-, Gehwegs- oder Verkehrsflächen handeln. Nach DWA-A 138 (2005) werden die Abflüsse in drei verschiedene Kategorien eingeteilt: 1) unbedenklich, 2) tolerierbar und 3) nicht tolerierbar. Hierbei gelten vor allem die Abflüsse von Gründächern, Wiesen, Dachflächen (unbeschichtet) und Terrassenflächen in Wohngebieten als unbedenklich. Die Spanne der tolerierbaren Abflüsse ist weit gefasst: dies sind u.a. Abflüsse von beschichteten Dächern, Rad- und Gehwegen, Hofflächen und Parkplätzen aber auch Abflüsse von Anlieger-, Kreis- und Hauptverkehrsstraßen (300-15000 KFZ/24h) sowie von Start- und Landebahnen von Flugplätzen. Als nicht tolerierbar werden dagegen Abflüsse von Hofflächen in Gewerbegebieten mit hoher Luftverschmutzung sowie einige Sonderflächen wie LKW Park- oder Abstellflächen und Flugzeugpositionsflächen angesehen (ebd., 2005).

In wissenschaftlichen Arbeiten wird das Abflusswasser dagegen häufig nach seinem Entstehungsort kategorisiert. Göbel et al. (2007) führten eine Metaanalyse durch, verglichen verschiedene Oberflächenabflüsse und bildeten daraus repräsentative, mittlere Abflusskonzentrationen für verschiedene Flächen (Tabelle 1). Die Autoren betrachten insgesamt 12 verschiedene Abflussflächentypen: (1) Niederschlagswasser, (2) Regenrinnen ohne Zink, (3) Regenrinnen aus Zink, (4) Gründächer, (5) Kupferdächer, (6) Aluminiumdächer, (7) Zinkdächer, (8) Fahrrad- und Fußgängerwege, (9) Garten, (10) Parkplätze und Nebenstraßen, (11) Hauptstraßen und (12) Bundesstraßen. Tabelle 1 zeigt die mittleren Konzentrationen von 22 Stoffen von 12 Oberflächenabflusstypen nach Göbel et al. (2007). Beim Vergleich der Stoffkonzentrationen in den verschiedenen Abflusskategorien (1-12) lässt sich ein eindeutiger Anstieg der Konzentrationen mit zunehmender Verkehrsintensität beobachten. Dies gilt sowohl für TSS (AFS), BSB und CSB als auch für die Ionen, PAK und MKW und Schwermetalle. Ausnahmen bilden Zink und Kupfer, welche in Dachabläufen von Zink- und Kupferdächern sowie von Dächern mit Regenrinnen aus diesem Material höher sind.

Tabelle 1: Repräsentative mittlere Konzentrationen von 22 Stoffen von 12 Oberflächenabflusstypen nach Göbel et al., 2007, verändert

Parameter	Einheit	Niederschlag		Dachabflüsse				Abflüsse von Verkehrsflächen						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		Gärten Grünland	Beton, Zement, Bitumen, Glas	Beton, Zement, Bitumen, Glas	Gründächer ohne Zinkrinnen	Kupferdächer	Aluminiumdächer	Zinkdächer	Fußgänger- und Parkplatz Fahrradweg Garten	Nebenstraße	Hauptstraße	Bundesstraße		
Pysiko-chemische Parameter														
1	EC	µS/cm	50	141	141	71	141	141	141	-	-	-	470	414
2	pH	-	5	5.7	5.7	7.5	5.7	5.7	5.7	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
Summenparameter														
3	TSS	mg/l	12	43	43	-	43	43	43	7.4	150	150	163	153
4	BSB	mg/l	2	12	12	-	12	12	12	-	11	11	11	32
5	CSB	mg/l	19	66	66	-	66	66	66	70	70	70	105	107
Nährstoffe														
6	P _{tot}	mg/l	0.09	0.22	0.22	-	0.22	0.22	0.22	-	0.18	0.18	0.29	0.2
7	NH ₄	mg/l	0.8	3.39	3.39	1.3	3.39	3.39	3.39	-	0.1	0.1	0.9	0.5
8	NO ₃	mg/l	1.54	2.78	2.78	0.59	2.78	2.78	2.78	-	2.78	2.78	5	2.52
Schwermetalle														
9	Cd	µg/l	0.7	0.8	0.8	0.1	0.8	0.8	1	0.8	1.2	1.2	1.9	3.7
10	Zn	µg/l	80	370	1851	468	370	370	6000	585	400	400	407	345
11	Cu	µg/l	11	153	153	58	2600	153	153	23	80	86	97	65
12	Pb	µg/l	9	69	69	6	69	69	69	107	137	137	170	224
13	Ni	µg/l	2	4	4	3	4	4	4	-	-	14	11	27
14	Cr	µg/l	3	4	4	3	4	4	4	-	-	10	11	13
Ionen														
15	Na	mg/l	2.14	-	-	-	-	-	-	-	18	-	108	194
16	Mg	mg/l	0.18	-	-	7	-	-	-	-	-	-	1	5
17	Ca	mg/l	7.5	10	10	78	10	10	10	-	-	-	31	37
18	K	mg/l	0.56	-	-	7	-	-	-	-	4	-	2	5
19	SO ₄	mg/l	5.46	46.71	46.71	-	46.71	46.71	46.71	-	-	-	15	39
20	Cl	mg/l	2.26	7.74	7.74	-	7.74	7.74	7.74	-	-	-	106	159
Organische Stoffe														
21	PAK	µg/l	0.39	0.44	0.44	-	0.44	0.44	0.44	1	3.5	4.5	1.65	2.61
22	MKW	mg/l	0.38	0.7	0.7	-	0.7	0.7	0.7	0.16	0.16	0.16	4.17	4.76
Anzahl der Daten														
			> 15			< 5								
			5-15			keine Daten								

4.3 Reinigungsleistung dezentraler Versickerungsanlagen

Internationale Studien zeigen, dass dezentrale Versickerungsanlagen wie Mulden (international auch bezeichnet als: Bioretention cells; Bioretention swales; Bioswales; Biofilters, Rain garden u.v.m.) sowohl die Wasserqualität als auch die Hydrologie des betreffenden Einzugsgebietes effektiv verbessern können (Davis et al., 2001, 2003; Jagd et al., 2006; Davis, 2007, 2008). Zahlreiche Labor- und Feldstudien zeigen, dass bodenbürtige, vegetationsbestandene Versickerungssysteme effektiv Schwermetalle binden und somit eingetragene Schadstoffe des Oberflächenabflusses in einem hohen Grad reduzieren können (Tabelle 1 Tabelle 2; Davis et al. 2006; Ingvertsen et al., 2012a; Lim et al. 2014).

Hunt et al., 2006 stellten bei einer Feldstudie eine Reinigung des Abflusswassers in einer dezentrale Versickerungsanlage von über 98% für Zn und Cu und über 80 % für Pb fest. Li and Davis (2009) bestimmten eine Reduzierung von Abflusskonzentrationen zwischen 92-99%, 65-96% und 83-100% für die Schwermetalle Zn, Cu und Pb in zwei Anlagen über eine Versuchsdauer von insgesamt 15 Abflussereignissen.

Bei einem Vorhaben in Berlin wurde sowohl die Sickerleistung als auch die chemische Rückhalteleistung einer Versickerungsanlage über eine Laufzeit von zwei Jahren untersucht (Sommer et.al., 2002). Eine gute Rückhalteleistung der Oberbodenzone der Mulde konnte bestätigt und der Frachteintrag in das Grundwasser deutlich reduziert werden. Über den Überlauf der Mulde in die Rigole gelangte nur ca. 1-2% der Gesamtfracht aus dem Zulauf.

Untersuchungen aus einem vom Umweltbundesamt geförderten Forschungsvorhaben bestätigen eine hohe Abbauleistung von Mineralölkohlenwasserstoffen in der Oberbodenzone einer Versickerungsmulde (Panning et al., 2006). Die festgestellte hohe Reduktionsleistung der Anlagen (Tabelle 2) wird von den Autoren zum einen durch physikalische und chemische Filter- und Adsorptionsprozesse von Böden und Pflanzen, zum anderen durch eine Stabilisierung, den Abbau und die Umsetzung durch Bodenmikroorganismen erklärt (Prince Georges County, 2002; Søbereg et al., 2014). Die Anwendung von „Biofiltern“ (Mulden und andere Anlagen mit Oberbodenfiltration) kann in Klimaregionen mit langen und kalten Wintern zu Problemen führen. Durch Frosteinwirkung können z.B. Risse im Filtermedium entstehen, die Verwendung von Tausalzen im Straßenraum, Schneefall und Tauprozesse führen zu erhöhten Ein- und Austrägen von Schadstoffen. Weiterhin kann die Reduktion der mikrobiellen Aktivität die Reinigungsleistung der Anlagen in kalten Klimaregionen herabsetzen (Marsalek et al., 2003; Westerland and Viklander, 2006; Søbereg et al., 2014).

Die Dauer der effektiven Schadstoffretention von dezentralen Anlagen ist auf dem Feldmaßstab noch nicht wissenschaftlich abgesichert. Bisher sind uns keine Ergebnisse von Sickerwasserbeprobungen von dezentralen Anlagen > 10 Jahren Laufzeit bekannt.

Tabelle 2: Übersicht des erreichbaren Rückhaltes mit dezentralen Versickerungsanlagen für verschiedene Parameter. Literaturangaben verschiedener Autoren.

Parameter	Rückhalt (%)	Quellen
Pb	80 -100	Li and Davis, 2009; Hunt et al., 2006
Zn	92-99	Li and Davis, 2009; Hunt et al., 2006; Trowsdale and Simcock, 2010
Cu	(-10) 65-99	Li and Davis 2009; Hunt et al., 2006; Trowsdale and Simcock, 2010
Cd	66 – 90	Glass and Bissouma, 2005; U.S. EPA, 2011
TSS	97	Hsieh und Davis, 2005
Bakterien	70	Hunt et al., 2007
PAK	87	DiBlasi et al., 2009

4.4 Anforderungen an Muldensubstrate zum Schadstoffrückhalt

Schwermetalle werden im Boden hauptsächlich durch Sorption, organische Bindung und in untergeordnetem Maß durch chemische Fällungsprozesse angelagert. Dabei ist zu beachten, dass der Rückhalt von Schwermetallen reversibel sein kann. Die Ursachen für Schadstoffdurchbrüche sind jedoch weitgehend bekannt (Verschiebungen des pH-Wertes, Taumiteinsatz) und können bei Planung, Betrieb und Überwachung von Versickerungsanlagen beachtet werden (Sieker, 2003). In Deutschland sind die Anforderungen an Muldensubstrate durch das Arbeitsblatt DWA-A 138 (2005) definiert. In diesem werden Vorschläge gemacht, die Bindungskapazität für Schwermetalle in Versickerungsanlagen zu erhöhen. Diese sind:

- Erhöhung des Tonmineralgehaltes
- Erhöhung des Gehaltes an organischer Substanz
- Stabilisierung des pH-Wertes durch Zugabe von schwer löslichem Kalk

Organische Stoffe werden an den Oberflächen von Huminstoffen, Tonmineralen und Eisen- und Manganoxiden des Bodens gebunden. Viele organische Schadstoffe können mikrobiologisch abgebaut werden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Abbauleistung mit steigendem Sauerstoff- und Nährstoffgehalt im Boden ansteigt (Sieker, 2003).

Tabelle 3 zeigt die Bodeneigenschaften, welche die Substrate in Versickerungsanlagen in Deutschland erfüllen sollen. Weitere Anforderungen sind eine ausreichende Mächtigkeit der Oberbodenschicht von 30 cm und eine Begrünung der Anlagen durch Rasen. Der Bewuchs soll langfristig einen Erosionsschutz durch die Durchwurzelung, die Sauerstoffversorgung und Wasserdurchlässigkeit sowie den partikulären Schadstoffrückhalt an der Bodenoberfläche sichern. Eine potenzielle Gefährdung des Bodens und des Grundwassers hängt demnach nicht allein von den Inhaltsstoffen der Niederschlagsabflüsse ab, sondern ist im entscheidenden Maße vom Boden, d.h. den physikalischen, chemischen und biologischen Fähigkeiten abhängig, Schadstoffe zurückzuhalten.

Tabelle 3: Bodeneigenschaften zur Förderung des Schadstoffrückhaltevermögens (nach Sieker et. al., 1999, DWA-A 138, 2005)

Bodeneigenschaft	Angestrebte Bodeneigenschaften zur Förderung der Rückhalte bzw. Reinigungsfunktion der Bodenpassage in Anlagen zur Versickerung von Niederschlagsabflüssen.
Bodenart	Bei der Vorgabe von Kornverteilungen für das Bodensubstrat in technischer Hinsicht (z. B. nach DIN 18035, Teil 4, Bild 2 oder nach STECKER 1995) ist zur Schaffung von Sorptionsflächen nach Möglichkeit im Rahmen der Anforderungen an die Wasserdurchlässigkeit auch ein entsprechender Schluff- und Tongehalt vorzusehen.
Wasserdurchlässigkeit	Zur Gewährleistung einer für Rückhalte- und Reinigungsprozesse ausreichend langen Aufenthaltszeit des Sickerwassers, sollte die Durchlässigkeit in der oberen Bodenzone langfristig im Bereich von $5 \cdot 10^{-6}$ bis $1 \cdot 10^{-5}$ m/s liegen.
Bodenreaktion	Zur Förderung des stoffspezifischen Bindungs- und Puffervermögens sollte der pH-Wert des Bodens in Versickerungsanlagen langfristig zwischen 6 und 8 liegen.
Humusgehalt	Zur Förderung des stofflichen Bindungsvermögens an organischen Bodenbestandteilen sollte der einzubauende Boden mindestens 1-3% organische Substanz (Humusgehalt) aufweisen.
Bodengefüge	Das Aggregatgefüge sollte weitgehend eine Krümelstruktur aufweisen, damit eine ausreichende Durchlüftung des Oberbodens stattfinden kann. Dies begünstigt die biologische Aktivität der Mikroflora und das Wurzelwachstum der Vegetation sowie die Intensität der Wasser- und Nährstoffaufnahme.

Die Fähigkeit, Schadstoffe aus dem Niederschlagsabfluss zurückzuhalten, ist in der oberen, belebten Bodenzone häufig größer als im Untergrund.

Daraus folgt, dass Flächen- oder Muldenversickerung den unterirdischen Versickerungsverfahren (Schacht-, Rohr-, Rigolenversickerung) vorzuziehen sind. Durchlässige Pflasterungen (Dränasphalt) sind dabei im Gegensatz z.B. zu Rasengittersteinen von der Wirkungsweise eher den unterirdischen Versickerungsverfahren zuzuordnen.

4.5 Grundwasserflurabstand

In den Bundesländern existieren unterschiedliche Forderungen bezüglich des einzuhaltenden Grundwasserflurabstandes bei dem Betrieb von dezentralen Versickerungsanlagen. In NRW gelten die Regelungen des § 44 (früher § 51a) LWG („Niederschlagswasserbeseitigung“) bzw. gemäß § 55, 2 WHG („Beseitigung des Niederschlagswassers“) sowie auf den RdErl. IV B 5 – 673/2-29010 / IV B 6 – 031 002 0901 v. 18.5.1998 (MURL,1998). In letzterem sind für verschiedene Versickerungsmethoden, Mindestabstände zum Sohl- bzw. Grundwasserflurabstand festgelegt. Für eine Muldenversickerung gilt z.B. kein Sohlabstand und ein Flurabstand von $>1,5$ m. Bei unterirdischen Versickerungsanlagen ist zusätzlich ein Sohlabstand von 1,0 m einzuhalten. Bei der Rigolen- und Rohrversickerung muss der Sohlabstand dagegen $>1,0$ m und der Flurabstand $>2,0$ m betragen. Ähnliche Regelungen gelten z.B. auch im Land Berlin. Nach einer Einzelfallprüfung besteht in Abhängigkeit vom mittleren Flurabstand die Möglichkeit einer großflächigen Versickerung bei Flurabständen $<1,0$ m und $>0,6$ m.

Im Sinne einer schadlosen Versickerung muss bei der Mulden- sowie Mulden-Rigolen-Versickerung der Abstand zwischen der Geländeoberkante und dem Bemessungsgrundwasserstand mindestens 1,5 m betragen. Bei der Rigolen-, Rohr oder Schachtversickerung muss der Sohlabstand mindestens einen Meter zum Bemessungsgrundwasserstand betragen (Sen-StadtUm, 2016). Eine pauschale Forderung nach einem Abstand zwischen Versickerungsanlage und Grundwasserstand von 1,0 m ist dagegen im aktuellen DWA-A 138 (2005) nicht mehr zu finden. Dies eröffnet die Möglichkeit einer Flächen- bzw. Muldenversickerung auch bei Unterschreitung eines Mindestsohlabstandes von 1,0 m bei der Infiltration von wenig belastetem Regenwasser. In der Praxis werden diese Größen als „gesetzt“ angenommen und nicht weiter hinterfragt. Mit dieser Forderung ist beispielsweise die Versickerung in Gebieten mit Schichtenwasser oft nicht möglich, da hier im Jahresverlauf sehr hohe, teilweise bis an die Geländeoberkante reichende Grundwasserstände auftreten können. Derartiges Schichtenwasser bildet sich vorzugsweise bei lehmigen oder tonigen Böden, die eine i.d.R. eine sehr hohe Schutzwirkung gegenüber dem Grundwasser aufweisen, da die Adsorptionskapazitäten dieser Böden bei langer Verweildauer hoch sind.

4.6 Versickerungsleistung

Für die Leistung von dezentralen Versickerungssystemen ist es wichtig, dass die eingesetzten Böden ausreichend hohe Infiltrationsraten aufweisen und gleichzeitig eine ausreichende Verzögerungszeit für die Niederschlagsabflüsse bieten.

Internationale Empfehlungen für die hydraulische Leitfähigkeit (K_f) des Bodens variieren erheblich. Sie liegen bei $3,5 \cdot 10^{-6}$ m/s in den USA und Neuseeland, bei $1,4 \cdot 10^{-5}$ und $5,5 \cdot 10^{-5}$ m/s in Australien und zwischen $1 \cdot 10^{-4}$ und $1 \cdot 10^{-6}$ m/s in Österreich und Deutschland (Le Coustumer et al., 2009; DWA A- 138, 2005).

Lindsey et al. (1992) und Le Costumer et al. (2009, 2015) haben die hydraulische Leistung von dezentralen Versickerungssystemen mit längeren Betriebszeiten untersucht und kommen zu dem Schluss, dass es schon nach wenigen Betriebsjahren zu einem Rückgang der Infiltrationsleistung kommt. Die Untersuchungen zeigten, dass etwa 40% der untersuchten Anlagen eine geringere hydraulische Leitfähigkeit aufwiesen, als in den Richtlinien empfohlenen wurde. Li und Davis (2008a) bestimmten eine Abnahme der hydraulischen Leitfähigkeit von zwei Bodenfiltermedien in Säulenversuchen von anfänglich $1,5 \cdot 10^{-2}$ und $2 \cdot 10^{-2}$ m/s auf weniger als $2,8 \cdot 10^{-5}$ m/s und führten dies auf eine Verstopfung der Bodenporen durch Partikel zurück.

4.7 Abgeleiteter Untersuchungsrahmen

Aus den vorangegangenen Untersuchungen lassen sich folgende Fragestellungen ableiten:

1. Wie ist eine Kolmation von Anlagen zu verhindern und wie lässt sich der langfristige Betrieb sichern?
2. Welche Anlagen unterliegen besonders hohen Schadstoffbelastungen?
3. Welche Voraussetzungen (z.B. Zusammensetzung Boden, Mächtigkeit) müssen Versickerungsanlagen erfüllen um Schadstoffe langfristig zu binden, ohne dass ein schädlicher Eintrag ins Grundwasser befürchtet werden muss?
4. Welche Anforderungen und Anpassungen müssen an Planung, Bau, Wartung und Betrieb gestellt werden?
5. Wie ist die Entwicklung der Regenwasserversickerungsanlagen mit belebter Bodenzone aus betrieblicher Sicht einzuschätzen? Welche Rollen spielen dabei die Einflussfaktoren:
 - Abflussliefernde Flächen (Dach, Wege, Straßen)
 - Ableitungstechniken (offene Ableitung, Grundleitungsentwässerung, punktuelle/ diffuse Ableitung)

- Hydraulische Anschlussverhältnisse
- Anlagenkonfiguration (dezentrale/ zentrale, lineare, punktuelle Anordnung)
- Trägerschaft des Betreibers (privat/ öffentlich)

5 Methodik und Vorgehensweise

5.1 Auswahl der Anlagen

Die vor rd. 20 Jahren technisch- planerisch entwickelte dezentrale Bewirtschaftung von Regenwasser in oberirdischen, belebten/begrünten Anlagen hat sich in NRW und anderen Bundesländern als Alternative zur Regenwasserableitung etabliert. Mit Einführung des §51a in das Landeswassergesetz 1995 wurde diese ab 1996 der Regenwasserableitung als gleichgestellte, bei jedem Neubauvorhaben auf ihre Umsetzbarkeit hin zu überprüfende Entwässerungslösung aufgewertet. In der Folge ist es zu einem rasanten Zuwachs an realisierten dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen gekommen. Die Anwendung bezog und bezieht sich dabei auf nahezu alle Bereiche der Siedlungsentwicklung wie:

- Wohnbauvorhaben aller Art
- Handels- und Dienstleistungsimmobilien
- Gewerbe- und Industriebauvorhaben
- Öffentliche Erschließung (Straßen und sonstige befestigte Flächen in Wohn-, Gewerbegebieten etc.)

Vor dem Hintergrund der Zielstellung des Forschungsvorhabens ist somit:

- der Zustand
- die Leistungsfähigkeit und
- der Handlungsbedarf zum nachhaltigen Erhalt der Leistungsfähigkeit

der in NRW und anderen Bundesländern realisierten Anlagen zu erfassen. Im ersten Schritt waren hierfür relevante Auswahlkriterien für die 30 bzw. 50 zu bearbeitenden Anlagen abzuleiten.

5.1.1 Allgemeine Auswahlgrundsätze

Die Grundsätze für die Auswahl der zu untersuchenden Anlagen waren:

- Erfassung der bisherigen Betriebsentwicklungen und –erfahrungen; Untersuchung von Anlagen mit möglichst langen Betriebsdauern (mind. 5, 10, 15 oder mehr Jahre)
- Nutzung der Ergebnisse von F+E Projekten aus den Anfängen der Dezentralen Regenwasserbewirtschaftung (konzeptionelle und planerische Entwicklung) und ersten Betriebsjahren (Ex-Post-Analysen)

- eine möglichst umfassende Abbildung der in NRW und darüber hinaus in der Praxis realisierten Entwässerungsplanungen (Siedlungs-, Nutzungsstrukturen, hydraulische und stoffliche Abflusscharakteristika technischer Systeme und Betriebszuständigkeit öffentlicher, wie privater)
- Untersuchungsschwerpunkt war mit $\frac{2}{3}$ der Anlagen NRW. Um aber auch von Erfahrungen aus dem übrigen Bundesgebiet zu profitieren und die NRW-Erfahrungen in den gesamtdeutschen Kontext einordnen zu können, wurden auch Anlagen außerhalb NRWs in der Größenordnung von $\frac{1}{3}$ aller Anlagen untersucht

Insgesamt wurden rd. 70 Anlagen in Augenschein genommen. Von diesen wurden rd. 50 Anlagen einer genaueren Sichtung und Erhebung untersuchungsrelevanter Parameter unterzogen. Schließlich wurden 30 bzw. 33 Anlagen für eine eingehende betriebliche, hydraulische und stoffliche Untersuchung ausgewählt.

5.1.2 Auswahlkriterien

5.1.2.1 Qualitative Auswahlkriterien

Unter qualitativen Gesichtspunkten spielen vorrangig die durch die Flächennutzung verursachten stofflichen Belastungen der Abflüsse, das Rückhaltevermögen der belebten Anlagen und der Schutz des Grundwassers vor stofflichen Belastungen eine Rolle. Anlagen mit Abflüssen folgender Flächenarten waren für die Untersuchung relevant:

- Gründächer & Grünflächen
- Dachflächen ohne unbeschichtete Eindeckungen & Terrassenflächen
- Rad- & Gehwege in Wohngebieten
- Hofflächen & PKW-Parkplätze
- Anliegerstraßen (etc.)
- PKW-Parkplatz mit häufigem Fahrzeugwechsel
- Hofflächen & Straßen in Gewerbe- und Industriegebieten
- Sonderflächen

Die ebenfalls in den Regelwerken und einschlägigen Erlassen aufgeführten Flächenarten bleiben im Zuge der weiteren Untersuchungen unberücksichtigt:

- Dachflächen mit unbeschichteten Metallen
- Start-, Lande- und Rollbahnen

- Dachfläche Gewerbe/ Industrie
- Hauptverkehrsstraßen
- Dachflächen mit unbeschichteten Eindeckungen/ Straßen und Plätze mit starker Verschmutzung
- Hauptstraßen überregional

5.1.2.2 Quantitative (siedlungsstrukturelle) Auswahlkriterien

Unter quantitativen Gesichtspunkten geht es darum, die Auswahl der Anlagen mit den quantitativen Schwerpunkten der Bautätigkeit in den vergangenen 2 Jahrzehnten wie der aktuellen Bautätigkeit abzugleichen und sicherzustellen, dass typische und vom Realisierungsanteil her relevante Anlagenkonfigurationen und Siedlungs- bzw. Baustrukturen mit der Anlagenauswahl adäquat erfasst werden.

Zu dem Zweck wurden die relevanten Siedlungsflächen in NRW innerhalb des Zeitraums 1998 – 2012 ausgewertet (Information und Technik Nordrhein-Westfalen 2009).

Die betrachteten Siedlungsflächen umfassen die Gebäude- und Freiflächen

- Wohnen
- Handel und Dienstleistung
- Gewerbe und Industrie sowie
- Verkehrsflächen (Straßen, Wege und Plätzen).

Diese haben zusammen einen Anteil von ca. 20% aller Bodenflächen in NRW. Nicht berücksichtigt wurden hier die Flächenarten Betriebsflächen, Erholungsflächen, Landwirtschaftsflächen, Waldflächen, Wasserflächen und Flächen anderer Nutzung.

Die Siedlungszunahme der o.a. Siedlungsflächenarten beträgt im Zeitraum von 1998 bis 2012 (14 Jahre) rund 41.673 ha, dies entspricht einem Flächenwachstum von rd. 6% und einer Siedlungsflächenzunahme von ca. 2.977 ha (ca. 0,5%) pro Jahr. Der größte Zuwachs liegt dabei im Bereich des Wohnens mit einem Anteil von 71%. Im Handels- und Dienstleistungsbereich (21%) sind die Zuwächse mit 20 % überproportional hoch.

Die Anteile an Wohn-, Verkehr- und Industrie/Dienstleistungsflächen sind die quantitativ dominierenden Siedlungsflächen und wurden entsprechend bei der Auswahl der Anlagenstandorte berücksichtigt.

Die überproportional hohen Wachstumsraten im Bereich Handel- und Dienstleistungsflächen machen eine Berücksichtigung auch dieses Siedlungsflächentypen in gleichem Maßstab erforderlich.

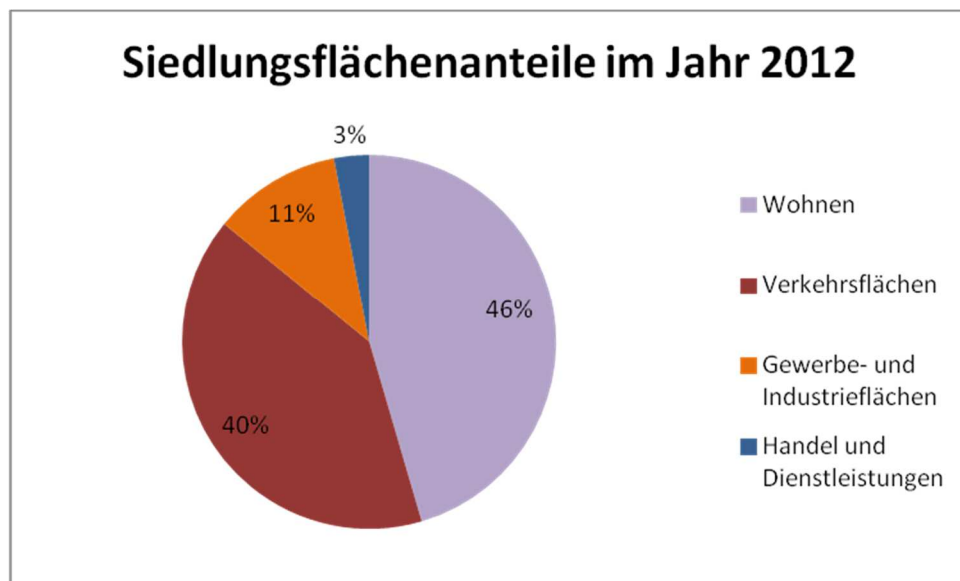


Abbildung 1: Siedlungsflächenanteile NRW in 2012

5.1.2.3 Berücksichtigung der Angaben der Unteren Wasserbehörde zu untersuchungsrelevanten Angaben in NRW

Zwar wurden in NRW seit 1996 eine Vielzahl an dezentralen Regenwasserbewirtschaftungsanlagen realisiert, eine zentrale Stelle an der diese erfasst sind und von der diese für eine systematische Anlagenauswahl zu Verfügung gestellt werden können, existiert jedoch nicht. Um hier einen landesweiten Überblick zu erhalten wurde deshalb in Zusammenarbeit mit dem LANUV eine Abfrage nach möglichst lange in Betrieb befindliche Anlagen zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung bei sämtlichen Unteren Wasserbehörden (UWB) in NRW durchgeführt.

Von den insgesamt rd. 40 angeschriebenen Unteren Wasserbehörden haben UWBs aus den vier nordrheinwestfälischen Regierungsbezirken Angaben gemacht (Tabelle 4). Davon entfielen 31 Anlagen auf reine Dachabflüsse, die weiteren 30 auch auf Hof-, Wege- und Straßenabflüsse. Die angegebenen Anlagen weisen eine mittlere Betriebsdauer von 13 Jahren auf. Im Zuge von Telefonaten mit Betreibern und Unteren Wasserbehörden sowie Besichtigungen vor Ort wurden weitere Informationen über die Eignung der Anlagen für die geplante Untersuchung eingeholt.

Die Anlagen mit den Nummern 9, 20, 25, 37,39, 42 wurden auf dieser Grundlage für die weitere Bearbeitung ausgewählt.

Tabelle 4: Angaben der UWBs zu Anlagenstandorten in NRW

Regierungsbezirk	Kommune	Anzahl
Düsseldorf	Krefeld	1
	Mülheim	12
	Kaarst	2
	Neuss	1
	Dormagen	2
	Oberhausen	2
	Bottrop	3
Arnsberg	Bochum	18
	Dortmund	15
Münster	Recklinghausen	3
Köln	Remscheid	2
Detmold	-	0
	Σ	61

5.1.2.4 Ex-Post-Analysebezogene Auswahlkriterien

Die Entwicklung und Implementierung der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung wurde in NRW mit Hilfe einer Reihe von Forschungs- und Entwicklungsprojekten auf den Weg gebracht und begleitet. Für eine Reihe von Anlagen in NRW liegen damit technisch-planerische wie auch stofflich-qualitative Untersuchungsergebnisse aus der Planungs- und Realisierungs- und ersten Betriebsphase vor. Dies eröffnet die Möglichkeit an diesen Anlagen Ex-Post-Analysen durchzuführen und so die in den bisherigen Betriebsjahren erfolgten Veränderungen zu erfassen.

Einen wesentlichen Beitrag zur konzeptionellen Entwicklung und Implementierung oberflächiger, belebter Versickerungsanlagen in die planerische Praxis, hat das BMBF- Verbundforschungsvorhaben OPTIWAK - Optimierung des Wasserkreislaufes geleistet (DBU, 1998). Über einen Zeitraum von 5 Jahren wurden hier erfolgreich versucht in Zusammenarbeit mit der Stadt Dortmund und der Emschergenossenschaft die dezentrale Regenwasserbewirtschaftung in die laufende städtebauliche Neu- und Sanierungsplanung sowie in gewerbliche und wohnungswirtschaftliche Bauvorhaben einzubinden. In dem Zuge konnten eine Vielzahl Demonstrationsprojekte realisiert und wissenschaftlich begleitet werden. Davon wurden für die weitere Bearbeitung die in angegebenen Anlagen 20 und 21 ausgewählt:

Die Universität Essen hat in 2001 im Auftrag des Landes NRW eine „Bodenchemische Untersuchung von Versickerungsanlagen“ vorgelegt (Hiller et al., 2001). Im Rahmen dieses Projektes wurden rund 80 Anlagen in NRW untersucht. Darunter waren auch Anlagen, die im Zuge des o.a. BMBF-Verbundforschungsprojektes OPTIWAK als Modellvorhaben planerisch entwickelt, erstellt und in der ersten Betriebsphase begleitet wurden (Kaiser, 1994).

Der Fördermittelgeber dieser Untersuchung hat mit Zuwendungsbescheid vom 13.03.2014 darauf hingewiesen, dass die damals untersuchten Anlagen im Zuge des vorliegenden Projektes in das Untersuchungsprogramm eingebunden werden sollen. Vor diesem Hintergrund wurden die Standorte und Koordinaten der damaligen Beprobungsstandorte recherchiert. Hierfür wurde auf alte Archivunterlagen von Prof. Dr. Burghardt (ehemals Uni Essen) zurückgegriffen. Da keine genaue Verortung der Standorte, bzw. der Probenahmepunkte vorlag, konnten nicht alle ins Untersuchungsprogramm aufgenommen werden. Die punktgenaue Verortung lies sich nur für die Anlagen Nr.1; Nr.4, Nr.8, Nr.9, Nr.10, Nr.20, Nr.21 sinnvoll rekonstruieren. Diese wurden unter betrieblichen (Nr.20, Nr.21), bodenkundlich/stofflichen (Nr.9, Nr.21, Nr.1, Nr.20, Nr.10, Nr.34), hydraulischen (Nr.1, Nr.4, Nr.9, Nr.21) und vermessungstechnischen (Nr.1, Nr.8) Aspekten wiederholt untersucht.

5.1.3 Übersicht der ausgewählten Anlagen

Die Auswahl der Anlagen hatte einer Vielzahl von Aspekten zu folgen. Ließen sich die oben erläuterten qualitativen und quantitativen Aspekte im Vorhinein relativ eindeutig bestimmen, warfen die tatsächlich vor Ort angetroffenen Verhältnisse oftmals neue Fragen an die technische Möglichkeit und wissenschaftliche Sinnfähigkeit der Bearbeitung der ausgewählten Anlage auf.

Nicht selten waren vor Ort gänzlich andere Versickerungstechniken erstellt worden als in Plänen und Angaben von Unteren Wasserbehörden angegeben. Auch war die Verfügbarkeit von Planunterlagen oder die Kooperationsbereitschaft der Eigentümer/Betreiber nicht selten weniger gut ausgeprägt als vorausgesetzt. Dies machte ein im Projektverlauf flexibles, mehrstufiges und schrittweises Auswahlverfahren erforderlich. Sicherzustellen war dabei, dass die Anlagenwahl und Bearbeitung in den o.a. Auswahlkriterien adäquat vertreten sind. Vor diesem Hintergrund wurden folgende Anlagen ausgewählt (Tabelle 5).

Tabelle 5: Übersicht der untersuchten Anlagen

Nr.	Nutzungsart				System	Baujahr	Bundesland	Ex-Post
	Wohnen	Handel & Dienstleistung	Gewerbe & Industrie	Verkehrsflächen				
1	x				M-R	1997	B	BS, H
2				x	M	1997	B	
3				x	M-R	1997	B	
4				x	M-R	1997	B	H
5				x	M-R	2001	B	
6				x	M-R	1998	B	
7				x	M	1998	B	
8				x	M-R	1998	B	H
9		X			M-R	1995	NRW	BS
10				x	M-R	2002	NRW	BS
13				x	M-R	2000	NRW	
15				x	M	1998	B	
16				x	M-R	1999	NS	
20			x		MK	1994	NRW	BS, BT
21			x		M	1995	NRW	BS, H, BT
25				x	M-R	2000	NRW	
29	x				M	1995	NRW	
30		X			M-R	1997	NRW	
31		X			M-R	1998	NRW	
32	x			x	M	1998	NRW	
34	x				M	1997	NRW	BS
36	x				M, M-R,	1998	NRW	
37	x				M	2000	NRW	
40	x			x	M-R	2000	NRW	
41	x				M	1997	NRW	
42		X			M	1996	NRW	
49		X			M	2009	NRW	
51		X			M	2004	NRW	
52		X			M	2006	NRW	
60			x		M, M-R	2005	NRW	
61	x				M	2006	NRW	

M=Mulde; MK=Muldenkaskade; M-R=Mulden-Rigolen System; Ex-Post= Wiederbeprobung und Vergleich mit Altdaten: hierbei bedeuten BS= Bodenkundlich/Stofflich; BT=Betrieblich; H=Hydraulisch; VT=Vermessungstechnisch.

5.2 Bodenkundliche und stoffliche Parameter

5.2.1 Bodenansprache und Probenahme

Entsprechend den Zielvorgaben des Projektes wurde für verschiedene Muldenstandorte aus vorangegangenen F+E Vorhaben (Sommer, 2000; Huetter und Remmler, 1997; Hiller et al., 2001) versucht, die exakten Probenahmepunkte aufzufinden, um diese erneut zu beproben. Nach eingehender Recherche, Sichtung von alten F+E Unterlagen, Aufzeichnungen und Bildern konnten für die folgenden LEIREV F+E Nummern 01, 09, 20,10, 21 und 34 Lagepunkte der ehemaligen Beprobungen rekonstruiert werden.

Dies ist vor dem Hintergrund sinnvoll, da durch die hohe kleinräumliche Heterogenität anthropogen veränderter, geschütteter Böden eine betriebsbedingte Schadstoffanreicherung nur durch eine punktgenaue Wiederbeprobung nachzuweisen ist. Auf Grund der teilweise unvollständigen Dokumentation dieser Vorhaben oder nicht rekonstruierbarer exakter Lagepositionen war eine genaue Verortung und Wiederbeprobung der bereits untersuchten Punkte nur bedingt möglich. Rückschlüsse auf eine Anreicherung oder Abnahme von Schadstoffen sind daher bis auf einige Ausnahmen, an denen anlagenbedingt mit sehr hohen Einträgen zu rechnen ist, nicht nachweisbar (siehe Kapitel 6.5.1).

Bei den weiteren Standorten erfolgte die Beprobung in einem für das Zuflussgeschehen der Mulde repräsentativen Bereich in unmittelbarer Nähe des Niederschlagswasser-Einlaufs (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Bodenkundliche Aufnahme und Beprobung (Stechzylinderentnahme) im Straßenrandbereich.

Eine Vorkartierung zur Bewertung der bodenkundlichen Heterogenität dieses Bereiches und zur Auswahl des Probenahmepunktes wurde mit einem Pürkhauerbohrer bis 1 m Tiefe durchgeführt.

Für die bodenkundliche Beschreibung des Muldenbodens und die Entnahme von Proben wurde eine Handschachtung von maximal 70 x 70 cm (L x B) gesetzt (siehe Abbildung 2). Die Tiefe der Handschachtung orientierte sich am Aufbau des Muldenbodens, wurde aber meist durch den Einbau eines Geotextils, einer Rigole oder den anstehenden Boden begrenzt.

Die Profilansprache der bodenkundlichen Merkmale wurde nach den Kriterien der Bodenkundlichen Kartieranleitung (5. Auflage) durchgeführt und erfolgte, ebenso wie die Probenahme, an der dem Einlauf zugewandten Profilwand. Aufnahmeparameter waren:

- Horizontmächtigkeit
- Bodenart
- Stein- und Kiesanteil
- Humusgehalt
- Carbonatgehalt
- Hydromorphiemerkmale
- Durchwurzelungsintensität
- anthropogene Beimengungen

Die Entnahme repräsentativer Bodenproben erfolgte als Mischproben für die bodenkundlich ausgewiesenen Horizonte und nicht über Horizontgrenzen hinweg. Bei Horizonten mit einer Mächtigkeit > 30 cm wurden diese für die Probenahme nochmals unterteilt. Das Bodenmaterial für die Analysen organischer und anorganischer Schadstoffe (PAKs, PCBs, Schwermetalle) wurde in Braunglasgefäße überführt, das Bodenmaterial für die chemischen und physikalischen Analysen (EC, pH, Textur, CNS) in Polyethylenbeutel. Die Entnahme volumengerechter Stechzylinderproben erfolgte repräsentativ in Horizontmitte und mit horizontaler Entnahmerichtung.

5.2.2 Labormethoden

Für alle im Rahmen des Projektes beprobte Muldenböden wurden horizontspezifisch die folgenden allgemeinen bodenkundlichen Kennwerte ermittelt:

- Partikelgrößenverteilung
- Trockenrohddichte (g/cm³)
- pH-Wert (in CaCl₂-Lösung)
- Elektrische Leitfähigkeit (µS/cm)
- Organischer Kohlenstoffgehalt – TOC (Masse %)
- Stickstoffgehalt, gesamt (mg/kg)
- Schwefelgehalt, gesamt (mg/kg)
- Phosphorgehalt, gesamt (mg/kg)

Die Charakterisierung der Schadstoffbelastung der Muldenböden erfolgte an den entnommenen Feststoffproben mittels labortechnischer Aufschluss- und Analyseverfahren. Für alle Proben wurden die Feststoffgehalte an Schwermetallen (Cu, Cd, Pb, Zn) und Polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bestimmt.

Da die Gehalte an Polychlorierten Biphenylen (PCB) bei den ersten 13 Anlagen unterhalb der analytischen Nachweisgrenze lagen, wurde nach Rücksprache mit dem Fördermittelgeber die Messung für weitere Anlagen nicht fortgesetzt. Zur Abschätzung der Schadstoffkonzentration im Sickerwasser wurden an ausgewählten Proben die mit Wasser eluierbaren Schwermetallanteile (Wasser/Feststoff 10:1) ermittelt. An einzelnen Proben wurden Säulenversuche zur Beurteilung des Austrags wasserlöslicher organischer Schadstoffe (PAK) durchgeführt.

Die für die chemische und physikalische Charakterisierung der Proben verwendeten Methoden richten sich nach den üblichen, den Vorschriften der BBodSchV (1999) folgenden Verfahren. Im Einzelnen wurden angewandt:

Physikalisch

DIN / ISO 11465	Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf Grundlage der Masse
DIN / ISO 11272	Bestimmung der Trockenrohddichte
DIN / ISO 11277	Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden

DIN 19683-9 Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderbodenproben

Chemisch

ISO 11466 Königswasser-Extrakt vom Feststoff

ISO 11464 Siebung

ISO 16703 Kohlenwasserstoffe in Feststoff (GC)

ISO 13877 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

ISO 11885 Metalle/Elemente in Feststoff (ICP-OES / ICP-MS)

EN 1483 Quecksilber (AAS)

DIN 38414-4 Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser

ISO 11885 Metalle/Elemente in Wasser/Eluat (ICP-OES)

EN 1483 Quecksilber in Wasser/Eluat (AAS)

LUA Merkblatt Nr. 20 Säulenversuch gemäß BBodSchV, LUA

EN ISO 9377-2 Kohlenwasserstoff-Index in Wasser/Eluat (GC)

DIN 38407 F8 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

DIN 19684-3 Bestimmung des Glühverlustes und des Glührückstands

DIN / ISO 10694 Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse)

DIN / ISO 11265 Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit

DIN / ISO 10390 Bestimmung des pH – Wertes

5.3 Prognose zukünftiger Sickerwasserkonzentrationen durch Aufbau eines Simulationsmodells

Um Prognosen über die Konzentrationen des Sickerwassers von Schwermetallen in einer Regenwasserversickerungsmulde zu erstellen, wurde eine 1D Modellmulde aufgebaut und mit Gelände-, Labor- und Literaturdaten parametrisiert. Anschließend erfolgten numerische Simulationen mit dem Softwareprogramm HYDRUS (Simunek et al., 2005).

5.3.1 Allgemeine Beschreibung des Modells

HYDRUS 1D ist ein Programm zur Simulation des Wasser- und Stofftransportes in ungesättigten und gesättigten porösen Medien. Es löst numerisch die Richards Gleichung für den gesättigten und ungesättigten Wasserfluss nach der Formel:

$$\frac{\partial\theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial Z} \right] + \frac{\partial K(h)}{\partial z}$$

Formel 1

dabei beschreibt θ den volumetrischen Wassergehalt (cm^3/cm^3), t die Zeit (d), z die vertikale Koordinate (cm), h das Matrixpotential (cm) und K die hydraulische Wasserleitfähigkeit (cm/d). Zur Lösung dieser Gleichung benötigt man Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen dem volumetrischen Wassergehalt θ , der Wasserspannung h und der hydraulischen Wasserleitfähigkeit. Weiterhin müssen Eingangs- und Randbedingungen bekannt sein. Das Programm generiert ein eindimensionales Netz mit Knotenpunkten; die Lösungen der Knotenpunkte werden an alle Nachbarpunkte weitergegeben. Für die Berechnung des Transportes gelöster Stoffe verwendet das Programm die Konvektions-Dispersions Gleichung:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\rho_B}{\theta} \frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \frac{q}{\theta} \frac{\partial C}{\partial z}$$

Formel 2

dabei beschreibt C die Lösungskonzentration der flüssigen Phase (mg/l), C_s die Konzentration der Bodenfestphase (mg/kg), D den effektiven Dispersionskoeffizient (-) und q die spezifische Flussrate (cm/d).

Der Wasserfluss und die Transportgleichungen werden numerisch nach der Finite Elementen Methode gelöst.

Die Abb.3 zeigt den Wasser- und Schadstofftransport in einer Mulde schematisch. Weiterführende Informationen über die zugrunde liegenden hydrologischen und chemischen Modelle von HYDRUS 1D finden sich in Šimůnek et al. (2005).

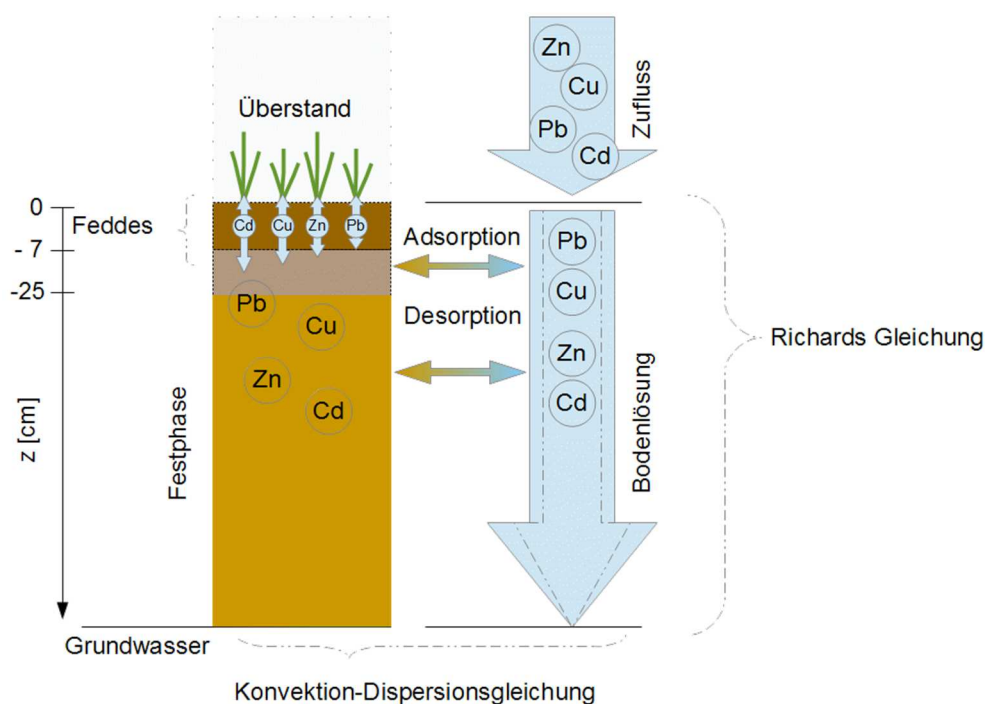


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Wasser- und Stofftransports in einer Mulde (nach Kübler, 2016, verändert)

5.3.2 Aufbau der Modellmulde und Inputparameter

Der Aufbau der Modell-Mulde ist in Abbildung 4 skizziert. Das Profil besteht aus drei Horizonten, mit unterschiedlicher Bodencharakteristik.

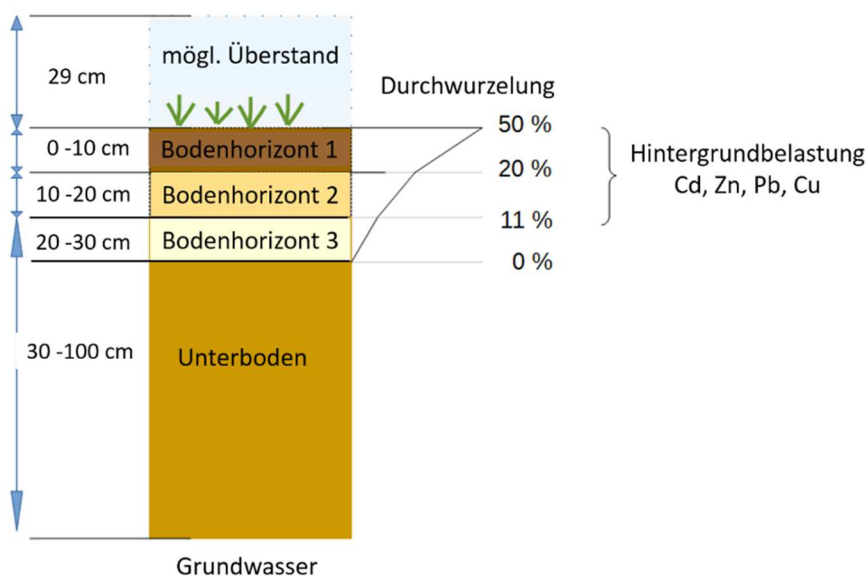


Abbildung 4: Schematischer Aufbau der Mulde im Simulationsmodell

Überirdisch befindet sich je nach Niederschlagsereignis ein Wasserüberstand von maximal 30 cm. Die Tabelle 6 zeigt die Beschreibung für das mit HYDRUS 1D modellierte Szenario für die Modell- Mulde (siehe Abbildung 4).

Tabelle 6: Szenariobeschreibung und simulierte Eigenschaften der Modell- Mulde

Szenario	Simulierte Eigenschaften- Beschreibung
Verlagerung von Cd, Pb, Zn, Cu mit dem Sickerwasser in der Modellmulde – Abflüsse Wohnstraße	Anschlussverhältnis 13:1, drei unterschiedliche Horizonte; stetige Schwermetalleinträge, Versickerung 3300 mm/a; 0-20 Jahre (bisheriger Betrieb) und 20-40 Jahre (2016-2036); Obere Randbedingung Zulauf: mittlere Abflusskonzentrationen Wohnstraßen (Sommer, 2000) von: Cd= 0.5; Zn=110; Pb=13 und Cu= 32 µg/l. Hintergrundwert Muldensubstrate bei Betriebsbeginn = Ausgangssubstrat Sand/Sandlöss NRW (0-30 cm) (P50) nach LABO 2003.

Weitere ausführliche Informationen zu den Eingangsparametern wie Niederschlag, Zulaufmenge, Wassertransport und Sorptionseigenschaften der Simulation sind im Anhang 10 aufgeführt.

5.4 Hydraulische Parameter

5.4.1 Bestimmung der Infiltrationsrate mit Ring- Infiltrometern

An ausgewählten Mulden wurde die gesättigte Wasserleitfähigkeit per Doppelring- Infiltrometer oder Einzelring- Infiltrometer ermittelt (siehe Abbildung 5). Der Großteil der Messung wurde mit Doppelring-Infiltrometern auf Grundlage der DIN 19628-7:2015-08 durchgeführt.

Die Berechnung der Sickerleistung erfolgte über das instationäre Verfahren, bei der sich die Infiltrationsrate (I_D) aus der Höhenänderung im Innenring des Doppelring-Infiltrometers (H_w) dividiert durch die Infiltrationszeit (t_i) ergibt (siehe Formel 3).

$$I_D = H_w/t_i$$

Formel 3



Abbildung 5: Doppelring-Infiltrometer (links) und Einzelring-Infiltrometer (rechts)

Als Standort für die Versickerungsversuche wurde stets die Muldensohle gewählt. In Vorbereitung der Versuche wurde höheres Gras und ähnlicher Bewuchs abgeschnitten, da Grashalme unter dem Doppelring zu ungewollten Wasserverlusten führen können und aufschwimmende Halme die Messgenauigkeit des Schwimmers negativ beeinträchtigen.

Die Messungen mit Einzelring- Infiltrometern erfolgten sowohl auf den Muldensohlen, als auch auf den Sohlen der verschieden tiefen Handschurfe. Die Infiltrationsrate wurde über eine Drucksonde (MSD 100 MRE) der Fa. GHM-Greisinger automatisch nach dem instationären Verfahren ermittelt. Für alle Versuche wurde Trinkwasser verwendet. Die Durchführung der Versuche mit Ring-Infiltrometern erfolgte gemäß DIN 19628-7 so lange, bis eine annähernd konstante Infiltrationsrate erreicht wurde.

5.4.2 Bestimmung der Infiltrationsrate im Labor

Neben diesen Feldmessungen wurde die gesättigte Wasserleitfähigkeit in von Stechzylinderbodenproben im Haubenpermeameter nach DIN 19683-9, unter Anwendung der constant-head-Labormethode bestimmt. Für die Probenahme wurden Handschurfe in den Mulden ausgehoben, in deren Seitenwände dann Stechzylinder einschlagen wurden (Siehe Abbildung 6). Die Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (K_f) erfolgte an mindestens 3 pro Horizont entnommenen, volumengerechten Stechzylinderproben (100 cm^3).



Abbildung 6 Haubenpermeameter zur Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit in Stechzylindern

5.4.3 Flutung

An ausgewählten Anlagen wurden Flutungsversuche durchgeführt, bei denen das gesamte Muldenvolumen mit Wasser aufgefüllt, und die Zeitspanne für die komplette Entleerung ermittelt wurde (siehe Abbildung 7).

Die Flutung von ganzen Mulden dient als Ergänzung der Infiltrationsmessungen im Feld und im Labor. Während Messungen mit Infiltrometern den K_f -Wert nur für kleine, ggf. nicht repräsentative Teilbereiche der Anlage ermitteln, werden durch Flutungen alle räumlichen Heterogenitäten berücksichtigt und das tatsächliche Versickerungsverhalten der Anlage dargestellt.

Die Befüllung der Mulden erfolgte über einen Hydrantenanschluss (C-Rohr). Die Mulden wurden bis an die Unterkante der Überläufe aufgefüllt, wobei je nach Dauer des Auffüllvorgangs erhebliche Wassermengen bereits infiltrieren und zu einer entsprechenden Vorsättigung des Bodens führen. Nach Erreichen der Füllobergrenze wird die Wasserzufuhr abgestellt, die Wassersäule eingemessen und die Zeit bis zur vollständigen Entleerung am Messpunkt aufgenommen.

Die gemittelte hydraulische Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage berechnet sich aus der Mächtigkeit der Wassersäule bei Erreichen der Füllobergrenze dividiert durch die Entleerungsdauer (siehe Formel 4). Der Abnahme der Wassersäule wurde in regelmäßigen Zeitschritten aufgenommen, sodass auch der zeitliche Verlauf der Versickerungsleistung wiedergegeben werden kann.

$$I_{D,mittel} = H_{W,Flutung}/t_i$$

Formel 4



Abbildung 7: Flutung der nördlichen Mulde am Standort Nr. 6

5.4.4 Berechnung von Einstauvolumina

Die Versickerungsfähigkeit und das Einstauvolumen einer Mulde sind die wesentlichen hydraulischen Parameter, die in einer gegenseitigen Wechselbeziehung stehen und die Entwässerung einer angeschlossenen Fläche gewährleisten. Genauso wie die Sickerleistung einer Mulde, kann auch das Einstauvolumen zeitlichen Veränderungen unterliegen, die sich aus Stoffumlagerungen (Erosion), stofflichen Einträgen oder baulichen Abweichungen gegenüber dem Planzustand ergeben.

Für einzelne von Mulden, für die entsprechende Daten vorlagen, wurden die Einstauvolumina berechnet die sich unter den heutigen Bedingungen ergeben. Für einen Vergleich im Sinne einer Ex-Post-Analyse wurden für diese Anlagen auch die ursprünglich geplanten Volumina ermittelt. Als Eingangsdaten für die Digitalisierung dienten die Ergebnisse der Vermessung (siehe Kap. 4.4.1) bzw. Muldenaufmaße aus Planunterlagen.

Die aufgenommenen Vermessungspunkte der Mulden wurden in ArcGIS eingelesen und in ein Punktshape umgewandelt (Abbildung 8). Im zweiten Schritt wird eine TIN-Oberfläche aus den Höheninformationen generiert, die in einem dritten Schritt in ein Raster (Datentyp: Float) umgewandelt wird (Abbildung 9).

Je höher die Auflösung des Rasters ist, desto besser präziser werden die Informationen der TIN-Oberfläche abgebildet. Die Höhenwerte des Rasters ergeben sich aus einer Interpolation der Ausgangsdaten nach der Methode der „Natural Neighbours“.

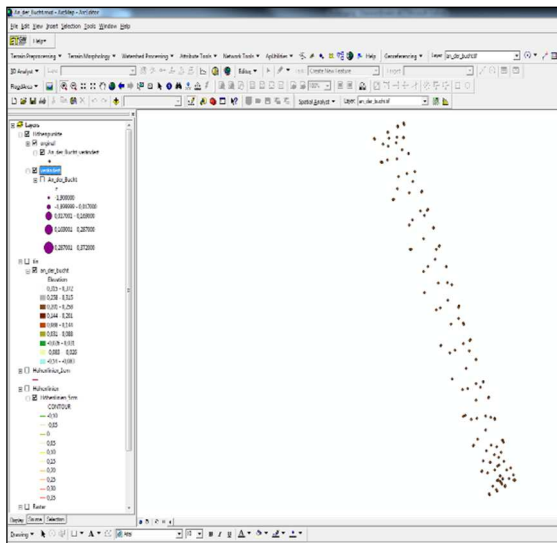


Abbildung 8: Punktshape der Vermessungspunkte

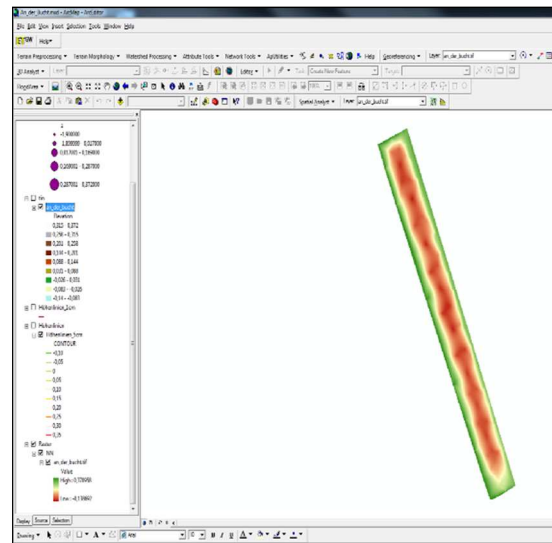


Abbildung 9: Erstelltes Raster für eingemessene Höhenwerte mit Zellgröße 1 cm

Für die Höhenwerte des Planzustandes wird als Interpolationsmethode „Linear“ genutzt, da nur die Höhenwerte der Eckpunkte vorliegen. Für verschiedene Höhen lässt sich im Programm ArcScene die verfügbare Versickerungsfläche, sowie das entsprechende Einstauvolumen sukzessive einer Volumenkenlinie der Mulde ausrechnen (Abbildung 10).

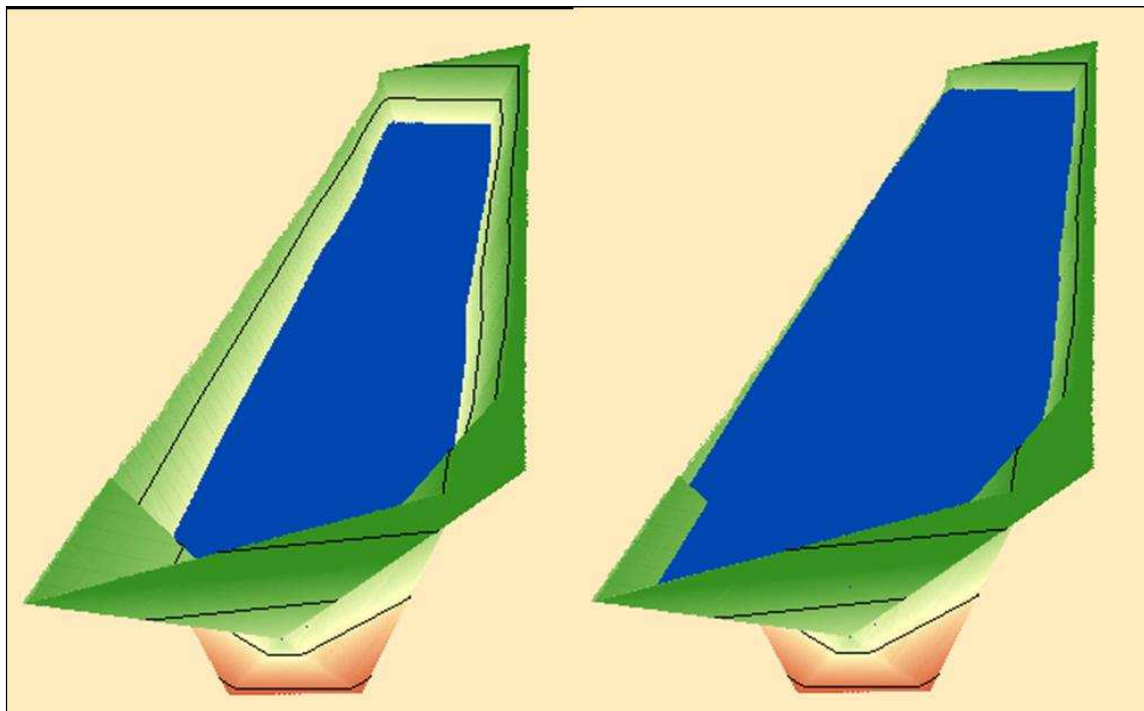


Abbildung 10: Prinzip der Volumenbestimmung mit ArcScene anhand der Mulde am Standort Anlage 1

5.5 Betriebliche Parameter

Im Zuge der Auswahlvorbereitung (siehe Abschnitt 5.1.2.4) wurden bereits grobe Strukturdaten (Flächennutzung und Belastung der Abflüsse, Art der Regenwasserbewirtschaftung, Betriebsjahre etc.) erhoben. Aus betrieblicher Sicht stehen die spezifischen Betriebsentwicklungen und Alterungserscheinungen der Anlagen selber, die Aneignungsprozesse der Anlieger und Nutzer sowie die Maßnahmen der Betreiber im Zentrum des Interesses.

5.5.1 Untersuchungskriterien

Die einzelnen relevanten Kriterien sind im Folgenden detailliert aufgeführt:

Alterserscheinungen (Parameter und Untersuchungen):

- Veränderungen wie Setzungen, Erosions- und Trittschäden, Verdichtung, Sohlveränderungen, Ausspülungen
- Materialermüdung und -schäden an Bauteilen
- Funktionsstörungen der Infiltration
- Vegetationsentwicklungen, Sedimentanreicherungen
- Verockerungen, Abnahme der Filterfunktion für Schadstoffe
- Sedimentablagerungen, Setzungen und Substratveränderungen
- Kamerainspektionen (z.B. in den Rohrsystemen)

Aneignungsprozesse:

- Nutzungskonflikte (temporär, dauerhaft)
- Unplanmäßige Nutzungs-/Gestaltungsänderungen der umgehenden angeschlossenen befestigten Flächen und Versickerungsanlagen
- Planmäßige Bauliche Veränderungen an den angeschlossenen befestigten Flächen und den Versickerungsanlagen

Maßnahmen der Betreiber:

- Wartung
- Pflege
- Instandhaltung
- Instandsetzung/Reparatur
- Erneuerung
- Umbau

Die ausgewählten Anlagen wurden sowohl in der Vegetations- als auch in der Vegetationsruhephase begangen. Charakteristika und kritische Entwicklungen wurden fotografisch dokumentiert und im Steckbrief zu jeder Anlage (siehe Anlagenband) detailliert festgehalten. Die

im Anlagenband dokumentierten Ergebnisse wurden differenziert in folgende 11 Kategorien erhoben und dargestellt:

Tabelle 7: Wartung und Betrieb - Kategorien und Definitionen

Kategorie		Definition
1	Erosionsschäden und Ausspülungen	<ul style="list-style-type: none"> • Abrutschungen und Ausspülungen an Muldenböschung • durch Regenwasser verursachte Unterspülungen von Pflasterflächen, Ableitungselementen (Pflaster-, Betonstein-, Rasenrinnen), Überläufe Mulden
2	Setzungen	<ul style="list-style-type: none"> • Absenkung von Muldensohle, -überläufen, Pflasterflächen und Ableitungselementen
3	Trittschäden/ Verdichtung	<ul style="list-style-type: none"> • Entstehen durch Überfahung mit Kfz, Mäh- und Pflegegeräte, in der Nähe befindliche Bautätigkeiten sowie informelle Fußwege
4	Materialermüdung	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnahme von Schäden an Schacht-, Überlauf- und Drosselbauwerken, Ableitungselementen und Einfriedungen
5	Vegetation	<ul style="list-style-type: none"> • stellenweise oder vollständige Schädigung der geschlossenen Vegetationsdecke, Verbuschung bzw. Verwaldung infolge fehlender Pflegemaßnahmen
6	Sedimentablagerung	<ul style="list-style-type: none"> • Ablagerung von Partikeln • Zulaufzungen im Zulaufbereich der Mulden, in breitflächigem Zulaufbereich (Wulstbildung), Einlaufbereich oder weiterem Sohlebereich der Mulde
7	Nutzungskonflikte	<ul style="list-style-type: none"> • Mehrfachnutzung von Mulden ohne bauliche oder gestalterische Veränderung (z.B. als Grünfläche für Aufenthalt)
8	Unplanmäßige Nutzungs- und Gestaltveränderung	<ul style="list-style-type: none"> • Umgestaltung der Versickerungsanlage durch Dritte oder informell durch Betreiber
9	Planmäßige Bauliche Veränderung	<ul style="list-style-type: none"> • (vom Betreiber) geplante maßgebliche bauliche Veränderungen an Versickerungsanlagen oder umliegenden angeschlossenen befestigten Flächen sowie Ableitungselementen
10	Grünpflege	<ul style="list-style-type: none"> • Angaben zu Art, Zielsetzung, Häufigkeit und Ausführung der Grünflächenpflege
11	Zustand Zuläufe, Überläufe, Drosselabläufe, Dränleitungen	<ul style="list-style-type: none"> • Funktionsfähigkeit der ausschließlich wasserwirtschaftlich relevanten Betriebsteile

5.5.2 Bestandsaufnahme und Dokumentation oberirdischer Anlagenteile

Alle Anlagen wurden in Rahmen von Ortsbegehung in Augenschein genommen und der Zustand fotodokumentarisch aufgenommen. Im Fokus der Betrachtung lagen die oberirdischen

Anlagenteile der offenen Ableitung und der Versickerungsanlagen selber. Ergebnisse der Bestandsaufnahme sind in den Anlagensteckbriefen (siehe Anlagenband), den in Tabelle 7 aufgeführten Kategorien entsprechend dokumentiert.

Vermessung von Anlagen

An insgesamt 14 Mulden wurden Vermessungen mit einem digitalen Theodoliten (Fa. Leica) durchgeführt. Bei diesen Vermessungen wurden je nach Zielstellung verschiedene Methoden angewandt.

Für die Bestimmung der exakten Einstauvolumina von einzelnen Mulden wurden Messungen in einem sehr engen Raster von bis zu 70 Einzelpunkten pro Anlage vorgenommen. Somit konnten die Muldengeometrien inklusive ihrer spezifischen Besonderheiten, wie Laternen, Baumscheiben oder Sedimentationsbereiche erfasst werden. Die Berechnung der Einstauvolumina erfolgte wie in Kap. 5.4.4 dargestellt.

Mit den Ergebnissen der Vermessung konnte darüber hinaus ein direkter Abgleich der heutigen Geometrien mit den ursprünglich geplanten Mulden, bzw. mit denen gemäß Revisionsaufmaß baulich umgesetzten Muldengeometrien vorgenommen werden.

5.5.3 Bestandsaufnahme und Dokumentation unterirdischer Anlagenteile (Dränrohrinspektion)

Der Zustand von unterirdischen Rohrelementen, vor allem von Dränrohren der Rigolen, aber auch von Drosselabläufen wurde mit einer Kanalkamera untersucht (Abbildung 11).

Die Ausrüstung der Kanalkamera besteht aus einem wasserdichten und Dioden-beleuchteten Kamerakopf, sowie einer versteiften Verkabelung, welche eine Direktübertragung auf einen Monitor erlaubt. Die Kamera wird in das Ende des zu untersuchenden Rohrs eingeführt und kann über eine Spindel nachgeführt werden.

Je nach Lichtverhältnis lassen sich durch die Kanalinspektion der Verschmutzungsgrad, sowie der bauliche Zustand des Rohrs überprüfen und dokumentieren. Eine Inspektion der Rohrelemente erfolgte an den Anlagen 1, 4, 5, 9, 10, 25.



Abbildung 11: Materialien zur Drainrohrinspektion

5.5.4 Befragung von Anlagenbetreibern

Neben den Labor- und Felduntersuchungen zum aktuellen Zustand von Versickerungsanlagen, die einen Rückschluss auf die langfristige Leistungsfähigkeit ermöglichen, wurden Anlagenbetreiber zu ihren Betriebserfahrungen befragt. Somit sollte das vorhandene Wissen und die Erfahrung über den Betrieb und die Wartung von Versickerungsanlagen erfasst und in die Bewertung mit eingebracht werden.

Die Befragung erfolgte mit Hilfe von Fragebögen (siehe Anhang B1), die folgende inhaltliche Schwerpunkte hatten:

- Allgemeine Angaben zur betrachteten Anlage
- Angaben zur Trägerschaft der Anlage
- Angaben zur Wartung und Pflege der Anlage
- Angaben zur Betriebssicherheit der Anlagen
- Angaben zu potentiellen Belastungen der Anlage
- Angabe zur Kontrolle der Anlage
- Einschätzung des Betreibers zum Betrieb von Versickerungsanlage

6 Ergebnisse

Die Untersuchungsergebnisse stützen sich auf Anlagen unterschiedlicher Kategorien in Bezug auf den Siedlungsflächentyp entsprechenden Abflüsse, Anlagenkonfiguration, Alter etc. Eine detaillierte Differenzierung auf die einzelnen Anlagenkriterien wurde durchgeführt. Nach Vorliegen aller anlagenstandortbezogenen Untersuchungsergebnisse wurden die Ergebnisse den o.a. Kriterien entsprechend systematisiert aufbereitet. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse geben wichtige Hinweise auf bisherige Entwicklung und Stand langjährig betriebener belebter Versickerungsanlagen.

6.1 Allgemeine bodenkundliche Eigenschaften

6.1.1 Partikelgrößenverteilung

Die Partikelgrößenverteilung beeinflusst maßgeblich die physikalischen als auch chemischen Eigenschaften von Böden. Mit zunehmendem Sand- und Kiesanteil steigen die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit und dadurch die Infiltrationsrate von Muldenböden. Hohe Anteile von feineren Fraktionen wie Schluff und Ton führen hingegen zu einer höheren Sorptionskapazität von anorganischen Schadstoffen, wirken sich aber im Gegenzug negativ auf die Versickerungsleistung aus. Auch die Horizontschichtung des Muldenbodens hat entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Mulde hinsichtlich Schwermetallbindung und Versickerungsleistung. So limitiert ein undurchlässiger, lehmiger Unterboden die Versickerung eines durchlässigen, sandigen Oberbodens.

Insgesamt wurden 115 Bodenhorizonte von insgesamt 33 Anlagen beprobt, wovon jeweils 84, 5 und 26 Horizonte den Bodenartenhauptgruppen der Sande, Lehme und Schluffe zugeordnet wurden. Einen Überblick der einzelnen, in den Mulden verwendeten Bodenarten gibt Tabelle 8. Trotz der überwiegenden Verwendung sandiger Substrate in den Mulden mit einem Sandgehalt > 70 Gew. %, wurde an einigen Standorten der anstehende bindige Boden mit einem Schluff- und Tonanteil von > 70 Gew. % verwendet. Abbildung 12 stellt die Partikelgrößenverteilung der 115 Bodenhorizonte im Körnungsdiagramm nach KA5 dar. Die deutliche Zweiteilung der Substrate in sandige und schluffig-lehmige Substrate ist auf die verwendeten geogenen Ausgangsgesteine an den jeweiligen Standorten bzw. in den entsprechenden Regionen zurückzuführen. So sind z.B. im Berliner Raum ausschließlich glaziale Reinsande und Lehmsande als Muldenboden verwendet wurden.

Tabelle 8: Übersicht und Anzahl der Bodenarten in den beprobten Muldenhorizonten

Anzahl	Bodenart
33	Ss – reiner Sand
32	Su2 – schwach schluffiger Sand
3	Su3 – mittel schluffiger Sand
9	Sl2 – schwach lehmiger Sand
3	Sl3 – mittel lehmiger Sand
2	St2 – schwach toniger Sand
1	Slu – schluffig-lehmiger Sand
1	Sl4 – stark lehmiger Sand
2	Ls2 – schwach sandiger Lehm
1	Ls3 – mittel sandiger Lehm
2	Lu – schluffiger Lehm
1	Uu – reiner Schluff
2	Ut2 – schwach toniger Schluff
9	Ut3 – mittel toniger Schluff
12	Uls – sandig-lehmiger Schluff
2	Ut4 – stark toniger Schluff

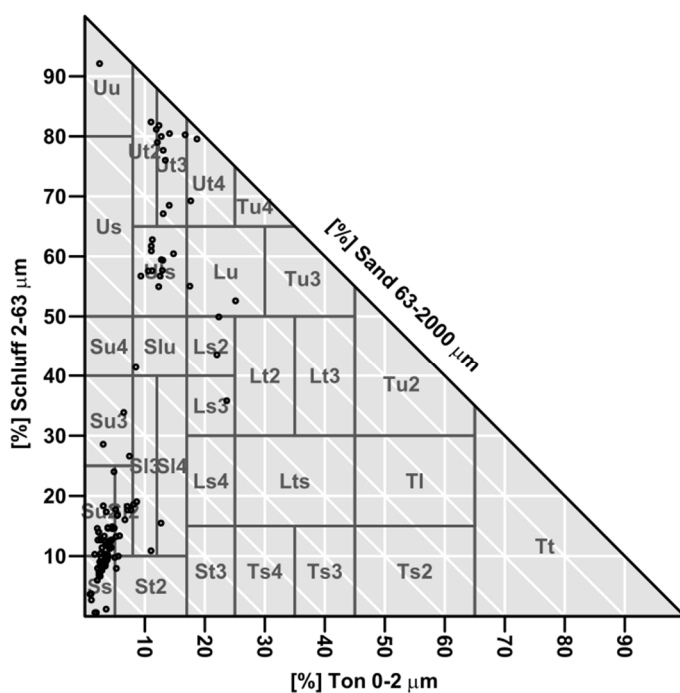


Abbildung 12: Körnungsdigramm der untersuchten Bodenhorizonte nach (KA5) n=115.

Auf Grund der geologischen Situation in NRW wurden hier sowohl Sande als auch Lehme und Schluffe als Ausgangsmaterial bei der Errichtung der Versickerungsanlagen verwendet. So dominiert z.B. in der Region Dortmund und Düsseldorf Löss als geologisches Ausgangssubstrat und erklärt dort die hohen Schluffanteile der verwendeten Muldensubstrate. An einem Standort in Berlin kam es in der Versickerungsmulde durch den Eintrag von tonhaltigem Feinmaterial (aus einer nahegelegenen Baustelle) zur Ausbildung einer Kolmationsschicht. Für die weiter unten folgenden Darstellungen der bodenchemischen Eigenschaften der Muldenböden wird diese Untergliederung der Substrate in Sand, sowie Lehm/Schluff übernommen.

6.1.2 pH-Wert

Der pH-Wert des Bodens hat entscheidenden Einfluss auf dessen chemische, wie biologische Eigenschaften. Neben der biologischen Aktivität, Humusakkumulation und Nährstoffdynamik wird auch das Sorptionsverhalten durch den pH-Wert der Bodenlösung bestimmt. So nimmt die Adsorption von Kationen wie Cd^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} und Zn^{2+} bei pH-Werten < 6 stark ab und das Risiko einer Auswaschung von Schwermetallen zu. Entsprechend sollten zur Gefährdungsvermeidung die pH-Werte von Muldenböden im neutralen bis basischen Bereich liegen.

Die pH-Werte der Ober- und Unterbodenhorizonte der untersuchten Böden liegen in einem relativ weiten Bereich zwischen pH 3,6 – 7,9 (siehe Abbildung 13). Sowohl bei den sandigen als auch den schluffig-lehmigen Substraten liegen die pH-Werte in den obersten 30 cm im Mittel im schwach sauren bis schwach alkalischen Bereich. Ein Großteil der Muldenböden weist pH-Werte auf, die vergleichbar mit denen landwirtschaftlich genutzter Böden in Deutschland sind (Scheffer und Schachtschabel, 2010). Bis auf einige Ausnahmen entsprechen die pH-Werte der Muldenböden den Anforderungen des Arbeitsblattes DWA -A138.

Eine genaue Benennung der Ursachen für die weite Streuung der pH-Werte ist auf Grund der Heterogenität des aufgeschütteten Bodenmaterials, der Unklarheit über den pH-Wert des Ausgangsmaterials sowie der verschiedenen anlagenbedingten Beschickung der Mulden schwierig. Die Daten legen jedoch nahe, dass pH-Werte $< 5,5$ vor allem auf die folgenden Ursachen zurückzuführen sind:

- Verwendung des bereits niedrige pH-Werte aufweisenden, am Standort anstehenden geologischen Ausgangsmaterials bei der Errichtung der Versickerungsanlage. Dies ist z.B. bei Standorten in der Region Dortmund – Düsseldorf mit Löss als geogenem Ausgangsmaterial der Fall.

oder

- Intensive Beschickung der Versickerungsmulde über punktuelle Zuläufe, wie Regenrinnen oder Rohrbrücken. An diesen „Hotspots“ wird auf Grund der hohen Sickerwassermenge die Säurepufferkapazität des Bodens schneller aufgebraucht, als dies ohne die Nutzung der Versickerungsanlage der Fall wäre.

Einige Standorte weisen hingegen pH-Werte > 7 auf. Ursache hierfür ist meist die sinnvolle Beimengung von kalkhaltigem Boden, Bauschutt oder sonstigem Fremdmaterial bei der Errichtung der Anlage oder die Versickerung von basenhaltigem Oberflächenabfluss. Zu letzterem kommt es nachweislich bei Anlagen entlang von Verkehrs-, Rangier- und Straßenflächen (Werkenthin et al., 2014).

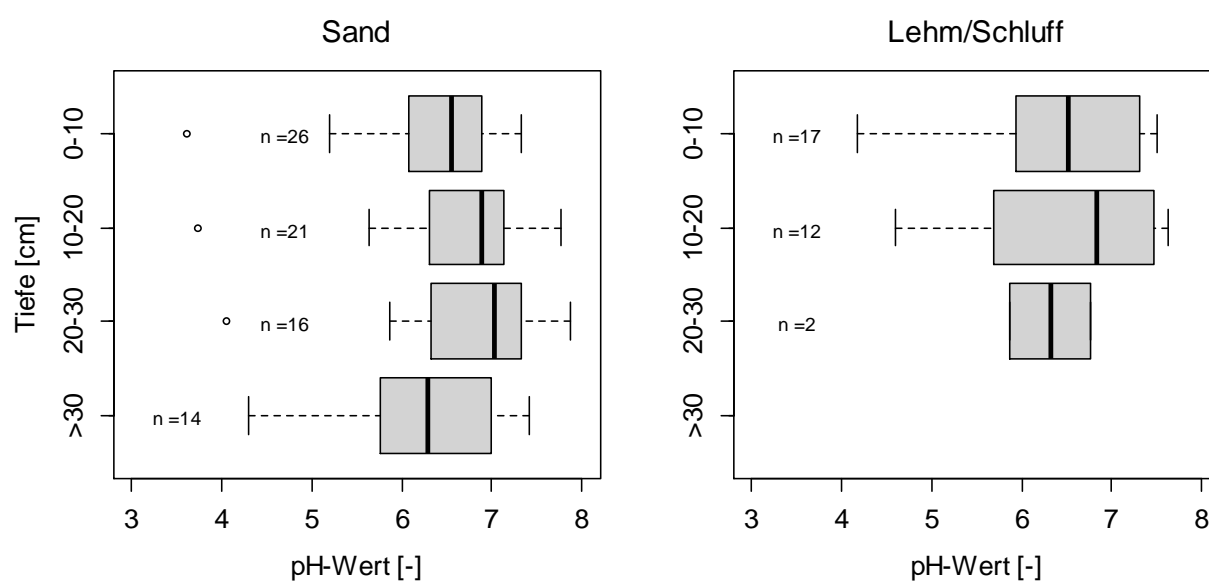


Abbildung 13: pH-Werte der untersuchten Muldenbodenhorizonte mit der Bodenart Sand (links) und der Bodenart Lehm/Schluff (rechts). Dargestellt sind der Median, die Quartile (25-75%), der Bereich ohne Ausreißer, sowie Ausreißer.

6.1.3 Elektrische Leitfähigkeit

Die Bestimmung des Salzgehaltes von Böden erfolgt standardmäßig über die Messung der elektrischen Leitfähigkeit (EC) im 5:1 Wasser-Feststoff-Extrakt. Im Fall eines übermäßigen Eintrags von salzhaltigem Oberflächenabfluss in Versickerungsanlagen kann es zu einer Salzanreicherung der Bodenlösung kommen und folglich über salzhaltiges Sickerwasser eine Belastung von Grundwasserleitern erfolgen. Die elektrischen Leitfähigkeiten der untersuchten Bodenhorizonte liegen zwischen 5 – 283 $\mu\text{S}/\text{cm}$, wobei die mittleren 50% der Werte in einem relativ engen Bereich zwischen EC 20 – 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ liegen.

Wie in Abbildung 14 zu erkennen, unterscheiden sich die elektrischen Leitfähigkeiten der Muldenböden aus Sand und Lehm/Schluff nur geringfügig. Deutlich ist jedoch bei beiden Substratklassen der etwas höhere Salzgehalt der Bodenlösung in den obersten 10 cm. Diese etwas höheren elektr. Leitfähigkeiten im Oberboden sind auf die Verdunstungsleistung der Vegetation und eine daraus resultierende Anreicherung von Salzen zurückzuführen und ist ebenso an natürlichen Standorten zu beobachten.

Die elektrischen Leitfähigkeiten der untersuchten Böden weisen keine ökologisch wirksamen Salzgehalte auf. Selbst bei empfindlichen landwirtschaftlichen Kulturen werden Salzschäden erst bei Elektrischen Leitfähigkeiten $> 400 \mu\text{S}/\text{cm}$ (5:1-Extrakt) erwartet (Scheffer/Schachtschabel, 2010). Der Grenzwert für die elektrische Leitfähigkeit liegt nach Trinkwasserverordnung (TrinkwV, 2001) bei $2790 \mu\text{S}/\text{cm}$.

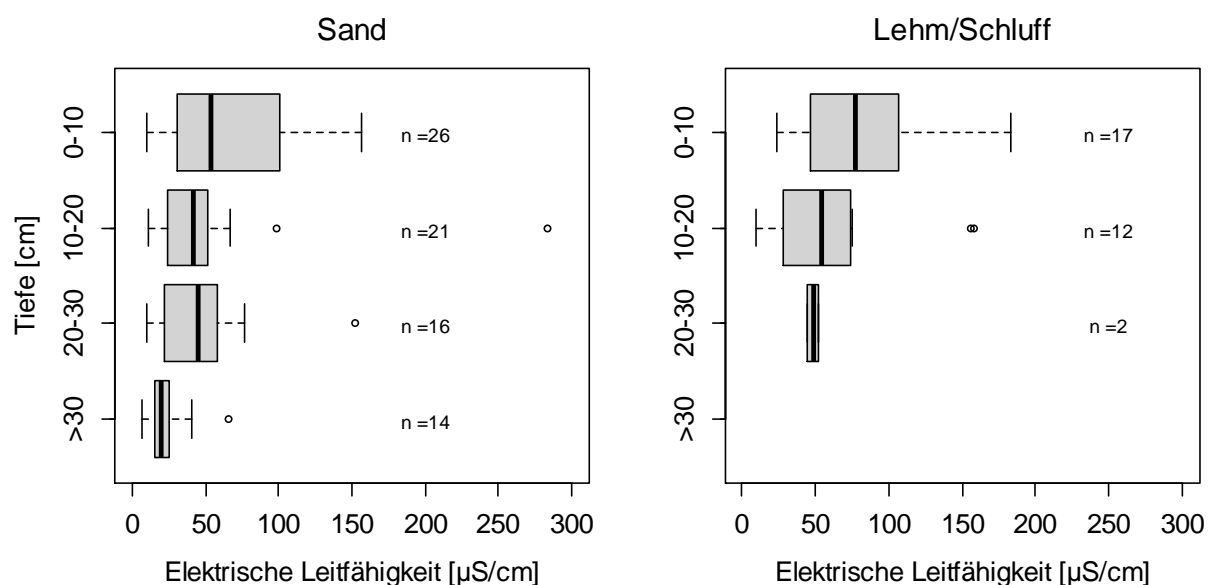


Abbildung 14: Elektrische Leitfähigkeit der untersuchten Bodenhorizonte mit der Bodenart Sand (links) und Lehm/Schluff (rechts). Dargestellt sind der Median, die Quartile (25-75%), der Bereich ohne Ausreißer, sowie Ausreißer.

6.1.4 Organischer Kohlenstoffgehalt

Der organische Kohlenstoffgehalt (C_{org}) von Böden hat entscheidenden Einfluss auf deren chemische und physikalische Eigenschaften. So steigt mit zunehmendem C_{org} -Gehalt das Adsorptionsvermögen und die Bindung von organischen und anorganischen Schadstoffen, die Porosität nimmt zu und führt zu einer erhöhten Wasserdurchlässigkeit und Wasserspeicherkapazität. Der organische Kohlenstoffgehalt ist jedoch stark von der Bodenart, sowie den klimatischen und hydraulischen Bedingungen abhängig. Oberbodenhorizonte von Wald- und Ackerböden weisen bei gemäßigt-humidem Klima C_{org} -Gehalte von 7,5 – 20 g/kg auf. Unter

Dauergrünland können die C_{org} -Gehalte bis zu 150 g/kg erreichen (Scheffer und Schachtschabel, 2010). Die Umrechnung von C_{org} in Humusgehalte erfolgt mit dem Faktor 1,724.

Die organischen Kohlenstoffgehalte der untersuchten Muldenböden liegen in einem Bereich von 0,3 – 168 g/kg C_{org} , das entspricht einem C_{org} -Anteil von 0,03 – 16,8 % (Abbildung 15). Sowohl bei den sandigen, als auch bei den schluffig/lehmgigen Substraten liegen die mittleren 50% der Werte in einer Größenordnung wie sie land- oder forstwirtschaftlich genutzte Böden unter ähnlichen klimatischen und hydraulischen Bedingungen aufweisen. Die wenigen Proben mit C_{org} -Gehalten > 50g/kg sind auf Anlagenbereiche zurückzuführen, bei denen es betriebsbedingt durch die hydraulische Situation zu einer Anreicherung von organischem Kohlenstoff kommt. Dies betrifft vorrangig die folgenden Anlagenbereiche:

- Auslass- und Randbereiche von größeren Rangier- und Parkflächen, die einen Großteil des Jahres durchfeuchtet bleiben und eine Humusakkumulation begünstigen
- Auslassbereiche von Rohrbrücken oder Drainagen, in denen sich Schwemmkegel mit kohlenstoffreichem Sediment aufhäufen

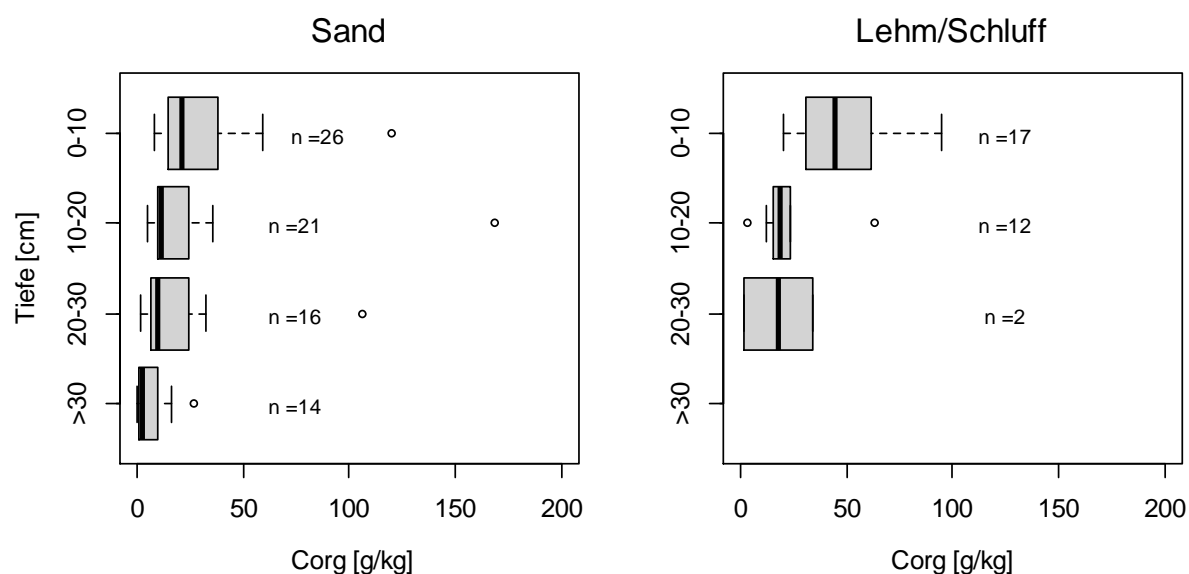


Abbildung 15: Organischer Kohlenstoffgehalt (C_{org}) der untersuchten Bodenhorizonte mit der Bodenart Sand (links) und Lehm/Schluff (rechts). Dargestellt sind der Median, die Quartile (25-75%) und Ausreißer.

Wie bei natürlich gewachsenen Böden sind auch bei den beprobten Muldenböden auf Grund der Vegetationsdecke die Gehalte an organischem Kohlenstoff im obersten Bodenhorizont und deren Varianz höher als die der Unterbodenhorizonte. Auch weisen die Böden mit Sand als Hauptbodenart tendenziell niedrigere Kohlenstoffgehalte auf, als jene mit der Hauptbodenart Lehm oder Schluff.

6.1.5 Schwefel-, Stickstoff- und Phosphorgehalt

Schwefel, Stickstoff und Phosphor sind wichtige Nährelemente für das Pflanzenwachstum, können aber bei erhöhten Austrägen zur Gefährdung von Oberflächengewässern und Grundwasserleitern führen. Damit ist vor Allem dann zu rechnen, wenn es neben den natürlichen Quellen zu einem übermäßigen Eintrag durch mineralische Düngung oder Luftdepositionen kommt. Schwefel (S)- und Stickstoff (N)-verbindungen werden in Böden schnell mineralisiert bzw. sind auf Grund ihrer chemischen Eigenschaften sehr mobil und werden kaum an die mineralische Phase gebunden. Bei landwirtschaftlich genutzten Oberböden und gemäßigt-humiden Klima betragen die Gesamt-N-Gehalte meist 700 – 2000 mg/kg Boden, die Gesamt-S-Gehalte durchschnittlich 100 – 500 mg/kg Boden (Scheffer/ Schachtschabel, 2010). Auch wenn Phosphor (P) in Böden in Form schwer abbaubarer Phosphate stabilisiert und angereichert wird, sind oft die jahrelange Überdüngung landwirtschaftlich genutzter, sandiger Böden mit geringer P-Sorptionskapazität die Ursache für P-Austräge mit dem Sickerwasser.

Ohne zusätzliche P-Anreicherung liegen unter gemäßigten Klimabedingungen und für sandig-lehmige Ausgangsgesteine die Gesamt-P-Gehalte meist bei < 1000 mg/kg Boden.

Die Gesamtgehalte für Stickstoff, Phosphor und Schwefel liegen bei den untersuchten Versickerungsanlagen in einem weiten, für die gegebenen klimatischen und hydraulischen Bedingungen jedoch zu erwartendem Bereich. Die Gesamtgehalte für N, S und P liegen bei den sandigen Substraten zwischen 100 – 7100, 27 – 3203 und 1 – 2400 mg/kg (siehe Abbildung 16).

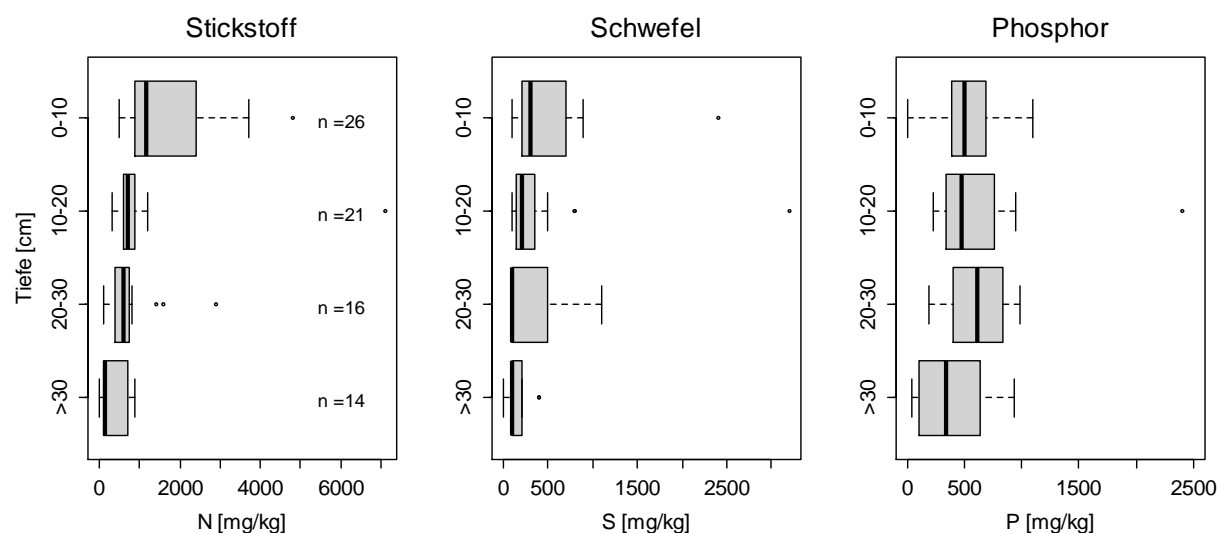


Abbildung 16: Gesamtgehalte der untersuchten Bodenhorizonte für Stickstoff (Gesamt-N), Schwefel (Gesamt-S), Phosphor (Gesamt-P) der Bodenart Sand. Dargestellt sind der Median, die Quartile (25-75%) und Ausreißer.

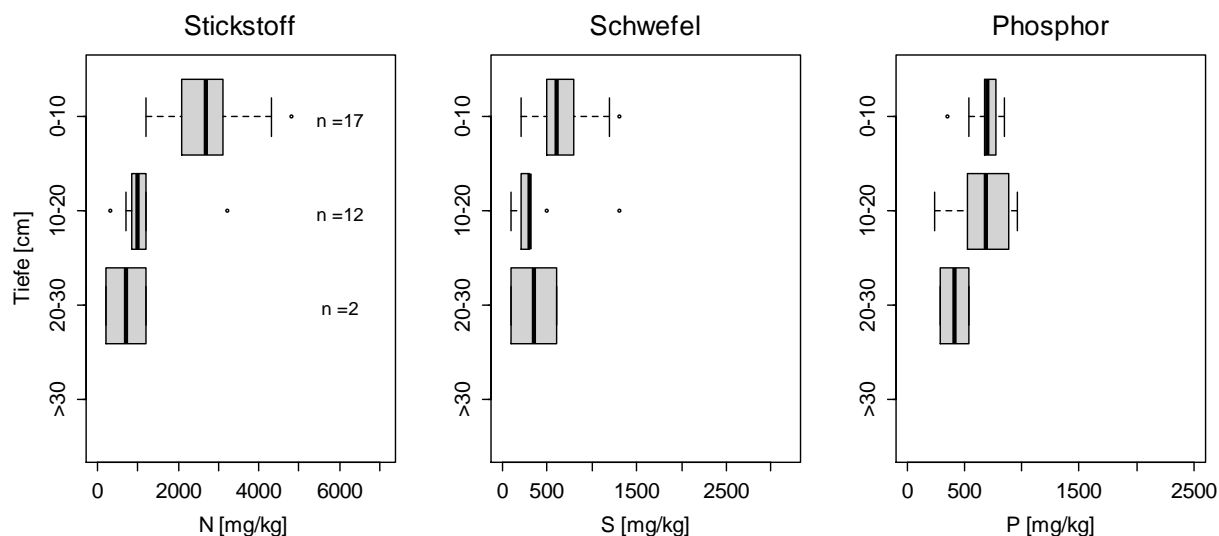


Abbildung 17: Gesamtgehalte der untersuchten Bodenhorizonte für Stickstoff (Gesamt-N), Schwefel (Gesamt-S), Phosphor (Gesamt-P) der Bodenart Lehm/Schluff. Dargestellt sind der Median, die Quartile (25-75%) und Ausreißer.

Die mittleren 50% der Werte weisen Gehalte von N, S und P zwischen 150 – 1150, 330 – 610 und 185 – 720 mg/kg auf und sind ähnlich denen land- und forstwirtschaftlich genutzter Böden unter vergleichbaren Standortbedingungen. Die Gesamtgehalte von N, S und P bei den schluffig/lehmigen Substraten sind geringer als bei den sandigen Substraten. Sie liegen zwischen 200 – 4800 (Gesamt-N), 100 -1300 (Gesamt-S) und 240 – 960 (Gesamt-P) mg/kg. Die Streuung der mittleren 50% der Werte von N,S, P variiert zwischen 700 – 2700, 350 – 600 und 350 - 700 mg/kg.

Die hohen, in Abbildung 16 und Abbildung 17 als Ausreißer markierten Werte sind vorrangig auf Anlagen zurückzuführen, bei denen (i) Auslassbereiche größerer Park- und Rangierflächen beprobt wurden und es zur Bildung von Sedimentkegeln kam oder (ii) an denen durch Straßenabflüsse ein Eintrag von standortfremdem, technogenem Material in die Regenwasserversickerungsanlage erfolgte.

Auch die hydraulischen Bedingungen der Regenwasserversickerungsanlagen begünstigen eine Anreicherung von Stickstoff, Schwefel und Phosphor. Durch das Verhältnis von angeschlossener Fläche zu Versickerungsfläche wird der Muldenboden im Jahresverlauf wesentlich intensiver und häufiger durchfeuchtet als unter natürlichen Standortbedingungen. Die resultierende mangelnde Durchlüftung des Bodens führt zu einer verminderten Aktivität von Mikroorganismen und folglich verringerten Mineralisierung der organischen Bodensubstanz (Scheffer und Schachtschabel, 2010).

Zusammenfassende Bewertung:

Die verwendeten Bodensubstrate und deren Schichtung im Muldenkörper entsprechen im Allgemeinen den Maßgaben des Regelwerks DWA-A 138 (2005). Die vorrangig verwendeten sandigen Substrate lassen eine hohe Sickerleistung und aufgrund der pH-Werte und des Humusgehaltes einen ausreichenden Stoffrückhalt erwarten.

Die pH-Werte der meisten Muldenböden liegen im schwach sauren bis schwach alkalischen Bereich und entsprechen den Empfehlungen des Arbeitsblattes DWA-A 138 (2005). Die pH-Werte einiger Böden liegen jedoch im schwach sauren bis sauren Bereich. Ursache hierfür ist oftmals die Verwendung 1) des anstehenden, bereits versauerten geologischen Ausgangsmaterials und/oder 2) punktueller Einläufe mit sehr hohen Sickerwasserraten (z.B. Rohrbrücken, Abflussrinnen).

Die Muldenböden weisen keine ökologisch wirksamen Salzgehalte auf. Eine Beeinträchtigung der Funktionalität der Versickerungsanlagen durch Salzschäden an der Vegetation oder eine Gefährdung des Grundwassers durch salzhaltiges Sickerwasser ist nicht zu erwarten. Die organischen Kohlenstoffgehalte in den beprobten Muldensubstraten (0-10cm) liegen bei den Bodenarten Sand und Lehm/Schluff im Bereich der Empfehlungen des Arbeitsblattes (DWA-A 138, 2005) von 1-3 Masse % organische Substanz. Nur an zwei Anlagen wurden niedrigere Werte festgestellt.

Die Gehalte von Stickstoff, Schwefel und Phosphor liegen im Bereich von vergleichbaren Böden unter land- und forstwirtschaftlich Nutzung.

6.2 Schwermetallgehalte im Bodenfeststoff der Mulden

Als Schwermetalle werden Metalle bezeichnet, die in ihrer Elementform eine Dichte von über $4,5 \text{ g/cm}^3$ aufweisen. Zu ihnen zählen sowohl die für den Stoffwechsel lebenswichtigen Spurennährstoffe wie z.B. Eisen, Zink, Kupfer und Chrom als auch Elemente wie z.B. Cadmium, Blei und Quecksilber. In Hinblick auf die stofflichen Belastungen von Böden spielen Schwermetalle eine besondere Rolle, da viele bereits in geringen Mengen toxisch wirken. Schwermetalle sind grundsätzlich persistent, d.h. sie können nicht physikalisch, chemisch oder biologisch abgebaut werden sondern lediglich in andere Verbindungen überführt werden (Scheffer/Schachtschabel, 2010).

Schwermetalle kommen im Gegensatz zu organischen Stoffen als natürliche Bestandteile in Gesteinen vor. Durch Verwitterung gelangen sie in Böden. Weitere große Quellen sind Staubimmissionen, Vulkaneruptionen und Meerwasserausgasungen.

Durch Abfallverwertung (hierunter fallen auch Kriegstrümmer; Bauschutt etc.), Abwasserverrieselung, Dünger- und Pestizidabgaben in der Landwirtschaft gelangen Schwermetalle direkt in den Boden (Blume et al., 2011).

Weitere Anthropogene Quellen für Schwermetalle in Böden sind die Emissionen aus der Industrie und von Verbrennungsanlagen, sowie von Kraftfahrzeugen. Über Niederschlagsabflüsse werden die Metalle und andere Schadstoffe in die dezentralen Systeme eingetragen und lagern sich in Form von feinen Partikeln an der Oberfläche ab oder werden als gelöste Stoffe mit dem Sickerwasser in die Tiefe verlagert.

Im Rahmen des F+E Vorhabens wurden insgesamt 33 Anlagen bodenkundlich beprobt. Dazu wurden Bodenproben in verschiedenen Muldentiefen entnommen, im Labor auf Feststoffgehalte untersucht und anschließend die stofflichen Belastungen ermittelt. In die Auswertung fließen alle beprobten Anlagen ein. Die Auswertung erfolgt zuerst übergreifend, d.h. die statistische Analyse und Bewertung der Feststoffgehalte der anorganischen und organischen Schadstoffe erfolgt tiefen- und substratabhängig. Definiert wurden dafür insgesamt 4 Tiefenstufen (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm und >30 cm). Die beprobten Horizonte wurden diesen Stufen zugeordnet. Die letzte Tiefenstufe wurde nur für die Anlagentypen mit der Bodenart Sand ausgewertet, da insgesamt zu wenig Tiefenbeprobungen und verwertbare Daten für die Bodenart Lehm/Schluff vorliegen.

Für die Bewertung der Ergebnisse werden zum einen die Prüfwerte der Bundesbodenschutzverordnung (BBodSchV 1999), zum anderen die Hintergrundwerte für organische und anorganische Stoffe in Oberböden in NRW (LABO 2003) herangezogen.

In der Regel liegen für die beim Bau der Anlagen verwendeten Substrate leider keine Feststoffkonzentrationen (Ausgangskonzentrationen) vor, was eine Ableitung der betriebsbedingten Belastung durch das versickerte Regenwasser nicht möglich macht. Eine Auswertung nach Kategorien/ Nutzungstypen erfolgt in Kapitel 6.5.

Die Abbildung 18 zeigt die Gesamtgehalte der Schwermetalle Cd, Pb, Zn, Cu, Ni sowie Cr im Bodenfeststoff in den verschiedenen Tiefen für die Bodenart Sand. Der Median des Gesamtgehaltes ist bei allen untersuchten Schwermetallen in der Tiefe 0-10 cm am höchsten. In dieser Tiefenstufe unterliegen die Gesamtgehalte i.d.R. der größten Streuung, was sich gut durch die Länge der „Antenne“ („Whisker“) nachvollziehen lässt. Der Median des Gesamtgehaltes von Zn und Cu überschreitet die Vorsorgewerte der BBodSchV für die Bodenart Sand im Tiefenbereich 0-10 cm und von Zn ebenfalls im Tiefenbereich 10-20 cm. Der Median des Feststoffgehaltes aller anderen untersuchten Schwermetalle überschreitet die Vorsorgewerte in keiner der beprobten Tiefenstufen. Einige Ausreißer liegen jedoch deutlich über den Vorsorgewerten.

Muldenstandorte mit der Bodenart Sand

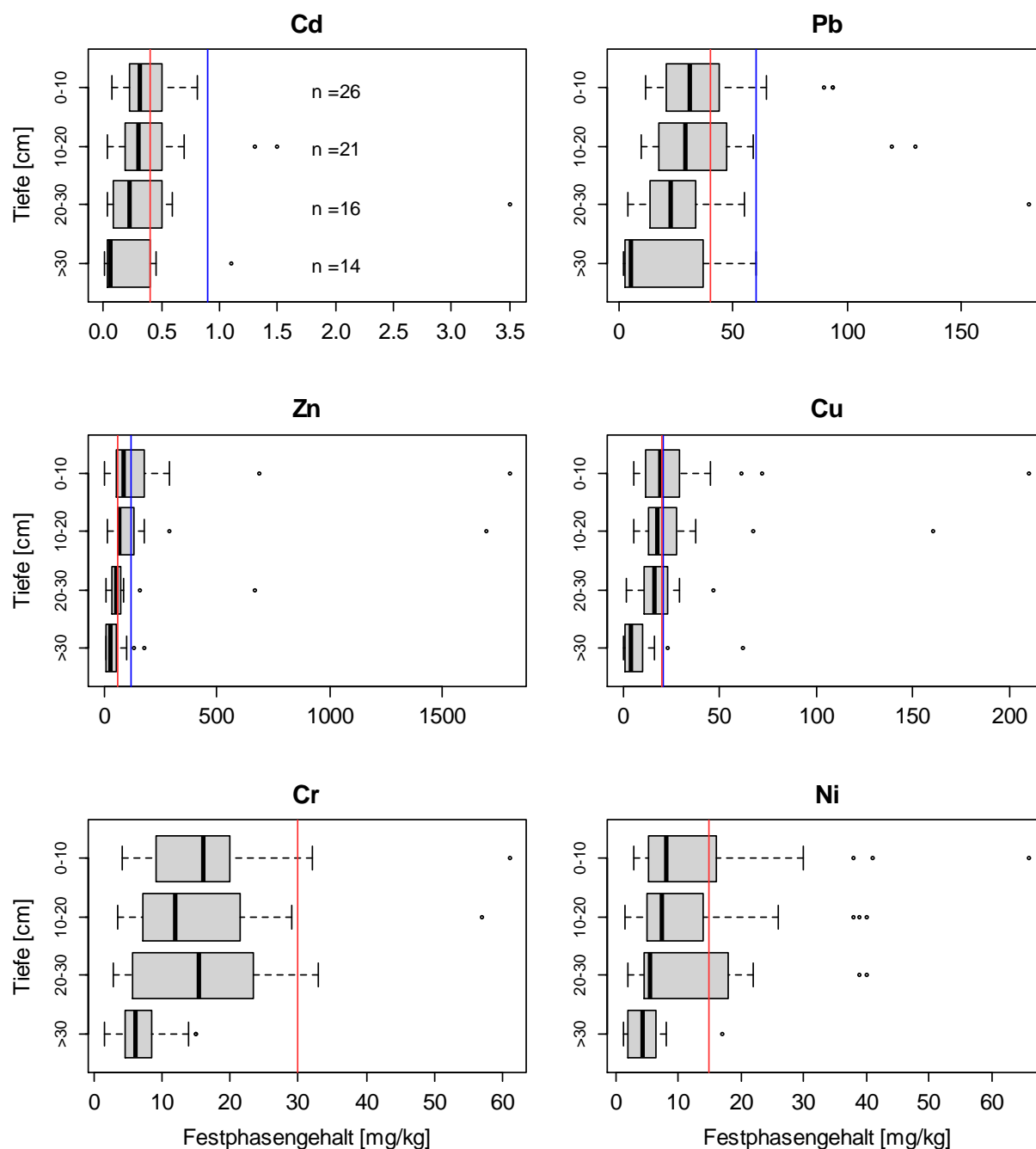


Abbildung 18: Schwermetallgesamtgehalte im Bodenfeststoff von Cd, Pb, Zn, Cu, Ni sowie Cr in den Tiefen 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm und >30 cm aller beprobter Anlagen mit der Bodenart Sand. Die rote Linien zeigen den Vorsorgewert der BBodSchV für die Bodenart Sand, die blauen Linien die 90 Perzentile der Hintergrundwerte für Böden aus (Flugsand) Sandlöss in NRW - Ballungskern (0-30cm).

Tabelle 9 listet die Anzahl an Bodenhorizonten, sowie die Anzahl der Versickerungsanlagen auf, bei denen es zu einer Überschreitung der Vorsorgewerte nach BBodSchV für die Bodenart Sand kommt.

Tabelle 9: Anzahl der Überschreitungen der Vorsorgewerte nach BBodSchV für die Bodenart Sand

Anorganische Stoffe	Cd	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni
Anzahl der Horizonte mit Überschreitung der Vorsorgewerte (BBodSchV)	18	18	42	25	1	13
Anzahl der Versickerungsanlagen mit Überschreitung der Vorsorgewerte (BBodSchV)*	8	8	16	12	1	5

Horizonte n=84; *Versickerungsanlagen bei denen mindestens bei einem Horizont eine Überschreitung der Vorsorgewerte der BBodSchV festgestellt wurde.

In der Regel nehmen alle Schwermetallgehalte mit zunehmender Tiefe ab. Dies lässt sich sowohl durch den Eintrag von atmosphärischer Deposition als auch durch die Ableitung konzentrierter Niederschlagsabflüsse erklären, die in beiden Fällen zu einer Anreicherung von Schwermetallen im Oberboden führen. Bei der Bewertung der Schadstoffbelastung der Anlagen ist zu berücksichtigen, dass die festgelegten Schwermetallgehalte der Einbauklasse Z0 der LAGA (2003), die als Maßstab für die Höchstgehalte der Metalle beim Einbau von Mulden substraten gelten, bereits den Vorsorgewerten der BBodSchV (1999) entsprechen (Tabelle 10).

Tabelle 10: Zuordnungswert (Z0) der LAGA (2003) für das Einbausubstrat und Vorsorgewerte für Böden der BBodSchV (1999).

Schadstoff	Zuordnungswert - Einbauklasse*	Zuordnungswert - Einbauklasse*	Vorsorgewert**	Vorsorgewert**
	Z0 Sand	Z0 Lehm/Schluff	Sand	Lehm/Schluff
Einheit	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Cd	0.4	1	0.4	1
Pb	40	70	40	70
Cu	20	40	20	40
Zn	60	150	60	150
Cr	30	60	30	60
Ni	15	50	15	50
PAK	3	3 (10)	3 (10)	3 (10)
Benzo (a)pyren	0.3	0.3 (1)	0.3 (1)	0.3 (1)

Nach * LAGA, 2003 ;** BBodSchV, 1999, Z0=Zuordnungswerte für Bodenmaterial, das für die Verfüllung von Abgrabungen unterhalb der durchwurzelten Bodenschicht verwertet wird. () = Humusgehalt der Böden >8%

Zusatz: Stark schluffige Sande sind entsprechend der Bodenart Lehm/Schluff zu bewerten. Bei Böden der Bodenart Ton mit einem pH-Wert von < 6,0 gelten für Cadmium, Nickel und Zink die Vorsorgewerte der Bodenart Lehm/Schluff. Bei Böden der Bodenart Lehm/Schluff mit einem pH-Wert von < 6,0 gelten für Cadmium, Nickel und Zink die Vorsorgewerte der Bodenart Sand. Bei Böden mit einem pH-Wert von < 5,0 sind die Vorsorgewerte für Blei entsprechend den ersten beiden Anstrichen herabzusetzen. Die Vorsorgewerte der finden für Böden und Bodenhorizonte mit einem Humusgehalt von > 8 Prozent keine Anwendung. Für diese Böden können die zuständigen Behörden ggf. gebietsbezogene Festsetzungen treffen (BBodSchV, 1999).

Zum anderen lassen sich die erhöhten Schadstoffgehalte auf die Verwendung von bereits vorbelastetem Bodenmaterial beim Einbau zurückführen. Das Vorfinden von technogenen Materialien (u.a. Holzkohle, Ziegel, Mörtel) in einigen Muldenböden lässt auf eine Vorbelastung vor Inbetriebnahme schließen. Vergleicht man die Vorsorgewerte der BBodSchV (1999) mit den Schwermetallgesamtgehalten der Tiefenstufe >30 cm, zeigt sich, dass diese ebenfalls unterhalb der Vorsorgewerte liegen.

Ein Vergleich der gemessenen Konzentrationen mit den 90 Perzentilen der Hintergrundwerte des Landes Nordrhein-Westfalen für Oberböden (Bodenart: Sand/ Nutzung: Acker) der Tiefe 0-30 cm (LABO, 2003) zeigt, dass die Böden vor allem im Ballungskern und in den Ballungsrandzonen höhere Schwermetallgehalte als die Vorsorgewerte der BBodSchV aufweisen können (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Hintergrundwerte für das Ausgangssubstrat Sand/Sandlöss in Nordrhein-Westfalen (0-30 cm) - (P90)= 90 Perzentile und (P50)= 50 Perzentile (LABO, 2003).

Ausgangssubstrat	Gebietstyp	Bodennutzung	Cd	Cu	Pb	Zn	Benzo (a) pyren
			in mg/kg TS (P90)				
Flugsand/ Sandlöss	Ballungskern	Acker	0.90	21	60	123	0.24
	Ballungsrandzone	Acker	0.90	20	57	144	0.12
	ländliche Struktur	Acker	0.50	15	33	78	0.07
			in mg/kg TS (P50)				
Flugsand/ Sandlöss	Ballungskern	Acker	0.50	16	42	89	0.08
	Ballungsrandzone	Acker	0.50	14	33	72	0.03
	ländliche Struktur	Acker	0.30	8	21	46	0.07

Erhöhte Hintergrundwerte für anorganische Stoffe sind im ländlichen Raum überwiegend naturbedingt. Im Siedlungsbereich können sie durch eine zusätzliche Anreicherung von Schadstoffen aus verschiedenen anthropogenen Quellen wie z.B. Verkehr, Siedlungsabfällen oder Industrieemissionen erhöht sein (vgl. LABO, 2003). Die Abbildung 19 zeigt die Gesamtgehalte der Schwermetalle Cd, Pb, Zn, Cu, Ni sowie Cr im Bodenfeststoff in den Tiefen 0-10 cm, 10-20 cm und 20-30 cm aller Anlagen mit den Ausgangssubstraten Lehm/Schluff. Mit Ausnahme des Tiefenprofils von Cr sind auch bei diesen beiden Bodenarten die Gehalte der Schwermetalle in den obersten 10 cm am höchsten und nehmen mit zunehmender Tiefe ab. Der Median der Gesamtgehalte von Zn überschreitet den Vorsorgewert der BBodSchV für die Bodenart Lehm/Schluff im Tiefenbereich 0-10 cm.

Muldenstandorte mit der Bodenart Lehm/Schluff

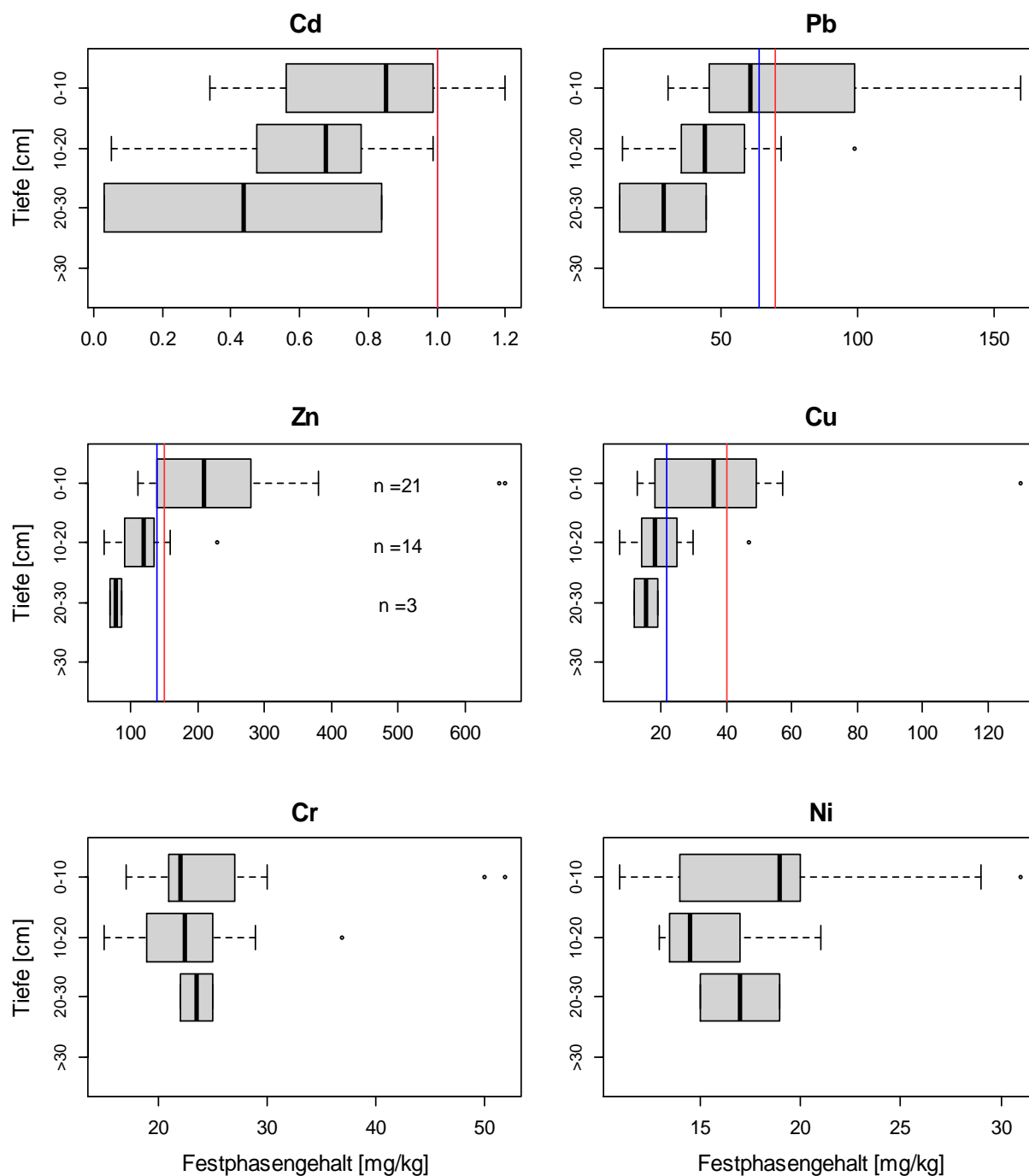


Abbildung 19: Schwermetallgesamtgehalte im Bodenfeststoff von Cd, Cu, Zn, Cu, Ni sowie Cr in den Tiefen 0-10 cm, 10-20 cm und 20-30 cm aller beprobter Anlagen mit der Bodenart Lehm/Schluff. Die gestrichelte rote Linie zeigt den Vorsorgewert der BBodSchV für die Bodenart Lehm/Schluff, die blauen Linien die 90 Perzentile der Hintergrundwerte für Böden aus (Schwemm-)Löss in NRW - Ballungskern (0-30cm). Die Vorsorgewerte von Ni und Cr liegen außerhalb des Darstellungsbereiches.

Der Median der Feststoffgehalte im Oberboden aller anderen untersuchten Schwermetalle überschreitet die Vorsorgewerte dagegen nicht. Einige Ausreißer liegen jedoch deutlich über den Vorsorgewerten. Zu beachten ist, dass die BBodSchV wiederum von einer Anwendung der Vorsorgewerte für die untersuchten Schwermetalle absieht, wenn der Humusgehalt der Bodenhorizonte > 8% liegt. Die 90 Perzentile der Hintergrundwerte des Landes NRW für Oberböden (Bodenart: Lehm/Schluff, Nutzung: Acker) der Tiefe 0-30 cm (LABO, 2003) zeigen, dass die Böden z.T. schon wesentlich höhere Schwermetallgehalte als die Vorsorgewerte der BBodSchV aufweisen (siehe Tabelle 12).

Tabelle 13 zeigt die Anzahl der Bodenhorizonte sowie der Versickerungsanlagen, bei denen es zu einer Überschreitung der Vorsorgewerte für die Bodenart Lehm/Schluff kommt.

Tabelle 12: Hintergrundwerte für das Ausgangssubstrat (Schwemm-) Löss in Nordrhein-Westfalen (0-30 cm) - (P90)= 90 Perzentile und (P50)= 50 Perzentile (LABO 2003).

Ausgangssubstrat	Gebietstyp	Bodennutzung	Cd	Cu	Pb	Zn	Benzo (a) pyren
			in mg/kg TS (P90)				
(Schwemm-) Löss	Ballungskern	Acker	1.00	22	64	139	0.24
	Ballungsrandzone	Acker	1.07	22	51	114	0.12
	ländliche Struktur	Acker	0.70	18	27	64	0.07
			in mg/kg TS (P50)				
(Schwemm-) Löss	Ballungskern	Acker	0.60	16	43	102	0.08
	Ballungsrandzone	Acker	0.50	14	32	75	0.03
	ländliche Struktur	Acker	0.43	812	27	64	0.07

Tabelle 13: Anzahl der Überschreitungen der Vorsorgewerte nach BBodSchV für die Bodenart Lehm/Schluff

Anorganische Stoffe	Cd	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni
Anzahl der Horizonte mit Überschreitung der Vorsorgewerte (BBodSchV)	6	5	13	1	-	3
Anzahl der Versickerungsanlagen mit Überschreitung der Vorsorgewerte (BBodSchV)*	3	3	7	1	-	2

Horizonte n=31; *Versickerungsanlagen bei denen mindestens bei einem Horizont eine Überschreitung der Vorsorgewerte der BBodSchV festgestellt wurde.

HINWEIS: Bei der Bewertung der Schadstoffbelastung der Anlagen hinsichtlich der Vorsorgewerte der BBodSchV (1999) ist zu berücksichtigen, dass die festgelegten Schwermetallgehalte der Einbauklasse Z0 der LAGA (2003), die als Maßstab für die Höchstgehalte der Metalle beim Einbau von Muldensubstraten gelten, bereits den Vorsorgewerten der BBodSchV (1999) entsprechen (Tabelle 10).

Zusammenfassende Bewertung

Aufgrund der hohen Heterogenität der verwendeten Muldensubstrate und der Unklarheit über die Schwermetallgehalte des Ausgangsmaterials (siehe Tabelle 11 und Tabelle 12), ist es nicht möglich auf eine betriebsbedingte Anreicherung von Schwermetallen in den Versickerungsanlagen zu schließen. Die Schwermetallgehalte der Mulden mit dem Ausgangssubstrat Lehm/Schluff (vornehmlich Anlagen in NRW) legen jedoch nahe, dass es zu einer Anreicherung der Schwermetalle Zn, Cu und Pb in den Oberböden (0-10cm) der Anlagen gekommen ist, da diese sogar zum größten Teil über den Hintergrundwerten für Böden in NRW (Gebietstyp Ballungskern) liegen. Im Einzelnen bedeutet dies, dass ~75% der Zn, ~70% Cu- und der ~45% der Pb-Gehalte im Oberboden (0-10cm) der Mulden höherer Werte als die Hintergrundgehalte der Böden in den Ballungskernen in NRW aufweisen.

Die Mediankonzentrationen der Metalle liegen mit Ausnahme von Zink (Bodenart Lehm/Schluff und Sand) und Kupfer (Bodenart Sand) unterhalb der in der BBodSchV(1999) angebenen Vorsorgewerte. Die Abnahme der Metalle mit der Tiefe lassen darauf schließen, dass das Oberbodensubstrat (i.d.R. 0-10 cm) und die darunter liegenden Bodensubstrate (-schichten) offenbar eine wirksame Filter- und Schutzfunktion gegenüber eingetragenen Schadstoffen durch das Oberflächenabflusswasser besitzen. Die Dauerhaftigkeit der Retentionsleistung, d.h. die stoffliche Belastbarkeit von dezentralen Regenwasserversickerungsanlagen ist bisher allerdings noch nicht ausreichend untersucht.

Zu einer Überschreitung der Maßnahmenwerte nach BBodSchV (1999) in den jeweiligen Kategorien Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park- und Freizeitanlagen und Industrie- und Gewerbegrundstücke kommt es bei keiner der untersuchten Versickerungsanlagen.

6.3 Organische Schadstoffe im Bodenfeststoff

6.3.1 PAK und Benzo(a)pyren

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) bilden eine für den Menschen gesundheitsgefährdende Stoffgruppe von organischen Verbindungen und treten in Luft, Boden und Gewässern auf. Es existieren weit über 100 Verbindungen, bekannte und häufig auftretende Verbindungen sind z.B. Benzo(a)- und Benzo(e)pyren sowie Fluoranthen (Scheffer/ Schachtschabel, 2010). Diese werden häufig auch als Leitsubstanzen verwendet. PAK entstehen bei unvollständiger Verbrennung von fossilen Energieträgern wie Holz, Kohle oder Öl.

PAK werden heutzutage zum größten Teil aus Abgasen des Kfz-Verkehrs sowie aus dem Hausbrand freigesetzt und werden über atmosphärische Depositionen und Wasser sowie durch Einbringung PAK-haltiger Materialien wie Teer, Ruß, Holzkohle, Aschen, Trümmer- und Bauschutt usw. in die Böden eingetragen. Die Adsorption von PAKs erfolgt mit hoher Bindungsstärke überwiegend an den humosen Bestandteilen des Bodens. Hierdurch kommt es in der Regel nur zu einer geringen Tiefenverlagerung in Böden.

Bei niedrig kondensierten PAK, wie z.B. Naphtalin, kann ein schneller mikrobieller Abbau erfolgen, höher kondensierte PAK, wie z.B. Benzo(a)pyren, werden dagegen stark adsorbiert und können nur in sehr geringen Anteilen mikrobiell abgebaut werden (vgl. Scheffer/ Schachtschabel, 2010).

Die Gehalte von Benzo(a)pyren in Oberböden in NRW (Ballungsraum) bewegen sich zwischen 0.03 mg/kg und 0.24 mg/kg. In Gärten in der Nähe von Industriegebiete mit Aufschüttungen aus Trümmerschutt oder Hausbrandaschen wurden Gehalte zwischen 0.4 und 1.4 mg/kg B(a)P gemessen (LABO, 2003). Die

Abbildung 20 zeigt die Gesamtgehalte von Benzo(a)pyren und die Summe aller nachgewiesenen PAK (16) in den Oberböden der beprobten Versickerungsanlagen mit der Bodenart Sand. Der Median der Gehalte von Benzo(a)pyren liegt in allen Tiefen unterhalb der Vorsorgewerte der BBodSchV und unterhalb der P(90) Hintergrundwerte für Ballungsräume in NRW (Tabelle 10). Einen sehr ähnlichen Verlauf zeigt der Median der Feststoffgehalte in den verschiedenen Tiefenstufen der Summe der PAK (16). Insgesamt werden für Benzo(a)pyren bei 11 Bodenhorizonten sowie für die Summe der PAK (16) bei 13 Horizonten in 6 Anlagen die Vorsorgewerte nach BBodSchV überschritten.

Muldenstandorte mit der Bodenart Sand

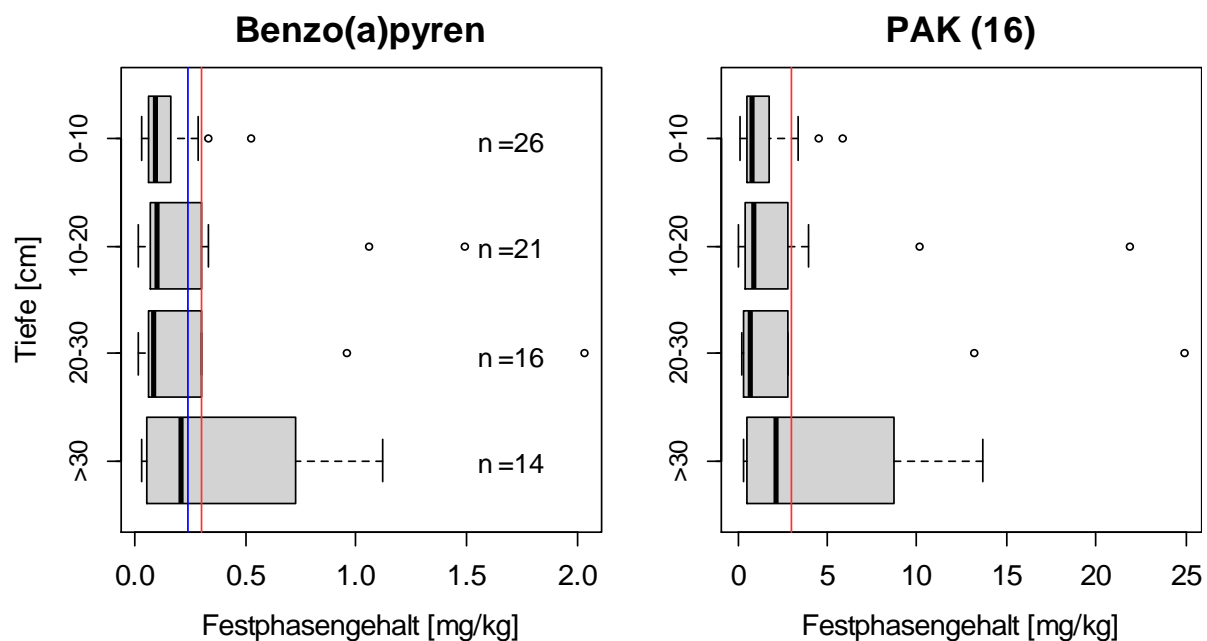


Abbildung 20: PAK und Benzo(a)pyren Gesamtgehalte im Bodenfeststoff in den Tiefen 0-10 cm; 10-20 cm, 20-30 cm und >30 cm der Anlagen mit der Bodenart Sand. Die gestrichelten roten Linien zeigen den Vorsorgewert der BBodSchV für Summe nachgewiesener PAK (16) und Benzo(a)pyren, die blauen Linien die 90 Perzentile der Hintergrundwerte von Benzo(a)pyren für Böden in NRW – Ballungsraum (0-30cm).

Die unspezifische Tiefenverteilung von Benzo(a)pyren und PAK (16) in den obersten 30 cm der beprobten Anlagen und der Vergleich mit den Hintergrundwerten für Benzo(a)pyren in NRW legen nahe (siehe Tabelle 11 und Tabelle 12), dass die Feststoffgehalte der Proben eher einer regionalen Grundbelastung des Bodenmaterials entsprechen und bereits beim Bau der Versickerungsanlagen vorlagen. Der Eintrag durch die betriebsbedingte Regenwasserversickerung hätte zu einer Anreicherung im humosen Oberboden führen müssen.

Auffällig sind die höheren Gehalte beider Schadstoffe unterhalb der technischen Anlage (0-30 cm) in der Tiefenstufe > 30 cm. Bei der bodenkundlichen Kartierung wurden häufig technogene Materialien (u.a. Schlacke, Holzkohle, Ziegel, Mörtel, Gips u.v.a) in den Substraten unterhalb von 30 cm gefunden. Vor allem in stark urban geprägten Räumen waren diese Materialien den Unterböden beigemischt. Urbane Substrate (v.a. Trümmerschutt) weisen häufig erhöhte Schadstoffgehalte auf (Abel 2015). Die Abbildung 21 zeigt die Gesamtgehalte von Benzo(a)pyren und die Summe aller nachgewiesener PAK(16) in den Oberböden aller beprobter Anlagen mit der Bodenart Lehm/Schluff.

Der Median von Benzo(a)pyren und PAK(16) liegt in der Tiefenstufe 0-10 cm oberhalb der Vorsorgewerte der BBodSchV und der P(90) Hintergrundwerte für Ballungsräume in NRW.

Muldenstandorte mit der Bodenart Lehm/Schluff

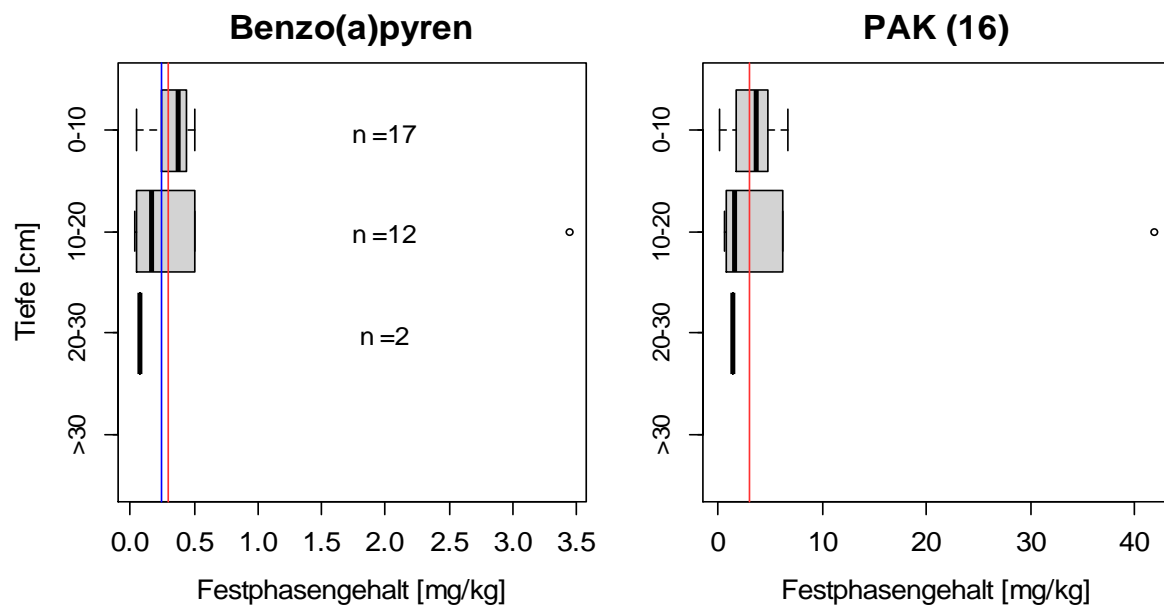


Abbildung 21: PAK und Benzo(a)pyren Gesamtgehalte im Bodenfeststoff in den Tiefen 0-10 cm, 10-20 cm und 20-30 cm aller beprobter Anlagen mit der Bodenart Lehm/Schluff. Die gestrichelten roten Linien zeigen den Vorsorgewert der BBodSchV für Summe nachgewiesener PAK(16) und Benzo(a)pyren, die blauen Linien die 90 Perzentile der Hintergrundwerte von Benzo(a)pyren für Böden in NRW - Ballungsraum (0-30cm).

Bei den anderen beiden Tiefenstufen liegt der Median der beiden Schadstoffe unterhalb der Vorsorge- und Hintergrundwerte. Insgesamt werden für Benzo(a)pyren bei 4 Bodenhorizonten in 3 Versickerungsanlagen, sowie für die Summe der PAK (16) bei 3 Horizonten in 2 Anlagen die Vorsorgewerte nach BBodSchV überschritten.

6.3.2 PCB

Bei allen untersuchten Anlagen lagen die Analysewerte für Polychlorierte Biphenyle (PCB) in den untersuchten Tiefen von 0-10 cm; 10-20 cm; 20-30 cm und >30 cm unterhalb der messtechnischen Bestimmungsgrenze von 0,01 mg/kg. Der Vorsorgewert der BBodSchV für PCB bei Böden mit > 8 % bzw. ≤ 8 % Humus liegt bei 0,1 bzw. 0,05 mg/kg Trockenmasse Feinboden.

Zusammenfassende Bewertung:

An einigen Anlagen werden die Vorsorgewerte der Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe überschritten. Die Tiefenverteilung von Benzo(a)pyren und PAK (16) in den obersten 30 cm der beprobten Anlagen und der Vergleich mit den Hintergrundwerten für Benzo(a)pyren in NRW legen, dass die Feststoffgehalte der Proben eher einer regionalen Grundbelastung des Bodenmaterials entsprechen und bereits beim Bau der Versickerungsanlagen vorlagen. Der Eintrag durch die betriebsbedingte Regenwasserversickerung hätte zu einer Anreicherung im humosen Oberboden führen müssen. Die Gehalte der Polychlorierte Biphenyle (PCB) liegen bei den untersuchten Anlagen immer unterhalb der methodischen Nachweisgrenze.

Zu einer Überschreitung der Maßnahmenwerte nach BBodSchV (1999) in den jeweiligen Kategorien Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park- und Freizeitanlagen und Industrie- und Gewerbegrundstücke kommt es bei keiner der untersuchten Versickerungsanlagen.

6.4 Übertragung der Ergebnisse auf Flächennutzungstypen

Für die Übertragung der Ergebnisse der Schwermetallgehalte in den beprobten Anlagen auf verschiedene Flächennutzungen, bzw. abflussliefernde Flächen wurden die Versickerungsanlagen drei Kategorien zugeordnet. Diese Kategorien sind Niederschlagsabläufe von:

- 1) Gewerbeflächen (Handel und Dienstleistung, Gewerbe)
- 2) Verkehrsflächen (Wohnstraßen, Hauptstraßen) und
- 3) Wohnflächen (Gehwege, Dächer mit Regenrinnen und Fallrohren aus Zink).

Vergleicht man die in Abbildung 22 dargestellten Schwermetallgehalte, zeigt sich dass bei den Kategorien der Abflüsse von Verkehrs- und Wohnflächen (Dachabläufe) die Gehalte von Zn und Pb in allen aufgenommenen Bodentiefen, vor allem aber im Oberboden (0-10 cm), die höchsten Werte aufweisen. In der Tiefenstufe 20-30 cm wurden bei den Wohnflächen (Kategorie 3) höhere Feststoffgehalte von Zn, Pb und Cd als bei den anderen Nutzungskategorien 1 und 2 festgestellt. Die Feststoffgehalte von Cd und Cu liegen in den Tiefenstufen 0-10 cm und 10-20 cm bei allen Nutzungskategorien in einer sehr ähnlichen Größenordnung.

Es zeigt sich eine Belastungstendenz, die sich vor allem durch die Passage des Niederschlagswassers über Regenrinnen und Fallrohren aus Zinkblech erklären lässt. Vor allem bei

geringen Niederschlägen versickert der größte Teil des Dachablaufes im direkten Einlaufbereich, wodurch es hier zu einer verstärkten Akkumulation und Verlagerung von Metallen kommen kann.

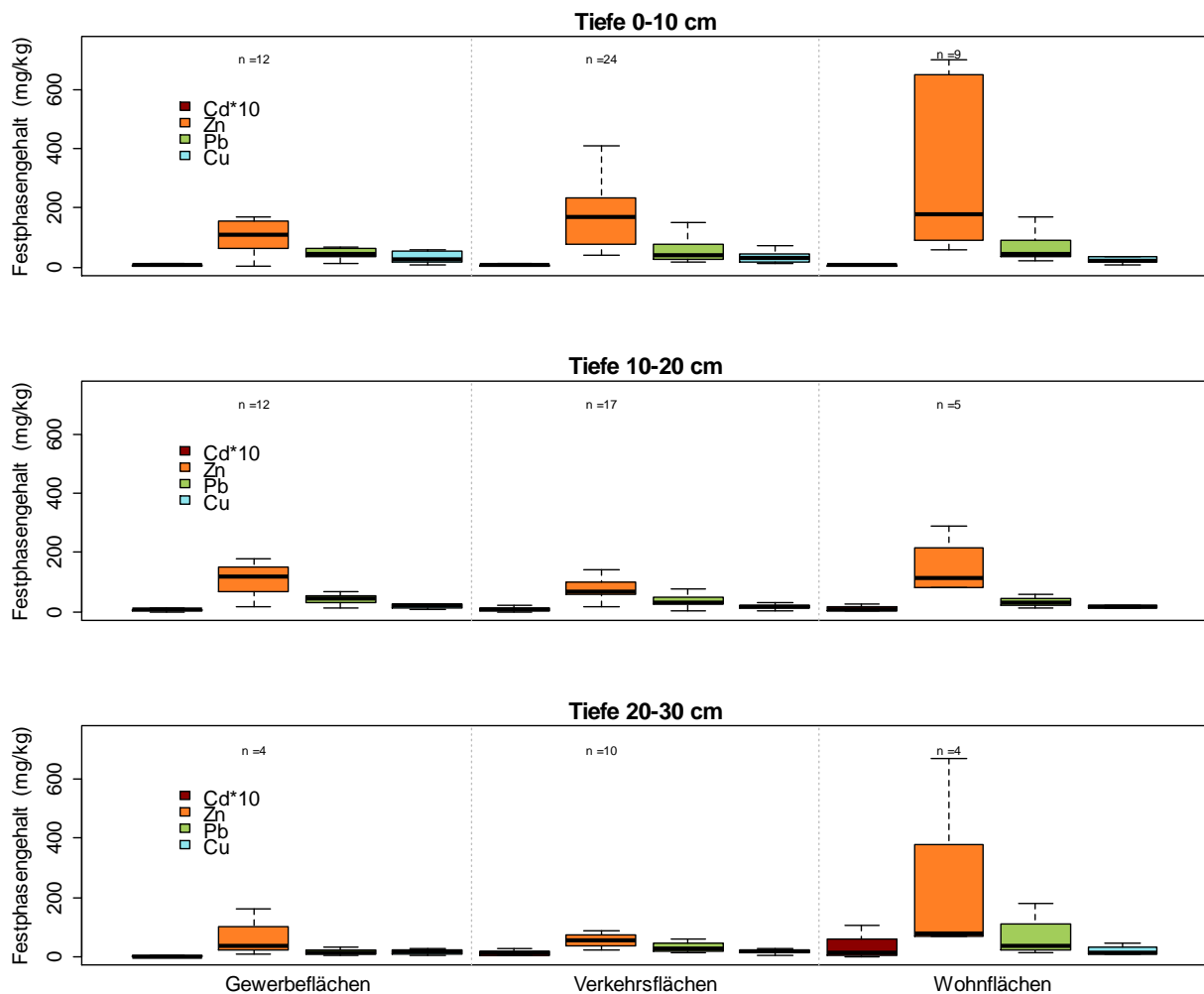


Abbildung 22: Statistische Auswertung der Metallkonzentrationen im Bodenfeststoff der untersuchten Muldenproben nach Tiefenstufen und Nutzungskategorien (n= Anzahl der Proben je Flächentyp und Tiefenbereich).

Untersuchungen anderer Autoren von Niederschlagsabflusskonzentrationen stützen die aufgeführten Ergebnisse. Die Abflusskonzentrationen von Häusern mit verzinkten Dächern und von Dächern mit verzinkten Regenrinnen und Fallrohren weisen häufig höhere Werte auf, als Straßenabflüsse von stark befahrenen Straßen und Autobahnen (siehe Tabelle 1). Dies gilt vor allem für die Konzentrationen von Zink und Kupfer.

6.5 Ex-Post-Analysen - Schwermetallakkumulation

In diesem Kapitel erfolgt der Vergleich von Feststoffgehalten von Muldenstandorten die im Zuge des F+E-Vorhabens „Bodenchemische Untersuchungen von Versickerungsanlagen als Grundlage für eine nachhaltige Niederschlagsbewirtschaftung im Sinne des Boden- und Grundwasserschutzes“ (Hiller et al., 2001) in den Jahren 1999 – 2001 sowie „Analytisches Begleitprogramm für die Versickerung von Niederschlagsabflüssen an einem Pilotprojekt bei kritischen Untergrundverhältnissen“ (Schöttler et al., 1997) untersucht wurden.

Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, ist die punktgenaue Wiederbeprobung der Entnahmestellen vorangegangener F+E-Vorhaben auf Grund fehlender Verortung nur bedingt möglich. Für den Nachweis einer durch den langjährigen Betrieb hervorgerufenen Zu- oder Abnahme der Schadstoffbelastung ist dies aber eine notwendige Voraussetzung. Da die untersuchten Muldenböden zusätzlich eine hohe kleinräumige Heterogenität aufweisen können, bleibt bei einer Wiederbeprobung stets unklar in welcher Größe die geogene Grundbelastung variiert und eine mögliche zeitliche Belastungsänderung überprägt.

Die Wiederbeprobung bzw. Punktwiederfindung wurde insgesamt für 6 Anlagen durchgeführt. Zur Durchführung einer Ex-Post Analyse bezüglich der Schwermetallakkumulation konnten jedoch lediglich 2 Standorte herangezogen werden, da sich die damaligen Beprobungspunkte nur in diesen zwei Fällen ausreichend genau nachvollziehen ließen.

Bei den anderen Anlagen wurde die Wiederbeprobung durchgeführt, eine aussagekräftige Verortung und der plausible Vergleich der Schwermetallgehalte verschiedener Zeitabschnitte waren jedoch nicht möglich.

6.5.1 Zeitliche Veränderung der Schwermetallgehalte Anlage Nr.9

Der Ex-Post-Vergleich der Schwermetallgehalte in verschiedenen Bodentiefen erfolgte anhand der Daten von Schöttler et al. (1997), die eine umfangreiche Beprobung am Standort Nr. 9 bereits bei Inbetriebnahme durchführten. Die dezentrale Anlage liegt in einem Wohngebiet. Das Abflusswassers stammt aus der Dachentwässerung, wird über eine verzinkte Dachrinne abgeführt und infiltriert direkt in der angrenzenden Mulde. Die Probenentnahme erfolgte zum einen in 1,5 m Entfernung zum Fallrohr der Regenrinne (=Einlassprobe), zum anderen als Mischprobe aus drei Einzelproben im zentralen Bereich der Mulde (=Mischprobe). In Abbildung 23 sind die Tiefenverteilungen für Blei, Cadmium, Zink und Kupfer an verschiedenen Beprobungs- und Zeitpunkten dargestellt.

Bei der Einlassprobe und der Mischprobe in 1,5 m Entfernung vom Einlauf (2014) sind die Bodenfeststoffkonzentrationen von Pb, Zn, Cd im obersten Horizont am höchsten und nehmen mit zunehmender Tiefe ab.

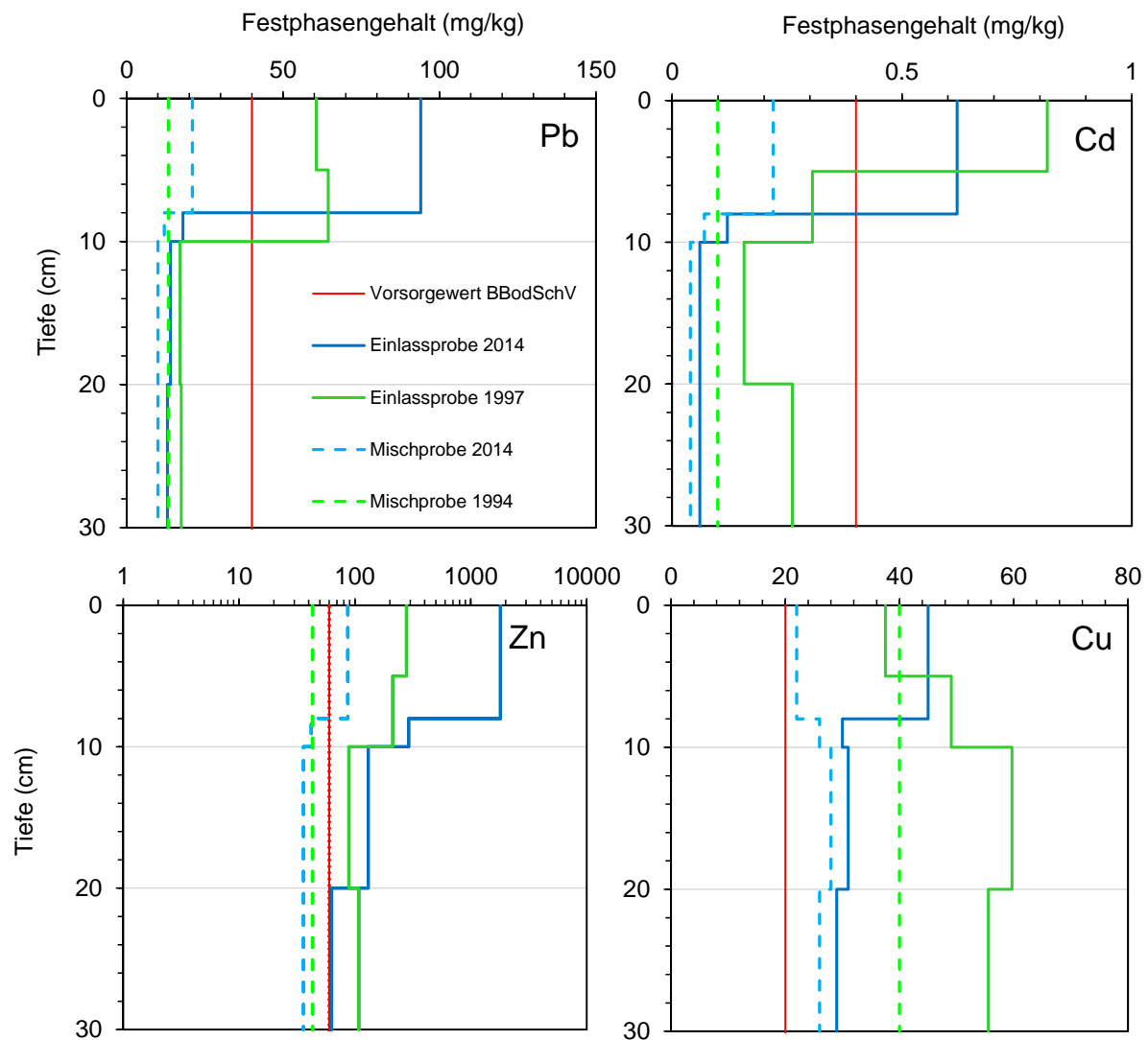


Abbildung 23: Schwermetallgehalte im Bodenfeststoff der Versickerungsmulde der Anlage Nr.9 in verschiedenen Bodentiefen und Beprobungsjahren (1994, 1997, 2014). Mischprobe= 1,5m Entfernung vom Einlauf. Die rote Linie markiert die Vorsorgewerte der BBodSchV (1999) für die Bodenart Sand.

Ein Vergleich der Feststoffgehalte von 2014 mit den Anfangsgehalten (=Feststoffgehalte des Substrats nach dem Einbau) des Oberbodens (0-10 cm) im Jahr 1994 (=Einlassprobe) zeigt eine Erhöhung der Gehalte um den Faktor 7, 6 und 42 für Pb, Cd und Zn. Im Gegensatz dazu lassen sich nur geringe Erhöhungen der Gehalte von Pb, Cd und Zn im Oberboden (0-10 cm) in 1,5 m Abstand zum Einlass (=Mischprobe 2014) im Vergleich zu den Ausgangsgehalten (Mischprobe 1994) feststellen.

Die hohen Zink-Gehalte der Einlassprobe (0-10cm) sind durch Korrosionsprozesse der verzinkten Regenrinne zu erklären. Bei der Korrosion durch Niederschlagsabflüsse werden insbesondere Zink, aber auch Cadmium, Blei und Kupfer mit dem Regenwasserabfluss freigesetzt und anschließend in die Mulde eingetragen. Göbel et al. (2007) stellten fest, dass insbesondere Abflüsse von Dächern mit Rinnen und Fallrohren häufig höhere Schwermetallkonzentrationen aufweisen als Abflüsse von hoch frequentierten Straßen.

He et al. (2001) untersuchten Korrosionsraten von Zinkdachmaterialien und konnten zeigen, dass die Metallkonzentrationen im Dachwasser nach anfänglich hohen Konzentrationen stark abnehmen und sich mit der Zeit konstante Konzentrationen einstellen. Dieser Trend wird auch durch die rasche Zunahme aller Feststoffgehalte der Schwermetalle im Oberboden innerhalb der ersten drei Jahre des Betriebs, mit Ausnahme Kupfer (Abbildung 23, Vergleich der Mischprobe 1994 mit der Einlaufprobe 1997) sichtbar.

Die Kupfer-Gehalte im Oberboden der Misch- und der Einlassprobe (2014) weisen dagegen ein anderes Verteilungsmuster auf. Hier sind die Feststoffgehalte im Oberboden geringer als im Jahr 1994 (Mischprobe) und im Jahr 1997 (Einlassprobe). Eine Erklärung hierfür könnte die bevorzugte Assoziation von Kupfer an organischen Bodenpartikeln sein. Über den mikrobiellen Abbau von organischer Bodensubstanz kann Kupfer verstärkt über gelöste organischer Substanz (DOC) in die Tiefe verlagert werden. Eine erhöhte Kupfer Auswaschung in Mulden wurde auch von Sauv e et al. (2000), Li und Davis (2008), Trowsdale et al. (2011), Mullane et al. (2015) festgestellt. Eine Tiefenverlagerung von Kupfer wurde auch in Straßenrandböden nachgewiesen, welche ebenfalls durch hohe Abfluss- und Infiltrationsraten gekennzeichnet ist (Bäckström et al., 2004 und Kocher et al., 2005). Die Autoren führen diese auf die straken Bindungsaffinität von Kupfer an organische Bodenbestandteile und der hohen Löslichkeit durch Wasser zurück.

Die Cadmium-Gehalte im Einlaufbereich im Jahr 1997 zeigen höhere Werte, als die des Jahres 2014 in allen untersuchten Tiefen. Dies könnte auf eine Verlagerung von Cadmium hinweisen. Cadmium gilt als das mobilste Metall im Boden (Alloway, 2006). Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Metallen tritt Cd vor allem in gelöster Form im Niederschlagsabfluss auf (Dierkes und Geiger, 1999, Preciado und Li, 2006). Überschreitungen der Vorsorgewerte der BBodSchV wurden im obersten Horizont (0-10cm) für alle untersuchten Metalle am Einlaufpunkt festgestellt, während die Konzentrationen im Abstand von 1,5m deutlich unter den Vorsorgewerten liegen. Ausnahmen bilden Zn in der Mischprobe 2014 und Cu mit Überschreitungen bei allen Probenorten, -zeitpunkten und -tiefen.

6.5.2 Zeitliche Veränderung der Schwermetallgehalte der Anlage Nr. 21

In Abbildung 24 sind die Tiefenverteilungen der Metalle Blei, Cadmium, Zink und Kupfer an verschiedenen Beprobungszeitpunkten in einer Mulde der Anlage Nr. 21 dargestellt. Die Koordinaten und Schwermetallkonzentrationen verschiedener Bodentiefen wurden den Daten von Hiller et al. (2001) entnommen. Über die Betriebszeit von 19 Jahren kam es zu einer starken Sedimentanreicherung im Einlassbereich. Bei der Wiederbeprobung wurde sowohl das aufgelagerte Sediment als auch die darunterliegenden Muldensubstrate beprobt und mit den Analysedaten des Jahres 2001 verglichen.

In den Einlassbereichen größerer Betriebs- und Rangierflächen lagern sich betriebsbedingt teilweise enorme Sedimentmengen an. Diese Sedimente sind zumindest an den Standorten Nr. 21 und 20 mit höheren Gehalten an Blei, Cadmium, Kupfer und Zink belastet. So liegen bei beiden Anlagen die Gehalte für Zink in den untersuchten Sedimentproben um ein Vielfaches über den Gehalten des am Standort anstehenden Bodens (Einbausubstrat) oder sedimentfreier Bereiche (Abbildung 24). Auch die Feststoffgehalte von Pb, Cd und Cu der Sedimente sind gegenüber den Bodenproben, die außerhalb der Sedimentansammlung liegen, aber auch im Vergleich zu den geogenen Hintergrundgehalten, deutlich erhöht und überschreiten besonders bei sandigem Ausgangsmaterial die Vorsorgewerte der BBodSchV (Tabelle 11 und Tabelle 12).

Ursache für die Schwermetallanreicherung in den aufgehäuften Sedimenten sind vermutlich der hohe Fahrzeugwechsel und die intensiven Rangier- und Verladearbeiten auf den angeschlossenen Flächen und der damit verbundene starke Reifenabrieb (Göbel et al., 2006; Kluge, 2010). Haile et al. (2016) fanden eine ähnliche Sedimentansammlung und starke Akkumulation partikulärer Anteile von Schwermetallen in einer dem ursprünglichen Profil aufliegenden Sedimentschicht einer Regenwasserversickerungsanlage an einer Autobahn in Österreich.

Ein Vergleich der Schwermetallkonzentrationen der Einlassprobe 2001 (=angenommene Ausgangskonzentrationen) mit der Mischprobe 2014 (1.5 m vom Einlassbereich) zeigt eine leichte Erhöhung der Konzentrationen von Pb und eine Abnahme der Konzentration von Cd und Zn im weniger hydraulisch belasteten Teil der Mulde. Ob diese Veränderung durch Akkumulation bzw. Verlagerung durch den Betrieb hervorgerufen wurde oder lediglich durch heterogene Ausgangskonzentrationen der Einbausubstrate (= Genauigkeit der Punktwiederfindung) zu erklären ist, kann abschließend nicht geklärt werden.

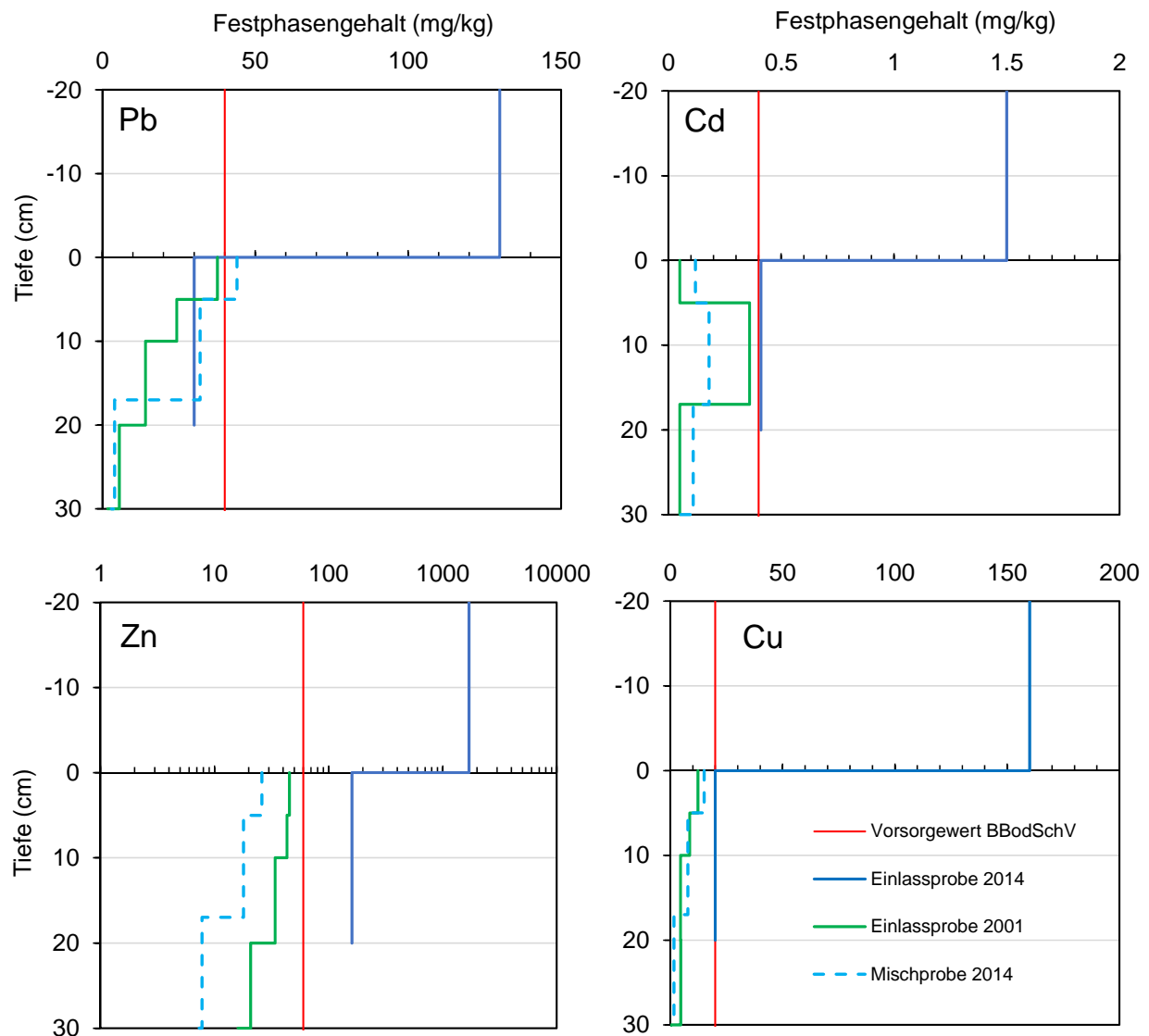


Abbildung 24: Schwermetallgehalte im Bereich mit Sedimentaufhöhung und außerhalb der Sedimentaufhöhung am Standort 21. Die rote Linie markiert die Vorsorgewerte der BBodSchV (1999) für die Bodenart Sand.

Zusammenfassende Bewertung

Anlagen, an denen intensiv genutzte Betriebsflächen konzentriert abgeleitet und über einen Punkteinlass in die Mulde geleitet werden oder an denen unbeschichtete Eindeckungen oder Regenrinnen und Fallrohre aus Zinkblech zur Dachentwässerung angeschlossen sind, zeigen deutliche Schwermetallakkumulationen in den direkten Einlassbereichen. Es ist bekannt, dass unbeschichteten Dachmaterialien stark korrodieren und hohe Mengen an gelösten und partikulären Schwermetallen freisetzen (Förster et al., 1999; Göbel et al. 2006, Brown & Peake, 2006).

Besonders problematisch ist dies, wenn bei entsprechenden Anschlussverhältnissen durch hohe Frachten mit einer Anreicherung im Boden oder Auswaschungen zu rechnen ist (Hiller et al., 2001). Am ersten Beispiel der Ex-Post Analyse wird dieser Zusammenhang besonders deutlich.

Eine Anreicherung der von der Regenrinne gelösten Schwermetalle findet jedoch hauptsächlich in dem obersten, stark humosen Horizont statt. Die Gehalte von Kupfer und Zink übersteigen besonders in diesen Bereichen der Mulde die Vorsorgewerte der BBodSchV deutlich. Bei punktuellen Einleitungen von Oberflächenabflüssen von Gewerbegebieten mit hohem Fahrzeugwechsel und/oder Rangierbetrieb kann es zu einer starken Akkumulation von belasteten Sedimenten im Einlassbereich kommen. Diese weisen häufig Schwermetallkonzentrationen auf, die ebenfalls deutlich über den Vorsorgewerte der BBodSchV liegen. Die Ableitung großer Wassermengen bürgt auch hier die Gefahr der Verlagerung v.a. gelöster Schadstoffe mit dem Infiltrationswasser im direkten Einlassbereich.

6.6 Elutionsversuche im Labor

Zur Abschätzung der wasserlöslichen, mobilen Schwermetalle im Sickerwasser wurden für 11 ausgewählte Anlagen an insgesamt 47 Muldensubstraten Schüttelversuche im Labor durchgeführt (DIN 38414-S4, 1984). Die Abbildung 25 zeigt beispielhaft die Beziehung zwischen den ermittelten Feststoffgehalten der Oberbodensubstrate und deren im Labor ermittelten Eluatkonzentrationen (S4) der verschiedenen Schwermetalle.

Die Ergebnisse zeigen, dass es selbst bei hohen Bodenfeststoffgehalten nur zu geringen Konzentrationen der Metalle in der flüssigen Phase kommt. So kommt es selbst bei Muldenproben bei denen die Feststoffgehalte über den Vorsorgewerten der BBodSchV (1999) liegen, nicht zu einer Überschreitung der Prüfwerte für den Pfad Boden-Grundwasser. Dies gilt auch für die Eluatkonzentrationen in den anderen beprobten Tiefenstufen der Mulden (siehe Tabelle 14). Eine ähnlich hohe Adsorption von Metallen im Oberboden (inklusive angelagerten Sedimenten) stellte Kocher (2008) fest. Die Autorin führte Schüttelversuche mit belasteten Bankettschälgutproben (Cu, Pb, Cd, Zn) durch. Die Eluatwerte der Schwermetalle lagen bis auf Cu und einigen wenigen Ausnahmen ebenfalls unterhalb der Prüfwerte der BBodSchV (1999) für den Pfad Boden-Grundwasser.

Auch Kluge et al. (2014) ermittelten bei Elutionsversuchen und Sickerwasserbeprobungen an Straßenrandproben und Bankettböden einer Autobahn mit fast hundertjähriger Nutzungsgeschichte und z.T. sehr hohen Feststoffgehalten im Oberboden, nur vereinzelt Überschreitungen der Prüfwerte der BBodSchV (1999).

An dieser Stelle sei aber darauf verwiesen, dass die im Labor durchgeführten Elutionsversuche nur einen Anhaltspunkt für mögliche Sickerwasserkonzentrationen in den untersuchten Muldensubstraten geben. Für die Überprüfung der Ergebnisse sollten zusätzlich In-Situ Versuche durchgeführt werden, da der Stofftransport, respektive die Schadstoffretention aufgrund von verschiedenen Faktoren, wie z.B. präferentiellm Fließen, hohen Wasserflüssen und unterschiedlichen Einlaufkonzentrationen, Temperaturen etc. stark von den Laborergebnissen abweichen können.

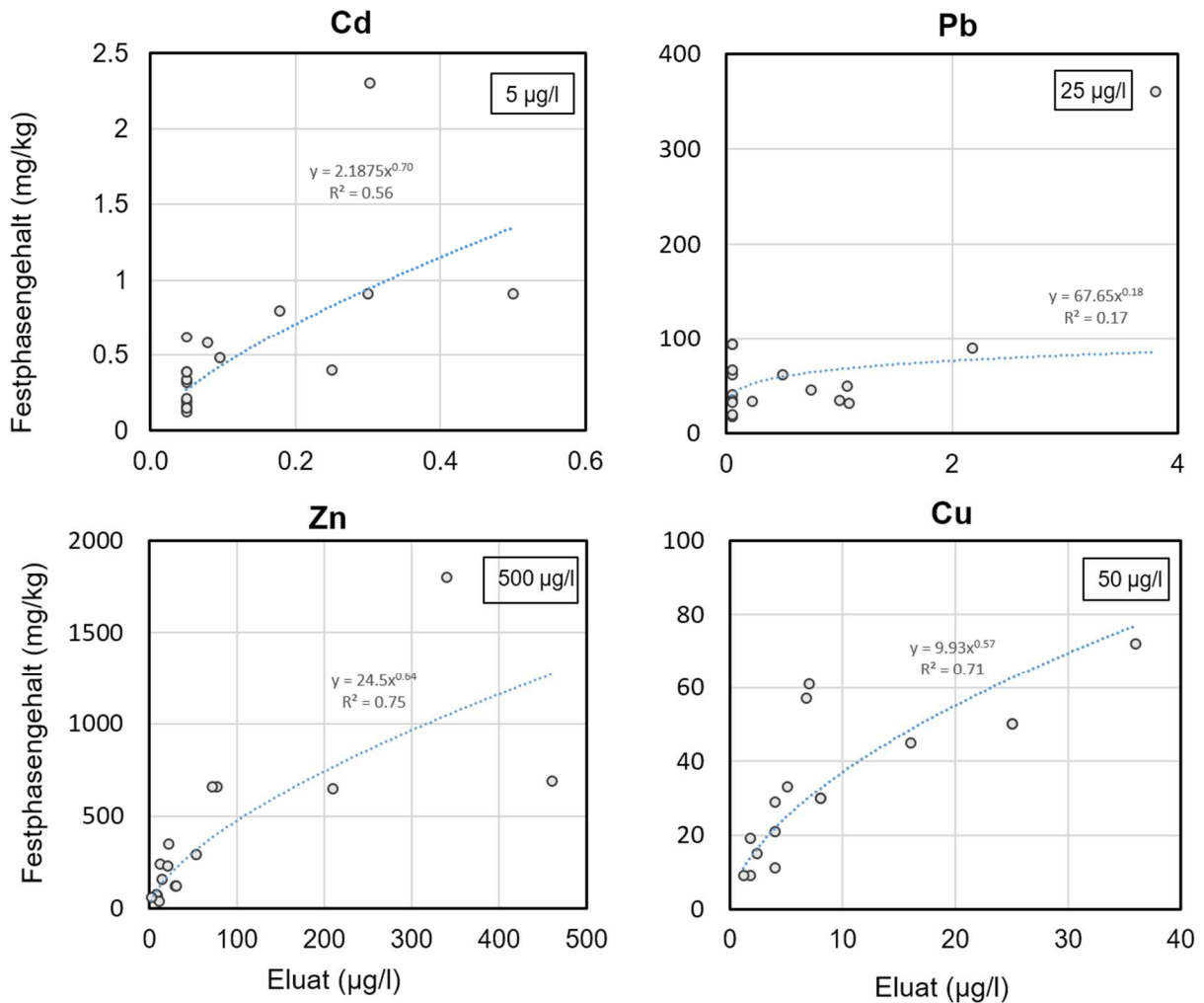


Abbildung 25:S4 Elutionen von ausgewählten Oberbodenhorizonten (0-10 cm) der Mulden mit verschiedenen Feststoffkonzentrationen. In den Textkästen sind die Prüfwerte für den Pfad Boden-Grundwasser der BBodSchV (1999) aufgeführt.

Tabelle 14: pH-Wert, C_{org} Gehalte und Schwermetallgesamtgehalte sowie Eluatkonzentrationen nach S4 Elution ausgewählter Anlagen in verschiedenen Tiefen

F+E Nr.	Tiefe	pH	C _{org}	Cd		Cu		Pb		Zn	
				Gehalte	Eluat	Gehalte	Eluat	Gehalte	Eluat	Gehalte	Eluat
	cm	-	M%	mg/kg	µg/l	mg/kg	µg/l	mg/kg	µg/l	mg/kg	µg/l
1	0-12	7.2	3.6	0.4	<0.5	72	35.3	41	<10	240	7.3
	12-26	6.9	1.2	0.2	<0.5	19	24.1	24	<10	65	17.8
	26-44	6.8	1.0	0.4	<0.5	23	18.6	39	<10	98	6.3
9	0-8	6.8	5.7	0.62	<0.5	45	16.3	94	<10	1800	330
	8-10	6.6	4.0	0.12	<0.5	30	7.7	18	<10	290	50.7
	10-20	6.9	3.5	0.06	<0.5	31	5.9	14	<10	130	16.4
	20-30	7.1	3.2	0.06	<0.5	29	4.6	13	<10	63	2.3
11	0-15	6.0	6.2	0.91	<0.5	50	25	62	<10	660	72.3
	15-25	6.1	2.3	0.73	<0.5	21	12.7	48	<10	160	8.2
6	0-15	6.7	1.5	0.16	<0.5	21	4	35	<10	68	9
	15-39	7.3	1.0	0.09	<0.5	5.4	2	11	<10	35	5
	39-90	7.2	0.1	0.05	<0.5	1.4	2	2.5	<10	9.1	11
7	0-18	6.2	1.5	0.15	<0.5	11	4	20	18	41	11
	18-23	6.5	1.2	0.25	<0.5	13	3	47	<10	67	4
	23-37	6.4	1.0	0.2	<0.5	9.8	4	36	<10	44	7
	37-65	6.4	0.1	0.02	<0.5	1.6	6	2.5	<10	6.9	4
8	0-8	7.0	3.1	0.21	<0.5	30	8	67	<10	120	30
	8-20	7.8	0.9	0.2	<0.5	29	6	75	<10	87	12
	20-40	7.8	0.8	0.2	<0.5	27	5	60	<10	88	5
16	0-10	5.7	2.1	0.58	<0.5	9	1.8	50	<10	120	30.6
	0-23	5.6	1.3	0.59	<0.5	8.3	2.5	47	<10	69	21
	23-45	5.5	1.1	0.46	<0.5	6.8	2.2	37	<10	52	9
18	0-14	5.5	3.0	0.8	<0.5	19	1.8	90	<10	690	460.2
	14-27	6.0	2.7	1.3	<0.5	16	1.4	59	<10	290	110.8
	27-44	5.7	0.9	0.28	<0.5	6.9	<1	20	<10	44	9.2
	90-100	6.0	0.7	0.03	<0.5	4	<1	6.2	<10	9.7	2
21	0-5	5.9	4.3	0.34	<0.5	57	6.8	35	<10	350	22.3
	5-30	6.2	1.1	0.39	<0.5	9	1	32	<10	62	3.7
	30-40	6.3	0.2	0.05	<0.5	10	<1	11	<10	34	1
20	0-9	6.1	3.5	0.39	<0.5	33	5.1	34	<10	160	14.8
	9-19	6.3	0.9	0.3	<0.5	23	2.9	32	<10	140	10.9
19	0-14	5.9	3.1	0.48	<0.5	15	2.4	46	<10	650	209.4

Säulenversuche PAK

Für eine Einschätzung der eluierbaren Summe nachgewiesener PAK im Sickerwasser wurden für ausgewählte Muldenstandorte Säulenversuche durchgeführt. Die Stoffkonzentrationen der analysierten Proben lagen zum größten Teil unter der Nachweisgrenze der Messgeräte von 0.02 µg/l. Es kam bei keiner Probe zu einer Überschreitung der Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser der BBodSchV.

Zusammenfassende Bewertung

Trotz zum Teil hoher Feststoffgehalte der beprobten Muldenproben, wurden bei den Elutionsversuchen weder bei den Schwermetall-, noch bei den PAK Konzentrationen Überschreitungen der Prüfwerte für den Pfad Boden-Grundwasser festgestellt. Dies lässt auf eine hohe Adsorptionsfähigkeit der Muldensubstrate schließen. Die Elutionen im Labor geben aber nur einen Anhaltspunkt für mögliche Sickerwasserkonzentrationen im Gelände. Die Ergebnisse sollten zusätzlich durch In-Situ Versuche überprüft werden, um diese Aussage abzusichern.

6.7 Prognose zukünftiger Sickerwasserkonzentrationen in einer Modellmulde (Sand) – numerische Simulation

Um Prognosen über die Konzentrationen des Sickerwassers von Schwermetallen in einer Regenwasserversickerungsmulde zu erstellen, wurde eine Modellmulde konstruiert, durch Gelände-, Labor- und Literaturdaten parametrisiert und numerische Simulationen mit dem Programm HYDRUS 1D durchgeführt. In diesem Kapitel wird an einem vereinfachten Beispiel aufgezeigt, wie für eine Modellmulde mit der Bodenart Sand die Sickerwasserkonzentrationen von Cd, Pb, Zn und Cu für weitere Betriebszeiträume abgeschätzt werden können.

Die Abbildung 26 zeigt die numerische Simulation der Sickerwasserkonzentration der Modellmulde über einen Simulationszeitraum von insgesamt 40 Jahren. Aufgetragen sind die Konzentrationen der Metalle Cd, Zn, Pb und Cu in verschiedenen Tiefen der Mulde an verschiedenen Zeitpunkten:

- 1) 1996-2016 (Betriebsbeginn - Heute)
- 2) 2016-2026 (+10 Jahre)
- 3) 2026-2036 (+20 Jahre)

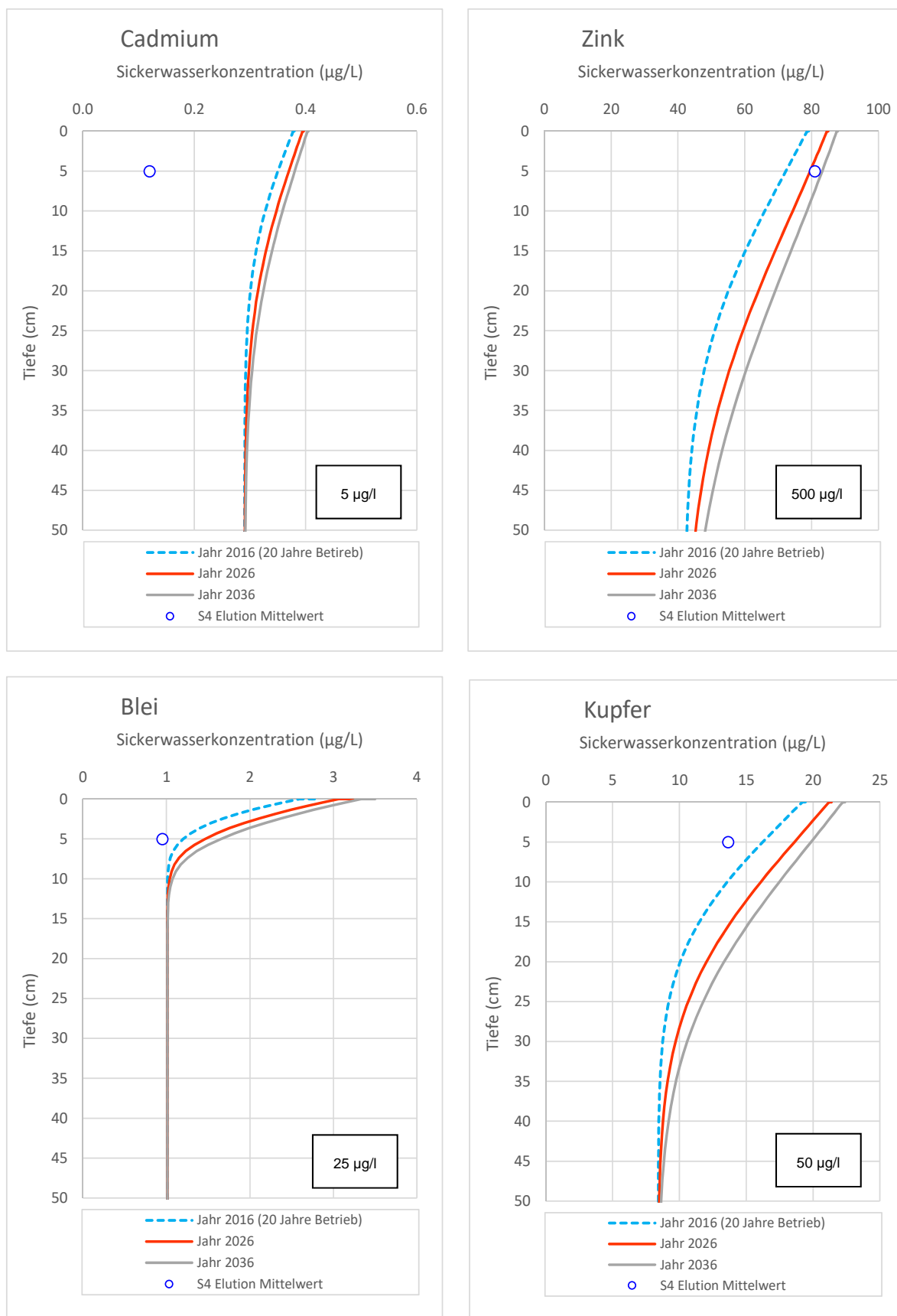


Abbildung 26: Simulation der Sickerwasserkonzentrationen in einer Modellmulde mit Zulaufkonzentrationen einer Wohnstraße über einen Zeitraum von 40 Jahren. In den schwarzen Textfelder sind die Prüfwerte der BBodSchV (1999) für den Pfad Boden-Grundwasser dargestellt.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass es unter den angenommenen Bedingungen zu keinem Zeitpunkt zu einer Überschreitung der Prüfwerte für die Metalle Cd, Zn, Cu und Pb der BBodSchV (1999) für den Pfad Boden-Grundwasser kommt. Die Konzentrationen in 30 cm Tiefe (=Muldenende) sind nach weiteren 20 Jahren Betriebsjahren um den Faktor 13 (Cd), 8 (Zn), 25 (Pb) und 4.5 (Cu) niedriger als die Prüfwerte. Die Simulation prognostiziert somit eine ausreichende Retentionskapazität der Substrate der Modellmulde (Medianeigenschaften aller Muldensubstrate, siehe Tabelle 6 und Tabelle A2) für die im Szenario angenommenen Einlaufkonzentrationen (Tabelle 6 und Abbildung 26). Dies gilt auch für eine weitere Betriebszeit von mindestens zwanzig Jahren.

Die prognostizierten Sickerwasserkonzentrationen sind jedoch exemplarisch zu bewerten, sie gelten nicht ohne weiteres für alle betrachteten Muldenstandorte und Betriebsbedingungen. Für eine Voraussage des Einflusses verschiedener Nutzungstypen (Wohn-, Gewerbe-, Parkplatz- und Verkehrsflächen, verschiedener Einlaufkonzentrationen, Anschlussverhältnisse, Substrateigenschaften u.v.m. auf die Sickerwasserkonzentrationen sind stärker differenzierte Modellaufbauten und –studien notwendig.

Das aufgebaute Modell betrachtet bisher zudem nur gelöste Schwermetallkonzentrationen. Die Verlagerung von partikulären Stoffen sowie eine schnelle Verlagerung der Stoffe durch Risse (präferentielles Fließen) wie sie bei lehmigen Substraten aufgrund von Schrumpfung – und Quellung auftreten kann, wird bisher nicht abgebildet. Für die Modellevaluierung und Verbesserung des Modells sind daher weiterführende Sorptionsversuche und In-Situ Messungen zur Ermittlung von Sickerwasserkonzentrationen in verschiedenen Mulden und Tiefen erforderlich.

Anmerkungen:

In Abbildung 26 sind zusätzlich zu den simulierten Sickerwasserkonzentrationen die Mittelwerte der Eluatkonzentrationen der S4-Elution aller Muldenproben der Tiefe 0-10 cm dargestellt (Kapitel 6.6). Diese dienen als Referenzwerte zur Einordnung der simulierten Konzentrationen der Modellmulde nach 20 Jahren Betriebszeit. Die simulierten Sickerwasserkonzentrationen liegen, trotz unterschiedlicher Anfangsbedingungen wie z.B. Feststoffgehalte bei Betriebsbeginn, Zuflusskonzentrationen, Zuflussmengen und Substrateigenschaften) in einem ähnlichen Größenbereich wie die mittleren S4- Eluatkonzentrationen. Eine Ausnahme bildet Cadmium; hier liegt die simulierte Sickerwasserkonzentration deutlich über dem Wert des S4 Eluats. Es wird vermutet, dass die Sorptionsfähigkeit der Substrate der Modellmulde durch die abgeleiteten Freundlich-Isothermen stark unterschätzt worden ist.

6.8 Hydraulische Eigenschaften

Die Dimensionierung von Anlagen zur Versickerung von Niederschlägen orientiert sich maßgeblich an der Verfügbarkeit der Flächen und der Wasserdurchlässigkeit des anstehenden Bodens. Das Potential des Bodens Wasser zu speichern und zu versickern bestimmt somit den Bedarf an Fläche, an zusätzlichem Retentionsvolumen, und an eventuell notwendigen Ableitungsmöglichkeiten. Somit handelt es sich bei der hydraulischen Leitfähigkeit um den maßgeblichen Parameter bei der Wahl zwischen Mulden, Mulden-Rigolen-Elementen und Mulden-Rigolen-Systemen.

Auf Grund der gegenseitigen Abhängigkeit von hydraulischer Leitfähigkeit und Retentionsvolumen für die Planung von Versickerungsanlagen werden diese beiden hydraulischen Eigenschaften im Rahmen von LEIREV schwerpunktmäßig untersucht.

6.8.1 Hydraulische Leitfähigkeit

Die Messung der hydraulischen Leitfähigkeit stellt eine gute Grundlage für die Bewertung von Versickerungsanlagen dar. So wird für Versickerungsanlagen durch das DWA Arbeitsblatt 138 ein „entwässerungstechnisch relevanter Versickerungsbereich“ ausgewiesen, der sich über K_f -Werte im Bereich von $1 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $1 \cdot 10^{-6}$ m/s definiert. Dieser Bereich wird bei nur 10 von 112 Messungen (9 %) verlassen. Für Mulden-Rigolen wird für den Einbau von Böden seitens des DWA-A 138 darüber hinaus die Empfehlung ausgesprochen, einen K_f -Wert $> 1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s einzuhalten. Dieses Kriterium wird bei Messungen mit dem Doppelring-Infiltrometer an 4 von 9 Anlagen mit Mulden-Rigolen eingehalten.

Einen signifikanten Einfluss auf die hydraulische Leitfähigkeit hat die Hauptbodenart, die für alle 33 intensiv untersuchten Anlagen ermittelt wurde (vgl. Kapitel 6.1.1)

Die in LEIREV untersuchten Anlagen können in sandgeprägte und schluffig-lehmig geprägte Standorte unterschieden werden (Abbildung 27). Die Unterschiede zwischen sand- und schluff/lehm-geprägten Standorten lassen sich anhand der Ergebnisse der Infiltrationsversuche deutlich erkennen. So liegt bei sandgeprägten Versickerungsanlagen der K_f -Wert bei drei von vier Messmethoden zum Teil deutlich über $1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s. Bei schluff/lehm-geprägten Standorten hingegen, liegen die Mediane bei allen Messmethoden deutlich unter $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Vergleicht man die Hauptbodenarten der Muldensubstrate mit jeweiligen dominierenden Bodengesellschaften der Region erkennt man, dass es klare Korrelationen gibt. So finden sich die meisten sand/lehm-geprägten Standorte im Großraum Dortmund-Düsseldorf, der geogen von Lössböden dominiert wird. Im Raum Berlin-Brandenburg dominieren glaziale Sande und Lehmsande.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass es trotz einheitlicher Vorgaben an das einzubauende Muldensubstrat (DWA-A 138) zu systematischen Abweichungen kommt, die auf den Gebrauch der regional zur Verfügung stehenden Böden zurückzuführen ist. So ist es in der Praxis nicht unüblich, den Aushub von gewachsenen und unbelasteten Böden (LAGA Zuordnungswerte = Z0) für den Einbau in Mulden weiter zu verkaufen.

Eine Beeinträchtigung der Anlagenleistung geht mit den systematisch schlechteren Kf -Werten an schluff/lehm-geprägten Standorten nicht zwingend einher. Schließlich ist die hydraulische Leistungsfähigkeit bereits im Zuge der Planung durch entsprechend große Muldenvolumina und wahlweise zusätzliche Rigolen zu berücksichtigen.

Die Darstellung der Messergebnisse (Abbildung 27) verdeutlicht, dass Unterschiede für die hydraulische Leistungsfähigkeit nicht nur auf das geogene Ausgangssubstrat zurückzuführen sind, sondern auch auf die Messmethode. Für die Untersuchungen in LEIREV wurden drei Feldmethoden und eine Labormethode zur Bestimmung des Kf -Werts genutzt (vgl. Kapitel 5.4 und Tabelle 15).

Tabelle 15: Messmethoden der hydraulischen Leitfähigkeit

Methode		Bilanzraum
Labormethode	Permeameter	Mikro-Skalig
Feldmethode	Einzelring-Infiltrrometer	Meso-Skalig
	Doppelring- Infiltrrometer	
	Flutungsversuche	Makro-Skalig

In dargestellter Reihenfolge vergrößert sich die Sickerfläche, und die Anfälligkeit der Messungen gegenüber Störungen durch räumliche Inhomogenitäten der Bodenmatrix nimmt ab. Die Wahrscheinlichkeit des Vorkommens von wasserleitenden Mittel- und Grobporen steigt innerhalb des Sickerraums mit zunehmender Sickerfläche. Bei Flutungsversuchen ist auch der Einfluss der Böschung zu berücksichtigen, die im Vergleich zu Muldensohlen eine geringe Kolmationsneigung besitzen und zudem in der Regel besser durchwurzelt sind (Sommer 2013).

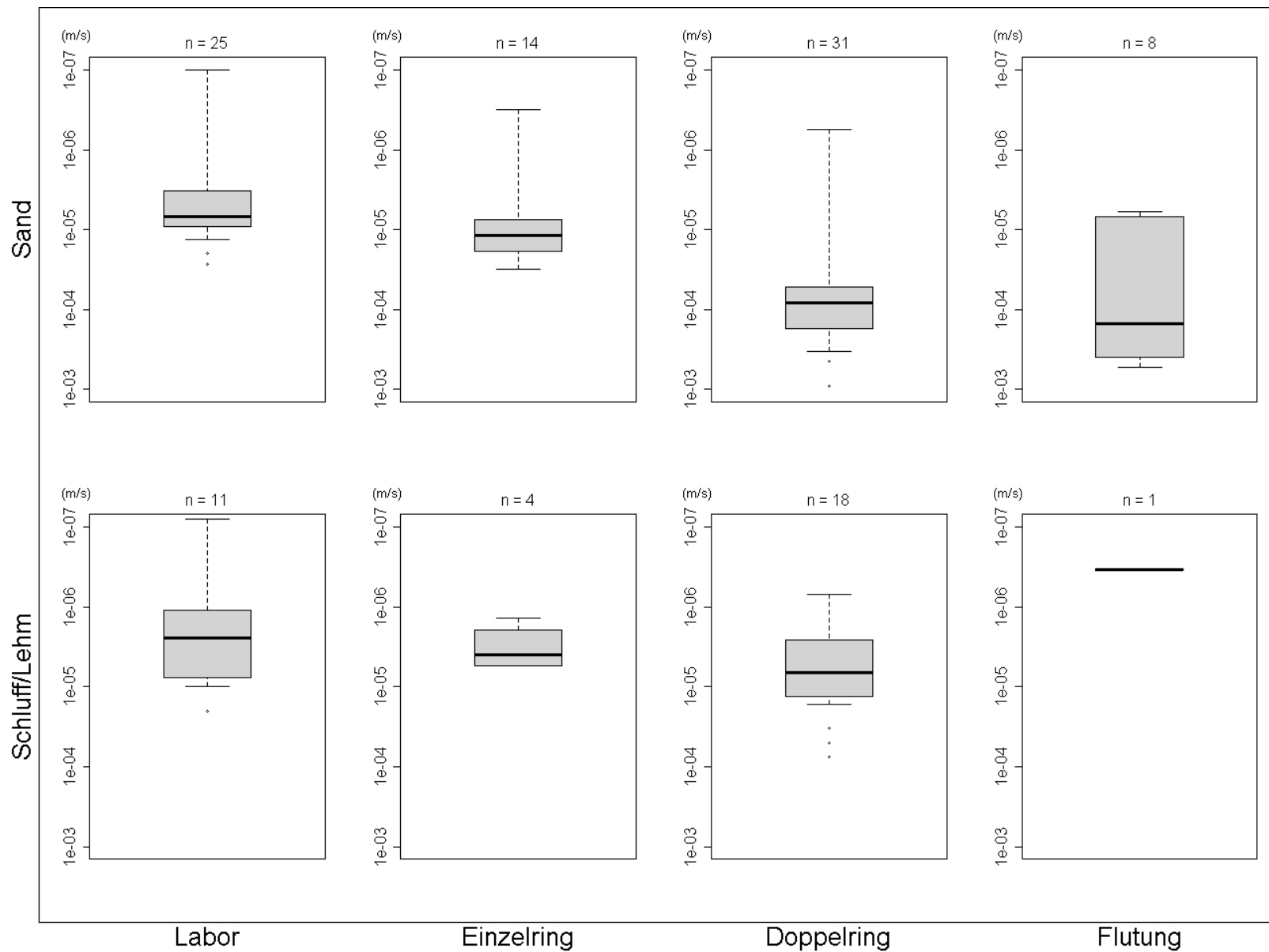


Abbildung 27 Ergebnisse zur Hydraulischen Leitfähigkeit in Versickerungsanlagen unterteilt nach der Hauptbodenart Sand oder Schluff/Lehm

Besonders deutlich zeigen sich die Unterschiede der Messmethoden an den untersuchten sandgeprägten Standorten, wo Labor-, Einzelring- und Doppelring-Messungen signifikant verschiedene Ergebnisse hervorbringen. Vor diesem Hintergrund sind auch die Korrekturfaktoren des DWA-A 138 (siehe Tabelle 16) nachzuvollziehen, die in dem Regelwerk wie folgt erläutert werden:

"Ein Korrekturfaktor von 2 für die Feldversuche bedeutet, dass durch Feldversuche genau die Durchlässigkeit festgestellt wird, mit der die Versickerungsanlagen bemessen werden. Das Versuchsergebnis entspricht also dem vertikalen Durchlässigkeitsbeiwert."

Tabelle 16: Korrekturfaktoren zur Festlegung des Bemessungs- K_f -Wertes nach DWA-A 138

Bestimmungsmethode		Korrekturfaktor
Abschätzung nach Bodenansprache		1
Labormethoden	Sieblinie	0,2
	Permeameter (vertikale Aufnahme)	1
Feldmethoden		2

Hintergrund ist die Definition des Durchlässigkeitsbeiwert der ungesättigten Zone - $K_{f,u}$, der gemäß Formel 5 ermittelt wird. Der $K_{f,u}$ -Wert wird für die Berechnung der Versickerungsrate im Zuge der Dimensionierung von Versickerungsanlagen hinzugezogen.

$$K_{f,u} = K_f/2$$

Formel 5

Die systematischen Abweichungen innerhalb der Messmethoden, z.B. zwischen den Messergebnissen der Einzelring- und Doppelring-Infiltrometern, fällt bei schluff/lehm-geprägten Standorten weniger deutlich aus. Dies kann zum einen an dem geringeren Stichprobenumfang gegenüber der Beprobung von sandgeprägten Standorten liegen. Zum anderen könnte die Ursache sein, dass der laterale Wasserfluss, der bei Feldmethoden zu beobachten ist, auf bindigen Böden geringer ausfällt.

6.8.2 Einstauvolumen

Das regulär vorgesehene einstaubare Volumen von Mulden dient als Zwischenspeicher, um den Abfluss von versiegelten Flächen der Versickerung zuzuführen. Das Muldenvolumen kann daher vereinfacht als Differenz von Niederschlagsvolumen und Versickerungsvolumen, unter der Annahme eines konstanten K_f -Wertes angesehen werden (Sieker et al., 2006).

Im Moment der Zwischenspeicherung kommt es zum Einstau der Mulde. Bei länger anhaltendem Einstau kann es zu inneren und äußeren Kolmationsprozessen kommen. Aus diesem Grund werden schon bei der Muldendimensionierung Randbedingungen bezüglich der Einstauhöhe definiert. So soll die Dauer des Muldeneinstaus bei einem einjährigen Regenereignis nicht länger als 24 h betragen (DWA-A 138). Um diese Vorgabe einzuhalten haben sich in der Praxis Einstauhöhen, bzw. Muldentiefen von 25-30 cm etabliert.

Das Einstauvolumen von Mulden wird im Laufe seiner Betriebszeit im Wesentlichen durch 2 Prozesse beeinflusst: Einerseits erfolgen partikuläre Stoffeinträge durch die zugeführten Abflüsse. Diese Stoffeinträge, die vor allem als Sediment an der Muldensohle wiederzufinden sind, reduzieren das absolute Muldenvolumen. Andererseits kann es durch Erosion und Trittschäden zu stofflichen Umlagerungen von der Böschung in die Sohle kommen. Diese Prozesse reduzieren weniger das absolute Muldenvolumen, sorgen aber dafür, dass die Volumenfüllstands-Kennlinie sich verschieben und bei denselben Niederschlagsvolumina höhere Wasserstände zu Beginn der Füllung auftreten.

Um diese Effekte zu betrachten, wurden ausgewählte Anlagen vermessen und ihr Volumen berechnet (siehe Kapitel 6.8.3). Die Einstauvolumina von ausgewählten Anlagen sind in den Steckbriefen im Anlagenband mit aufgeführt.

6.8.3 Ex-Post-Analyse - Hydraulischer Zustand

Die digitale und dreidimensionale Abbildung von ausgewählten Muldenstandorten (siehe Abbildung 28) ermöglicht die Berechnung von Einstauvolumina sukzessive der Volumenkenlinie (siehe Abbildung 29). Im Sinne einer Ex-Post-Analyse werden dabei der heutige Zustand der Mulden mit dem geplanten Zustand, bzw. dem Zustand nach der baulichen Vollendung verglichen. Hierzu wurden neben den in LEIREV erfolgten Vermessungen (siehe Kap. 0) auch Baupläne und Revisionsaufmaße digitalisiert und dreidimensional abgebildet. Liegen schwerwiegende Abweichungen zwischen den berechneten Einstauvolumina im Plan-, Bau-, und Ist-Zustand vor, lassen diese sich bereits über die dreidimensionale Visualisierung erkennen. Solche Abweichungen geben Hinweise auf geänderte Baudurchführung.

Darüber hinaus kann man anhand der 3-D-Visualisierung erkennen, ob es Tiefpunkte bzw. schräge Sohlen gibt, die zu einer ungleichmäßigen hydraulischen Belastung der Anlage führen können.

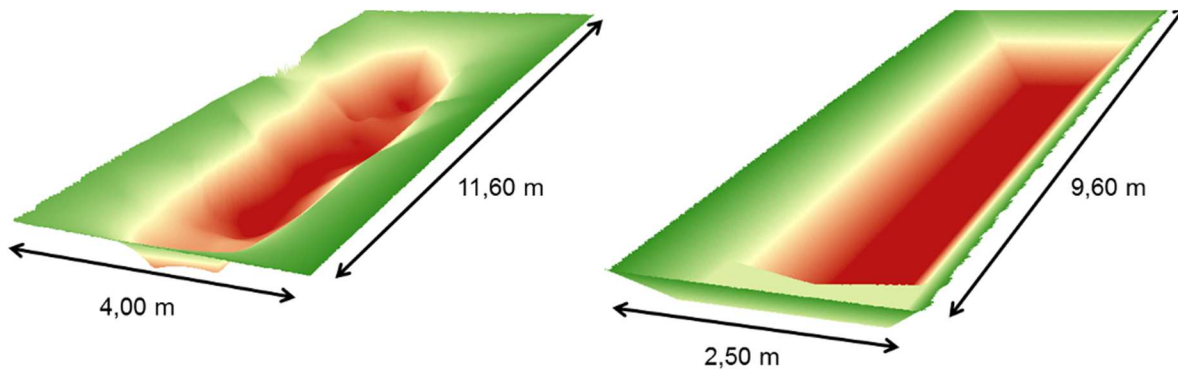


Abbildung 28: Mulde Anlage 8, links Raster aus vermessenen Punkten, rechts Raster aus Planungsunterlagen. Zwischen den beiden Aufnahmen liegt eine Nutzung von 16 Jahren.

Volumenkennlinie

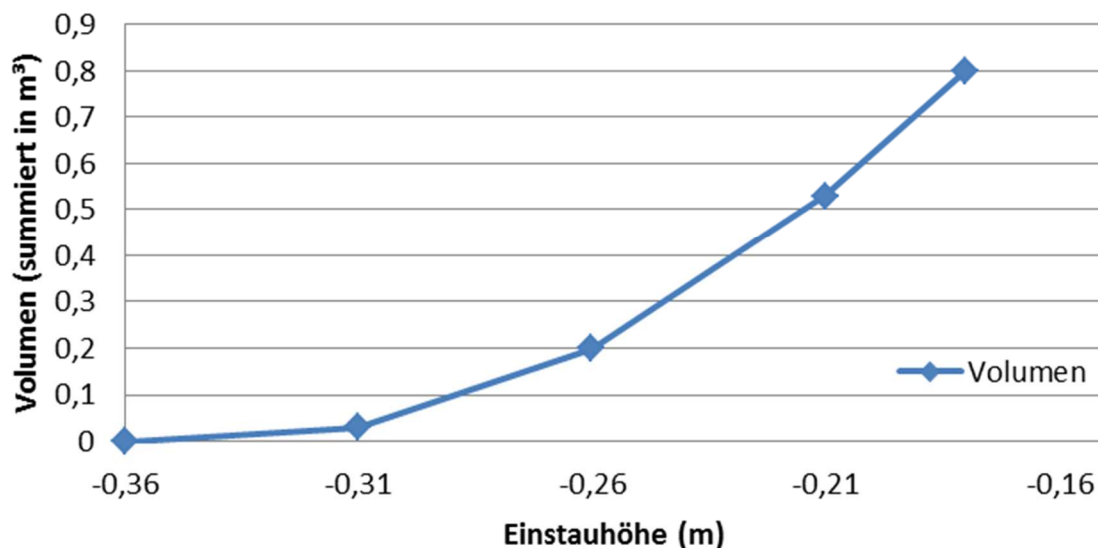


Abbildung 29 Einstauvolumen einer Mulde in Abhängigkeit der Einstauhöhe. Die Berechnung erfolgte auf Basis von digitalisierten Vermessungsdaten

Ergebnisse der Muldenvolumina von Ist- und Planzustand

Die Auswertung der Muldenvolumina erfolgt für den Einstau vom Sohltiefpunkt bis zum Überlauf. Ein direkter Vergleich der Volumina im Ist- und Planzustand, sowie gemäß Revisionsaufmaß ist lediglich für zwei Standorte, Anlage 8 und Anlage 1, möglich (siehe Tabelle 17). Für die übrigen Standorte, für die jeweils nur das aktuelle Muldenvolumen vorliegt kann aber unter Berücksichtigung der angeschlossenen Fläche und der hydraulischen Leitfähigkeit das Betriebsverhalten simuliert werden. Erst die Synthese der Daten zu Volumen, Einzugsgebiet und Sickerpotential ermöglicht die ganzheitliche Bewertung der Anlagenleistungsfähigkeit.

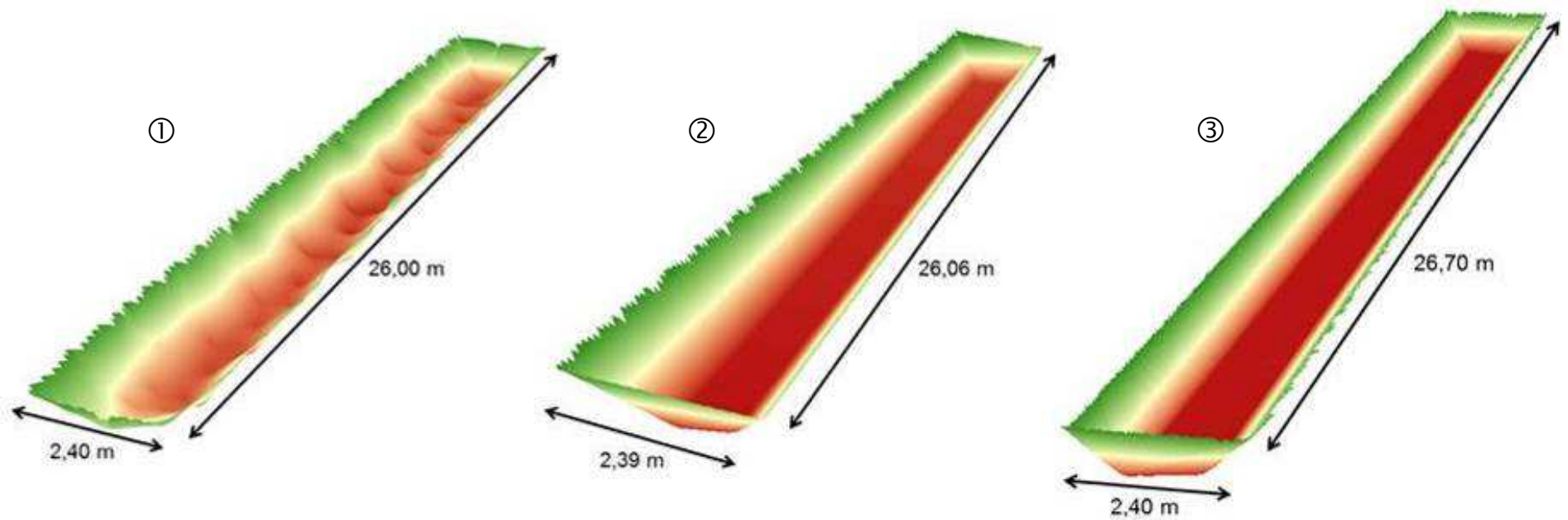


Abbildung 30: Abweichungen des Muldenvolumens am Standort Anlage 1. Volumina basieren von links nach rechts auf Vermessung Ist-Zustand ①, Revisionsaufmaß ② und Bauplanungsunterlagen ③. Unterschiede zwischen ① und ② in Folge von Alterungsprozessen während einer Nutzungsdauer von 17 Jahren. Unterschiede zwischen ② und ③ lassen auf abweichende Bauausführung schließen.

Tabelle 17: Berechnung von Muldenvolumina im Ist- und Plan-Zustand, sowie auf Basis von Revisionsaufmaßen

Anlagen Name	Volumen (m ³)		
	Planzustand	Revisionsaufmaß	Ist-Zustand
Anlage 8	2,29	-	0,80
Anlage 1	10,1	9,32	4,82
Anlage 5b	-	-	3,63
Anlage 5a	-	-	0,5
Anlage 2	-	-	6,25
Anlage 3	-	-	2,46
Anlage 3b	-	-	0,77
Anlage 6a	-	-	2,26
Anlage 6b	-	-	4,28
Anlage 4	-	-	4,24
Anlage 7	-	-	14,54
Anlage 16*	-	-	0,18 – 0,72 *
* kaskadierte Anlage			

Sowohl am Standort Anlage 8, als auch in Anlage 1 weicht das aktuelle Einstauvolumen deutlich vom ursprünglich geplanten Volumen ab (siehe Abbildung 31 und Abbildung 32). Das Defizit beträgt 65% in Anlage 8 und 53 % in Anlage 1. Für letzteren Standort zeigen die Ergebnisse, das gemäß des Revisionsaufmaßes bereits nach der Baudurchführung eine Abweichung vom Planzustand um fast 8% festzustellen ist. Die Ursachen für die erheblichen Volumenveränderungen sind zum einen der Eintrag von Sedimenten, zum anderen aber auch die Erosion der Muldenböschung (siehe Abbildung 33, Abbildung 34 und Abbildung 35).

Diese Prozesse wirken besonders in den linienhaften, schmalen und straßenbegleitenden Mulden, wie Anlagen 1 und 8, reduzierend auf das Volumen. In größeren Mulden, wie sie z.B. in Wohngebieten und bei Gewerbeflächen vorkommen, wirkt die Böschungserosion nur geringfügig auf das Einstauvolumen. Diese Ergebnisse zeigen einen deutlichen Trend auf, müssen jedoch bezüglich ihrer tatsächlichen Abweichung eingeordnet werden, da es Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Muldenvolumina gibt. Dies betrifft vor allem die Berechnungen für den Zustand gemäß Revisionsaufmaß und im IST-Zustand:

- Beim Revisionsaufmaß werden nur Eckpunkte der Geometrie eingemessen. Unebenheiten werden nicht mit erfasst.
- Bei Vermessungen im IST-Zustand werden durch die dichte Punktwolke Unebenheiten mit aufgenommen.

- Durch die Interpolation in ArcScene (siehe Kapitel 5.4.4) können diese Unebenheiten jedoch überschätzt werden, was zu einer Reduzierung des Gesamtvolumens führt.
- Der Messfehler bei Vermessungen wirkt sich auf sehr kleine Räume, wie z.B. Mulden, recht stark aus. So liegt bereits eine Differenz von 4 % vor, wenn bei einer Mulde von 25 cm Einstautiefe die Messlatte 1 cm tief in den Boden gesteckt wird, oder nur aufliegt.

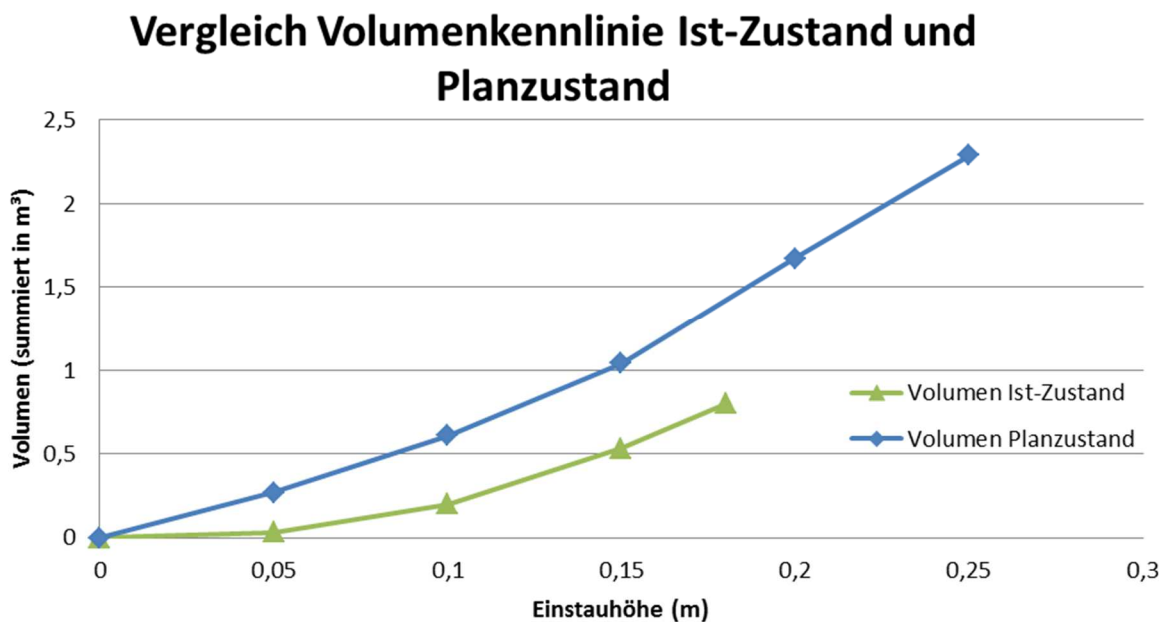


Abbildung 31: Vergleich Volumenkennlinie Ist-Zustand und Planzustand Anlage 8

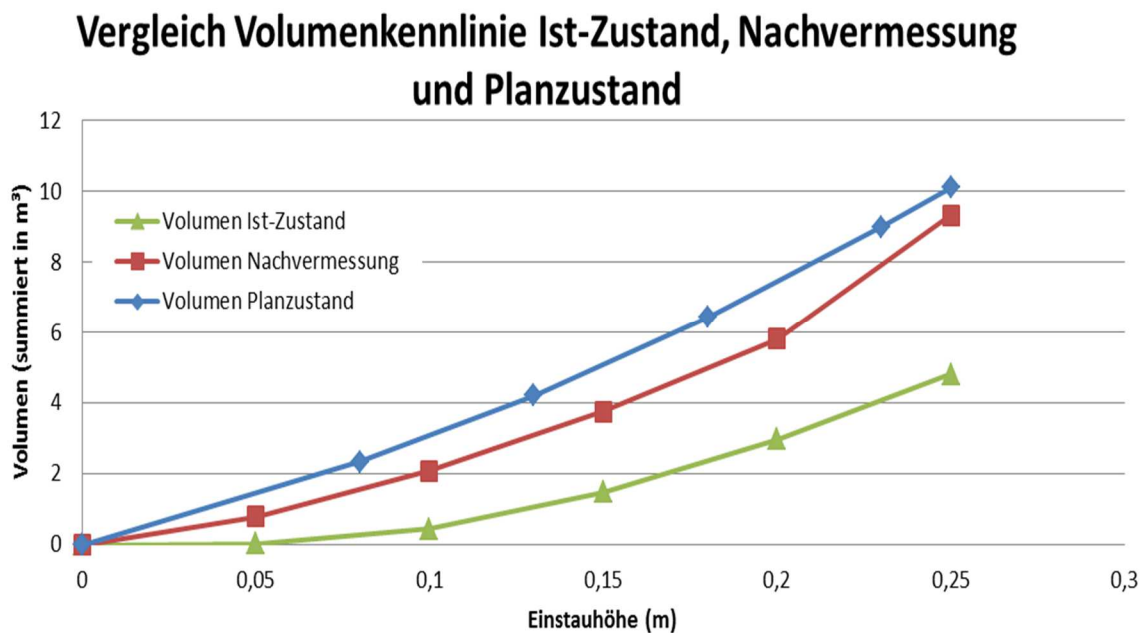


Abbildung 32: Vergleich Volumenkennlinie Ist-Zustand, Nachvermessung und Planzustand Anlage 1

Dennoch ist ein Trend festzustellen, für den es ebenfalls verschiedene Ursachen gibt. So haben auch die Längsaufnahmen gezeigt, dass es im Wesentlichen drei Gründe für die Veränderung der Muldenvolumina gibt

- Sedimenteintrag führt zur Teilfüllung
- Reduzierung der Einstauhöhe durch Erosion oder Setzungen
- Zu kleine bauliche Umsetzung

Dass es zu Erosion und Einträgen kommen kann, zeigen Längs- und Querschnitte für den Standort Anlage 8 (siehe Abbildung 33 und Abbildung 34).

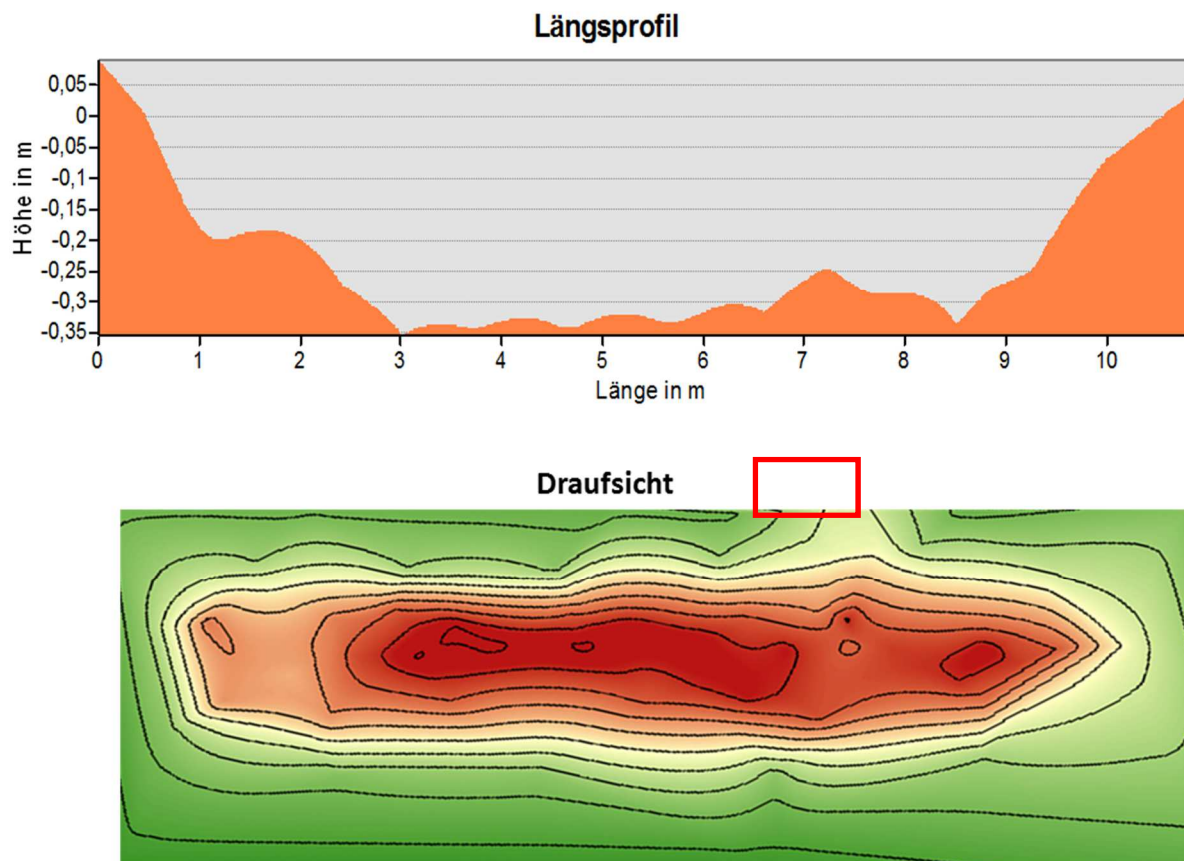


Abbildung 33: Längsschnitt und Draufsicht Anlage 8 im Ist-Zustand (2015). Einlaufbereich ist rot markiert

Der Längsschnitt (Abbildung 33) offenbart, dass es im Bereich des einzigen Zulaufs zu Ablagerungen auf der Muldensohle gekommen ist, die eine Mächtigkeit von ca. 5 cm haben. Durch die resultierenden Unebenheiten kommt es zu einer ungleichmäßigen Beschickung der Mulde. Die Kolmationsgefahr am Muldentiefpunkt steigt.

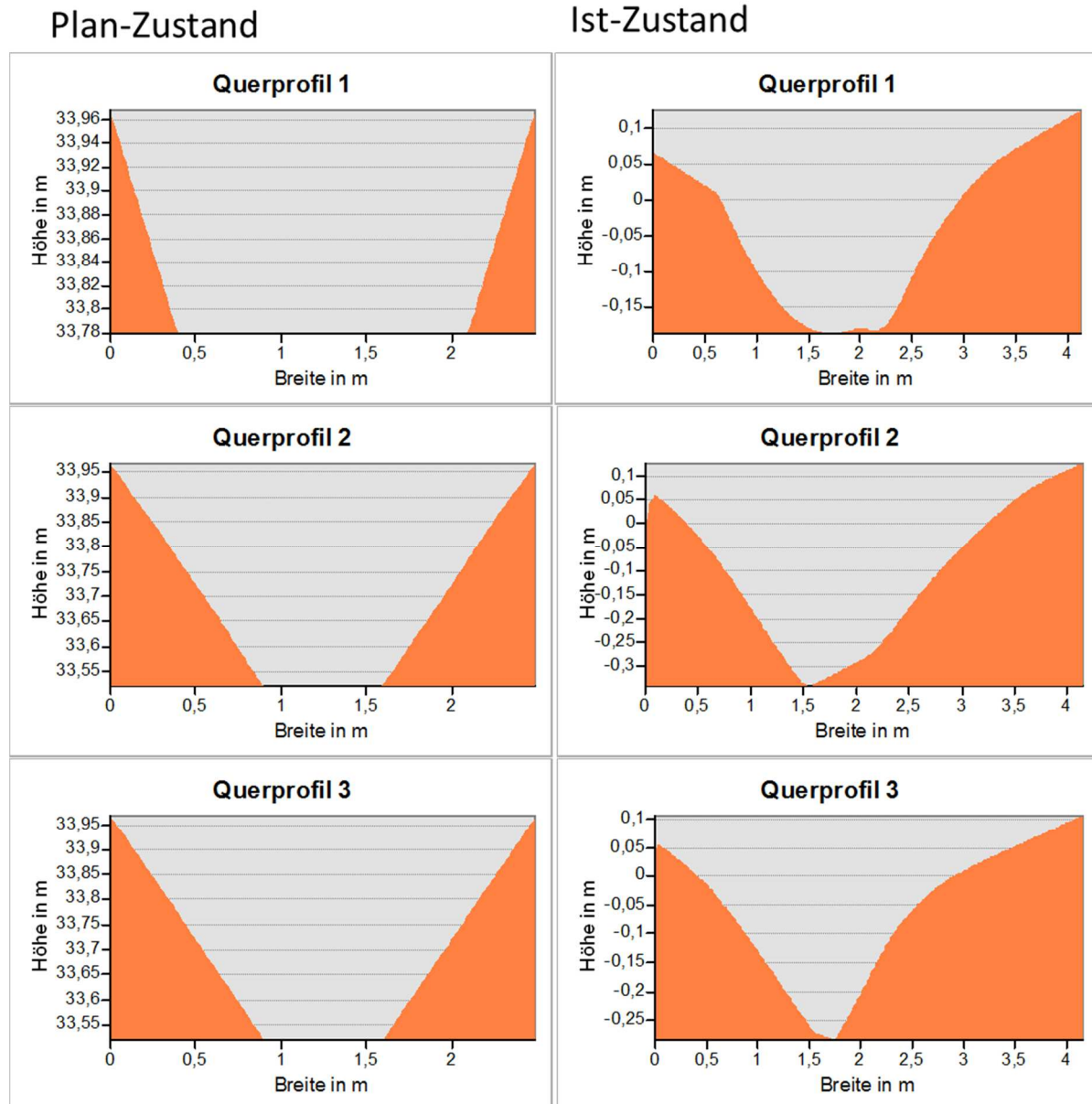


Abbildung 34: Änderung von Muldenquerschnitten am Standort Anlage 8. Die Sohlbreite reduziert sich von 0,6- 1,6 m im Plan-Zustand auf 0- 0,6 m im IST-Zustand. Eine gleichartige Skalierung der Höhen und Breiten ist auf Grund unterschiedlicher Bezugspunkte nicht möglich

Gleichzeitig zeigen die Querschnitte der Mulde (siehe Abbildung 34), dass aus dem ursprünglichen Trapezprofil ein V-Profil geworden ist. Der Böschungfuß hat sich soweit verschoben, dass auf Sohlniveau eine deutliche Reduzierung der Breite festzustellen ist. Diese Änderungen sind auf Erosion zurückzuführen. Ob Vertritt an dieser Stelle die Erosion verstärkt hat, ist nicht festzustellen.

Die Ergebnisse verdeutlichen die bereits beschriebene Erosionsanfälligkeit mit einhergehendem Volumenverlust von schmalen, straßenbegleitenden Mulden (Linielemente).

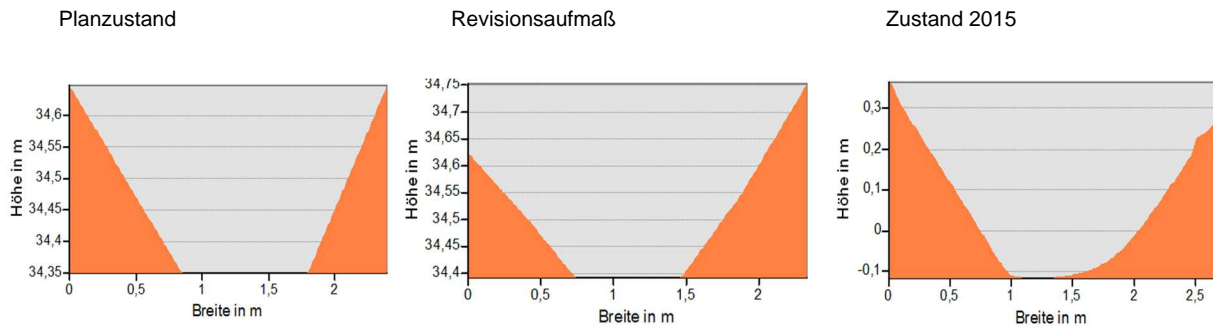


Abbildung 35: Veränderung der Muldenböschung bei 15 Jahren Laufzeit an Anlage 1

6.8.4 Simulation des heutigen Betriebsverhaltens

Sowohl die hydraulische Leitfähigkeit, als auch die Veränderung des Muldenvolumens vermitteln einen ersten Eindruck über das Anlagenverhalten im Ist-Zustand. Inwiefern die Entwässerungsanlagen den Entwässerungskomfort einhalten können, lässt sich jedoch nur bei gemeinsamer Betrachtung des Einstauvolumens, der hydraulischen Leitfähigkeit und der angeschlossenen Fläche sagen. Zu diesem Zweck wurde für die Anlagen, bei denen alle Informationen vorlagen eine Langzeitsimulation (30a) des Anlagenverhaltens im Programm STORM durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationen liefern eine Abschätzung über die derzeitige Überstauhäufigkeit der Anlagen (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Abschätzung der aktuellen Überstauhäufigkeit von ausgewählten Anlagen

Standort – Nr.	Simulierte Überstauhäufigkeit IST-Zustand „n“ (1/a)	$0,2 > n$	$0,2 < n < 1$	$n > 1$
8	1,1			x
1	0,01	x		
5b	1,4			
5a	0,01	x		
2	0,6		x	
3	2,2			
6a	0,27		x	
6b	0,14	x		
4	0,02	x		
7	2,2			x
16	< 2,2			x

Von den 12 untersuchten Anlagen, bei denen die Leistungsfähigkeit über eine Langzeitsimulation nachgebildet werden konnte, liegen vier unter der Überstauhäufigkeit von 0,2/a. Für den Bereich von 0,2-1,0/a, der bundesweit in der Regel als Dimensionierungsvorschrift angeführt wird, können zwei Anlagen zugeordnet werden. Weitere vier Anlagen liegen über einer Überstauhäufigkeit von 1,0/a und somit außerhalb der angestrebten Leistungsfähigkeit.

Zusammenfassende Bewertung

Die hydraulische Leistungsfähigkeit von Versickerungsanlagen wird nicht allein durch die Versickerungsfähigkeit des Bodens bestimmt. Erst die Berücksichtigung des Muldenvolumens und der angeschlossenen Fläche ermöglicht die ganzheitliche Bewertung. Letzterer Bewertungsschritt kann auf Grund der Datenlage nur für wenige Standorte durchgeführt werden.

Sowohl Anlagen mit sandgeprägten Versickerungsraum, als auch Anlagen mit bindigen Böden (Sand/ Lehm) im Versickerungsraum zeigen größtenteils eine Versickerungsleistung, die nach den gängigen Dimensionierungsvorschriften (DWA-A 138) ausreichend sind.

Durch abweichende Bauausführung und Alterungsprozesse, die vor allem auf Erosion und Stoffeinträge zurückzuführen sind, gibt es eine Tendenz zum Verlust von Retentionsvolumen. Hierdurch wird das Gleichgewicht zwischen Zufluss, Versickerung und Zwischenspeicherung gestört. In der Folge kann es zu längeren Einstauphasen kommen, und damit zu einer eigen dynamischen Verschlechterung der hydraulischen Leistungsfähigkeit.

Die Untersuchungen zeigen aber, dass durch die generell guten Standortbedingungen der Versickerungsanlagen die mögliche Übernutzung (v.a. Stoffeinträge, Vertritt und überhöhte Anschlussgrade) zum Teil ausgeglichen werden kann.

6.9 Auswertung der Untersuchungen zu Wartung und Betrieb

Es wurden insgesamt 30 Anlagen intensiv aufgenommen, in anlagenbezogenen Steckbriefen (siehe Anlagenband) dokumentiert und ausgewertet. Versickerungsanlagen mit belebter Oberbodenzone unterliegen, da sie aus künstlich profiliertem Boden bestehen insbesondere in der ersten Zeit nach der Erstellung nicht zu vermeidenden Veränderungsprozessen (v.a. Setzungen). Diese werden bei der Planung und Erstellung durch entsprechende Sicherheiten (Zuschläge bei der Höhenausbildung, Anordnung von Tiefborden) vorausschauend berücksichtigt. Für Landschaftsbauwerke ist darüber hinaus eine „Fertigstellungspflege“ im ersten Betriebsjahr gemäß DIN 18917 und 18918 obligatorisch.

In dieser Zeit werden Ausfälle beim Bewuchs und Veränderungen bei der Profilierung (z.B. in Folge Setzung oder Erosion) bei regelwerkskonformer Planung, Ausschreibung, Erstellung und Inbetriebnahme korrigiert. Daran schließt sich gemäß DIN 18919 die Entwicklungspflege an, die der Erzielung eines funktionsfähigen Zustands dient (2 bis 5 Jahre).

Nach Erreichen des funktionsfähigen Zustands setzt die Unterhaltungspflege ein, die der Erhaltung des erreichten Zustands dient (mind. ein Pflegegang pro Jahr).

Insofern ist es auch vor diesem Hintergrund sinnvoll, Anlagen zu untersuchen, die auch nach Auslaufen der Fertigstellungspflege eine bereits mehrjährige Betriebsphase durchlaufen haben.

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus der Untersuchung zu Wartung und Betrieb (siehe Tabelle 7) zusammengefasst dargestellt und erläutert. Die Ergebnisse basieren auf mehrmaligen Ortsbegehungen, Schachtungen und punktuellen Aufmaßen der jeweiligen Anlagen. Die Begehungen wurden zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt, um die Zustandsentwicklung im Jahresverlauf zu erheben.

Die Auswertung erfolgte systematisch unter den in Tabelle 7 definierten Kriterien. Dabei werden die festgestellten Schadensbilder, die damit einhergehende Gefährdung (Risikobewertung) sowie die bei fortgesetzter Trendentwicklung zu erwartenden Folgeschäden orientiert an den in Tabelle 7 definierten Gefährdungspotenzialen tabellarisch zusammengestellt und erläutert. Die Definitionen der Risikobewertung wurden den vor Ort gegebenen Gefährdungspotenzialen entsprechend wie folgt festgelegt:

Tabelle 19: Kriterien zur Risikobewertung gemäß Gefährdungspotential vor Ort

Risikobewertung	Gefährdungspotenzial
Sehr hoch	Funktionsmängel bei der offenen Ableitung mit der Gefahr direkter Gebäudevermögens / -überflutung
Hoch	grundlegende Funktionsmängel der Entwässerungsanlage bei Retentions- und Versickerungsleistung an der Entwässerungsanlage
Mittel	punktueller Funktions- und Zustandmängel an der Entwässerungsanlage
Gering	punktueller Zustandmängel mit geringer Auswirkung auf die entwässerungstechnische Funktionsfähigkeit der Versickerungsanlage
Sehr gering	punktueller Zustandmängel ohne Auswirkung auf die entwässerungstechnische Leistungsfähigkeit der Versickerungsanlage

In Abbildung 36 ist die quantitative Verteilung (Häufigkeiten) von Schadensbildern/Mängeln differenziert nach den Kriterien aus Tabelle 7 im Überblick dargestellt.

Dabei fällt auf, dass mehr als die Hälfte der untersuchten Anlagen von Erosionsschäden und Ausspülungen, Materialermüdungen sowie Sedimentablagerungen betroffen sind.

Bei weniger als einem Viertel der Anlagen treten Setzungen und die Versickerungsanlage negativ beeinflussende Nutzungskonflikte und Nutzungs- und Gestaltungsveränderungen auf.

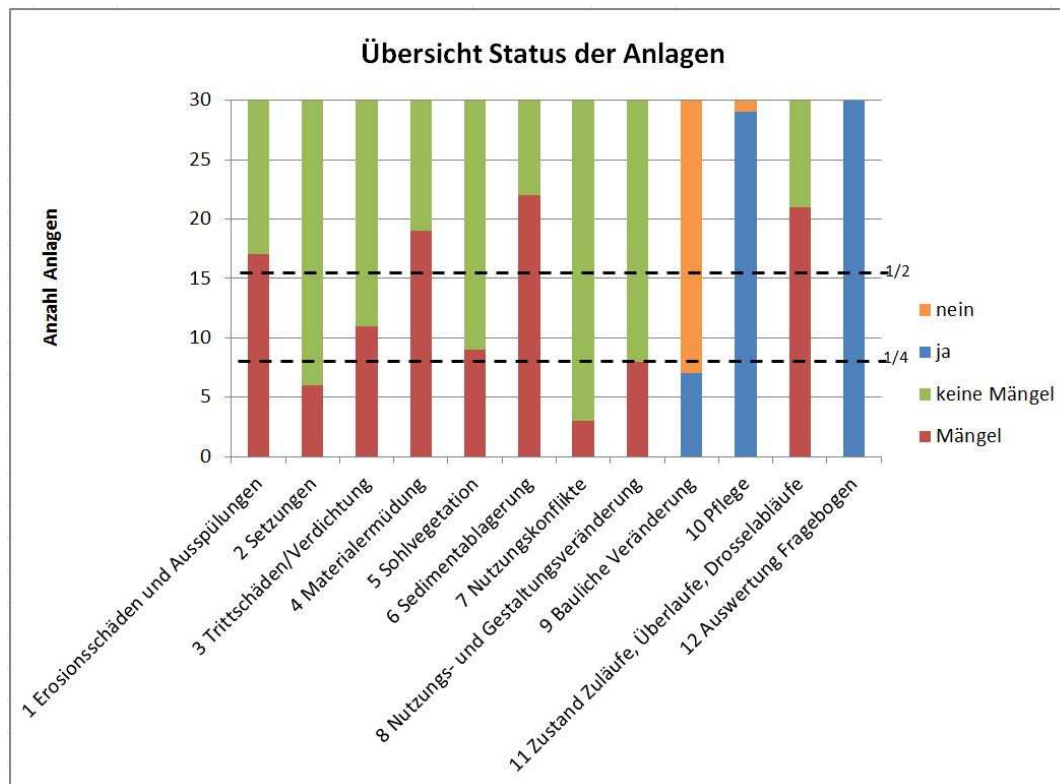


Abbildung 36: Übersicht Status der Anlagen

Versickerungsanlagen mit belebtem Oberboden gliedern sich in eine Reihe von Betriebspunkten an denen die in Tabelle 7 aufgeführten betrieblichen Prozesse in jeweils spezifischer Art und Weise stattfinden. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse bezogen auf die verschiedenen Mängelkategorien erläutert und differenziert nach:

- Betriebspunkt
- Schadensbild
- Risikobewertung und
- Trendentwicklung/zu erwartende Folgeschäden

in Tabellenform zusammengefasst dargestellt und erläutert. Eine grafische Übersicht der gesamten statistischen Auswertung geben Abbildung 37 und Abbildung 38 wieder.

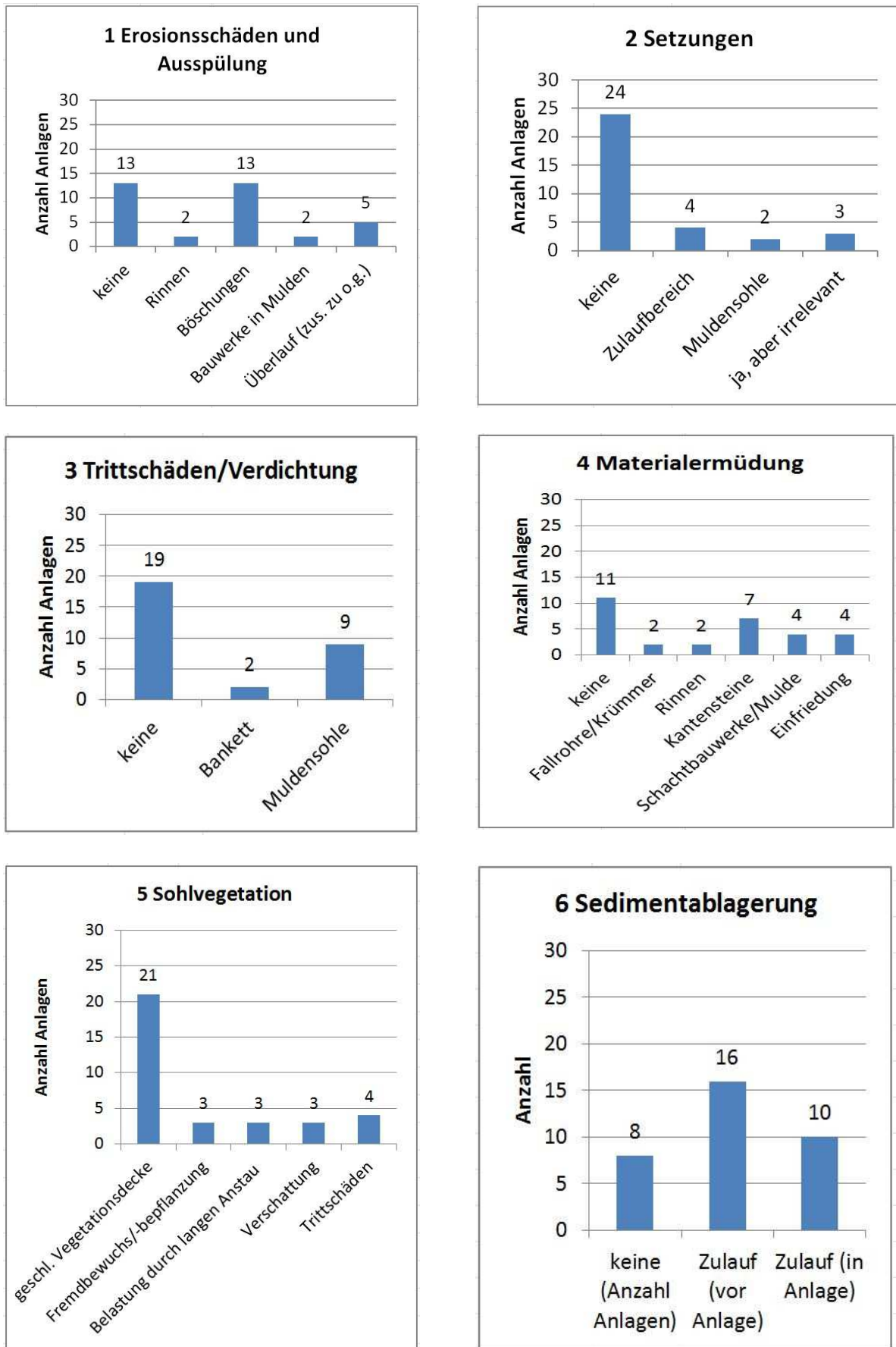


Abbildung 37: Auswertung der Untersuchungen zu Wartung und Betrieb (Erosionsschäden; Setzungen; Trittschäden, Verdichtung; Sohlvegetation und Sedimentablagerungen)

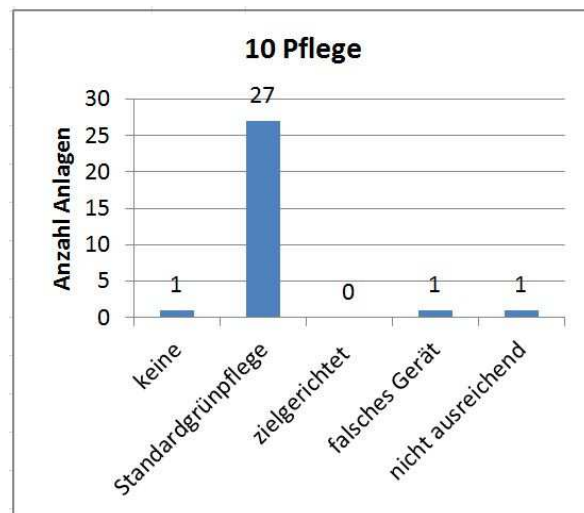
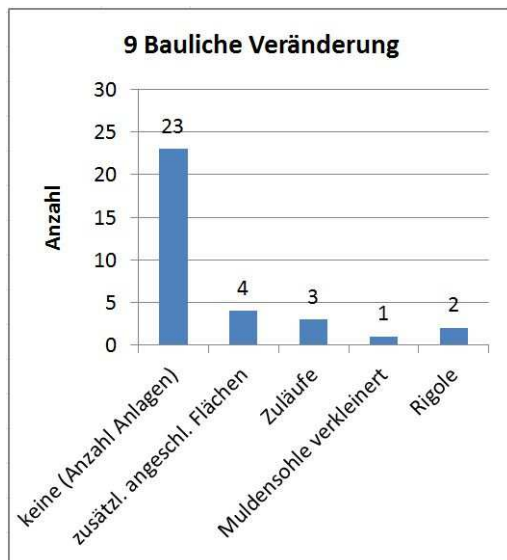
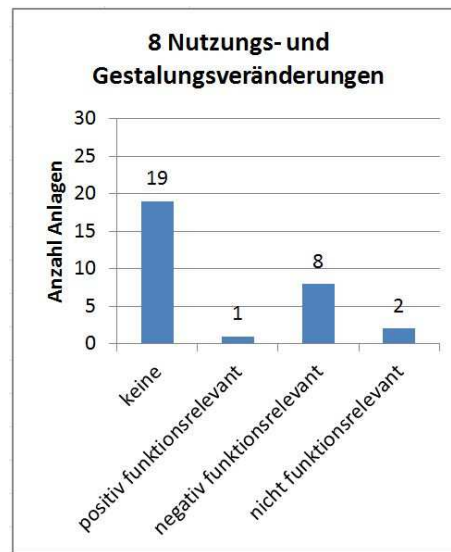
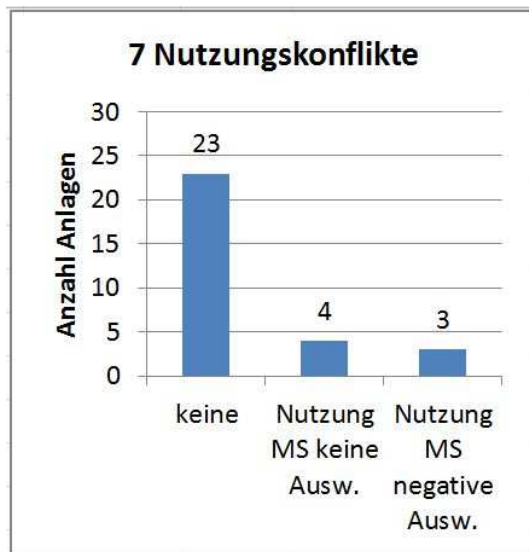


Abbildung 38: Auswertung der Untersuchungen zu Wartung und Betrieb (Nutzungskonflikte, Nutzungs- und Gestaltungsänderung, Bauliche Veränderung, Pflege)

6.9.1 Erosionsschäden und Ausspülungen

Definition:

- *Abrutschungen, Trittschäden und Ausspülungen an Muldenböschung*
- *durch Regenwasser verursachte Unterspülungen von Pflasterflächen, Ableitungselementen (Pflaster-, Betonstein-, Rasenrinnen), Überläufe Mulden*

Mit 13 Anlagen von 30 zeigt knapp die Hälfte keine Erosionsschäden oder Ausspülungen. Am häufigsten zeigen sich Erosionsschäden an (Mulden-) Böschungen (siehe Abbildung 37) wie sie auch in Kapitel 5.8.2 dargestellt sind. Folge von Ausspülungen ist z.B. das Absacken offener Rinnen bei dem die planmäßige Ableitung des Niederschlagswassers nicht mehr sichergestellt ist. Schäden dieser Kategorie treten insgesamt bei weniger als der Hälfte der untersuchten Anlagen auf (siehe Abbildung 37).

Häufig sind dies Schäden an oberflächigen Kaskaden- und Notüberläufen (bzgl. Notüberläufe von Mulden in Rigolen siehe Kapitel 6.10.9). Weniger häufig sind Schäden an Rinnen und Bauwerken in Mulden.

Tabelle 20 fasst die Schadensbilder, Folgeschäden, sowie die Risikobewertung zu Erosionsschäden und Ausspülungen zusammen.

Tabelle 20: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Erosionsschäden

Betriebspunkt	Schadensbild	Risikobewertung	Trendentwicklung/ Folgeschäden
Rinne an Gebäudesockel	wild abfließendes NW	sehr hoch	Gebäudevernässung, Überflutung baul. Anlagen
Böschungen	Vegetationsausfall und Erosion	mittel	Verlust an Muldensohlfläche und –volumen durch erodiertes Böschungsmaterial
Bauw. in Mulde	fortschreitender Verlust Anstauhöhe	sehr hoch	Verlust Retentionsvolumen
Überlauf	fortschreitender Verlust Anstauhöhe	hoch	Verlust Retentionsvolumen

6.9.2 Setzungen

Definition:

Absenkung von Muldensohle, -überläufen, Pflasterflächen und Ableitungselementen

Bei einem Viertel der Anlagen treten Setzungsschäden auf (siehe Abbildung 37). Von den auftretenden Schäden, die überwiegend den Zulaufbereich betreffen, ist die Hälfte allerdings nicht funktionsrelevant.

Hohes Gefährdungspotenzial ist bei Rinnen oder Fallrohranschlüssen direkt am Haus, die in offene Rinnen münden, gegeben (Kellerwandvernässung).

Setzungen im Bereich der Ableitungsbauwerke (offene Gerinne) und Versickerungsanlagen (Muldenüberläufe und -begrenzungswälle) verändern die Abflusswege des Niederschlagswassers und entwickeln oftmals eine Türöffnerfunktion für nachfolgende Erosions- und Ausspülungsschäden, die die Gefahr der Gebäudeverwässerung bergen (Wasser steht vor den Kellerwänden und versickert dort). Durch Setzungen entstehen Tiefpunkte und es werden unplanmäßige Richtungsänderungen der Abflüsse verursacht (wild abfließendes Wasser, Überflutung) - siehe Fotos Anlage 37, Anlage 20, Anlage 13 in Steckbriefen (Anhang).

Setzungen bei Versickerungsmulden bergen die Gefahr, dass es insbesondere in Gefällelagen (Wallausbildung an den Fußpunkten) zu einem Verlust an Rückhaltevolumina kommt. Ergeben sich dadurch andere Überlaufstellen, als die an den befestigt erstellten Muldenüberläufe, besteht dort die Gefahr nachfolgender Erosionsschäden (vgl. Anlage 20, Anlage 13). Setzungen im Tiefbau können nach Abschluss der Baumaßnahme durch dynamische Belastung (z.B. Verkehr), statische Belastung (z.B. Massivbauelement) oder Eigenlast, die eine Verformung des Bodensubstrates nach sich ziehen, hervorgerufen werden. Setzungen im Landschaftsbau treten vor allem in Bereichen mächtigerer Auffüllungen auf. Das Eindringen von Wasser in inhomogene, schlecht verdichtete oder unverdichtete Auffüllungen kann Setzungsprozesse neu auslösen bzw. verstärken oder zu unterirdischer Erosionen führen.

Setzungen wurden im Bereich der als Erdbauelemente erstellten Versickerungsanlagen an:

- Rinnen und Flächenbefestigungen (Pflasterung)
- Muldenwällen
- Muldensohlen
- Schächten und Schachteinfassungen festgestellt (siehe Abbildung 37).

Tabelle 21 fasst die Schadensbilder, Folgeschäden, sowie die Risikobewertung zu Setzungen zusammen.

Tabelle 21: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Setzungen

Betriebspunkt	Schadensbild	Risikobewertung	Trendentwicklung/ Folgeschäden
Rinne/ Pflasterflächen	wild abfließendes NW	sehr hoch	Gebäudevernässung, Überflutung baul. Anlagen
Muldensohle	Ungleichmäßige hydraulische Belastung. Ausfall der Vegetation und Kolmation	hoch	Verringerung versickerungswirksamer Fläche
Muldenwälle	Absenkung Anstauhöhe	hoch	Verlust Retentionsvolumen, weitere Erosionsprozesse
Schächten und Schachteinfassungen	Reduzierung des Einstauvolumens	mittel	Verlust von Retentionsvolumen

6.9.3 Trittschäden und Verdichtung

Definition:

Entstehen durch Überfahung mit Kfz, Mäh- und Pflegegeräte, in der Nähe befindliche Bautätigkeiten sowie informelle Fußwege

Zwei Drittel der Anlagen zeigen keine Trittschäden bzw. Verdichtungen (siehe Abbildung 37). Bei den Anlagen, an denen Schäden festgestellt wurden, sind sowohl Böschung als auch die Muldensohlen betroffen. Ursachen sind hier:

- im Wohnbereich Bespielen und informelle Fußwege,
- im Stellplatzbereich (Anlage 30, Anlage 42) fehlende Abgrenzung/Markierung der Muldenbereiche (Überfahung bei Schneedecke), unzureichender Ausstiegsbereich des Beifahrers: Austritt direkt auf die Muldenböschung nicht ausreichende Schleppkurven, LKW-Ein- und Ausfahrten sowie längsparkende PKW bei fehlendem Bankett (Anlage 6, Anlage 7, besser Anlage 1/2 und Anlage 16) und
- bei großflächigen Versickerungsmulden (Anlage 20) der Einsatz schwerer Mähmaschinen bei feuchter Witterung (Fahrspuren).

Die ermittelten Trittschäden und Verdichtungen durch Personen (Bespielen, Trampelpfade, versehentliches Überfahren) weisen eine nur geringere Risikowirkung in Bezug auf Betrieb und Funktionserfüllung auf. Allerdings ist das Abrutschen des Böschungsbereiches auch mit

Volumenverlusten verbunden, die zu häufigeren Überläufen führen können. Bei der unsachgemäßen Pflege der Versickerungsanlagen unter Einsatz schwerer Geräte bei feuchten Bodenverhältnissen dagegen, werden flächendeckend und regelmäßig weite Teile der Sohlflächen verdichtet. Dies zieht, insbesondere bei bindigen Böden eine irreversible Verringerung der Versickerungsleistung nach sich, die zum Funktionsverlust der Anlage führen kann und deshalb ein hohes Risiko für die Betriebssicherheit darstellt. Tabelle 22 fasst die Schadensbilder, Folgeschäden, sowie die Risikobewertung zu Trittschäden und Verdichtung zusammen.

Tabelle 22: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Trittschäden und Verdichtung

Betriebspunkt	Schadensbild	Risikobewertung	Trendentwicklung/ Folgeschäden
Muldenwall/-böschung	Absenkung	hoch	Verlust Retentionsvolumen
Muldensohle	hochfrequentierte Spielbereiche	mittel	punktueller bis flächiger Verdichtung, Ausfall Vegetation und Kolmation
Muldensohle	Trampelpfade	gering	punktueller/linearer Verdichtung, Ausfall Vegetation und Kolmation
Muldensohle	Spurrillen in Teilbereich (PKW)	gering	punktueller/linearer Verdichtung, Ausfall Vegetation und Kolmation
Muldensohle	Spurrillen auf gesamter Sohlfläche (Mahd mit schwerem Gerät)	hoch	flächiger Verdichtung, Ausfall Vegetation und Kolmation

6.9.4 Materialermüdung und -schäden an Bauteilen

Definition:

Schäden an Schacht-, Überlauf- und Drosselbauwerken, Ableitungselementen und Einfriedungen

Zwei Drittel der Anlagen weisen Materialermüdungen auf (siehe Abbildung 37). Meistbetroffen sind hier Kantensteine mit Abplatzungen und umgefahrene Hochborde im Gewerbe (Anlage 21). Darauf folgen zu gleichen Teilen Materialermüdungen an Einfriedungen sowie Schacht- und Muldenbauwerken.

Versickerungsanlagen mit belebten Oberboden regenerieren sich im Gegensatz zu sonstigen baulichen Anlagen in der Vegetationsphase selbsttätig. Insofern treten einige der sonst im

Bauwesen anzutreffenden Materialermüdungsprozesse hier nicht auf. Einfassungen zum Schutz vor Befahren (auf Lücke gesetzte Hochborde), Rinnenelemente, Randeinfassungen und Überläufe aus Beton- oder Naturstein jedoch unterliegen den im Bauwesen gebräuchlichen Alterungsprozessen.

Nach 10-20 Jahren Betriebszeit sind hier erste signifikante Ermüdungserscheinungen festzustellen. Schächte und Rohrleitung waren im Allgemeinen in gutem Zustand. Allerdings konnte beobachtet werden, dass die Schächte oft nicht regelmäßig gewartet werden. Die Abdeckungen wurden zum Teil lange nicht mehr geöffnet. Eine Reihe von Schächten der Drosseleinrichtungen waren nach ca. 20 Jahren Standzeit vollständig von Gras überwachsen (siehe Abbildung 39), was darauf schließen lässt, dass diese über einen längeren Zeitraum nicht inspiert wurden. Die Kamerabefahrungen haben gezeigt, dass die Drainagerohrleitungen intakt sind und nur leichte Wurzeleinwüchse aufwiesen (Abbildung 40).



Abbildung 39: Mit Gras zugewachsene Schachtabdeckung eines Drosselschachts im Bereich der Mulden

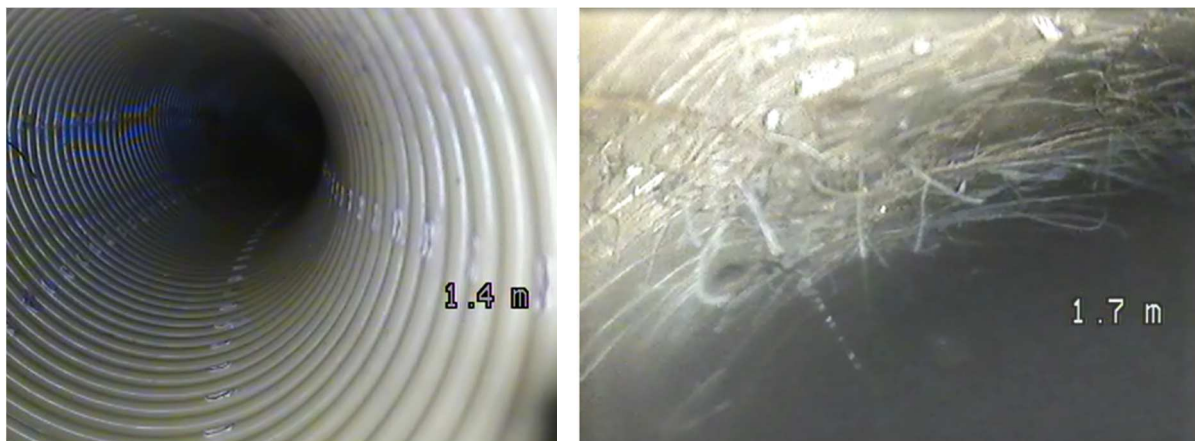


Abbildung 40: Aufnahmen von Drainagerohren mit der Inspektionskamera. Schadensfrei (links), Einwuchs von Feinwurzel (rechts)

Allerdings wurden von Betreibern Anlagen benannt, bei denen es zu erheblichem Wurzeleinwachsen in den Drainagerohren gekommen ist. Die Tabelle 23 fasst die Schadensbilder, Folgeschäden, sowie die Risikobewertung zu Materialermüdungen an.

Tabelle 23: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Materialermüdung

Betriebspunkt	Schadensbild	Risikobewertung	Trendentwicklung/ Folgeschäden
Fallrohrkrümmer (Endstück)/Fallrohr	Ablösung Krümmer und Rohrschellen, RW-Ableitung in Rinne nicht gesichert	sehr hoch	Gebäudevernässung, Überflutung baul. Anlagen
Rinne	ausgespülte Fugen und Bettung	sehr hoch	Gebäudevernässung
Hochbord auf Lücke	Anprallschäden an Hochborden	sehr gering	–
Muldenabgrenzung aus Holz	Verrottet, nicht mehr vorh.	gering	Überfahung durch PKW (v.a. bei geschl. Schneedecke)
Holzeinfassung Überläufe	Verrottet, lückenhaft	hoch	Verlust Retentionsvolumen
Schächte	Überwachsen	gering	Kontrollverlust
Rohrleitungen (IPS)	Wurzeleinwuchs, Sedimentablagerung	mittel	Querschnittsverringering

6.9.5 Vegetation

Definition:

Stellenweise oder vollständige Schädigung der geschlossenen Vegetationsdecke, Verbuchung bzw. Verwaldung infolge fehlender Pflegemaßnahmen

Die Vegetationsentwicklung wird bei Versickerungsanlagen mit belebter Oberbodenzone von den Feuchte- und Nährstoffbedingungen geprägt. Nach der Raseneinsaat passt sich die Vegetation über Sukzession den örtlichen Standortbedingungen an. Die Spielräume der Sukzession sind umso weiter gefasst, je extensiver die Pflege gehandhabt wird.

Bei der Befragung der Betreiber wurde ermittelt, dass der größte Teil der Mulden mit Rasen bepflanzt ist.

Versickerungsanlagen mit belebten Oberboden sind ohne schützende, gut durchwurzelte Vegetationsdecke weder standsicher (Erosionsgefahr der Muldenbegrenzungswälle, -überläufe) noch betriebssicher (Verlust von Porenstruktur und Verringerung der Wasserdurchlässigkeit der belebten Oberbodenzone (Kolmation)).

Eine auch nur punktuelle Schädigung der Vegetationsdecke wurde bei weniger als einem Drittel der Anlagen festgestellt.

Als Ursachen des Ausfalls der Vegetation wurde in jeweils 3 bzw. 4 der 30 untersuchten Anlagen

- Aufwuchs von Brombeerstauden, Gehölzen etc. massive Verschattung durch große Bäume und damit einhergehender Laubfall (Anlage 21)
- künstliche Verdichtung in Folge falscher Wartung (Fahrspuren) (Anlage 20) und

Trittschäden festgestellt. (siehe Abbildung 37). Tabelle 24 fasst die Schadensbilder, Folgeschäden, sowie die Risikobewertung zu Sohlvegetation zusammen.

Tabelle 24: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Sohlvegetation

Betriebspunkt	Schadensbild	Risikobewertung	Trendentwicklung/ Folgeschäden
Muldenzulaufbereich	Ausfall Vegetationsdecke durch eingeschwemmte mineralische Sedimente und organische Stoffe (Laub)	gering	Beschränkung auf Einlaufbereich: Regeneration Vegetationsdecke in Sommermonaten, Entnahme im Rahmen der Pflege
Böschung	Reduzierte Vegetation	mittel	Beschränkung auf Einlaufbereiche
Muldensohle	Ausbildung feuchteresistenter Vegetation	gering	höherer Pflegeaufwand (Mahd und Entnahme Mahdgut)
Muldensohle	Aufwuchs von Wildstauden (Brombeere)	mittel	partielle Verschattung, höherer Arbeitsaufwand bei Mahd
Muldensohle	Aufwuchs von kleinen und mittleren Gehölzen (U ca. 40 cm)	hoch	partielle Verschattung, moderater Laubfall, Kolmation, Verstopfung von Zulaufrohren
Muldensohle	Aufwuchs von Großgehölzen (U ca. 60 cm)	hoch	Großflächige Verschattung, massiver Laubfall, Kolmation
Muldensohle	Veränderung der Abflusswegen, Überlastung tiefer gelegener Muldensegmente	mittel	Kolmation der Muldensohle, langanhaltende Wasserstände
Muldenwall/Überlauf	Absenkung durch Gehölzaufwuchs	hoch	Verlust Retentionsvolumen, Überflutungsgefahr

6.9.6 Sedimentablagerung

Definition:

Ablagerung von Partikeln: Zulaufzonen im Zulaufbereich der Mulden, in breitflächigem Zulaufbereich (Wulstbildung), Einlaufbereich oder weiterem Sohlenbereich der Mulde

Bei über zwei Drittel der Anlagen wurden Sedimentablagerungen an diffusen und dezentralen Zuleitungen und/oder in den Ableitungselementen, punktuellen Zuläufen und in der Muldensohle festgestellt (siehe Abbildung 37). Dabei fällt auf, dass je länger der Fließweg bis zur Mulde ist, sich umso mehr Sedimente in den Ableitungselementen ablagern und nicht mehr bis in die Versickerungsanlage gelangen.

Sedimentablagerungen behindern bei den Ableitungselementen:

- Rinnen,
- punktuelle,
- breitflächige/diffuse Zuläufe,
- sohlgleiche Grundleitungseinläufe

den ungehinderten Abfluss in die Versickerungsanlage.

Sedimentablagerungen ziehen genauso wie Setzung und Erosion eine ungleichmäßige hydraulische Belastung der Muldensohle nach sich. Tabelle 25 fasst die Schadensbilder, Folgeschäden, sowie die Risikobewertung zu Sedimentablagerung zusammen.

Tabelle 25: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Sedimentablagerung

Betriebspunkt	Schadensbild	Risikobewertung	Trendentwicklung/ Folgeschäden
Ableitungselemente (Rinnen)	Sedimentablagerung fixiert durch Pflanzenbewuchs	hoch	wild abfließendes NW, Überflutung baulicher Anlagen
dezentrale Zuläufe (Hochborde auf Lücke)	Sedimentablagerung fixiert durch Pflanzenbewuchs.	mittel	bei 0 % Straßenlängsgefälle Rückstau, verzögerter Abfluss, bei >0 % keine gleichmäßige Belastung Muldensegmente
Diffuser Zulauf (über Schulter)	Wulstbildung durch Rasenaufwuchs	hoch	bei 0 % Straßenlängsgefälle Rückstau, verzögerter Abfluss, bei >0 % ungleichmäßige Belastung Mulden Segmente (Kaskade), Belastung von Tiefpunkten
punktuelle Einlauf (oberhalb Sohle)	flächige Sedimentablagerung fixiert durch Pflanzenbewuchs (Aufhöhung)	gering (sichtbar!)	Volumenverlust vernachlässigbar, allerdings kann bei erhöhter Belastung eine Verringerung der Versickerungsleistung auftreten
punktuelle Einlauf (sohlgleich)	flächige Sedimentablagerung fixiert durch Pflanzenbewuchs (Aufhöhung)	hoch (unsichtbar!)	Rückstau bis hin zu Verstopfung des Rohrzulaufs

Vor diesem Hintergrund kommt einer regelmäßigen Entnahme von Sedimentablagerungen und Verkräutung an allen Ableitungselementen eine hohe Priorität zu.

6.9.7 Nutzungskonflikte

Definition:

Mehrfachnutzung von Mulden ohne bauliche oder gestalterische Veränderung (z.B. als Grünfläche für Aufenthalt)

Die Untersuchung von Mehrfachnutzungen und der sich daraus ergebenden Nutzungskonflikte hat aufgezeigt, dass sich diese in temporäre und permanente Konflikte unterscheiden lassen. Insgesamt treten bei jeder vierten Anlage Nutzungskonflikte auf. Dabei wurde lediglich in nur jedem zweiten Fall ein negativer Einfluss auf die Funktionsfähigkeit festgestellt. Tabelle 26 fasst die Schadensbilder, Folgeschäden, sowie die Risikobewertung zu Nutzungskonflikten zusammen

Tabelle 26: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Nutzungskonflikten

Betriebspunkt	Schadensbild	Risikobewertung	Trendentwicklung/ Folgeschäden
Rinne	Abstellen von Blumentöpfen, Gartengeräten etc.	mittel (sichtbar!)	Abflussbehinderung, Gebäudevernässung, Überflutung baul. Anlagen
Rinne zu Mulde	unqualifizierter Umbau Rinne zu Grundleitung	mittel	Auskolkung Rohrauslässe, Erosion im Einlaufbereich
Muldensohle	Trampelpfad	gering	punktueller Verdichtung, Ausfall Vegetation und Kolmation
Muldensohle	Temporäre Nutzung Baustelleneinrichtung	hoch	Flächige Verdichtung, Ausfall Vegetation, Kolmation, Verlust Rückhaltevolumen
Muldensohle	Erweiterung bef. Flächen	hoch	Überlastung Versickerungsanlagen

Temporäre Nutzungskonflikte

Temporäre Nutzungskonflikte wurden in Baugebieten festgestellt, deren öffentliche Erschließungsanlagen inkl. straßenbegleitenden Versickerungsanlagen bereits erstellt, in denen zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht alle Baugrundstücke bebaut waren (Abbildung 41). Die dem Grundstück vorgelagerte Versickerungsmulde wird für die Bauzeit als Fläche für die Baustelleneinrichtung (Baumaterial, Container etc.) genutzt und in ihrer Oberflächenbeschaffenheit sowie Profilierung stark verändert. Nach Abschluss der Baumaßnahmen wurde die betroffene Mulde grob gesäubert.



Abbildung 41: Baustelleneinrichtung in Versickerungsmulde, Anlage 7

Permanente bzw. dauerhafte Nutzungskonflikte

Dauerhafte Nutzungskonflikte stellen vor allem die in Kapitel 6.9.3 Trittschäden und Verdichtung aufgezeigte Inanspruchnahme der Muldenfläche als fußläufige Wegequerungen und erweiterte Stellplatzbereiche für Fußgänger dar (Abbildung 42). Trotz hohen Überbauungsgrades fallen die Schäden bei Begehungen zwar sofort in den Blick, stellen mit einem Anteil im sehr niedrigen einstelligen Prozentbereich an den insgesamt zur Verfügung stehenden Versickerungsflächen bei den ausgewerteten Standorten aber keine Gefahr für die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems dar.



Abbildung 42: Trampelpfad in Versickerungsmulde zum Erreichen des Hauseingangs, Anlage 7

6.9.8 Unplanmäßige Nutzungs- und Gestaltungsveränderung

Definition:

Umgestaltung der Versickerungsanlage durch Dritte oder informell durch Betreiber

Nutzungs- und Gestaltungsveränderungen treten bei knapp einem Drittel der intensiv untersuchten Anlagen auf (siehe Abbildung 37). Diese wirken sich in den meisten Fällen negativ auf die Funktionsfähigkeit der Versickerungsanlage aus. Nur in einem Fall ist eine Gestaltungsveränderung positiv zu bewerten (dort wurden Findlinge so versetzt, dass die Muldenrandbereiche nicht mehr von Lieferfahrzeugen überfahren werden können), in zwei weiteren Fällen ist sie nicht funktionsrelevant. Tabelle 27 fasst die Schadensbilder, Folgeschäden, sowie die Risikobewertung zu Nutzungs- und Gestaltungsveränderung zusammen.

In verdichteten Einfamilienhausgebieten werden Vorgärten und Bauflächen befestigt und zu zusätzlichen Stellplatzflächen umgenutzt (Abbildung 43). Dies erhöht die an die Versickerungsfläche angeschlossenen befestigten Flächen. Je neu geschaffenen Stellplatz werden ca. 15 m² Fläche zusätzlich befestigt. Unter Berücksichtigung der öffentlichen Erschließungsflächen (fahrender und ruhender Verkehr, Gehwege, etc.) kann sich die insgesamt befestigte Fläche eines Einfamilienhausgebietes durch solche schleichenden Versiegelungsprozesse in einer Größenordnung von 10-15 % erhöhen.

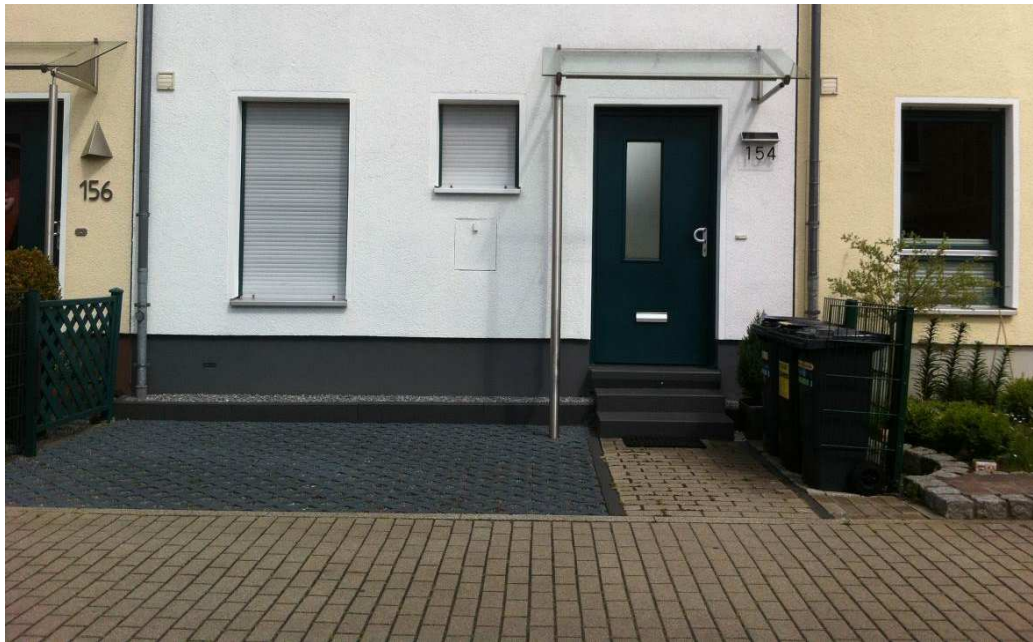


Abbildung 43: Umnutzung von Vorgartenflächen zu Stellplätzen, Bochum-Linden

Tabelle 27: Schadensbilder, Folgeschäden, Risikobewertung zu Nutzungs- und Gestaltungsveränderung

Betriebspunkt	Schadensbild	Risikobewertung	Trendentwicklung/ Folgeschäden
Krümmen/Rinnenanschluss	Lageveränderung Fallrohr	sehr hoch	Gebäudevernässung, wild abfließendes Wasser
Offene Rinne an Gebäude	Zugestellt (Pflanzkübel, Regentonne etc.)	hoch	wild abfließendes Wasser
Rasenrinne	Angleichung an umliegende GOK	mittel	wild abfließendes Wasser
Muldensohle	Informelle Nachverdichtung (bef. Vorgärten zur Stellplatznutzung)	hoch	Vergrößerung angeschl. bef. Fläche, langanhaltende Wasserstände, Kolmation
Muldensohle	Verfüllung von Mulden oder Rückbau zugunsten von Pflanz-/Kiesbeeten	mittel	Verlust Retentionsvolumen
Überlauf	Abflachung durch Überfahung mit schwerem Mähgerät	hoch	Verlust Retentionsvolumen

6.9.9 Planmäßige bauliche Veränderung

Definition:

(vom Betreiber) geplante maßgebliche bauliche Veränderungen an Versickerungsanlagen oder umliegenden angeschlossenen befestigten Flächen sowie Ableitungselementen

Bei rund einem Viertel der Anlagen wurden bauliche Veränderungen durchgeführt. Hauptsächlich wurde die angeschlossene Fläche wegen baulicher Erweiterungen vergrößert (siehe Abbildung 37). In drei Fällen wurden die Zuläufe nachträglich optimiert (Querschnittsvergrößerung, Vorbeugung/Vermeidung Gebäudevernässung).

Die in einem Fall durchgeführte Verkleinerung einer Muldensohle (zugunsten zusätzlicher befestigter Betriebsfläche) wurde mit einer nachträglichen Rigolenunterfangung kompensiert (Abbildung 44).

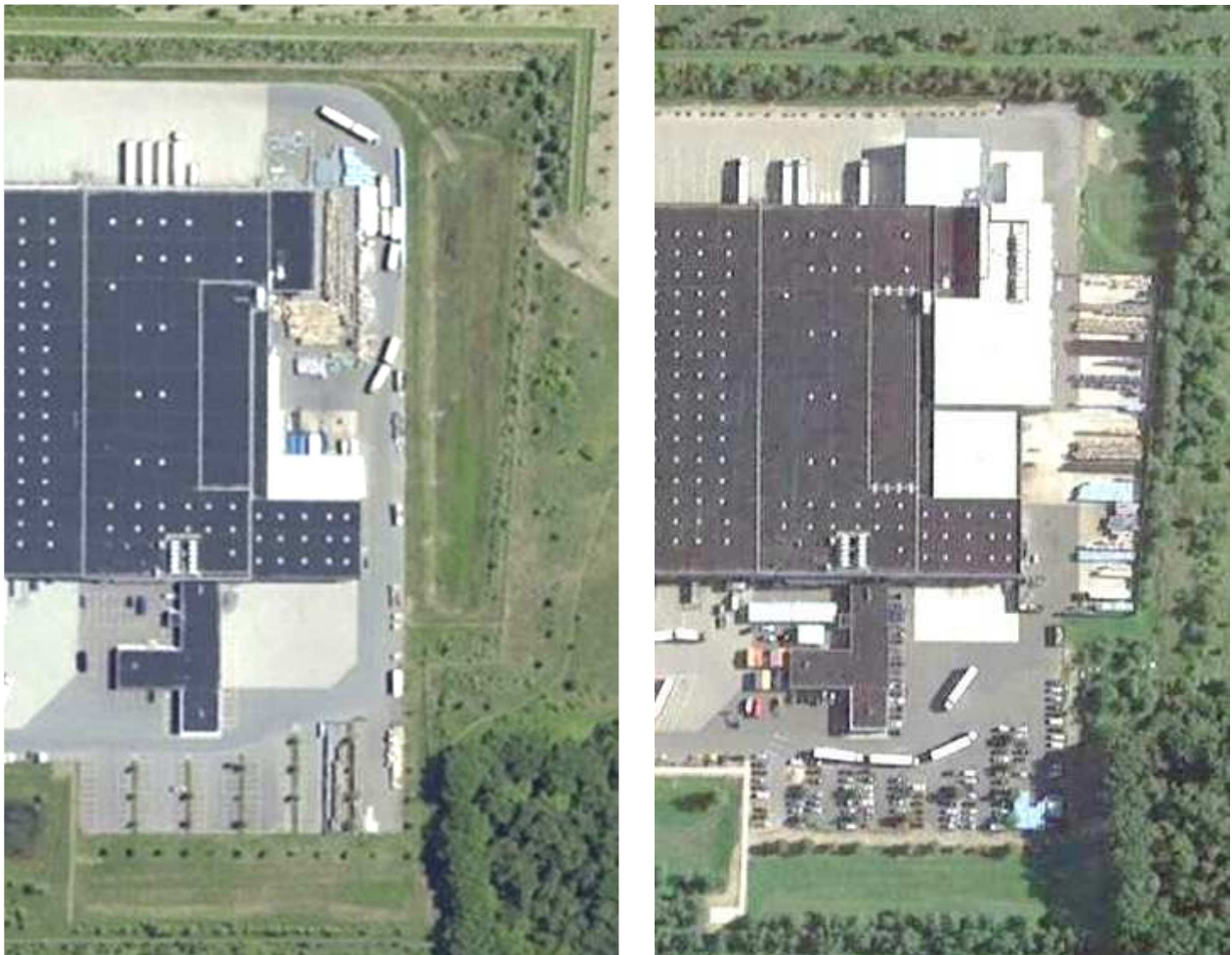


Abbildung 44: Anlage Nr. 60 Zustand vor Erweiterung der befestigten Betriebsflächen 2010 (linkes Bild) und nach Erweiterung der befestigten Betriebsflächen 2015 (rechtes Bild) (Google Earth)

6.9.10 Pflege

Definition:

Angaben zu Art, Zielsetzung, Häufigkeit und Ausführung der Grünflächenpflege

Nahezu alle Anlagen werden mit einem Standardgrünflächenpflegeprogramm ohne spezifische Position für die Wartung von Versickerungsanlagen gepflegt (siehe Abbildung 37; Abbildung 38). In Einzelfällen wurden die Anlagen entweder gar nicht, nicht ausreichend oder mit falschem Gerät (Einsatz Großflächenaufsitzmäher bei feuchten Bodenverhältnissen) gepflegt. Die Folgen einer solchen Behandlung sind in Kapitel 6.10.11 und unter der Betriebspunkt erläuterung in dem folgenden Kapitel „Kritische Betriebspunkte“ (siehe Kapitel 6.10) dokumentiert. Es zeigt sich ferner, dass die Übergangsbereiche zwischen z.B. Böschung und Muldensohle nicht ohne langfristigen Aufwuchs gemäht werden können, da die Mähmaschinen die scharfen Kanten aus der Planung nicht nachschneiden können.

6.9.11 Zusammenfassende Bewertung

Die Untersuchung der Anlagen zeigt, dass auf der einen Seite zwar die überwiegende Mehrzahl der Versickerungsanlagen auch nach 10 bis 20 Jahren Betriebszeit ohne größere Mängel und Funktionsdefizite ist. Auf der anderen zeigt sich, dass Fehlentwicklungen durch Planungs- und Baufehler oder durch unterlassene bzw. falsche Wartung und Pflege eine sich selbst verstärkende Dynamik in Richtung Funktionsverlust auslösen können.

Bei der Bewertung der Mängel und Schadensbilder treten folgende Schadensbilder in den Vordergrund:

- Gefahr der Gebäudevernässung im Zuge von Setzungen, Erosion oder Materialermüdung an Elementen der offenen Ableitung des Niederschlagswassers
- Gefahr wild abfließenden Wassers in Folge Erosions-, Ausspülungs- und Setzungsprozessen an Elementen der offenen Ableitung
- hydraulische Überlastung und Kolmation einzelner Muldensegmente infolge planungsabweichender Abflusswege des Niederschlagswassers von den befestigten Flächen und damit einhergehender Überlastung von Muldensegmenten
- Gefahr ungleichmäßiger hydraulischer Belastung und Kolmation infolge Unebenheiten der Muldensohle
- Verlust von Retentionsvolumen in Folge von Setzungs-, Erosions- und Ausspülungsprozessen an oberflächigen Muldenüberläufen
- Verlust der Standfestigkeit (Erosionssicherheit) und Versickerungsfähigkeit (Kolmation) in Folge ungehinderten Aufwuchses von Gehölzen (Verschattung, Laubfall)

Vor dem Hintergrund der in den vorstehenden Abschnitten aufgeführten Auswertung und der dabei festgestellten quantitativen (Häufigkeit) und qualitativen Relevanz (Risiko, Folgeschäden), werden im folgenden Abschnitt ausgewählte kritische Betriebspunkte detailliert untersucht.

6.10 Kritische Betriebspunkte

Versickerungsanlagen mit belebter Bodenzone erfordern, dass die Zuleitung der zu entwässernden Niederschlagsabflüsse oberhalb der belebten Vegetationsdecke stattfindet. Maximale Anstauhöhe (i.d.R. 30 cm) und die Ausbildung eines Freibordes (15-30 cm) erfordern die Zuleitung mindestens 50 cm über der Sohle einer Versickerungsmulde. Ein Transport des Niederschlagswassers in geschlossenen Grundleitungen ist wegen der aus Standfestigkeits- (verkehrliche Nutzung) und Witterungsgründen (Frost) erforderlichen mindestens 0,80 m mächtigen Überdeckungen i.d.R. nicht möglich. Eine daraus resultierende Sohltiefe von mindestens 1,30 m zieht erhebliche Böschungsflächen und eine Verkleinerung der versickerungswirksamen Muldensohlfläche nach sich. Oftmals sind solche Tiefenlagen der Mulden auch aus konstruktiven, gestalterischen oder grundwassertechnischen Gründen nicht sinnvoll.

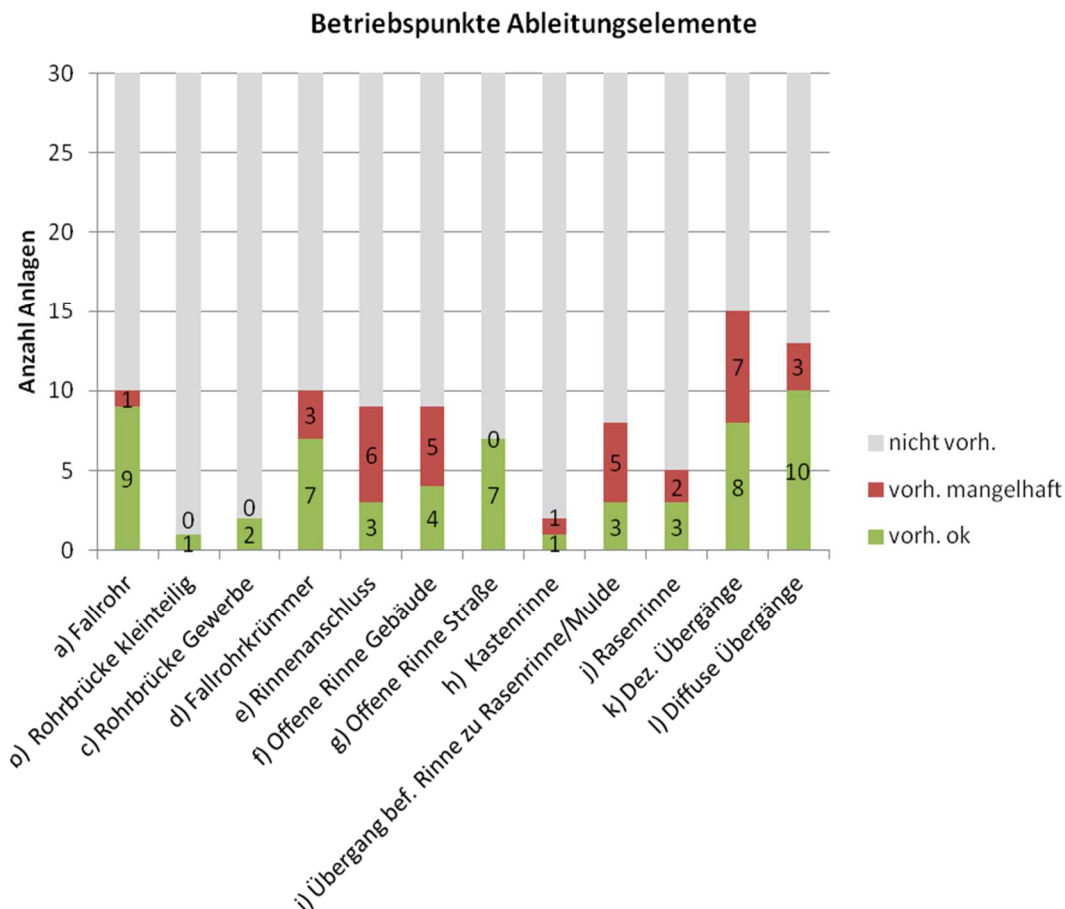


Abbildung 45: Diagramm Betriebspunkte der Zuleitungselemente

Vor diesem Hintergrund erfordern Versickerungsanlagen mit belebtem Oberboden in der Regel eine offene, auf der Geländeoberkante geführte Ableitung des Regenwassers von den befestigten (Dach-, Wege-) Flächen in die Versickerungsmulde. Die Elemente der offenen Ableitung sind somit integraler Bestandteil belebter Versickerungsanlagen weshalb diese Betriebspunkte in den hier durchgeführten Untersuchungen mit einbezogen sind. In der Abbildung 45 und Abbildung 46 sind die einzelnen Betriebspunkte hinsichtlich ihrer quantitativen Bedeutung (Häufigkeit) und ermittelten Mängel zusammengestellt.

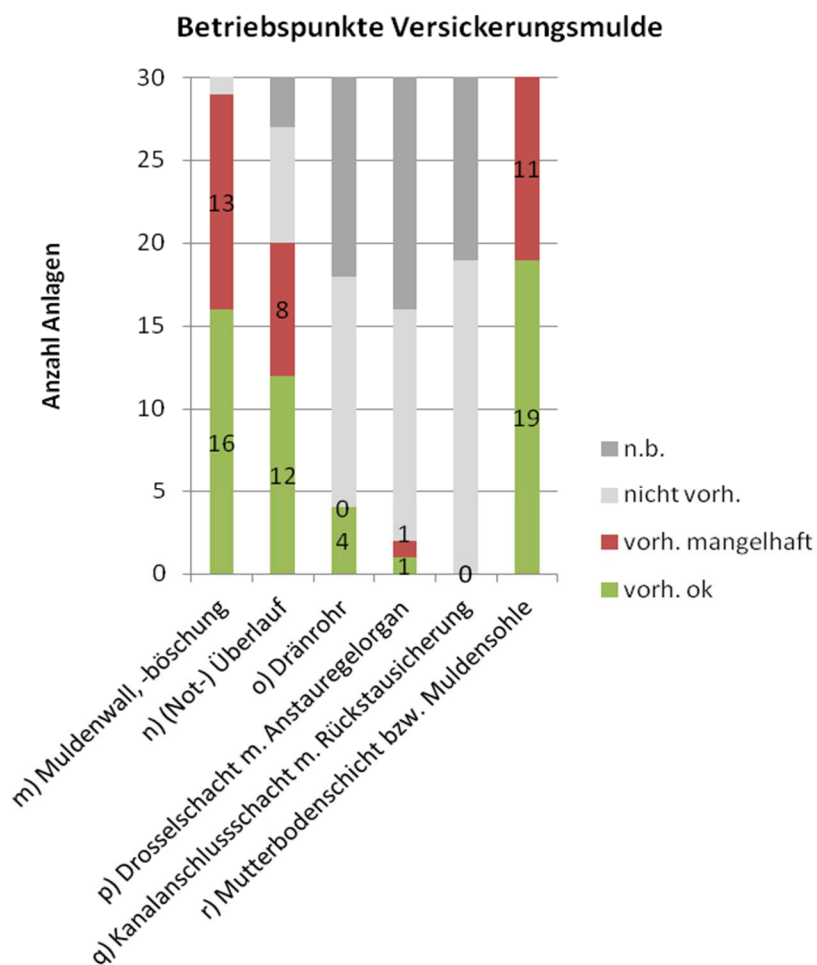


Abbildung 46: Diagramm Betriebspunkte Mulde

Auf Grundlage der in Kapitel 6.9 ermittelten Kriterien- und betriebspunktbezogenen Schadensbilder und Risikobewertungen wurden in Tabelle 29 die kritischen Betriebspunkte der offenen Ableitung und der Versickerungsmulde als untersuchungsrelevant für eine weitergehende Bearbeitung ausgewählt. Da an den Betriebspunkten b), c) und g) keine Mängel aufzuzeichnen waren, wurden diese als nicht weiter untersuchungsrelevant bewertet. Abbildung 47 zeigt im Überblick, wie oft die relevanten Betriebspunkte von welcher Schadenskategorie betroffen sind. Dabei fällt auf, dass Rinnenanschlusspunkt (e)), die offene Rinne am Gebäude (f)), Mul-

denwall- bzw. Muldenböschung (m)) sowie die Muldensohle (r)) besonders empfindliche Betriebspunkte sind. Diese sind in der folgenden Abbildung 48 zur Veranschaulichung schematisch dargestellt.

Tabelle 28: Schadensrisiko und Untersuchungsrelevanz Betriebspunkte offene Ableitung

Betriebspunkt	Mängel (n)	Mängel (%)	Risiko	Untersuchungsrelevant?
a) Fallrohr	1 von 10	10	sehr hoch	ja
b) Rohrbrücke kleinteilig	0 von 1	-	-	-
c) Rohrbrücke Gewerbe	0 von 2	-	-	-
d) Fallrohrkrümmer	3 von 10	33	sehr hoch	ja
e) Rinnenanschluss	6 von 9	66	sehr hoch	ja
f) Offene Rinne Gebäude	5 von 9	56	hoch	ja
g) Offene Rinne Straße	0 von 7	0	mittel	-
h) Kastenrinne	1 von 2	50	mittel	-*
i) Übergang bef. Rinne zu Rasenrinne (bzw. Mulde)	5 von 8	63	hoch	ja
j) Rasenrinne	2 von 5	40	mittel	ja
k) Dezentrale Übergänge ¹	7 vom 15	47	hoch	ja
l) Diffuse Übergänge ²	3 von 13	23	hoch	ja

* kein Element der offenen Ableitung

Tabelle 29: Schadensrisiko und Untersuchungsrelevanz Betriebspunkten Versickerungsanlagen mit belebten Oberboden

Betriebspunkt	Mängel (n)	Mängel (%)	Risiko	Untersuchungsrelevant?
m) Muldenwall/Böschung	13 von 29	37	sehr hoch	ja
n) (Not-)Überlauf	8 von 20	40	sehr hoch	ja
o) Dränrohr	0 von 12	-	mittel	ja
p) Drosselschacht mit Drossel	0 von 9	-	sehr hoch	ja
q) Kanalanschlusschacht mit Rückstauklappe	0 von 9	-	sehr hoch	ja
r) Mutterbodenschicht	11 von 30	37	sehr hoch	ja

¹ Abflüsse in die Versickerungsmulde über auf Lücke gesetzte Hochborde

² Abflüsse „über die Schulter“ in die Versickerungsmulde

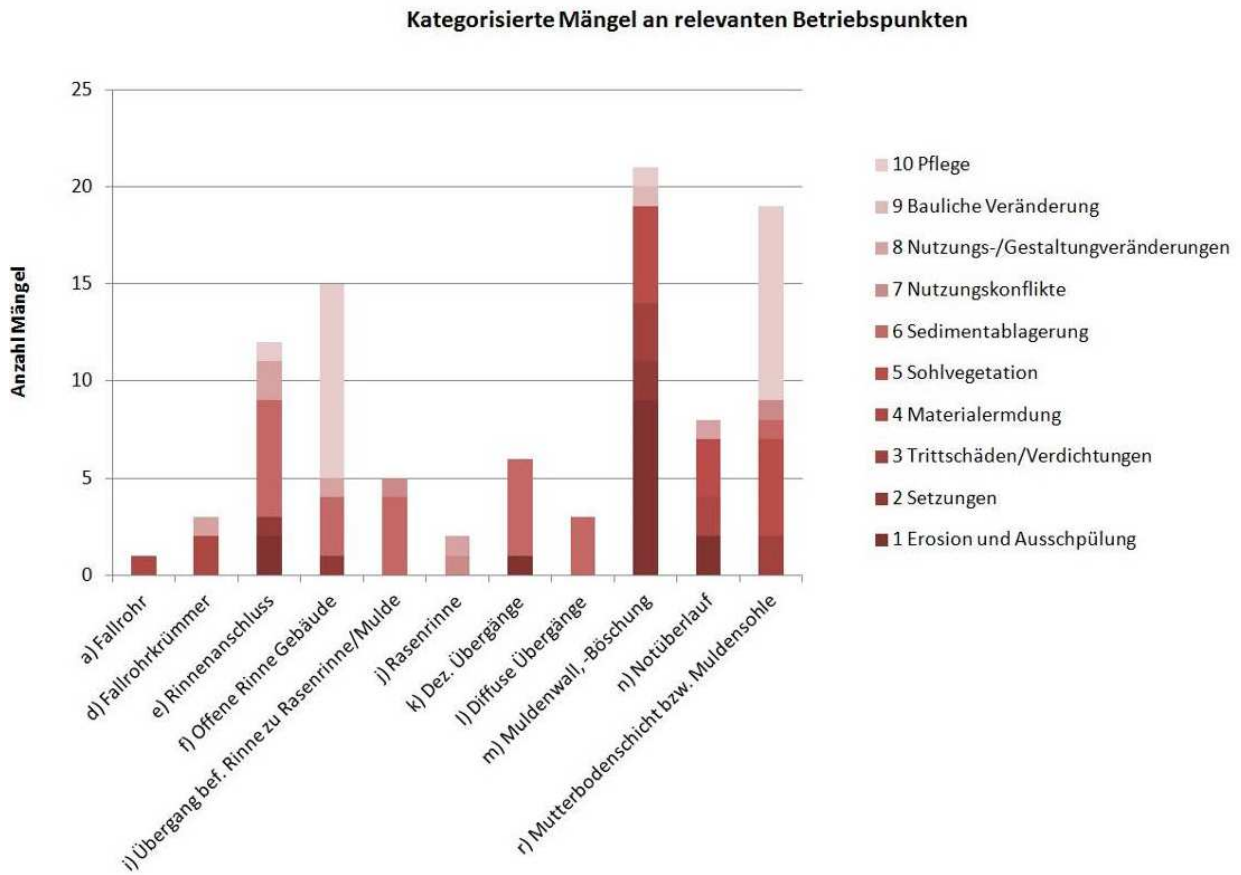


Abbildung 47: Diagramm Kategorisierte Mängel an relevanten Betriebspunkten

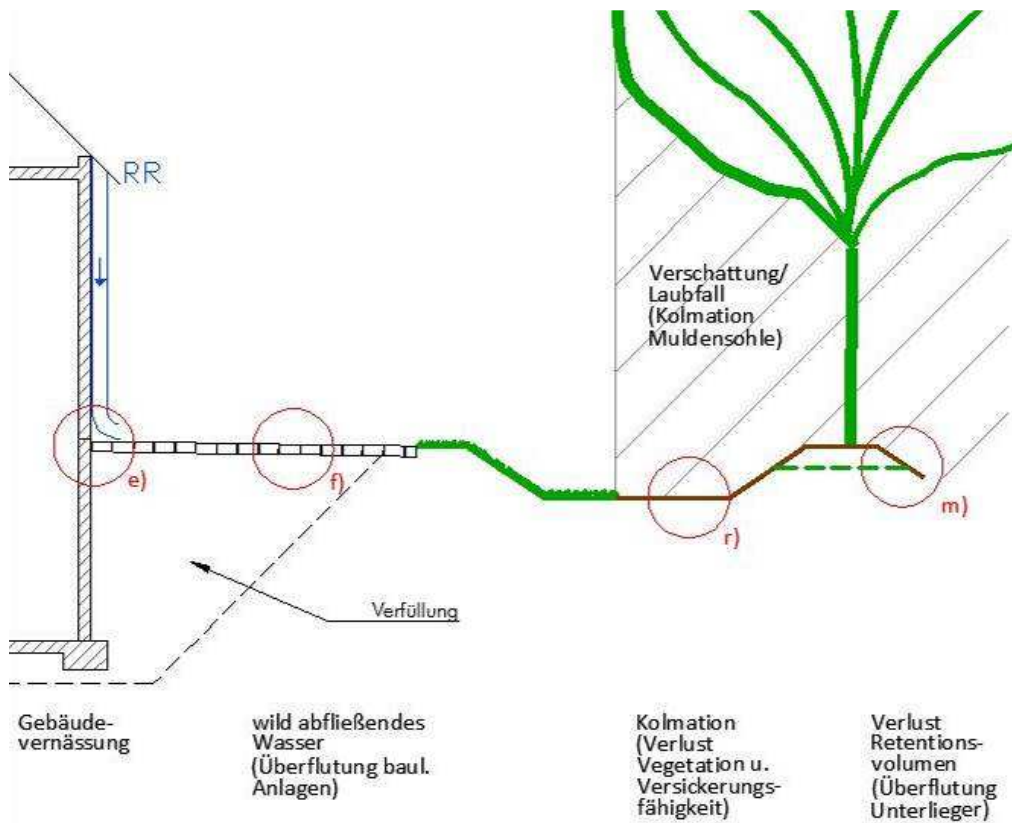


Abbildung 48: Schematische Darstellung ausgewählter relevanter Betriebspunkte

In den folgenden Abschnitten sind die Untersuchungsergebnisse zu den ausgewählten kritischen Betriebspunkten textlich sowie grafisch in Diagrammen dargestellt. Die Balkendiagramme zeigen jeweils die Anzahl der Mängel in den verschiedenen Schadenskategorien, wobei die Färbung der Balken das aus den vorhandenen Mängeln erfolgende weiterführende Schandensrisiko kennzeichnet.

Daraus abgeleitete Handlungsempfehlungen sind in kursiv gesetzter Schriftart im Text hervorgehoben.

6.10.1 Fallrohr

Fallrohre sind mit Hilfe von Rohrschellen an der Gebäudeaußenwand lagemäßig fixiert. Infolge Materialermüdung und betriebsbedingter Erschütterungen kommt es im Verlauf mehrerer Jahre zu einer Lockerung der Rohrschellen. Diese ist für die lagebezogene Befestigung der Fallrohre in aller Regel ohne Bedeutung. Verloren geht damit jedoch die höhenbezogene Fixierung der Fallrohrsegmente. Dies bleibt beim Anschluss an erdverlegte Grundleitungen ohne Auswirkung auf Lage und Funktionsfähigkeit der Fallrohre, weil erstere als Auflager für das Fallrohr wirken. Bei der offenen Ableitung fehlt dieses Auflager, eine nachlassende Rohrschellenspannung kann hier deshalb ein senkrecht Abrutschen einzelner Fallrohrelemente nach sich ziehen. In einem Fall (Abbildung 49) wurde festgestellt, dass dadurch Fallrohrelemente aus ihrer Steckverbindung gelöst werden. Das Niederschlagswasser tritt in diesem Fall auf halber Gebäudehöhe aus dem Fallrohr aus und vernässt die Außenwand (Abbildung 50).

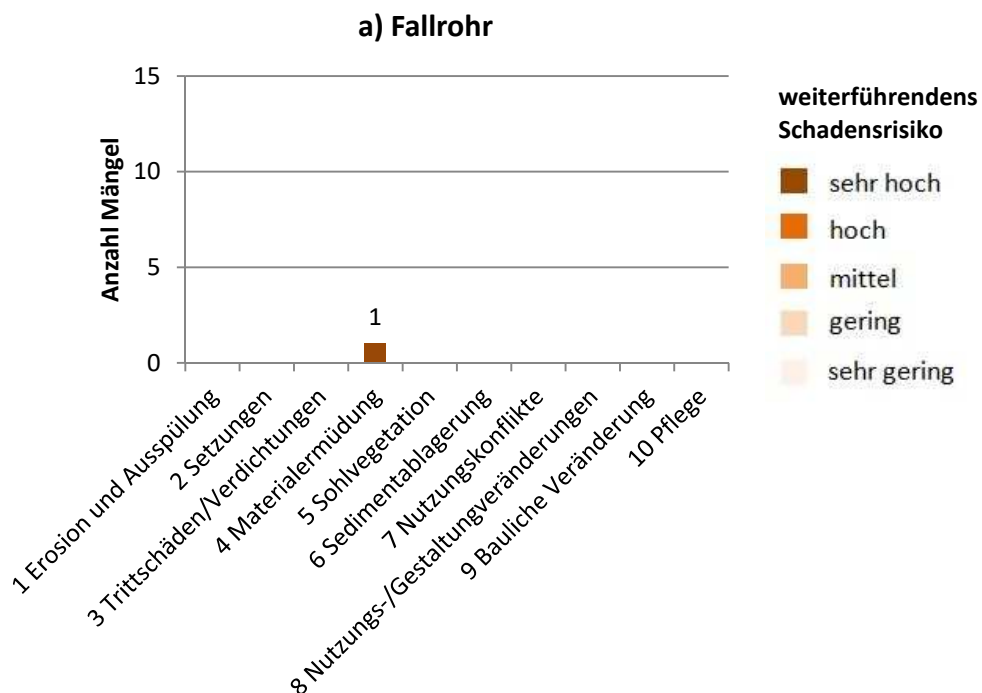


Abbildung 49: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte a) Fallrohr

Es wird empfohlen, stabilere Rohrschellen mit der Möglichkeit zum nachträglichen Justieren der Schellenspannung einzusetzen.

Sinnvoll ist darüber hinaus, den Fallrohrkrümmer auf dem Rinnenelement zu fixieren, um damit ein Auflager für das Fallrohr zu schaffen und auf diese Weise das aus dem Gefüge Rutschen zu verhindern.



Abbildung 50: Vernässte Gebäudewand durch abgerutschtes Fallrohr

6.10.2 Fallrohrkrümmer und Rinnenanschluss

In kleinteilig strukturierten Siedlungsgebieten insbesondere bei mehrgeschossigen Mehrfamilienhäusern ist festzustellen, dass der offene Auslauf des Fallrohrs immer wieder Opfer mutwilliger oder fahrlässiger Zerstörung wird. Um hier möglichst wenig an Angriffsfläche (Hebelwirkung) anzubieten, werden die Fallrohrkrümmer oftmals extrem kurz ausgeführt (Abbildung 51). Bei Anordnung stabiler Rohrschellen und massiver Gussstahl- oder Zinkrohre kann zwar die Zerstörungsanfälligkeit wirkungsvoll reduziert werden. Wie in Abschnitt 6.9.4 beschrieben, zieht dies jedoch erhöhte Gefahren für die Vernässung von Kellerwänden, Erosion, Unterspülung und Setzung der Ableitungsrinnen nach sich.

Beim Übergang vom Fallrohr (Gebäudeentwässerung) in die offene Rinne (Grundstücksentwässerung), liegt die Fließgeschwindigkeit in Fallrohren gemäß DIN 1986-100, z.B. bei dreigeschossigen Gebäuden mit rd. 8 m/s 40-mal so hoch, wie in einer offenen Ableitungsrinne (0,2 m/s bei 1 % Gefälle und Rauigkeitsbeiwert Betonrinne 0,6, gemäß DIN 1986-100/Manning-Strickler).

Ortsaufnahmen bei Starkregenereignissen (Abbildung 51) haben gezeigt, dass die Anordnung eines Fallrohrkrümmers am Ende der Fallrohre nicht ausreicht, um Fließgeschwindigkeit und -richtung so umzuformen und zu beruhigen, dass das anfallende Regenwasser sicher innerhalb der Rinne abgeleitet wird. Stattdessen schießt das Regenwasser mit hoher Geschwindigkeit in einen sich breit verteilenden Strahl aus dem Fallrohr seitlich über das Rinnenprofil hinaus und kann dort je nach Befestigungsgrad und sonstigen örtlichen Gegebenheiten Erosion, Aus- und Unterspülungen, Vernässungen und Änderungen der Abflussrichtung (wild abfließendes Niederschlagswasser) nach sich ziehen (Abbildung 52).

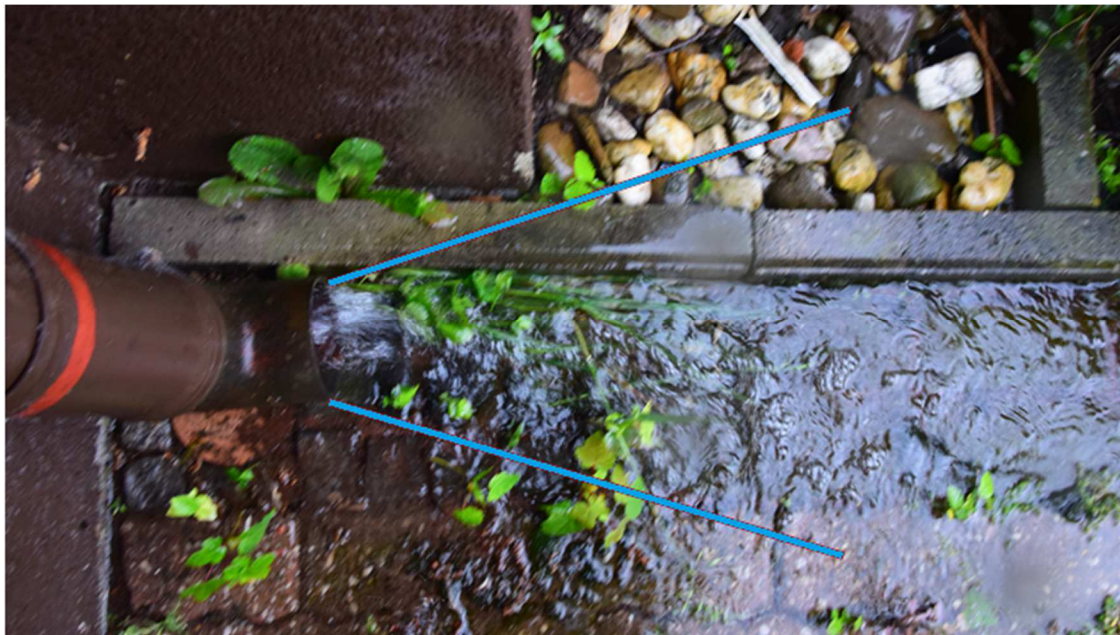


Abbildung 51: RW schießt seitlich sogar über einen 4 cm hohen Kantenstein aus der Rinne und vernässt den gebäudenahen Bereich



Abbildung 52: Unterspülte offene Rinne mit Setzungsschaden 2/3 Rinnenelement und geänderter Abflussrichtung

Dieser Betriebspunkt (siehe Abbildung 51 und Abbildung 52) markiert zugleich die Stelle an der die Gebäudesubstanz wegen der bei Wohn- und wohnähnlichen Gebäuden direkt angrenzenden Kellerwände am stärksten gefährdet ist.

Funktionsdefizite am Betriebspunkt Rinne am Gebäudesockel haben bei einzelnen untersuchten Anlagen Vernässungen der Kellergeschosse der Gebäude verursacht und die Akzeptanz der Regenwasserversickerung bei den Bewohnern stark in Mitleidenschaft gezogen

Ausgespülte, offene Fugen z.B. zwischen Rinnenelementen bzw. –steinen ziehen Ausspülungen in der Bettung und im weiteren Untergrund nach sich. Die Folge ist das Absacken von Rinnenelementen.

Die auftretenden Mängel sind in Abbildung 53 und Abbildung 54 unter Kennzeichnung des weiterführenden Schadensrisikos zusammengefasst.

Um dies zu vermeiden und das Niederschlagswasser sicher in der Rinne abzuleiten ist eine wirkungsvolle

- Reduzierung der Fließgeschwindigkeit sowie
- eine Beruhigung und
- Richtungsstabilität

des Wasserstrahls aus dem Fallrohr sicherzustellen.

Eine betriebssichere Ausführung ist bei mehrgeschossigen Gebäuden nur zu erreichen, wenn das Fallrohr 40-50 cm lang horizontal weitergeführt und mit stabilen Schellen auf der Rinne fixiert wird. Abbildung 55 zeigt eine solche Lösung, die nach dem Auftreten von Kellervernässungen nachgerüstet wurde und das Problem nachhaltig gelöst hat. Eine konsequente Wartung, Pflege und Instandhaltung ist hier zur Vermeidung von Schäden unbedingt erforderlich.

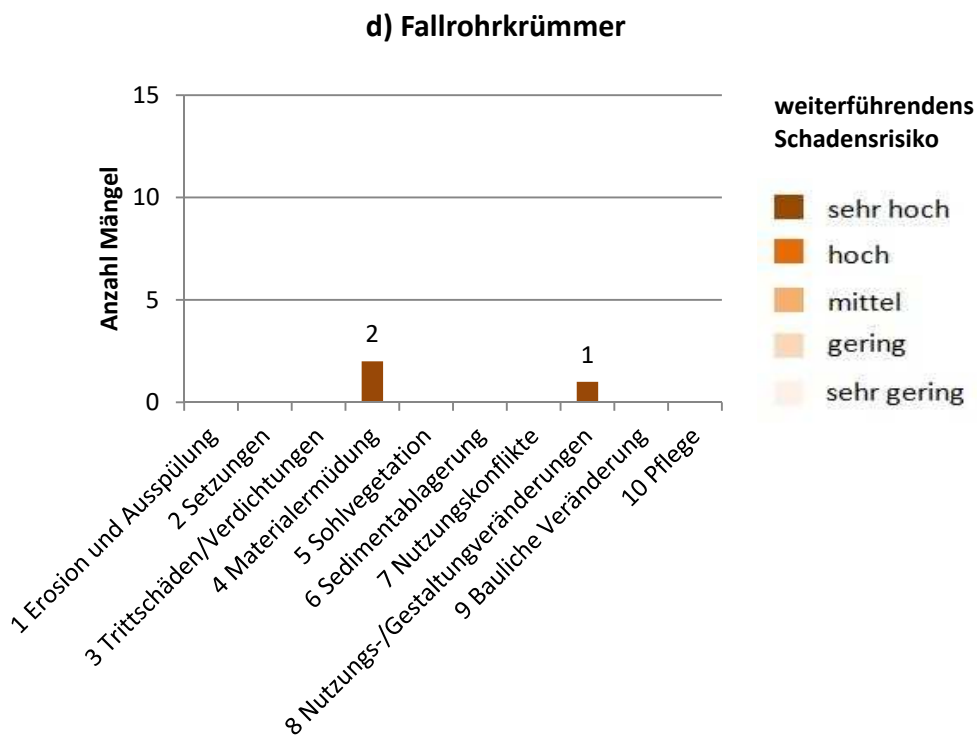


Abbildung 53: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte d) Fallrohrkrümmer

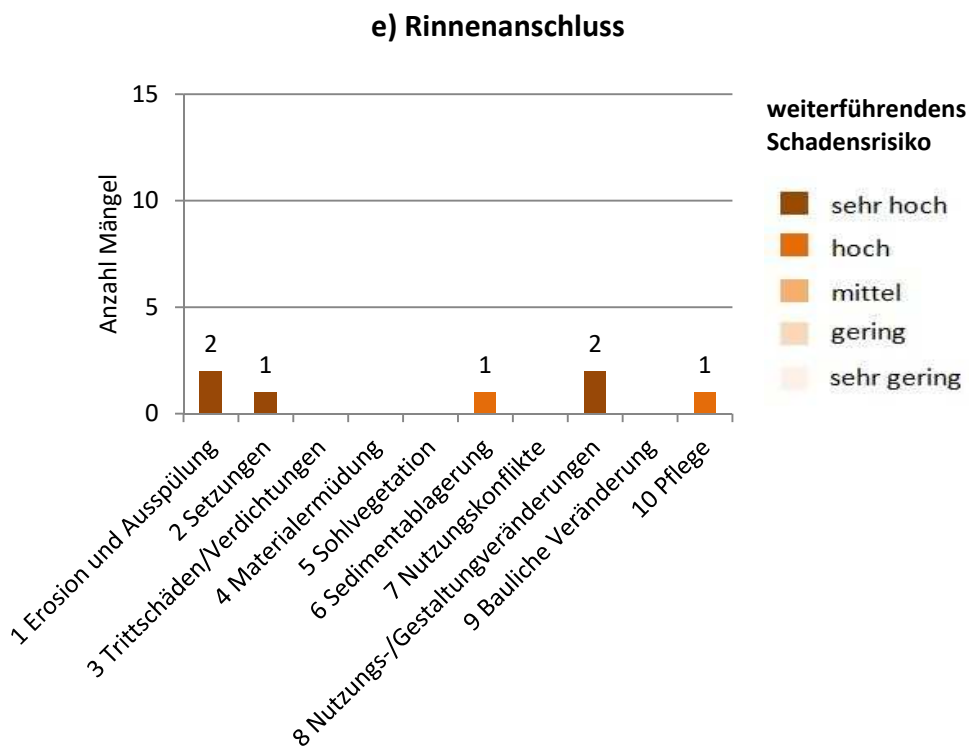


Abbildung 54: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte e) Rinnenanschluss



Abbildung 55: An Rinne befestigtes Rohrendstück

Fallrohrkrümmer

Bewährt haben sich hier Lösungen bei denen das Fallrohr 30-50 cm hinter dem Krümmer horizontal verlängert und an seinem Ende mit Hilfe einer stabilen Manschette an der offenen Rinne fixiert wird (Abbildung 55).

6.10.3 Offene Rinne Gebäude

Setzungen von Flächenbefestigungen und Rinnen ziehen oftmals eine Veränderung der Abflusswege des Niederschlagswassers nach sich. In einzelnen Fällen fließt das Niederschlagswasser nicht wie vorgesehen in Richtung Versickerungsanlage sondern bleibt in abgesenkten Rinnen und Pflasterbereichen stehen. Dort versickert es in direkter Nähe zur Kellerwand oder fließt über z.B. Treppen ab und überflutet den Keller (siehe Abbildung 56). Entgegen der ursprünglichen Erwartung wurden Setzungsschäden bei Neubauvorhaben im Bereich des Übergangs von Gebäude- (Fallrohr) zur Grundstücksentwässerung (offene Rinne) nicht festgestellt. Dieser, in früheren Zeiten zur Entsorgung von Bauschutt und Baustellenabfällen genutzte und deshalb von Setzungen besonders betroffene Bereich ist im Neubau durch eine heute übliche qualifizierte Verfüllung und Verdichtung nicht mehr davon betroffen. Insofern wurden im Neubaubereich keine, wohl aber im Bestand, in Folge von Setzung abgesenkte Ableitungsrinnen angetroffen.

Die Bestandsaufnahmeergebnisse legen es nahe, dass dieser Prozess durch die im vorstehenden Abschnitt erläuterte mangelnde Bündelung des aus dem Fallrohr austretenden Niederschlagswassers sowie die Verkrautung von Rinnen verstärkt wird.

Nicht auszuschließen ist, dass durch die unerwünschte Versickerung von Wasser im ehemaligen Baugrubenbereich bei älteren Gebäuden neue Setzungsprozesse aktiviert werden (siehe Abbildung 56 abgesackte Pflasterfläche vor Kellertreppe).



Abbildung 56: Veränderter Fließweg auf abgesackter Pflasterfläche vor Kellertreppe

Die auftretenden Mängel sind in Abbildung 47 unter Kennzeichnung des weiterführenden Schadensrisikos zusammengefasst.

f) Offene Rinne Gebäude

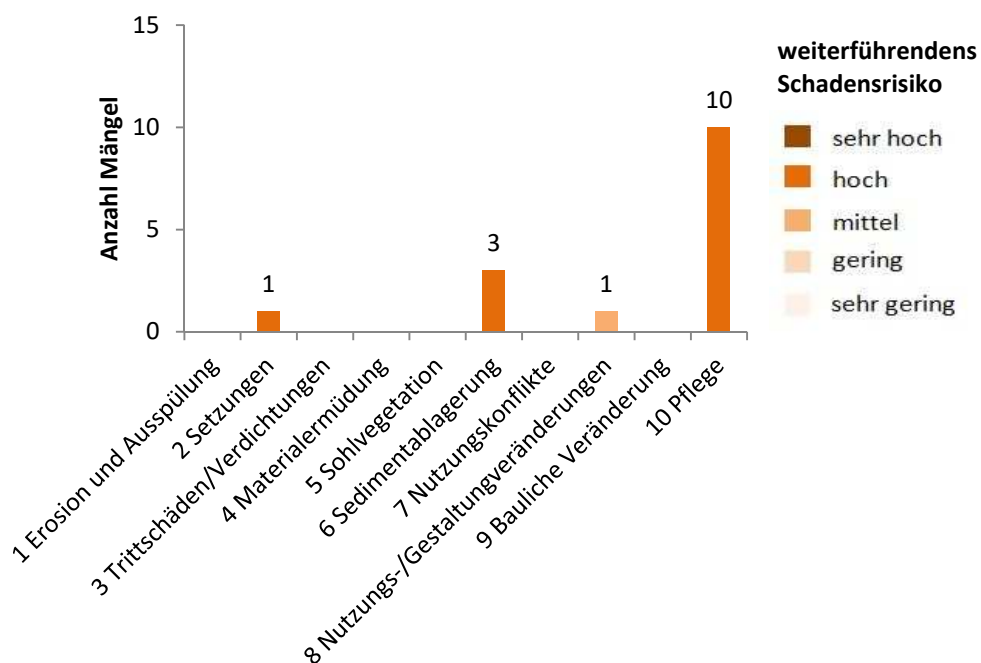


Abbildung 57: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte f) Offene Rinne Gebäude

Um solchen Setzungsprozessen vorzubeugen, sind eine sichere Ableitung des Niederschlagswassers in der Rinne sowie eine wasserdichte Verfüzung der Rinnenelemente im Betrieb sicherzustellen. Mit der Anordnung eines horizontalen Rohrauslegers wie in Kapitel 6.10.2 beschrieben, wird die Ableitung des Niederschlagswassers direkt am Gebäudesockel unabhängig von Setzungsprozessen sichergestellt. Sedimentablagerungen und Verkrautungen in Rinnen sind regelmäßig, mind. einmal im Jahr zu entfernen.

6.10.4 Übergang bef. Rinne zu Rasenrinne bzw. Mulde

Die auftretenden Mängel sind in Abbildung 58 unter Kennzeichnung des weiterführenden Schadensrisikos zusammengefasst.

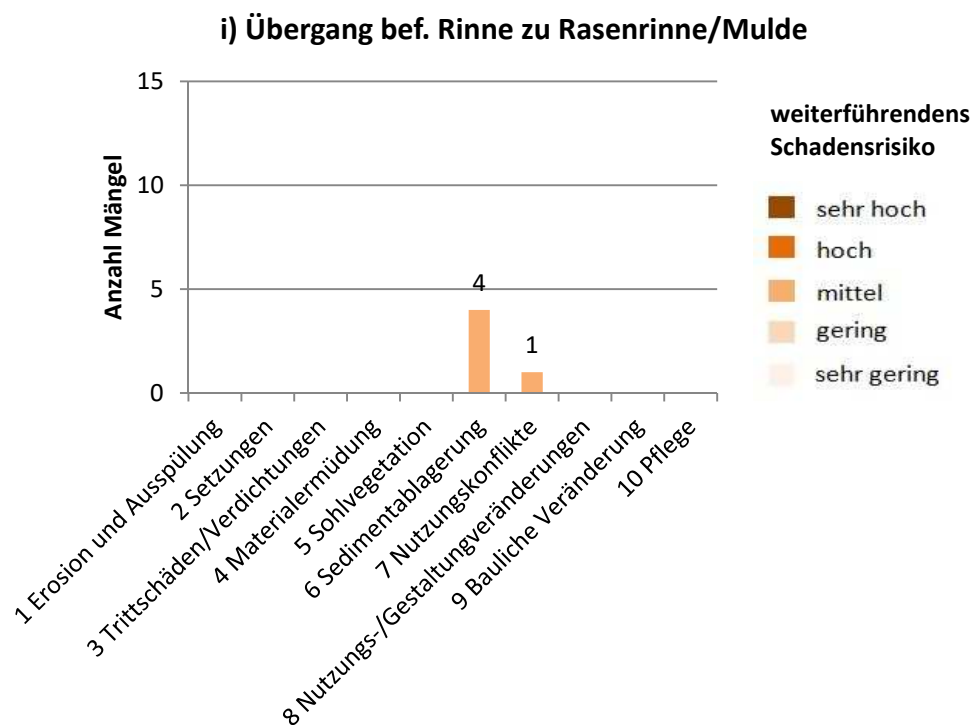


Abbildung 58: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte i) Übergang bef. Rinne zu Rasenrinne/Mulde

Bei punktueller Einleitung über Grundleitungen oder offene Gerinne kommt es im Einlaufbereich zu einer Akkumulation mitgeführter Stoffe.

Die sich dort ablagernden Stoffe gliedern sich in folgende drei Fraktionen:

1. Müll (Verpackungsreste, Plastiktüten, Papier)

Ablagerung im Einlaufbereich, organische Bestandteile mineralisieren, Kunststoffe, Metalle etc. werden i.d.R. im Zuge der Grünflächenpflege entnommen

2. Äste und Laub

Kleinteilige Ablagerungen und geringmächtige mineralisieren und werden gemeinsam mit Sediment von Vegetation eingewachsen, größere Laubansammlungen und Äste werden bei gut gepflegten Anlagen im Zuge der Grünflächenpflege entnommen

3. Sedimentation von Feinstoffen und Sand

Sedimente werden von den Pflanzen in die Bodenmatrix eingewachsen und ziehen im Einlaufbereich punktueller Zuläufe Aufhöhungen auf der Muldensohle nach sich



Abbildung 59: Rinne und Muldeneinlaufbereich mit Sedimentablagerungen

Im Zuge der Mineralisierung und anschließendem Pflanzenaufwuchs bildet sich daraus ein humoser Boden mit hohem Durchwurzelungsgrad. Damit ist i.d.R. keine Verschlechterung der Versickerungsleistung verbunden. Es kommt jedoch zu einem Verlust des Rückhaltevolumens in der Mulde (Aufhöhung Muldensohle im Einlaufbereich). Diese Prozesse wurden an ausgewählten Anlagen mit Hilfe von Aufmaßen erfasst und mit dem Gesamtrückhaltevolumen abgeglichen.

Dabei wurden an einzelnen Anlagen Aufhöhungen in einer Größenordnung von 1,5 bis 8 m³ festgestellt, die im jeweiligen Fall 1-2 % des gesamten Rückhaltevolumens darstellen. An schmalen, straßenbegleitenden Mulden (Linielementen) können diese Verluste unter Umständen größer ausfallen (siehe Kapitel 6.8.3 und Abbildung 33).



Abbildung 60: Aufhöhung um Muldeneinlaufbereich durch eingetragenes Laub



Abbildung 61: Aufhöhung in Folge Ablagerungen im Einlaufbereich Schnittdarstellung Mulden-Rigolen-Element B2 (siehe vorherige Abbildung), Anlage 10

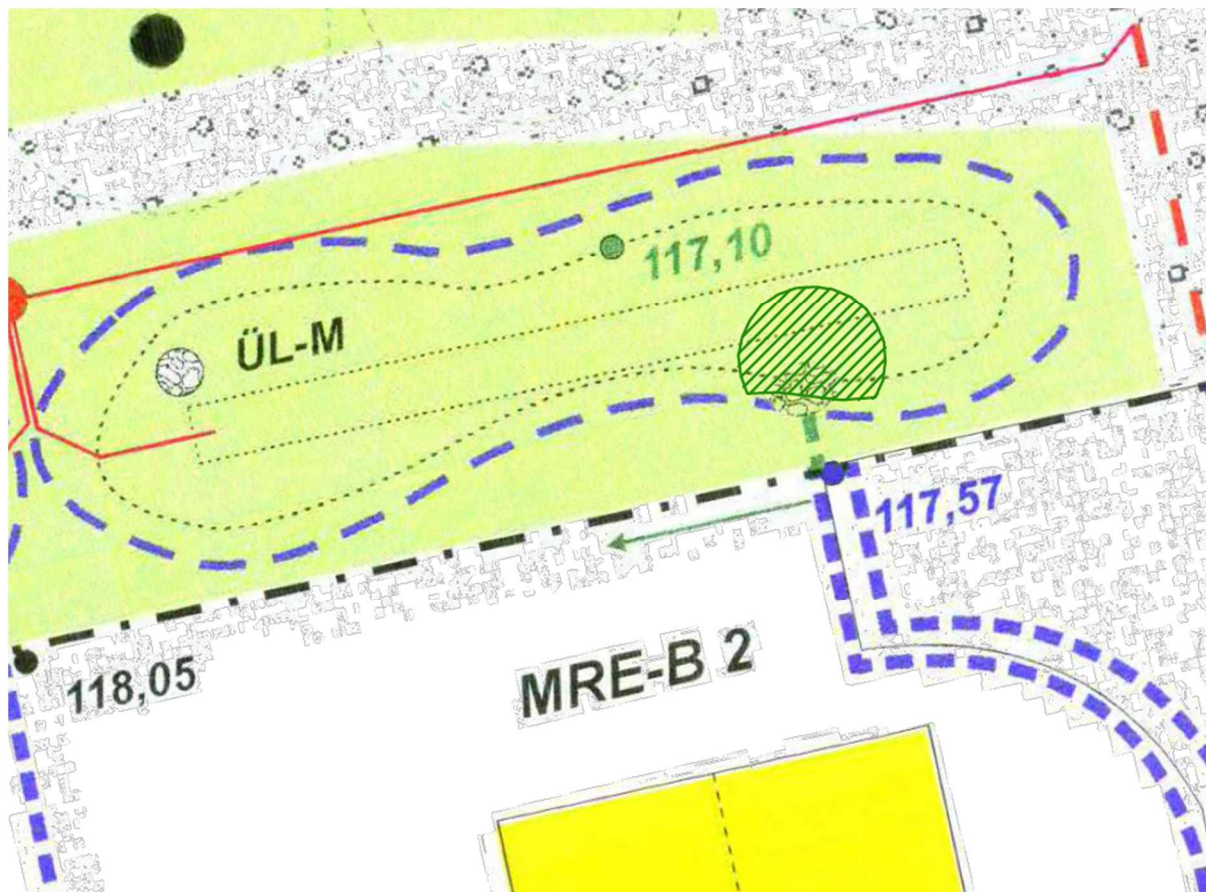


Abbildung 62: Aufhöhungen in Folge Ablagerungen im Einlaufbereich. Lageplanskizze Mulden-Rigolen-Element B2, Anlage 10

Auf eine eigene Darstellung der Untersuchungsergebnisse der Rasenrinne (j.) wird hier verzichtet, da der relevante Betriebspunkt i.) Übergang befindlichen Rinne zu Rasenrinne bzw. Mulde bereits abgedeckt ist. Die in Abbildung 63 festgestellten Mängel sind äquivalent zu den in f.) (Offene Rinnen) und damit ebenfalls erfasst.

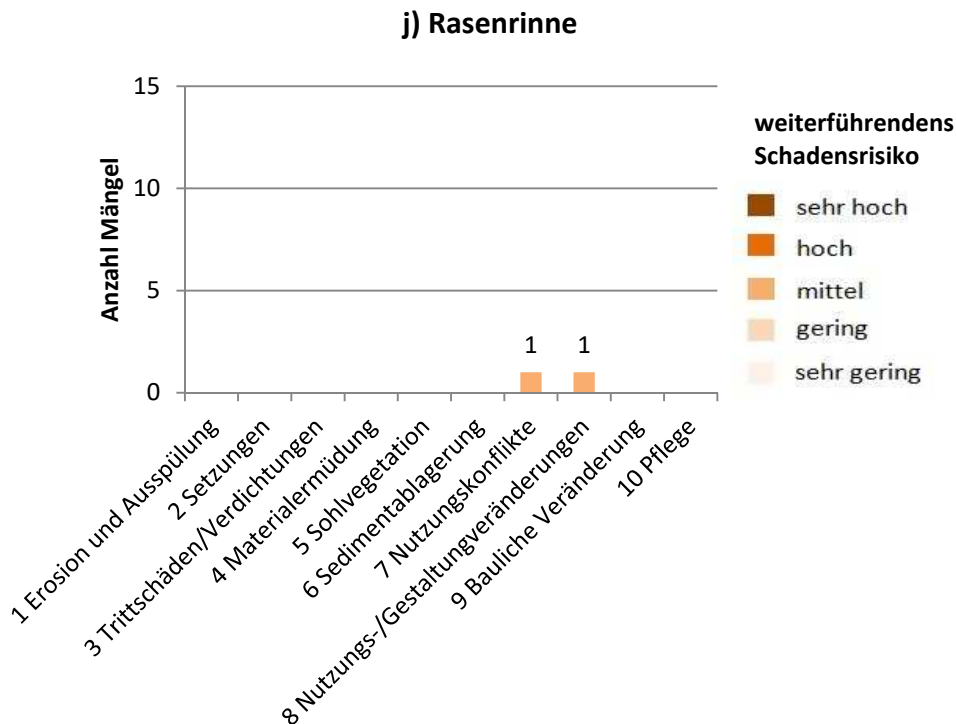


Abbildung 63: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte j) Rasenrinne

Muldenzulaufbereich

Bei Anlagen mit punktuellen Zuflüssen von ebenerdigen angeordneten befestigten Flächen werden Sedimente, Laub und z.T. auch Abfall in die Mulde mit eingeleitet. Diese lagern sich im näheren Umkreis der Zuläufe ab. In diesen Bereichen kann es phasenweise (Vegetationsruhephase) oder permanent zu einem Ausfall der Vegetationsdecke kommen. Die betroffenen Flächenanteile sind von der Größenordnung her für die Funktionsfähigkeit der Versickerungsanlage in aller Regel vernachlässigbar klein (*Empfehlung: Regelmäßige Entnahme*). Mineralische Sedimente allein stellen bei normaler Abflussbelastung (auch von verkehrlich genutzten Flächen) keine Gefahr für den Aufwuchs der Vegetationsdecke und den Erhalt der Versickerungsfähigkeit dar. Sie werden jeweils in der Vegetationsperiode in den Wurzelhorizont der Pflanzen als Teil der Bodenmatrix aufgenommen.

Im gewerblichen Bereich kommt es in Abhängigkeit von der Nutzung und den auf den ebenerdigen Betriebsflächen umgeschlagenen Gütern zu höheren Stoffansammlungen im Einlaufbereich. Bei den Anlagen 20 und 21 wird Leergut gelagert und sortiert. Neben Bruchglas und Aluminiumschraubverschlüssen dominiert hier die Papierfraktion (abgelöste Flaschenetiketten).

Im Verlauf der mehr als 20 Betriebsjahre haben sich diese im Einlaufbereich akkumuliert und mineralisiert und eine Aufhöhung um bis zu 40 cm gebildet. Der freie Auslauf aus den Rohrleitungen war dadurch z.T. verhindert.



Abbildung 64: Freigelegter, teilweise zugesetzter Grundleitungseinlauf

6.10.5 Dezentrale Übergänge

Betriebspunkt Hochbord „auf Lücke“

Bei verkehrlich genutzten Flächen fällt auf, dass auf Lücke gesetzte Hochborde durch den Anprall von PKWs/LKWs in ihrer Lage verändert und zum Teil sogar aus dem Gefüge gerissen werden (siehe Abbildung 65). Dies wird begünstigt durch die wegen der Lücke zwischen den Bordsteinen hier nicht gegebene Scherfestigkeit der Borde sowie der wegen der abfallenden Muldenböschung fehlenden Hinterfüllung mit Boden.

Obwohl diese Schäden am meisten ins Auge springen, ist ihre betriebliche Relevanz unter entwässerungs- und versickerungstechnischen Aspekten als „gering“ zu bewerten. Der Abflussweg des Niederschlagswassers in die Mulde wird dadurch in aller Regel nicht beeinflusst.



Abbildung 65: Umgefahrener Hochbord

Kantensteine „Hochbord auf Lücke“

Die Scherfestigkeit der Borde kann erhöht werden, indem zwischen diese ein Betonpflasterstein eingebaut wird. Dieser sorgt auch dafür, dass der für den Abfluss des Niederschlagswassers erforderliche Querschnitt eine ebene Sohle hat und Sedimente/Verkrautungen mit einfachen Mitteln entfernt werden können.



Abbildung 66: Einbau Betonpflasterstein zwischen Hochborden



Abbildung 67: hydraulisch überlastete Mulde im Tiefpunkt, Vegetationsschädigung in Folge Eintrag von Feinstoffe und zu häufigem Überstau zieht Infiltrationsstörung nach sich, Anlage 5

Die Abbildung 68 stellt zusammengefasst unter Kennzeichnung des weiterführenden Schadensrisikos die auftretenden Mängel an dezentralen Übergängen dar.

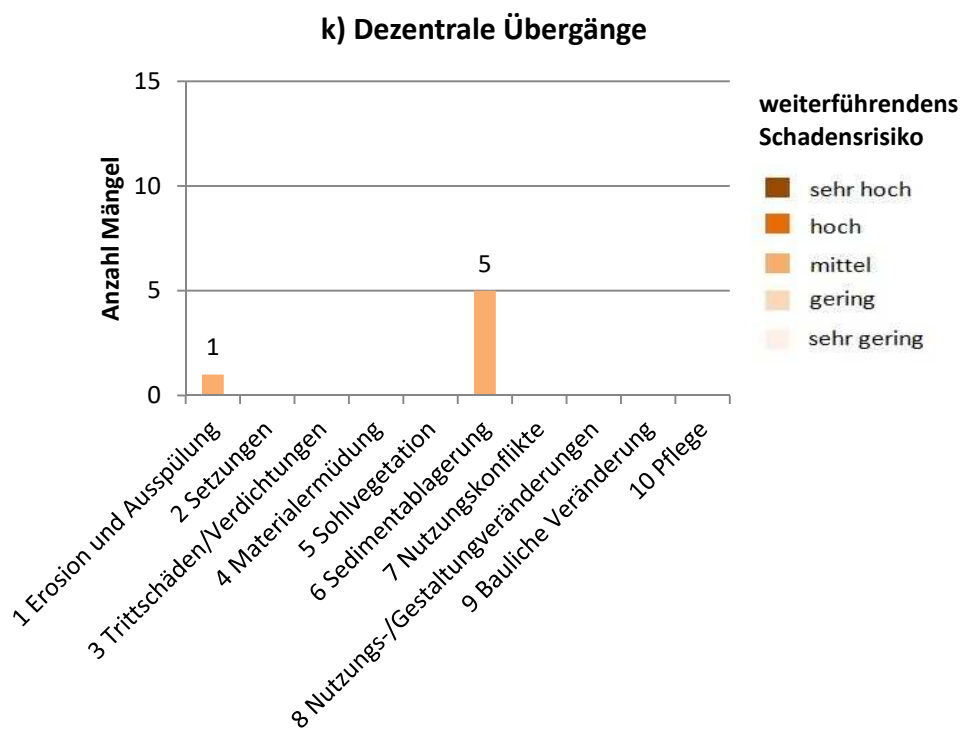


Abbildung 68: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte k) Dezentrale Übergänge

6.10.6 Diffuse Übergänge

Wie in Abbildung 69 dargestellt kommt es bei diffusen Übergängen hauptsächlich zu Mängeln in Form von Sedimentablagerungen.

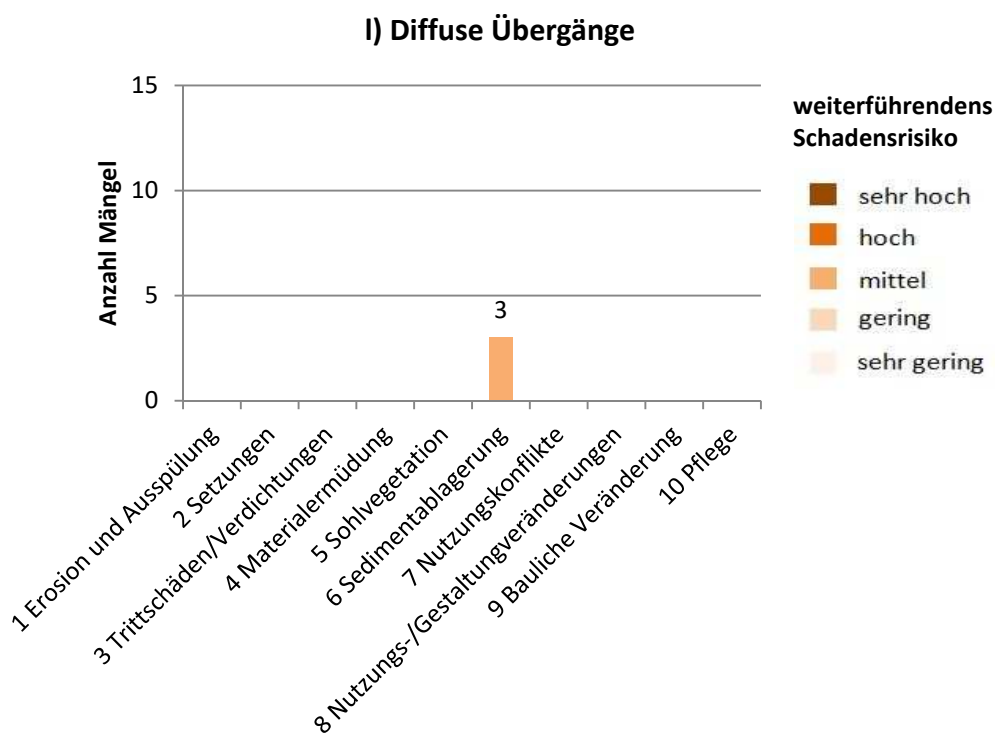


Abbildung 69: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte I) Diffuse Übergänge

Zu Sedimentanreicherungen kommt es vor allem durch die Einleitung von Abflüssen von verkehrlich genutzten Flächen. Erfolgt die Ableitung breitflächig diffus über die Schulter verteilen sich mitgeführte Sedimente auf der Muldensohle und werden von Pflanzen in die Bodenmatrix eingearbeitet, ohne dass es zu Veränderungen der Durchlässigkeit der Muldensohle kommt. Teile der Sedimente werden im Bankettbereich zwischen befestigter Fläche und Muldenböschung abgelagert. Diese werden durch den Aufwuchs von Pflanzen fixiert und es setzt eine Wulstbildung ein. In fortgeschrittenem Zustand kann es dabei zu einem Rückstau auf die zu entwässernde befestigte Fläche kommen.

Da die Wulstbildung nicht gleichförmig, sondern je nach Menge der mitgeführten Sedimente in unterschiedlichem Tempo und Intensität stattfindet, ist eine durchgängige Entfernung der Wülste nur in längeren zeitlichen Intervallen gerechtfertigt und realistisch.

Um den stellenweisen Rückstau auf die angeschlossenen befestigten (Verkehrs-) Flächen zu verhindern, ist ein punktuell Abschälen in regelmäßigen Abständen (alle 5-10 m) sinnvoll.



Abbildung 70: Punktueller Abschälung der Wulstbildung zur Vermeidung von Rückstau auf die Fahrbahn, Wulstbildung an Muldenzulaufsteinen mit Verhinderung des Einlaufens von Niederschlagswasser

6.10.7 Muldenwall, -böschung

Betriebspunkt Muldenböschungen

Erosionsschäden an begrünten Böschungen treten auf, wenn die erosionsschützende Vegetationsdecke nicht ausreichend ausgebildet ist. Gründe dafür können sein:

- ungeeignetes Oberbodensubstrat (zu geringe Feinkornanteil), Sande ohne Schluffanteile
- Wühltätigkeiten von Nagetieren (siehe z.B. Anlage 49)
- großflächige Verschattung durch (wegen fehlender Pflege zu groß gewordener) Gehölze (siehe Anlage 20)
- langanhaltende Wasserstände oder
- Trittschäden (siehe Fotos Anlage 6) in Versickerungsmulden.

Die Erosion von Muldenböschungen zieht zwar eine Verringerung der Muldensohlfläche nach sich, jedoch entfaltet der Prozess in der Regel keine betriebsrelevante Größenordnung und kommt nach erfolgter Abflachung der Böschung schließlich von selbst zum Stillstand. Bei schmalen, langgestreckten z.B. straßenparallel angeordneten Mulden können sich dagegen Verringerungen des Retentionsvolumens in funktionsrelevanter Größenordnung ergeben (vgl. 5.8.3).



Abbildung 71: Erosionsschäden in Folge Wühltätigkeiten von Nagetieren

Handelt es sich um Mulden, die ohne Wallausbildung in die Umgebung einprofiliert sind, entwickeln sich daraus keine weitergehenden Risiken für Standfestigkeit und Funktionsfähigkeit der Anlage.

Bei Muldenbegrenzungen die als Wälle beidseitig oberhalb der Geländeoberkante angeordnet sind, ergeben sich infolge Böschungserosion dagegen Risiken für die Standsicherheit und den Erhalt des Retentionsvolumens insgesamt.

Setzungsschäden im Bereich von Muldenwällen sind i.d.R. auf eine nicht ausreichende, ungleichmäßige „Verdichtung“ der Rohbodenkerne und unzulässige Abweichungen bei der Ausbildung des Planums bei der Erstellung sowie mangelnde Setzungsreserven bei der Planung (Freibord) zurückzuführen. Sie wirken als „Türöffner“ für nachfolgende Erosionsprozesse und können bei fortgeschrittener Erosion zu einem Totalverlust des Rückhaltevolumens führen.

Die auftretenden Mängel an Muldenwall und -böschung sind in Abbildung 72 unter Kennzeichnung des weiterführenden Schadensrisikos zusammengefasst.

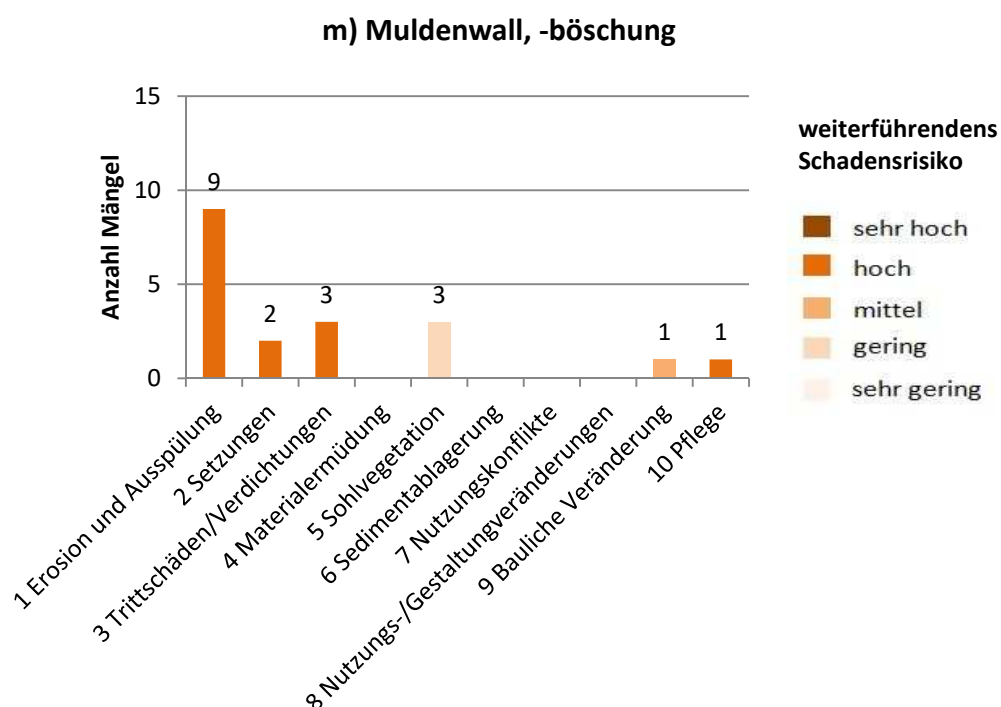


Abbildung 72: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte m) Muldenwall, -böschung

Im Zuge der Planung sind die landschaftsbaulichen Qualitätsstandards bezüglich Unter- und Oberboden sowie Ausbildung des Planums (DIN 18915 Bodenarbeiten, 18916 Pflanzen und Pflanzarbeiten und 18917 Rasen- und Saatarbeiten) einzuhalten.

Werden im Zuge der Wartung Setzungsschäden an Muldenwällen erkannt, sind diese durch entsprechende Nachprofilierung und Andeckung von Boden zeitnah zu beseitigen.

6.10.8 (Not-) Überlauf

In Abbildung 73 sind die an (Not-) Überläufen auftretenden Mängel zusammengefasst unter der Kennzeichnung des weiterführenden Schadensrisikos dargestellt.

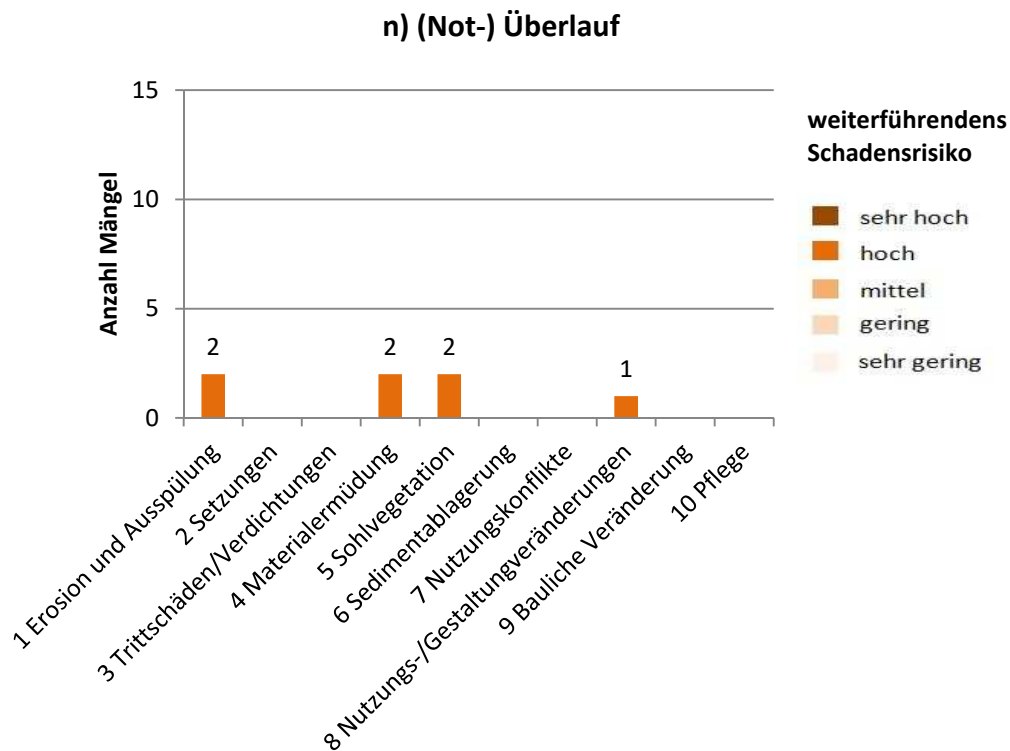


Abbildung 73: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte n) (Not-) Überlauf

Schon bei gering bewegter Topografie (1-2 % Gefälle) werden bei dezentraler Anordnung von Versickerungsanlagen höhenmäßig abgetreppte „Muldenkaskaden“ erforderlich. Zur gleichmäßigen Auslastung des Rückhaltevolumens findet bei Starkregenereignissen ein Überlauf von Regenwasser aus höher gelegenen Elementen in darunterliegende statt. In einer Reihe von Fällen wurde festgestellt, dass die für den Rückhalt des Regenwassers erforderlichen Überlaufschwelhöhen in Folge Setzungen, Erosion und Ausspülungen nicht mehr gegeben waren.



Abbildung 74: Erosion der Muldenböschung an Überlaufelement

Abbildung 74 zeigt einen Fall bei dem zwar dafür gesorgt worden war, den Überlauf mit Hilfe eines Spezialformsteins erosionssicher auszubilden, der restliche Teil des Überlaufwalls wurde jedoch als Mineraldamm, ohne ausreichende Erosionsfestigkeit, erstellt. Nach rd. 16 Betriebsjahren wurden Erosionsschäden an 50 von insgesamt 103 Überlaufelementen festgestellt, die bereits in 24 Fällen zu einem signifikanten Rückhaltevolumenverlust der Mulde geführt hatten.

Der bisher eingetretene Verlust an Rückhaltevolumen insgesamt liegt zwar erst bei ca. 7 %, das ungebremste Überlaufen aus einzelnen bereits geschädigten Kaskadenelementen in darunterliegende lässt jedoch für die nähere Zukunft eine dynamische Zunahme der Erosionsschäden und einen beschleunigten weiteren Verlust an Rückhaltevolumen erwarten. Erosion und Ausspülungen an Muldenüberläufen innerhalb oder am Ende von Mulden (-kaskaden) gefährden, wegen des drohenden Verlusts von Anstaufläche und Retentionsvolumen die entwässerungstechnische Funktionserfüllung der Versickerungsanlage insgesamt. Dieser Prozess unterliegt einer sich selbst beschleunigenden Dynamik.



Abbildung 75: Verwitterte Böschungssicherung aus Holz an Überlauf

Die in Abbildung 75 gewählte Randbefestigung von Überlaufschwellen mit Rundholzpfosten ist nach rd. 16-jähriger Betriebszeit in weiten Teilen weggefault. An Stelle der Rundholzpfosten bilden sich neue, gegenüber der Sollüberlaufschwelle (Betonelement) abgesenkte Fließwege aus. Folge ist auch hier ein massiver Verlust an Rückhaltevolumen und die Gefahr exponentiell fortschreitender Erosionsschäden an den Rändern der Überlaufbauwerke.

Der Einsatz solcher, aus dem Fließgewässerausbau stammenden als Uferbefestigung eingesetzten Bautechniken ist für die Erstellung von Muldenüberläufen nicht geeignet. Im Zuge einer qualifizierten Wartung, Pflege und Instandhaltung, sind diese durch erosions- und verwitterungsresistente Materialien/Konstruktionen zu ersetzen.

Abbildung 76 zeigt einen Fall, bei dem versucht wurde den Kern des Muldenwalls mit Hilfe einer Folie gegen Erosion zu sichern. Die Vegetation der Mutterbodenauflage war deshalb nicht in der Lage sich mit dem, auf diese Weise abgeschotteten Walkern zu verzahnen. Folge war hier ein Abspülen der Mutterbodenauflage. Da die Mutterbodenauflagenhöhe nicht als zusätzliches Freibord ausgelegt ist, sondern mit ihrer Oberkante selber die Überlaufschwellenhöhe sicherstellen sollte, zieht dies hier einen vollständigen Verlust des Rückhaltevolumens nach sich.



Abbildung 76: Erosierte Muldenwälle

Diese in den vorstehenden Abbildungen aufgezeigten Betriebspunkte bedürfen im Rahmen von Wartung, Pflege und Instandhaltung einer besonderen Aufmerksamkeit. Werden Fehlentwicklungen zeitnah erkannt, können diese mit einfachen Mitteln (Nachprofilierung Mineraldamm, Ergänzung beschädigter Überlaufbefestigungen) behoben werden.

6.10.9 Muldenüberläufe in Rigole

Neben den oberflächigen Muldenüberläufen stellen die vertikalen Muldenüberläufe in die Rigole ein weiteres betriebsrelevantes Element dar (Abbildung 77). Diese werden angewendet, wenn die Mulde auf Grund der nicht ausreichend vorhandenen Muldenfläche nur auf eine geringere Häufigkeit als das Gesamtsystem ausgelegt werden und die Überläufe bei einer Jährlichkeit kleiner 1 pro Jahr zur weiteren Speicherung in die Rigole geleitet werden.

Die Weiterleitung geschieht via Überläufen, die auf der Ebene des Bemessungseinstaus gelegen sind. Diese sind entweder geschlitzte Öffnungen, die das Wasser in einem aufgeständerten Rohr in die Rigole leiten. Der Durchmesser und die Schlitzweite können hierbei sehr unterschiedlich sein.



Abbildung 77: Muldenüberlauf direkt in Drosselschacht, kommuniziert mit Rigole. Drosselablauf in Ablauf des Schachtes (oben). Muldenüberlauf, etwas zu flach montiert (unten)



Abbildung 78: Muldenüberlauf (Aufsicht) mit gepflasterter Umrahmung, Vlieseinsatz zur Verhinderung des Eintrages von Feinstoffen in die Rigole



Abbildung 79: Muldenüberlauf mit Tauchwandprinzip zur Verhinderung des Eintrages Schwimm- und Feinstoffen in die Rigole

Die Umpflasterung des Einlaufes verhindert das Zuwachsen. Ein Filterkorb mit Vlies kann den Eintrag von Feinstoffen in die Rigole verhindern, führt aber zu erhöhtem Betriebsaufwand bis hin zum Versagen des Überlaufes.

Ganz entscheidend ist die höhenmäßige Einordnung de Überlaufes in die Mulde. Diese sollte mit einem Freibord so erfolgen, dass das zulaufende Wasser einen maximalen Einstau vor Überlauf erreichen kann. Oft werden die Überläufe aus Sorge vor zu hohem Einstau zu tief gesetzt. Damit kann dann die Reinigungsleistung der Versickerung durch die Oberbodenzone und die Absetzwirkung für Feinstoffe in der Mulde nur ungenügend zum Tragen kommen.

Überläufe sind so anzuordnen, dass ein Maximum an Einstauvolumen in der Mulde bei gleichzeitig ausreichend Freibord gegeben ist. Setzungen sind zu vermeiden und sollten ausgeglichen werden.

Die Überläufe sind auf Durchgängigkeit zu prüfen. Vorhandene Vliesfilter sind regelmäßig zu reinigen, um eine einwandfreie Funktion zu gewährleisten. Von Vorteil sind Überläufe mit Tauchwandprinzip, die einen Eintrag von Schwimmstoffen weitgehend verhindern.

6.10.10 Dränrohr und Drossel im Schacht

In den untersuchten Anlagen, die als Mulden-Rigolen-System mit Ableitung ausgeführt sind, werden die Abläufe aus den Rigolen über Drossel in den Kanal abgegeben (Abbildung 80 und Abbildung 81). Zu den Drosseln existieren unterschiedliche Bautypen.

- Verstellbare Öffnung ineinander gesteckter Rohre (Pilotbauart 90er Jahre)
- Lochblendendrossel
- Kegeldrossel



Abbildung 80: links: Erste Drossel mit verdrehenden Rohren, rechts: Drossel im Überlaufschacht im Ablauf des Schachtes montiert



Abbildung 81: links: Kegeldrossel, rechts: Lochblendendrossel

Es wurde beobachtet, dass die Drosseln in den Drosselschächten oft nur selten kontrolliert und gewartet werden. Dies konnte am Zustand abgelesen werden. Zum Teil waren die Schachtdeckel schwer zu öffnen oder auch schon zugewachsen.

Die einzelnen Drosseln funktionieren unterschiedlich und weisen somit auch unterschiedliche Betriebspunkte auf, die für die Funktion wichtig sind. Trotz geringer Kontrolle kann die Drossel als unkritischer Betriebspunkt angesehen werden.



Abbildung 82: Dränrohr mit Feinwurzeleinwüchsen

Das Dränrohr sollte möglichst frei von Einwurzungen sein. Bei der Begehung und Kamerabefahrung wurden meist keine Einwüchse, oder auch nur geringe Einwüchse durch Feinwurzeln beobachtet, die unkritisch zu sehen sind (Abbildung 82). Allerdings wurde auch von Einwurzungen durch Baumwurzeln berichtet. Letztere sind auch abhängig vom Standort und der verwendeten Baumart.

Für die Wartung und den Betrieb ergeben sich daraus unterschiedliche Aufgaben bei Bau und der späteren Kontrolle:

- *Einstellen des Durchmesser (Verdrehung Rohre)*
- *Freihalten des Querschnittes (Lochblende)*
- *Einstellen des Kegels auf den erforderlichen Abfluss und Einhalten des Abflusses*

Diese Punkte sind bei der Wartung regelmäßig zu kontrollieren, um eine einwandfreie und möglichst genaue Drosselung des Abflusses zu gewährleisten.

Die Drainagerohre sollten in größeren Abständen kontrolliert werden, um Einwüchse festzustellen und zu beseitigen.

6.10.11 Mutterbodenschicht bzw. Muldensohle

In Abbildung 83 sind die an Mutterbodenschicht bzw. Muldensohle auftretenden Mängel zusammengefasst dargestellt.

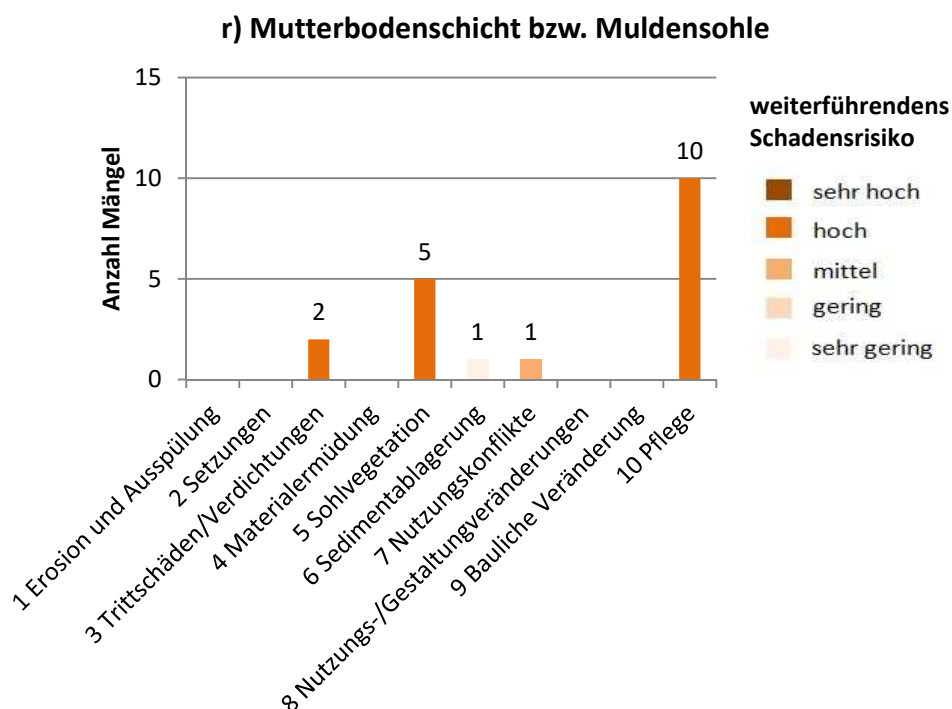


Abbildung 83: Kategorisierung und Bewertung relevanter Betriebspunkte r) Mutterbodenschicht bzw. Muldensohle

Trittschäden durch Bespielen

In Wohngebieten werden Versickerungsmulden auch zu Spielzwecken genutzt. In einzelnen Fällen werden dort zielgerichtet Spielgeräte aufgestellt (siehe Abbildung 84). Die hohe Frequentierung zieht in den betroffenen Bereichen Verdichtungen und eine Kolmation des Oberbodens nach sich.



Abbildung 84: Bolzplatz in Versickerungsmulde



Abbildung 85: Zentrale Versickerungsfläche Wohngebiet (Anlage 40)

Abbildung 85 zeigt flächig verteilte Störsteine mit Hilfe derer die Nutzung der Mulde als Bolzplatz wirkungsvoll verhindert wird.

Empfohlen wird, schon bei der Planung und Bemessung Reserveflächen vorzusehen (Flächenzuschlag damit eine Doppelnutzung der Versickerungsanlage möglich ist). Außerdem eine Beschränkung des für Bespielen in Frage kommenden Bereiches mit Hilfe von Störelementen (Störsteine)

Trittschäden bei Straßenentwässerung

Im öffentlichen Straßenraum treten Trittschäden gehäuft vor allem bei linearen Versickerungsmulden (straßenparallel) auf (Abbildung 86). Hier ist zu beobachten, dass eine mangelnde Abstimmung der öffentlichen Erschließungsplanung (Anordnung Querungshilfen für die öffentlichen Mulden, Ausstieg aus Parkenden PKW) und grundstücksbezogener Planung (Anordnung von Hauseingängen, Ladenlokalen, etc.) informell genutzte Trampelpfade in den Mulden nach sich ziehen.

Gegebenenfalls ist hier die Anordnung von befestigten Querungshilfen erst der nach Bebauung der Grundstücke (orientiert an den Trampelpfaden) zielführender als eine Erstellung im Rahmen des Straßenbaus. Bei geringer Frequentierung wird die Vegetation nur saisonal geschädigt und kann sich in der Vegetationsphase wieder erholen. Moderate Bodenverdichtungen können im Zuge der Durchwurzelung des Oberbodens durch die Pflanzen der Vegetationsdecken revidiert werden.

Bei hoher Frequentierung jedoch wird eine Regeneration des Vegetationsaufwuchses nicht mehr erreicht und die betroffene Fläche geht als versickerungswirksame Muldenfläche verloren. Um die davon betroffenen Stellen zu reduzieren und den Fußverkehr bei Querung der Mulden zu bündeln, ist es sinnvoll befestigte Querungshilfen an besonders hochfrequentierten Stellen zu erstellen.



Abbildung 86: Trittshaden straßenbegleitende Mulde vor Ärztehaus, Anlage 7

Überfahrerschäden bei Stellplatzanlagen

Bei Stellplatzanlagen mit linearen, die Stellplatzspangen als Grünfuge trennenden Versickerungsmulden können bei Schneedecke im Winter befestigte Fläche und Versickerungsfläche nicht unterschieden werden, wenn oberirdische Markierungen, Abgrenzungselemente fehlen. Es kommt regelmäßig dazu, dass Autos irrtümlich durch die Mulden fahren und dabei Vegetationsdecke und Untergrund schädigen.



Abbildung 87: Durchfahrene Mulde

Handlungsempfehlung: Markierung mit Zaun bzw. Rasenbändern (symbolische Durchfahrtsperren) oder Anordnung von Störsteinen

Überfahrtschäden im Zuge der Pflege bei breitflächigen Versickerungsanlagen

Bei großflächigen Versickerungsmulden wurde festgestellt, dass es durch Mahd und Abtransport des Mähgutes mit Hilfe von schwerem, gummibereiftem Gerät auch bei feuchten Bodenverhältnissen (Anlage 20) über eine mehr als 20-jährige Betriebszeit zu großflächigen Verdichtungen und nachlassender Versickerungsleistung in den Mulden kommt (siehe Abbildung 88).



Abbildung 88: Folgeschäden durch falsch durchgeführte Pflegemaßnahmen

Werden durch Bespielen Muldensohlflächen in einer kritischen Größenordnung geschädigt, wird empfohlen z.B. die Nutzung als Bolzplatz durch die Anordnung von, mit von Hand nicht beweglichen, Natursteinen zu verhindern. Dasselbe gilt für das Überfahren von linearen Mulden im Bereich von Stellplätzen. Die Schädigung durch Trampelpfade kann mit dem Bau befestigter Querungen sowie dem Anpflanzen von Stauden oder Heistern gebündelt und so reduziert werden. Eine Verhinderung der flächigen Schädigung breitflächiger Versickerungsanlagen ist nur im Zuge einer qualifizierten Ausschreibung, Vergabe und Überwachung der Pflegemaßnahmen zu erreichen.

Dafür sind Qualitätskriterien für Maschineneinsatz (Gewicht, Bereifung etc. und Bodenfeuchte/-tragfähigkeit beim Pflegegang) zu definieren. Eine Großflächenmahd mit Aufsitzgeräten ist ausschließlich bei trockenen Bodenverhältnissen zulässig. Bei Mahd ohne Fahrmaschineneinsatz (handbetriebener Freischneider) ist sicherzustellen, dass eine „feuchte“ Versickerungsmulde auch für den Abtransport des Mähgutes nicht befahren werden darf.

Muldenabgrenzungen und Böschungssicherungen aus Holz

Bauteile aus Holz an Überlaufbegrenzungen (siehe Abbildung 75) oder Fahrspurbegrenzungen sind in aller Regel nach mehr als 15-jähriger Betriebszeit verrottet bzw. für die, die Funktionsfähigkeit entscheidenden, Betriebspunkte nicht mehr vorhanden. Im Zuge der Pflege und Instandhaltung von Außenanlagen wird Versickerungsanlagen eine nur untergeordnete Beachtung geschenkt. Die Notwendigkeit einer Wiederherstellung der o.a. Holzbauteile wird im Rahmen klassischer Grünpflege und Außenanlageninstandhaltung nicht gesehen.

Vor diesem Hintergrund ist auf Holzeinsatz bei Planung und Bau von Versickerungsanlagen vollständig zu verzichten.

Sohlnebenheiten und Vegetationsentwicklung

Auf Grund von Sohlnebenheiten, heterogener Versickerungsleistung des Untergrunds sowie ungleichmäßiger Beschickung von Muldensegmenten kommt es in einzelnen Bereichen zu länger anhaltenden Wasserständen. Die Sohlvegetation passt sich diesen feuchteren Standortgegebenheiten an (siehe Abbildung 89) und es setzen sich dort feuchteresistente Pflanzen (Gräser, Binsen) durch.

Dadurch kann es zu einem höheren Aufwand bei der Pflege (Mahd und Entnahme des Mähgutes) kommen. Für die Funktionsfähigkeit der Versickerungsanlage sind solche Vegetationsdiversifizierungen alleine noch keine negativ zu bewertende Entwicklung, sondern können Teil einer die Versickerungsfähigkeit und Durchwurzelung des Oberbodens sicherstellenden selbsttätigen Anpassung an spezifische Standortbedingungen sein. In anderen Fällen können sie jedoch auch ein Zeichen allgemein nachlassender Versickerungsfähigkeit und Regenerationsleistung des Rückhaltevolumens sein. Bei einigen Anlagen wurden einzelne Mulden mit langanhaltenden Wasserständen aufgefunden. Die gefällebezogene Analyse dieser Situationen hat gezeigt, dass die betreffenden Mulden unplanmäßig mit dem Mehrfachen der in der Planung veranschlagten Niederschlagsabflüsse beaufschlagt werden. Ursache dafür sind Abweichungen der Abflusswege durch Wulstbildung. Die planmäßig für höher gelegene Muldenelemente vorgesehenen Abflüsse werden wegen der Wulstbildung an diesen vorbei in das am Tiefpunkt gelegene Muldensegment abgeleitet.

Der dadurch hervorgerufene häufige Überstau der Mulden schädigt den Aufwuchs der Vegetation und wird somit zur Gefahr für die Aufrechterhaltung der Versickerungsfähigkeit der belebten Bodenzone (Anlage 5). Diese Prozesse können im Einzelfall ein Totalversagen der betroffenen Versickerungsanlagen nach sich ziehen (Zusammenbruch Vegetation, Verlust Porenstruktur der belebten Bodenzone, fortschreitender Verlust der Versickerungsfähigkeit bis hin zur Selbstabdichtung der Sohlfläche).



Abbildung 89: Ausbildung feuchteresistenter Vegetation

Sorgfältige Planung des Übergangsbereichs von befestigter Fläche zum Muldenbankett (Höhensprung usw.) sowie regelmäßige Kontrolle und Beseitigung abflussbehindernder Wulstbildung.

Aufwuchs von Wildstauden

Ein auch nur stellenweises Auslassen der Mindestpflege (einschurige Mahd = eine Mahd pro Jahr) zieht schon nach ein bis zwei Jahren je nach Standortumgebung den Aufwuchs von Wildstauden (z.B. Brombeeren) und/oder Gehölzen (z.B. Birken) nach sich (Abbildung 91 und Abbildung 92). Diese entwickeln in kurzer Zeit eine Verschattungswirkung die zum Zusammenbruch der Rasen-/Wiesenvegetation führt (Erosions-/Kolmationsgefahr).

Um dieser Entwicklung entgegenzutreten und sie zu korrigieren ist ein Pflegegang (Rodung) mit hohem Aufwand erforderlich.



Abbildung 90: Brombeerbefall von Muldensegmenten

Aufwuchs von kleinen und mittleren Gehölzen

Bleiben die Pflegegänge über einen längeren Zeitraum aus, kommt es innerhalb 5-7 Jahren zu einem ungebremsten Aufwuchs von Gehölzen. Neben einer flächendeckenden Verschattung wurden dabei Verstopfungen von Zulaufrohren in fortgeschrittenem Zustand festgestellt, die ein Totalversagen der Entwässerungs- und Versickerungsanlage innerhalb der nächsten 3 Jahre erwarten lassen.



Abbildung 91: Aufwuchs von Kleingehölzen



Abbildung 92 Aufwuchs von Gehölzen

Aufwuchs von Großgehölzen

Bei Anlagen mit bisherigen Betriebszeiten von über 20 Jahren wurde festgestellt, dass der ungehinderte Aufwuchs von Gehölzen in der Peripherie der Versickerungsanlagen einen Totalausfall der Vegetationsdecke durch großflächige Verschattung und Laubfall verursachen kann (siehe Abbildung 93).



Abbildung 93: Verschattungsfolgen

Die Aufwuchsstandorte der Gehölze weisen einen Abstand von 15 und mehr Metern auf und stehen nicht selten jenseits der Grundstücksgrenze (siehe Abbildung 93).

Da die Gehölze oft Höhen von 20 m erreicht haben, macht hier eine Rodung und Wiederherstellung der betriebsnotwendigen Rahmenbedingungen extrem schwierig und teuer.

Im Zuge der Mäharbeiten sollte daher auch der Verschattungsgrad und dessen Ursprung überprüft werden, um frühzeitig den Gehölzaufwuchs zurückzuschneiden.

Betriebspunkt Muldensohle

Setzungsschäden in Mulden ziehen eine ungleichmäßige Ausbildung der Sohlfläche nach sich. In den durch Setzung betroffenen Bereichen stellen sich länger anhaltende Wasserstände ein, die zu einer Gefahr für den Aufwuchs der Vegetation und dem Erhalt von Porenstruktur und Wasserdurchlässigkeit führen können.

Gehen Vegetationsdecke und Porenstruktur verloren, sackt der Oberboden zusammen, verliert an Volumen und verstärkt so die Setzungstiefe im betroffenen Bereich. Wegen der fortschreitenden Kolmationprozesse gehen die betroffenen Flächen als für die hydraulische Funktionsfähigkeit der Mulde relevante Versickerungsfläche verloren und ziehen auch auf den übrigen vegetationsbeständigen Flächen länger anhaltende Wasserstände nach sich.

Handlungsempfehlungen

Eine mechanische Nachprofilierung zur Wiederherstellung einer durchgängig ebenen Sohle ist bei in Betrieb genommenen Versickerungsanlagen, die mit den bemessungstechnisch vorgesehenen Niederschlagswassermengen beschickt werden, nicht sinnvoll. Die Gefahr ist dabei groß, dass die noch vorhandene Vegetation weiter geschwächt, der Oberboden durch Umlagerung und Profilierung weiter an Skelettstruktur verliert und ggfs. auch der gewachsene Boden/Untergrund verdichtet und in seiner Versickerungsleistung negativ beeinflusst wird.

Als Lösungsansätze kommen stattdessen folgende Maßnahmen in Frage:

- *Bei quantitativ wenig bedeutsamen Flächenanteilen kann einer Besiedelung mit standortgerechten Gräsern im Zuge der natürlichen Sukzessionsentwicklung Raum gegeben werden. Diese dauert i.d.R. ein bis zwei Vegetationsperioden.*
- *Bei flächengroßen und bemessungstechnisch relevanten Vegetationsausfällen ist ggfs. eine provisorische alternative Teilentleerung (gedrosselte Ableitung, abpumpen von Wasserständen) mit der Einsaat feuchteresistenter Gräser in den betroffenen Bereichen sinnvoll.*

Die Betriebserfahrungen zeigen, dass die Wiederbesiedelung von Sohlbereichen, mit z.B. Binsen, die Versickerungsfähigkeit des Bodens signifikant erhöht.

Die erhöhte Versickerungsfähigkeit wiederum zieht eine „Abtrocknung“ des Standortes nach sich. Folge davon ist, dass die Binsen im Zuge der Sukzession wieder verschwinden und standortgerechten Gräsern Platz macht.

6.11 Ex-Post-Analyse – Betriebliche Aspekte

Im Zuge des Untersuchungsvorhabens waren für Anlagen, die schon in früheren F+E-Projekten Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen waren, Ex-Post-Analysen durchzuführen. Die Ex-Post-Analysen wurden dabei getrennt nach stofflichen, hydraulischen und betrieblichen Gesichtspunkten durchgeführt und dokumentiert. Auswahlkriterien für die betriebsbezogenen Ex-Post-Analysen waren:

- Beide Anlagen waren 2001 bereits Untersuchungsgegenstand eines F+E-Projektes der Universität Essen
- beide Anlagen weisen eine über 20-jährige Betriebsdauer auf
- die Eigentümer/Betreiber beider Anlagen waren den Untersuchungen ihrer Anlagen gegenüber in besonderer Weise aufgeschlossen und kooperativ
- die Verfügbarkeit von Planungs-, Bemessungs- und Genehmigungsunterlagen war in beiden Fällen gut

6.11.1 Ex-Post-Analyse: betriebliche Aspekte Anlage Nr. 20

Die Grunddaten der Anlage sind im Steckbrief Nr. 20 (siehe Anlagenband) dokumentiert.

Die Versickerungsanlage wurde im Zuge der Genehmigungsplanung mit Hilfe des DWA-Arbeitsblattes A-138 bemessen.

Die vor Ort ermittelte Wasserdurchlässigkeit des Untergrundes wurde mit 2×10^{-6} m/s (entspricht 16,6 cm/d) ermittelt.

Als Bemessungsergebnis wurden unter Ansatz der für die Versickerung zur Verfügung stehenden Nettomuldensohlfäche von 10.213 m² das erforderliche Rückhaltevolumen mit 1.472,32 m³ ermittelt. Unter Ansatz der in den Folgejahren zusätzlich an die bestehende Versickerungsanlagen angeschlossenen 2.600 m² befestigter Fläche ergibt sich gemäß A-138 ein erforderliches Rückhaltevolumen in Höhe von 1.598,90 m³ (+126,58 m³). Der Zuwachs an befestigter Fläche um rd. 10 % (inkl. Dachfläche) macht gemäß A-138 die Vorhaltung von 8 % zusätzlichen Muldenvolumens erforderlich.

Da die vor Ort erhobene Versickerungsleistung des Bodens mit 2×10^{-6} m/s der zum Zeitpunkt der Planung und Erstellung der Anlage (1994) unterhalb der damals als Mindestversickerungsleistung von 5×10^{-6} m/s (entspricht 43 cm/d) liegt, wurde die Versickerungsanlage im Zuge der Ausführungsplanung mit Hilfe einer Langzeitsimulation rechnerisch optimiert und nachgewiesen. Im Vordergrund stand hier vor allem das Erreichen stabiler Aufwuchsbedingungen für die Vegetation in allen Muldensegmenten. Der maximale Anstau in direkt beschickten Mulden wurde deshalb auf 0,10 bis 0,15 cm begrenzt. Nachgeschaltete Mulden, die nur bei seltenen, stärkeren Regenereignissen überhaupt mit Regenwasserabflüssen beaufschlagt werden, wurden dagegen mit größeren maximalen Anstauhöhen (0,30-0,50 m) konzipiert.

Diese auf stabile Betriebsbedingungen hin orientierte Bemessung hatte bei gleichbleibender Versickerungsfläche mit 1.850 m³ gegenüber der Bemessung nach DWA-A 138 ein um ca. 26 % größeres Retentionsvolumen zum Ergebnis.

Die zusätzlich neu befestigten Flächen wurden zielgerichtet an bis dahin wahrnehmbar wenig beanspruchte, nachgelagerte und flächengroße Muldensegmente (siehe Abbildung 94 und Abbildung 95, Mulde Nr. 9) angeschlossen.



Abbildung 94: Befestigte Flächen und Versickerungsanlage, Anlage 20

Die Untersuchungen bezüglich der in Kapitel 5.5 und 6.4 aufgeführten betrieblichen Aspekte zeigten Fehlentwicklungen in folgenden Bereichen:

- Behinderung des freien Auslaufs an den Einleitungspunkten von Grundleitungen in Folge Sohlaufhöhungen durch mit dem Regenwasser eingetragene Stoffe (Sedimente, Palettenabrieb, Flaschenetiketten etc.)
- Fahrspuren/Verdichtung und Veränderung der Vegetation in Folge unsachgemäßer Pflege (Abräumung des Mähgutes mit schwerem Gerät bei feuchten Bodenverhältnissen)
- Ungehindertes Größenwachstum von Gehölzen an Muldenrändern und auf Muldenwällen. Folge ist hier die großflächige Verschattung und Verlust der vor Erosion schützenden Vegetation.

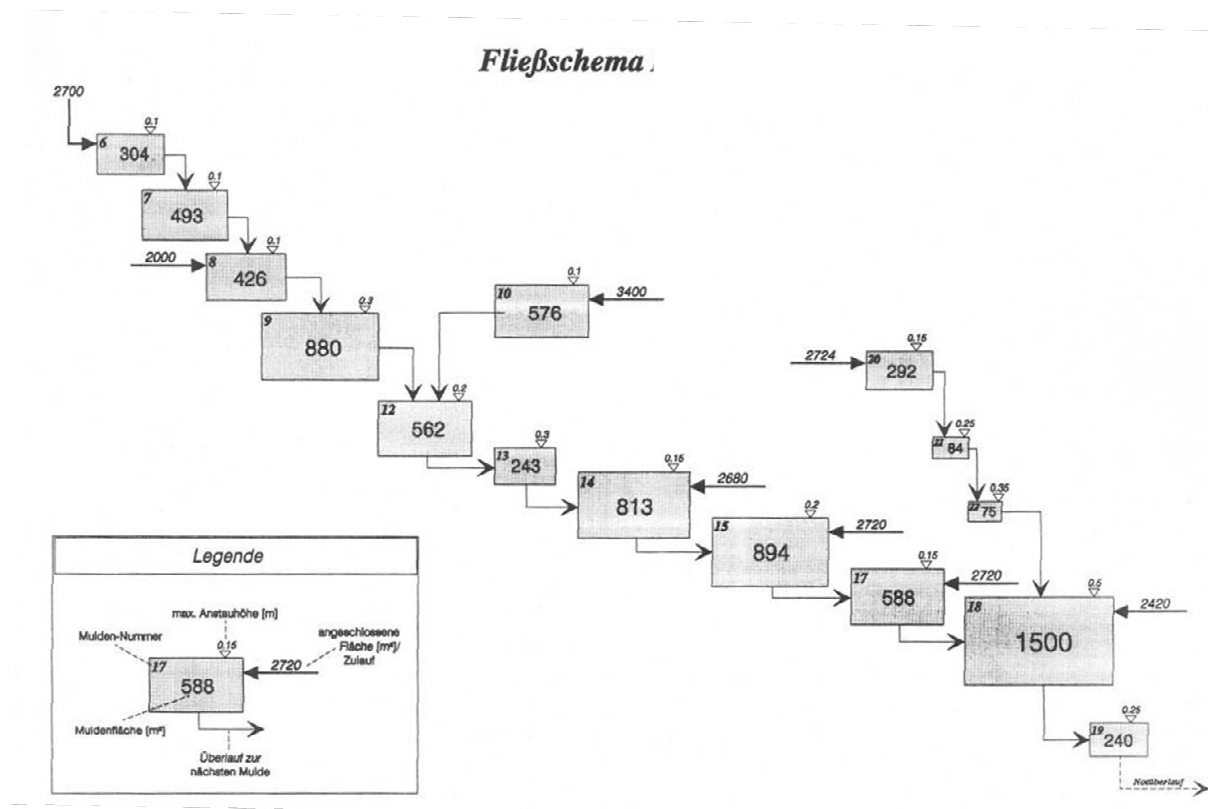


Abbildung 95: Fließschema Muldenkaskade Anlage Nr. 20

In Gesprächen mit dem Betreiber konnte ein Wiederfreilegen der Einläufe sowie die Umstellung auf eine qualifizierte Durchführung der Mahd erreicht werden. Überschaubarer Aufwand und hohe Plausibilität der Maßnahmen waren hier entscheidend für das zielgerichtete Handeln des Betreibers.

Zu einem Rückschnitt der Gehölze dagegen war der Betreiber vor dem Hintergrund des hohen zu erwartenden Arbeits- und Kostenaufwandes trotz deutlicher Hinweise auf die Gefahr für die Funktionsfähigkeit und Erosionssicherheit der Anlage nicht zu bewegen.

Großflächige Verschattung und Laubfall stellen in der hier erreichten Größenordnung jedoch eine ernsthafte Gefahr für den Bestand der Versickerungsanlage dar. Um diese Fehlentwicklung besser einordnen zu können wurde das bisher erreichte Größenwachstum und die damit einhergehende Verschattung differenziert untersucht.

Abbildung 96 zeigt den Zustand des Gehölzaufwuchses im Jahr 2002 (8 Jahre nach Inbetriebnahme). Abbildung 97 zeigt die verschatteten Flächen im Jahr 2015 (21 Jahre nach Inbetriebnahme). In Tabelle 30 ist der Verschattungsgrad bezogen auf die Muldensohlfäche für das Jahr 2015 mit 51 % ermittelt. Die Verschattung überlaufrelevanter Böschungen, die wegen Verschattung und Laubfall über keine vor Erosion schützende geschlossene Vegetationsdecke mehr verfügen, liegt 2015 bei 63 %. Festzustellen ist, dass bereits im Istzustand mehr als die Hälfte der Muldensohlfächen wegen der Verschattungswirkung ungehindert aufwachsender Gehölze, kolmationsgefährdet sind.

Bei den für den Erhalt der Retentionsvolumens entscheidenden überlaufrelevanten Muldenböschungen und -wällen, sind wegen ausgefallener Vegetationsdecke bereits zwei Drittel der Flächen in hohem Maße erosionsgefährdet.



Abbildung 96: Gehölzaufwuchs und Verschattung Mulden (türkise Linie) 2002, 8 Jahre nach Inbetriebnahme (Quelle: Google Earth, verändert).



Abbildung 97: Gehölzaufwuchs und Verschattung Mulden (türkise Linie) 2015, 21 Jahre nach Inbetriebnahme (Quelle: Google Earth, verändert).

Tabelle 30: Verschattungsgrad Muldensohlflächen Anlage Nr. 20

Nr. Mulde	Muldensohle (m ²)	Verschattung (m ²)	Flächenverlust (%)	Überlaufrel. Böschung (m)	Erosionsgef. Böschung (m)	Erosionsgef. Anteil (%)
6	327	225	69	98	56	57
7	338	246	73	63	55	87
8	328	312	95	71	71	100
9/11	1.037	590	57	117	114	97
10	589	340	58	35	26	74
12	562	406	72	76	39	51
13	204	182	89	43	25	58
14	685	125	18	90	35	39
15	777	173	22	40	5	13
17	683	87	13	57	20	35
Teich	590	152	26	19	4	21
19	80	10	13	-	-	-
20/21/22	666	620	93	-	-	-
Σ	6.866	3.468	51	709	450	63

6.11.1 Ex-Post-Analyse: betriebliche Aspekte Anlage Nr. 21

Die Grunddaten der Anlage sind im Steckbrief Nr. 21 (siehe Anlagenband) dokumentiert.

Im Rahmen der Ausführungsplanung und Beantragung der Wasserrechtlichen Erlaubnis, wurden 1995 die Versickerungsanlagen anhand des DWA-Arbeitsblattes A-138 bemessen.

Die Bodendurchlässigkeit wurde durch Schlitzsondierungen und Versickerungsversuche mit 3×10^{-5} m/s (250 cm/d) ermittelt.

Bei einer verfügbaren Nettomuldensohlfäche von rd. 4.000 m², wurden im Zuge des Wasserrechtsantrags die überschlägig angesetzten angeschlossenen, befestigten Flächen mit rd. 40.000 m² angesetzt. Gemäß DWA-A 138 wurde ein erforderliches Rückhaltevolumen von 969,14 m³ sowie ein mittlerer Anstau von 0,24 m für das 5-jährige Regenerereignis ermittelt.

Die zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme befestigte Fläche beläuft sich inklusive der damals schon berücksichtigten Erweiterung auf ca. 37.500 m² und liegt damit um ca. 2.500 m² unter dem ursprünglich angesetzten Wert.

Im Zuge von Umnutzungen wurden rd. 600 m² Muldensohlfäche überbaut; dadurch hat sich das Anschlussverhältnis von 9:1 auf 10:1 erhöht (siehe Tabelle 31).

Tabelle 31: Gegenüberstellung Bemessungsergebnisse (Anlage Nr. 21)

(m ² /m ³)	A-138 alt	A-138 neu
A _E	40.000	37.900
A _U	36.000	34.110
A _U /A _S	9:1	10:1
V _{M erf. Bem.}	970	795

Tabelle 32: Verschattungsgrad Muldensohlfächen Beispiel 2 (Anlage 21)

Mulde	Muldensohle (m ²)	Verschattung (m ²)	Flächenverlust (%)
Südwest	340	205	60
Süd	572	346	60
Südost	670	125	19
Σ	1.582	676	43

Die Untersuchung der Anlage zeigt, wie Anlage Nr. 20, mit Ausnahme der Fahrspuren/Verdichtung in Folge unsachgemäßer Pflege, die gleichen beiden Hauptmängel bzw. Fehlentwicklungen:

- Behinderung des freien Auslaufs an den Einleitungspunkten von Grundleitungen in Folge Sohlaufhöhungen durch mit dem Regenwasser eingetragene Stoffe (Sedimente, Palettenabrieb, Flaschenetiketten etc.)
- Ungehindertes Größenwachstum von Gehölzen an Muldenrändern und auf Muldenwällen. Folge der großflächigen Verschattung ist hier Verlust der vor Erosion schützenden Vegetation und Kolmation der Muldensohle.

Eine konsequente Einfriedung der Versickerungsanlagen sowohl außen an der Grundstücksgrenze als auch innen zu den Betriebsflächen sowie die Regulierung der Zugänglichkeit zu den Mulden ausschließlich über rd. 1,20 m breite, alarmgesicherte Tore, schließt hier den Einsatz schweren Gerätes bei der Pflege aus.

Der Standorte des ungehinderten Gehölzaufwuchses, der in Teilen bereits eine fortgeschrittene Kolmation der Muldensohle nach sich gezogen hat, ist das angrenzende Nachbargrundstück.



Abbildung 98: Ausfall Vegetation Muldensohle und -wall wegen Gehölzaufwuchs (Verschattung und Laubfall)

Abbildung 98 zeigt die durch ungehinderten Gehölzaufwuchses nach 20 Jahren verschatteten und inzwischen großteilig kolmatierten Bereiche.

Diese erreichen bezogen auf die gesamte Anlage in 2015 einen Anteil von 17 % der Muldenfläche. Bezogen auf die einzelnen betroffenen Muldensegmente liegt der Anteil der von Kolmation geschädigten bzw. bedrohten Flächenanteile bei bis zu 60 %.

6.11.2 Schlussfolgerung Ex-Post-Analyse

Betriebliche Schäden und Fehlentwicklungen bei den beiden seit über 20 Jahren betriebenen Anlagen beschränken sich auf drei wesentliche Bereiche:

- Abflussminderung sohlgleicher Grundleitungseinläufe in Folge abgelagerter Sedimente und sonstiger Stoffe von den Betriebsflächen
- Verdichtung von Muldensohlen durch unsachgemäße Pflege
- großflächige Verschattung und Laubfall durch das ungehinderte Aufwachsen von Gehölzen in und an der Peripherie von Versickerungsanlagen

Während die Betreiber zur Behebung der ersten beiden Fehlentwicklungen leicht zu bewegen waren, ist dies bei der dritten nicht auf Anhieb gelungen.

Ein weiterer ungehinderter Gehölzaufwuchs gefährdet jedoch die zukünftige Leistungsfähigkeit der Versickerungsanlage insgesamt. Hemmnisse die einer Korrektur dieser Fehlentwicklung im Wege stehen sind:

- hohe Kosten der Rodung
- schlechte Erreichbarkeit der Gehölzstandorte (für Rodungsmaschinen)
- natur- und baumschutzrechtliche Vorschriften zum Erhalt der Gehölze
- fehlende Akzeptanz für eine Rodung
- fehlender Zugriff des Betreibers bei Aufwuchs der Gehölze auf Nachbargrundstücken

Die Analyse der beiden Anlagen hat das Ausmaß und die Tragweite des ungehinderten Gehölzaufwuchses nach zwei Betriebsjahrzehnten für die Funktionsfähigkeit der Anlagen aufgezeigt.

Vor dem Hintergrund wird deutlich, dass ein regelmäßiger Rückschnitt von Gehölzen auf, am Rande und in der näheren Peripherie (10-20 m) von Versickerungsanlagen zwingend notwendig ist. Dabei ist eine Orientierung an der Landschaftspflege bzw. im Landschaftsbau übliche Auslichtung zum Zweck des Erhalts einer stabilen Grasnarbe sinnvoll. Bei der Neuerteilung ausgelaufener Wasserrechtlicher Erlaubnisse ist eine Auslichtung von Gehölzen im Einzugsgebiet der Versickerungsanlage eingefordert werden. Sedimentablagerungen werden landläufig als Gefahr für den Erhalt der Versickerungsfähigkeit von Versickerungsanlagen gesehen.

Die Untersuchung und Auswertung hat gezeigt, dass belebte Anlagen ein hohes Regenerationspotenzial gegenüber eingeschwemmten Sedimenten haben und bei ordnungsgemäßer

Planung und Bemessung keine Funktionseinschränkungen auf dieser Seite zu befürchten sind.

6.12 Übertragung der Ergebnisse auf Nutzungstypen

6.12.1 Gewerbe

Bei den im Rahmen der Ex-Post-Analyse betrieblich genauer untersuchten Anlagen 20 und 21 fiel auf, dass die Vegetation in den Versickerungsmulden ausdifferenziert und von einer relativ großen Artenvielfalt geprägt ist. In Teilbereichen (dort wo Leergut von Bieren und Limonaden umgeschlagen werden) dominieren Stickstoffanzeiger (Brennnesselstauden) die Vegetationszusammensetzung. Die diffuse, breitflächige Ableitung des Regenwassers von den ebenerdigen Betriebsflächen über auf Lücke gesetzte Hochborde funktioniert und zeigt in den Versickerungsmulden, außer kurzzeitigen Wasserständen nach Starkregenereignissen keine Spuren.

In den Bereichen an denen ebenerdige Betriebsflächen konzentriert über Kastenrinnen oder Grundleitungen abgeleitet werden, waren Sedimentaufhöhungen von bis zu 0,40 m und über eine Fläche im zweistelligen Quadratmeterbereich festzustellen.

Die mitgeführten Sedimente waren durchsetzt mit Aluminiumgetränkeflaschenverschlüssen, Palettenresten (Holz), Papierresten, kleinteiligem Palettenabrieb (Holzmehl) und sandigen Anteilen. An einzelnen Punkten war der ungehinderte Abfluss aus den Entwässerungsleitungen durch die Sedimentaufhöhungen behindert, so dass von einem regelmäßigen Rückstau in die Leitungen ausgegangen werden muss.

Offensichtlich wurden diese Einleitungspunkte im Praxisbetrieb nicht gewartet, so dass sich über die Jahre massive Sedimentaufhöhungen akkumulieren konnten.

Die ebenfalls punktuell über Rohrbrücken mit freiem Auslauf eingeleiteten Dachabflüsse dagegen hatten nach wie vor einen ungehinderten Auslauf in die Versickerungsmulden. Steinschüttungen (Kolkenschutz) und Muldenprofilierung waren weitgehend ohne Veränderung geblieben.

Wie in Kapitel 6.11 differenziert erläutert, stellt der ungehinderte Aufwuchs von Gehölzen nach rd. 20-jähriger Betriebszeit eine ernstzunehmende Fehlentwicklung dar, die nur mit erhöhten Aufwendungen zu korrigieren ist.

Auffällig ist, dass die Anlagen auf Gewerbegrundstücken zwar einer Unterhaltungspflege der Grünflächen unterzogen werden, eine gezielte Pflege der Betriebspunkte von Versickerungsanlagen aber nicht durchgeführt wird.



Abbildung 99: Muldenversickerung, Anlage Nr. 20

Nach 20-jährigem Betrieb zeigen sich Fehlentwicklungen, die sich ohne pflegerische Gegenmaßnahmen zu einer Gefahr für die weitere Funktionsfähigkeit der Anlagen entwickeln.

Die i.d.R. nach 20-jähriger Betriebszeit auslaufende und neu zu beantragende Wasserrechtliche Erlaubnis erlaubt hier den Aufsichtsbehörden differenzierte Angaben zum Status-quo, die Wiederherstellung ordnungsgemäßer Betriebsbedingungen und der Sicherstellung einer zukünftigen, qualifizierten Wartung, Pflege und Instandhaltung der Versickerungsanlagen einzufordern.

Charakteristisch für gewerbliche Grundstücke ist, dass schon wenige Jahre nach Fertigstellung weitere bisher noch nicht überbaute Grundstücksflächen im Zuge baulicher Erweiterungen befestigt werden. Betrifft dies Reservefläche oder sonstige bisher unbefestigte Flächen, erhöhen sich damit die Abflüsse ohne, dass dabei die Versickerungsanlagen flächenmäßig vergrößert werden. In Einzelfällen werden jedoch auch Versickerungsflächen selber überbaut. Die Kombination von vergrößerten abflussliefernden Flächen und einer Verringerung der Versickerungsflächen ist in diesem nur in sehr kleinem Maßstab ohne Durchführung von Kompensationsmaßnahmen realisierbar. Bei größeren Eingriffen dieser Art sind zusätzliche unterirdische Versickerungsbauwerke anzuordnen.

6.12.2 Handel/Dienstleistung

Das Spektrum der Anlagen bei den Handel und Dienstleistungsimmobilien weist unterschiedliche Reichweiten (Regenwasserbewirtschaftung nur der Dachflächen bzw. aller befestigten Grundstücksflächen) und Anlagenkonfigurationen auf.

Häufig werden ausschließlich die Dachflächen in kompakten Mulden auf der Gebäuderückseite bewirtschaftet. Die Muldenflächen sind dann in der Regel eingefriedet und unterliegen in Einzelfällen gar keiner Pflege (siehe Anlage 52). Nach einigen Jahren Betriebszeit stellt sich dort eine mehrere Meter hohe Vegetation ein (Brennnesseln, Brombeersträucher, Gehölze). Die Flächen geraten so immer aus dem Blick und die Möglichkeit einer Sichtkontrolle der Funktionsfähigkeit ist nicht mehr gegeben (siehe Abbildung 92 und Abbildung 93).

In einigen Fällen kommt es aufgrund der hohen Fließgeschwindigkeiten am Einlauf (Beschickung über größere Grundleitungen) zu Ausspülungen an Sohle und Böschung der Mulden. Werden auch die Verkehrsflächen über Regenwasserversickerungsanlagen entwässert, sind diese in der Regel in begrünten Pflanzstreifen zwischen Stellplätzen oder am Grundstücksrand angeordnet. Eine Pflege wird hier im Zuge der Grünflächen- und Außenanlagenpflege durchgeführt. Während die Sohlflächen der Mulden oftmals in gutem Zustand sind, wird der direkte Zufluss von den befestigten Flächen durch zugewachsene Lücken im Hochbord, Wulstbildung (einwachsen abgelagerter Sedimente) behindert bzw. in andere dafür nicht vorgesehene Bereiche abgeleitet.



Abbildung 100: Versickerungsmulde, Anlage 52

6.12.3 Wohnen

Das Bild bei den Anlagen im Bereich Wohnen weist eine hohe Heterogenität auf. Dabei fällt auf, dass mit einer schlüssigen aufeinander abgestimmten Entwässerungs-, Verkehrsanlagen- und Freianlagenplanung sowie konsequenter Wartung und Pflege auch bei hohen Befestigungsgraden nahezu mängelfreie Zustände erreicht werden (Anlage 1).

Unstimmigkeiten zwischen privater grundstücksbezogener Planung (insbesondere Anordnung Hauszugänge) und öffentlicher Erschließungsplanung (Anordnung Wegequerung der linear angeordneten Mulden) ziehen in einzelnen Bereichen Nutzungskonflikten nach sich. In solchen Bereichen werden die belebten Versickerungsanlagen in ihrer baulichen Gestalt und ihrer entwässerungstechnischen Funktionsfähigkeit punktuell beeinträchtigt (Anlage 6 und 7). In Bereichen mit bewegter Topographie (Anlage 13) sind in Folge unterlassener Wartung und Pflege bereits relevante Teile (7-15%) der ursprünglich bereitgestellten Retentionsvolumina verloren gegangen.

6.12.4 Öffentliche Verkehrsflächen

Bei den untersuchten Anlagen zur Entwässerung von Verkehrsflächen handelt es sich in der Regel um linienförmige, ein- oder beidseitig parallel in den Straßen angeordnete Mulden und Mulden-Rigolen-Systeme. (Anlage 1/2/6/13)

In verdichteten Mischgebieten kommt es immer wieder zu Nutzungskonflikten mit dem ruhenden Verkehr. Autos werden mit ein oder zwei Rädern in den Böschungen der Mulden abgestellt. Dabei kommt es zu Schädigungen von Bodenmatrix und Vegetation an den Böschungen, nicht aber an der für die Leistungsfähigkeit relevanten Sohle der Versickerungsanlagen. Trittschäden (Bodenverdichtung, Schädigung der Vegetationsdecke) treten dort auf wo erhöhte Querungsbedarfe für Fußgänger bestehen (mangelhafte bzw. fehlerhafte Anordnung von fußläufigen Querungsmöglichkeiten) sowie beim Aussteigen im Bereich von Längsparkplätzen. Zwar fallen die durch Trittschäden und Parken in begrünten Muldenflächen bei einer Begehung sofort ins Auge, ihr Anteil an den Gesamtversickerungsflächen bewegt sich jedoch im sehr niedrigen einstelligen Prozentbereich (1-2%) und stellen damit kein ernsthaftes Betriebsproblem dar. In Einzelfällen wurden bei sehr schmalen und langgestreckten Mulden mit direkt angrenzenden, hochfrequentierten Längsparkstreifen Trittschäden an den Muldenböschungen festgestellt, die eine für die Funktionsfähigkeit relevante Reduzierung des Retentionsvolumens nach sich gezogen haben (siehe Kapitel 6.8.3).

Werden im Bereich von Baustellen ganze Muldensegmente als Flächen für die Baustelleneinrichtung genutzt ist hier zumindest während der Bauzeit von signifikanten Leistungseinbußen auszugehen.



Abbildung 101: Straßenbegleitende Muldenkaskade, Anlage 13

6.13 Auswertung der Betreiberbefragung

6.13.1 Angaben der Betreiber

Es wurden die Betreiber aller näher untersuchten Anlagen kontaktiert. Daraus ergab sich ein Rücklauf von 32 Fragebögen von 13 Betreibern, die bezüglich der untersuchten Anlagen Angaben gemacht haben. Diese wurde sowohl im persönlichen Gespräch als auch, wo das nicht möglich war, von den Betreibern alleine ausgefüllt. Der Umfang des Rücklaufs schwankte zum Teil. Nicht immer konnten die Betreiber Auskunft zu allen gestellten Fragen geben. Die Ergebnisse wurden aggregiert und statistisch ausgewertet (siehe Abbildung 102 und Abbildung 103).

Bei den meisten betriebenen **Anlagentypen** handelt es sich um Mulden oder um Mulden-Rigolen-Systeme mit gedrosselter Ableitung. Nur eine Mulde-Rigole wurde vorgefunden. Dort wo Mulden-Rigolen-Systeme mit gedrosselter Ableitung gebaut wurden, ist die überwiegende **Drosselart** die Lochblende aufzufinden. Diese bilden die gängigste Bauart. Daneben wurden als Alternativausstattung Kegeldrosseln angegeben. Der Hersteller vertreibt diese Kegeldrosseln jedoch nicht mehr. Das überwiegende Füllmaterial für Rigolen ist gemäß der Befragung Kies. Lava wurde nur in einem Fall verwendet.

Die **Bepflanzung** der Mulden erfolgt in der Regel mit Rasen. In einem Fall hat sich neben Rasen auch Schilf etabliert, was ein Indiz auf längerfristige Staunässe ist. In einem weiteren Fall haben sich Weidengehölze entwickelt. Die angeschlossenen **Flächentypen** sind überwiegend Dächer und Gehwege. Deren **Lage** befindet sich sowohl auf öffentlichen als auch auf privaten Flächen. Straßen und Stellplätze sind in gleichem Maße zu je einem Sechstel der Anzahl von Anlagen vertreten. Die vorliegenden **wasserrechtlichen Erlaubnisse** haben in NRW i.d.R. eine lange Laufzeit von 20 Jahren. In anderen Bundesländern werden diese z.T. auch unbefristet erteilt. (10 Jahre in Berlin, wird dann unbefristet erteilt). Über den **Zustand nach Bau** der Anlagen liegen in der Regel keine Angaben, z.B. in Form von Bestandsunterlagen, vor. Daher sind meist auch keine Vergleiche zwischen Bau und Ausführung vorhanden. Es wurde davon ausgegangen, dass so wie geplant auch gebaut wurde.

Es gibt mehrere Gründe, die von den Betreibern für einen **Umbau** angegeben wurden. Dazu gehören zum einen die Erweiterung der angeschlossenen Flächen und zum anderen die Veränderung von Dachflächen. Ferner führen auch die Verlegung von Einlaufsituationen und Bodenauftrag/Aushub zum Umbau bzw. Umgestaltung der Anlage. Die **Straßenreinigung** im öffentlichen Bereichen wird von den Betreibern mit überwiegend einmal pro Woche (bei einmal die Woche kann es sein dass entweder der Gehweg oder die Straße gereinigt wird) angegeben. Je 1x erfolgt die Reinigung täglich bzw. alle 2 Wochen. In manchen Fällen werden aber auch große Intervalle von 1-3 Monaten angegeben, was einen hohen Eintrag von Feststoffen zur Folge haben kann.

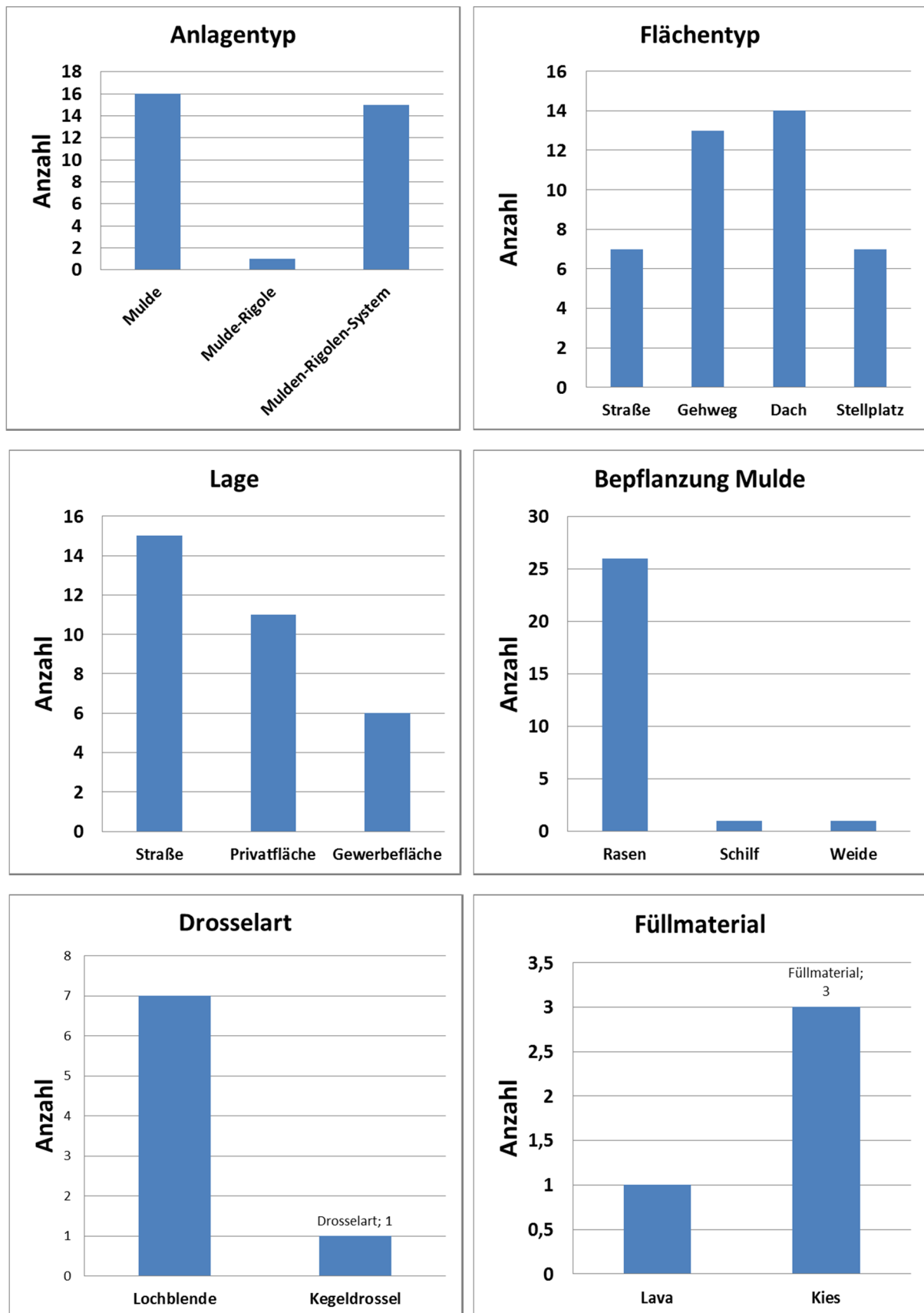


Abbildung 102: Angaben der Betreiber zu Anlagentypen, Flächentypen, Lage, Bepflanzung, Drosselart und Füllmaterialien an Versickerungsanlagen

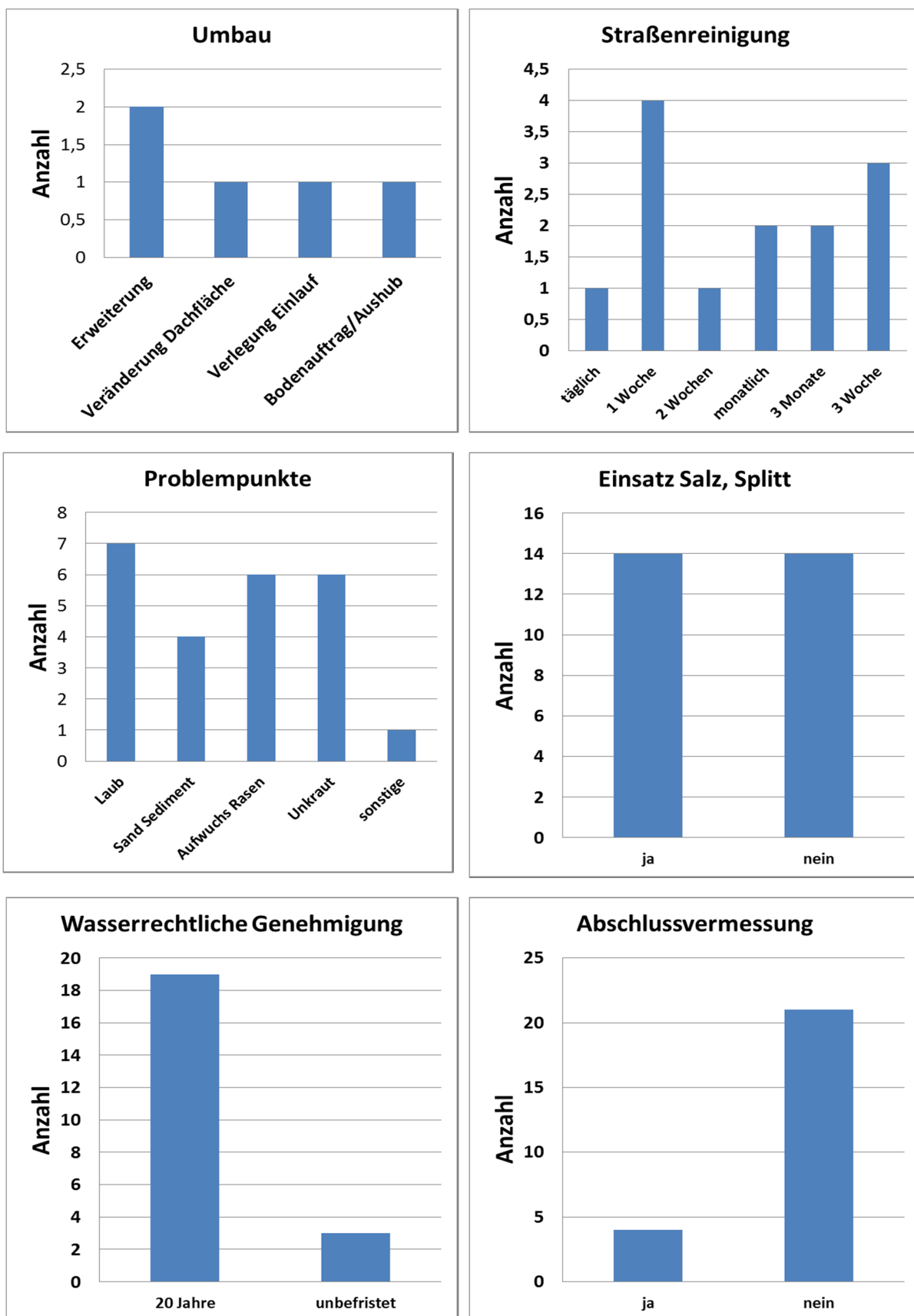


Abbildung 103: Angaben der Betreiber zu Umbauten, Straßenreinigung, Problempunkten, Einsatz von Streu/Splitt, Wasserrechtlichen Genehmigungen und Abschlussvermessungen an Versickerungsanlagen

Im **Winterbetrieb** ist jeweils zur Hälfte mit dem Einsatz von Splitt oder auch von Salz zu rechnen. Nach Angaben der Betreiber kam es zu keinerlei Problemen im Winterbetrieb. Dies bezieht sich sowohl auf Überstau als auch Einstau mit Versagen der Anlagen und ist vor der häufigen Besorgnis bezüglich des Frost-Tau-Wechsels als sehr positiv für die Leistungsfähigkeit der Anlagen zu bewerten.

Die von den Betreibern angegebenen **Problempunkte** sind sowohl hoher Laubfall, Sediment und Sandeintrag, als auch der Aufwuchs von Rasen und Unkraut. In je einem Fall wurde Kolk-schutz, Sandeintrag, Müll, Weihnachtsbäume, Wühlschäden, Erosionsschäden, Hundekot und Vertritt angegeben. Nur in einem Fall wurden als Problem Einwuchs von Baumwurzeln in die Mulden und auch in die Rohrleitungen der Rigolen genannt. Dies lässt darauf schließen dass die Probleme mit dem Einwuchs von Baumwurzeln relativ gering sind und u.U. nur mit bestimmten Baumarten zusammenhängen.

6.13.2 Zusammenfassung der Betreiberangaben

Auch wenn die Betreiber in dem einen oder anderen Fall Problempunkte sehen, so werden die Versickerungsanlagen insgesamt sehr positiv bewertet. Es gibt keine Hinweise, dass ein Betreiber auf solche Anlagen verzichten möchte und die Leistungsfähigkeit anzweifelt.

Nach Angaben gerade der öffentlichen Betreiber werden die oberirdischen Anlagenteile in der Regel von Dritten im Unterauftrag betrieben und gewartet. Eine der Hauptmotivationen ist dabei ein optisch positives Erscheinungsbild der oberirdischen Anlagenteile. Die unterirdischen Bauteile werden von den öffentlichen Betreibern häufig selbst gewartet, allerdings oft in längeren Intervallen, und solange keine Funktionsstörungen auftreten.

6.13.3 Vergleich der Betreiberangaben mit Beobachtungen in LEIREV

Der Vergleich der Betreiberangaben mit den Untersuchungsergebnissen aus LEIREV offenbart Diskrepanzen. In der Wahrnehmung der Betreiber spielen vor allem kleinere Schadensbilder, die langfristig jedoch die Leistungsfähigkeit von Anlagen negativ beeinflussen können eine nur untergeordnete Rolle. So werden kleinere Trittschäden oder Beschädigungen der Anlagenbauteile toleriert, solange die Anlagen prinzipiell funktionieren und keine akuten Rückmeldungen über ein Versagen auftreten. Solche Schadensmeldungen lagen insgesamt in nur zwei Fällen vor.

Wartung und Pflegemaßnahmen werden von den Betreibern in der Regel auf Mindestmaß reduziert, so lange keine Beschwerden oder offensichtliche Schäden auftreten. Hierbei spielt das Erhalten eines gepflegten äußeren Erscheinungsbilds und nicht die Funktion die maßgebende Rolle. Insofern werden oberirdische Anlagen besser gewartet als unterirdische Anlagenteile.

7 Handlungsempfehlungen

Im Folgenden werden zusammenfassende Handlungsempfehlungen aus stofflicher (6.1) und betrieblicher Sicht (6.2) formuliert. Hydraulische Mängel resultieren in der Regel aus mangelhafter Wartung und Betrieb, und können somit durch Berücksichtigung der in 6.2 aufgeführten Handlungsempfehlungen vermieden werden.

7.1 Stofflich

1. Die Vorbelastung von Muldensubstraten beim Einbau sollte möglichst gering ausfallen. Die Werte der Einbauklasse Z0 sollten möglichst unterschritten werden, da die Z0-Werte schon den Vorsorgewerten der BBodSchV (1999) entsprechen.
2. Unterhalb der Versickerungsanlage (Versickerungsraum) ist die Freiheit von Altlasten, Bau- und Trümmerschutt nachzuweisen.
3. Im Zuge der Bauüberwachung sollte die Vorbelastung des eingebauten Oberbodens gutachterlich durch eine abschließende Beprobung und Analyse nachgewiesen werden.
4. Die Verteilung des Abflusses sollte bei stofflich belasteten Abflüssen über die gesamte versickernde Fläche zur Vermeidung stark belasteter, punktueller Einlaufbereiche (z.B. Querinnen) erfolgen, wie sie z.T. bei großen Logistikanlagen verwendet werden. Dies kann z.B. durch Fächer, mehrere Einlaufpunkte oder Steinschüttung erfolgen. Auch aus hydraulischer Sicht ist eine flächige Beschickung notwendig, um punktuelle hydraulische Überlastung mit der Folge von Erosion und Kolmation im Zulaufbereich zu vermeiden.
5. Bei bereits bestehenden punktuell beschickten Versickerungsanlagen sollte aus stofflicher Sicht, nach Prüfung mittels Bodenprobe aus dem Einlaufbereich, ein Austausch des Substrates (Sedimente) stark belasteter Einlaufbereiche erfolgen.
6. Die Verwendung von verzinkten oder aus Zinkblech bestehenden Dachrinnen und Fallrohren, die nicht vorbewittert sind, sollte zukünftig möglichst vermieden werden.
7. Um eine breitflächige Ableitung in die Versickerungsanlage zu gewährleisten, sollten Pflanzenaufwuchs und Sedimentanlagerung bei flächenhafter Einleitung im direkten Randbereich der Mulden in regelmäßigen zeitlichen Abständen abgeschält werden (Verteilung der Abflüsse in die Fläche, ähnlich wie Bankettschälung bei Autobahnen).
8. Es sollte eine regelmäßige Reinigung des angelagerten Sediments (Staub, Reifenabrieb, Bodenmaterial) der befestigten (versiegelten) Flächen im Bereich des Einlaufes zur Vermeidung von Einträgen erfolgen.

Die angeführten Punkte 3 und 5 sollten bei neuen Anlagen bei der Bauabnahme und bei bestehenden Anlagen im Zuge der Verlängerung der wasserrechtlichen Erlaubnis mittels Auflagen gefordert werden.

7.2 Betrieblich

Die Handlungsempfehlungen aus betrieblicher Sicht gliedern sich in die beiden wesentlichen für die Funktionsfähigkeit der Anlagen Zuständigen:

- Betreiber
- Aufsichtsbehörden

Betreiber bzw. Beauftragter:

1. Betriebspunktbezogene Dokumentation der Anlagen (Listenkatalog, Betriebspunktverortung in Planskizze) als Grundlage für örtliche Aufnahme
2. Erstellung eines anlagenbezogenen Pflichtenheftes (Betriebsanweisung) zu Wartung, Pflege und Instandhaltung mit Angaben zu:
3. Betriebspunktbezogene Wartungs-, Pflege- und Instandhaltungsmaßnahmen
4. Betriebspunktbezogene Angabe zeitlicher Durchführungsintervalle
5. Durchführung und Protokollierung betriebspunktbezogenes Monitoring
6. Betriebspunktbezogene Definition, Ausschreibung, Vergabe, Überwachung spezifischer Wartungs-, Pflege- und Instandhaltungsmaßnahmen als Ergänzungsbaustein der Grünflächenpflege

Aufsichtsbehörde (Untere Wasserbehörde):

1. Formulierung der Auflage zur Führung und Vorlage eines anlagenbezogenen Pflichtenheftes Wartung, Pflege und Instandhaltung
2. Kenntnisnahme/Aktenarchivierung von Betreiber vorgelegte Wartungs- und Pflegedokumentation (alle 5 Jahre)
3. Formulierung der Auflage eines fachplanerischen Nachweises des Zustandes der Anlage ein Jahr vor Auslaufen der Wasserrechtlichen Erlaubnis mit folgenden Inhalten:

Betrieb und Funktion der Anlage

- Fotodokumentation Betriebspunkte
- Auflisten von Schäden, Wartungs-, Pflege-, Instandhaltungsmängeln
- Bewertung der betrieblichen Funktionsfähigkeit
- Zusammenstellung erforderlicher Instandsetzungsmaßnahmen

Hydraulische Leistungsfähigkeit

- Nachweis der Versickerungsleistung
- Dokumentation der Veränderungen bei den angeschlossenen Flächen
- Ggfs. Neubemessung unter Berücksichtigung Anlagenveränderungen

Stoffliche Belastung

- Entnahme von Bodenproben bei punktuellen Einläufen bei Anlagen auf Gewerbe und Industriestandorten sowie Hauptverkehrsstraßen (Mischprobe aus 3 Einzelproben 0-10 cm und 3 Einzelproben 20-30 cm Tiefe im direkten Einlaufbereich; Analyse von Cd, Pb, Cu, Zn).

4. Erstellung Instandsetzungskonzept zur Wiederherstellung / nachhaltigen Sicherstellung der Funktionsfähigkeit
5. Angaben zu erforderlichen baulichen Maßnahmen und ihrer analgenverträglichen Durchführung (Schutz vor Verdichtung, Verwendung geeigneter Geräte / Maschinen)
6. Nachweis der durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen incl. Nachweis der Funktionsfähigkeit als Voraussetzung für die Neuerteilung / Verlängerung der Wasserrechtlichen Erlaubnis.

8 Zusammenfassung Ergebnisse

8.1 Bodenkundlich / Stofflich

Die verwendeten Bodensubstrate und deren Schichtung im Muldenkörper entsprechen im Allgemeinen den Maßgaben des Regelwerks DWA-A 138 (2005). Die vorrangig verwendeten sandigen Substrate lassen eine hohe Sickerleistung und aufgrund der pH-Werte und des Humusgehaltes einen ausreichenden Stoffrückhalt erwarten. An einigen Standorten mit hohem Schluffanteil (Region Dortmund und Düsseldorf) ist die Versickerungsleistung auf Grund der Bindigkeit der Böden limitiert.

Die pH-Werte der meisten Muldenböden liegen im schwach sauren bis schwach alkalischen Bereich und entsprechen den Empfehlungen des Arbeitsblattes DWA-A 138. Die pH-Werte einiger Böden liegen jedoch im schwach sauren bis sauren Bereich. Ursache hierfür ist oftmals die Verwendung 1) des anstehenden, bereits versauerten geologischen Ausgangsmaterials und/oder 2) punktueller Einläufe mit sehr hohen Sickerwasserraten (z.B. Rohrbrücken, Abflussrinnen).

Die Muldenböden weisen keine ökologisch wirksamen Salzgehalte auf. Eine Beeinträchtigung der Funktionalität der Versickerungsanlagen durch Salzschäden an der Vegetation oder eine Gefährdung des Grundwassers durch salzhaltiges Sickerwasser ist nicht zu erwarten.

Die organischen Kohlenstoffgehalte in den beprobten Muldensubstraten (0-10cm) liegen bei den Bodenarten Sand und Lehm/Schluff im Bereich der Empfehlungen des Arbeitsblattes DWA-A 138 von 1-3 Masse % organische Substanz. Nur an zwei Anlagen wurden niedrigere Werte festgestellt.

Die Gehalte von Stickstoff, Schwefel und Phosphor liegen im Bereich von vergleichbaren Böden unter land- und forstwirtschaftlich Nutzung.

Aufgrund der hohen Heterogenität der verwendeten Muldensubstrate und der Unklarheit über die Schwermetallgehalte des Ausgangsmaterials, ist es nicht möglich auf eine betriebsbedingte Anreicherung von Schwermetallen in den Versickerungsanlagen zu schließen.

Die Schwermetallgehalte der Mulden mit dem Ausgangssubstrat Lehm/Schluff (vornehmlich Anlagen in NRW) legen jedoch nahe, dass es zu einer Anreicherung der Schwermetalle Zn, Cu und Pb in den Oberböden (0-10cm) der Anlagen gekommen ist, da diese sogar zum größten Teil über den Hintergrundwerten für Böden in NRW (Gebietstyp Ballungskern) liegen. Im Einzelnen bedeutet dies, dass ~75% der Zn, ~70% Cu- und der ~45% der Pb-Gehalte im Oberboden (0-10cm) der Mulden höhere Werte als die Hintergrundgehalte der Böden in den Ballungskernen in NRW aufweisen.

Die Mediangehalte der Metalle liegen, mit Ausnahme von Zink (Bodenart Lehm/Schluff und Sand) und Kupfer (Bodenart Sand), unterhalb der in der BBodSchV (1999) angegebenen Vorsorgewerte. An einigen Anlagen, bzw. Muldensubstraten werden die Vorsorgewerte für jedoch Schwermetalle überschritten.

Die Abnahme der Metalle mit der Tiefe lässt darauf schließen, dass das Oberbodensubstrat (i.d.R. 0-10 cm) und die darunter liegenden Bodensubstrate (-schichten) offenbar eine wirksame Filter- und Schutzfunktion gegenüber eingetragenen Schadstoffen durch das Oberflächenabflusswasser besitzen. Die Dauerhaftigkeit der Retentionsleistung, d.h. die stoffliche Belastbarkeit von dezentralen Regenwasserversickerungsanlagen ist bisher allerdings noch nicht ausreichend untersucht. Zu einer Überschreitung der Maßnahmenwerte nach BBodSchV (1999) in den jeweiligen Kategorien Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park- und Freizeitanlagen und Industrie- und Gewerbegrundstücke kommt es bei keiner der untersuchten Versickerungsanlagen.

An einigen Anlagen werden die Vorsorgewerte der Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe überschritten. Da die Gehalte von PAK und Benzo(a)pyren in den verschiedenen Tiefen sehr ähnliche Werte aufweisen und im Bereich der Hintergrundgehalte Benzo(a)pyren liegen, wird von Vorbelastung des Substrates beim Einbau ausgegangen.

Die Gehalte der Polychlorierte Biphenyle (PCB) liegen bei den untersuchten Anlagen immer unterhalb der methodischen Nachweisgrenze. Zu einer Überschreitung der Maßnahmenwerte nach BBodSchV (1999) in den jeweiligen Kategorien Kinderspielflächen, Wohngebiete, Park- und Freizeitanlagen und Industrie- und Gewerbegrundstücke kommt es bei keiner der untersuchten Versickerungsanlagen.

Anlagen, an denen intensiv genutzte Betriebsflächen konzentriert abgeleitet und über einen Punkteinlass in die Mulde geleitet werden oder an denen unbeschichtete Eindeckungen oder Regenrinnen und Fallrohre aus Zinkblech zur Dachentwässerung angeschlossen sind, zeigen deutliche Schwermetallakkumulationen in den direkten Einlassbereichen. Es ist bekannt, dass unbeschichtete Dachmaterialien stark korrodieren und hohe Mengen an gelösten und partikulären Schwermetallen freisetzen. Besonders problematisch ist dies, wenn bei entsprechenden Anschlussverhältnissen durch hohe Frachten mit einer Anreicherung im Boden oder Auswaschungen zu rechnen ist. Am ersten Beispiel der Ex-Post Analyse wurde dieser Zusammenhang besonders deutlich.

Eine Anreicherung der von der Regenrinne gelösten Schwermetalle findet jedoch hauptsächlich in dem obersten, stark humosen Horizont statt. Die Gehalte von Kupfer und Zink übersteigen besonders in diesen Bereichen der Mulde die Vorsorgewerte der BBodSchV deutlich. Bei punktuellen Einleitungen von Oberflächenabflüssen von Gewerbegebieten mit hohem Fahr-

zeugwechsel und/oder Rangierbetrieb zu einer starken Akkumulation von belasteten Sedimenten im Einlassbereich kommen. Diese weisen häufig Schwermetallgehalte auf, die ebenfalls deutlich über den Vorsorgewerten der BBodSchV liegen. Die Ableitung großer Wassermengen bürgt auch hier die Gefahr der Verlagerung v.a. gelöster Schadstoffe mit dem Infiltrationswasser im direkten Einlassbereich.

8.2 Betrieblich

Die genauere Inaugenscheinnahme von rd. 30 Anlagen hat gezeigt, dass es bei einer relevanten Anzahl von Anlagen signifikante Abweichungen zwischen Planung/ Wasserrechtlicher Erlaubnis und der tatsächlich erstellten baulichen Anlagen gibt.

Ein Motiv dafür war, die für den Rückhalt und die Versickerung von Regenwasser vorgesehene Flächen für andere Zwecke (i.d.R. als Stellplätze oder ebenerdige Betriebsflächen) zu nutzen. Statt einer dezentralen Rückhaltung und Versickerung wurde in diesen Fällen eine konventionelle Rückhaltung und Ableitung des Regenwassers realisiert.

Aufgefundene betriebliche Defizite haben ihre Ursache oftmals in einer fehlerhaften bzw. nicht ausreichend differenzierten Planung bzw. einer von dieser abweichenden Ausführung. Dies betrifft insbesondere Schäden in Folge von Nutzungskonflikten (Trittschäden, ruhender Verkehr, etc.).

Defizite bei der Entwässerung großer privater Grundstücke (wild abfließendes Wasser von großen Stellplatzanlagen auf öffentliche Straßen) und Wulstbildung im Bankettbereich bei diffuser Ableitung über die Schulter ziehen die Gefahr einer Überlastung von straßenbegleiteten Mulden in Kreuzungsbereichen und Tiefpunkten nach sich.

Die Regenwasserbewirtschaftungsanlagen werden i.d.R. im oberirdischen Bereich als Grünflächen gepflegt und betrieben. Einzelne Anlagen weisen wegen der Defizite bei Pflege und Betrieb Schwachstellen auf, die mittelfristig zu Einschränkungen der Leistungsfähigkeit führen können. Insofern ist es wichtig die Anforderungen an einen ordnungsgemäßen Betrieb mit dem eine nachhaltige Funktionsfähigkeit der Anlagen sichergestellt wird schon im Zuge der Erteilung der wasserrechtlichen Erlaubnis zu definieren und ihre Sicherstellung im Betrieb zur verpflichtenden Auflage zu machen. Die unterirdischen Anlagenteile erhalten oft nicht die Aufmerksamkeit und Wartung, derer sie bedürften, so lange keine offensichtlichen Probleme auftreten.

8.3 Hydraulisch

Der hydraulische Zustand der Versickerungsanlagen hängt in erster Linie von den jeweiligen Bodeneigenschaften ab. Die Böden aller untersuchten Anlagen können den Hauptbodenarten Sand oder Schluff zugeordnet werden. Bezüglich der Hauptbodenart wurden an keinem Standort Unterschiede im vertikalen Aufbau festgestellt. Ausnahmen bilden in wenigen Fällen kleinräumige Kolmationsbereiche mit lehmigen Bodentexturen. Die räumliche Verteilung zeigte, dass schluffgeprägte Böden vor allem in Anlagen in der Region Düsseldorf und Dortmund vorkommen, wo Löss das geologische Ausgangssubstrat darstellt. Im Raum Berlin-Brandenburg, der von glazialen Reinsanden und Lehmsanden geprägt wird, dominieren dagegen sandgeprägte Böden in den Versickerungsanlagen. Dies zeigt, dass es einen starken Einfluss der geogenen Bodenbeschaffenheit auf die eingebauten Substrate gibt.

Die bisher beprobten Anlagen entsprechen zum größten Teil der empfohlenen Versickerungsleistung nach DWA-A 138, die einen „entwässerungstechnisch relevanten Versickerungsbereich“ definiert, der zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ m/s und $1 \cdot 10^{-6}$ m/s liegt.

Unter Berücksichtigung der stofflichen und betrieblichen Untersuchungen können verschiedene Ursachen für niedrige K_f -Werte abgeleitet werden. Es sind:

- Sedimenteintrag
- Hydraulische Überlastung
- Übermäßige Verschattung
- Eingebauter Boden mit niedrigen K_f -Werten

Dies kann gerade in größeren Versickerungsanlagen zu ungleichmäßig verteilten Versickerungswerten führen, die zum Teil- oder Gesamtversagen führen können. Insgesamt stellen die vorhandenen Versickerungswerte in den untersuchten Anlagen einen langfristigen Betrieb der Anlage sicher.

8.4 Umweltnutzen

Im Zuge der Befragung der Betreiber wurden nur wenige Angaben zu Betriebskosten gemacht. Die gemachten Angaben decken sich aber mit den Erfahrungswerten von 0,5 – 1 EUR /m² Mulde und Jahr. Diese wiederum decken sich auch mit älteren Ausschreibungen und einer Übersicht der Betriebskosten aus dem Emscher Raum, die 2014 erhoben wurden. Da ein Austausch des Oberbodens bislang nicht erforderlich war, sind dazu bisher keine Kosten bekannt.

Der Umweltnutzen der Anlagen wird als hoch angesehen, da die diffusen Einträge auf Grund der hohen Flächenverhältnisse zu den angeschlossenen Flächen im Boden sehr gut zurückgehalten werden. Damit gelangen sie nicht in die Oberflächengewässer oder müssen in der Kläranlage entfernt werden. Die Anlagen tragen weiterhin zur Erhaltung und Verbesserung des natürlichen Wasserhaushaltes und aufgrund der Retentionseigenschaften für Niederschlagswasser zur Minderung des Überflutungsrisikos im urbanen Raum bei. Eine Quantifizierung dieser Ökosystemleistung konnte in diesem Projekt nicht durchgeführt werden.

Die Investitions- und Betriebskosten sind unter Berücksichtigung der bei anderen dezentralen Reinigungsanlagen nicht vorhandenen Retentionsleistung deutlich geringer. Daher ist das Kosten-Nutzen Verhältnis für die Versickerungsanlagen mit Oberbodenpassage generell positiv zu bewerten.

8.5 Restnutzungszeiten und Erneuerungszyklen

Die Restnutzungszeiten der Anlagen müssen auf Grund der Unterschiedlichkeit der Anlagen differenziert betrachtet werden. Die Infiltrationsleistung ist in ca. 95% der Anlagen nach wie vor so gut, dass eine Standzeitbegrenzung nicht notwendig ist.

Bezüglich der stofflichen Belastung zeigen sich deutliche Akkumulationen von Schadstoffen an punktuellen Einläufen bei großen angeschlossenen Flächen im Gewerbe und zum Teil bei Dachentwässerungen (hier vor allem Zink). Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Elutionsversuche lassen bei den meisten Anlagen den Schluss zu, dass bisher noch ein ausreichender Schadstoffrückhalt vorliegt. Selbst bei hochbelasteten Punktzuläufen liegen die Elutionswerte der entnommenen Proben meist unterhalb der Prüfwerte der BBodSchV für den Pfad Boden-Grundwasser. Genauere Aussagen können aber erst mit Hilfe von In-Situ Sickerwasseruntersuchungen getroffen werden.

Bei flächigen Zuläufen wurden dagegen kaum kritischen Feststoffgehalte festgestellt. Hier verteilen sich die Stoffeinträge gleichmäßiger über die Anlage. Diese Anlagen müssen trotz zum Teil langer Laufzeiten derzeit nicht erneuert werden.

Aus betrieblicher Sicht sind bei einzelnen Anlagen auf Grund hoher Erosion der Böschung, hoher Sedimenteinträge oder Verschattung die Restlaufzeiten wahrscheinlich limitiert.

9 **Ausblick und weiterer Forschungsbedarf, offene Fragen**

Im Projekt LEIREV wurde eine Vielzahl von Anlagen hinsichtlich Betrieb, quantitative und qualitative Parameter untersucht. Die detaillierte Untersuchung der ausgewählten Anlagen hat dabei eine Reihe spezifischer Schwachstellen bei der grundstücksübergreifenden Anordnung von LEIREV aufgezeigt. Es tauchten auch Fragen bezüglich großer und kaskadierter Anlagen und Sickerwasserqualität auf, die im Zuge von LEIREV noch nicht abschließend beantwortet werden konnten, jedoch eine hohe Praxisrelevanz aufweisen. Dazu gehören z.B. schleichende Erosionsprozesse, die bei kaskadierten Anlagen in abschüssigen Gelände zu einem relevanten Verlust an Rückhaltevolumen führen und Überflutungsgefahren am Endpunkt / Tiefpunkt der Anlagen nach sich ziehen können. Diese sind z.T. auf ungenügender Sorgfalt bei Planung und Erstellung und zum anderen Teil auf Defizite bei Betrieb und Wartung zurück zu führen. Hier sind weitergehende Auswertungen und Entwicklungsarbeiten im Hinblick auf die Ableitung von Sanierungsmaßnahmen sowie Qualitätsvorgaben im Hinblick auf Planung, Erstellung sowie Betrieb und Wartung durchzuführen.

Die Wissenslücken ergaben sich in folgenden Bereichen:

- Qualität des abfließenden Niederschlagswassers bei verschiedenen Nutzungskategorien (Handel/Gewerbe, Wohnen, Verkehr)
- Qualität des realen Sickerwassers unterhalb der Anlagen (30 cm) bei verschiedenen Nutzungskategorien
- Belastungsstatus der Mulden bei Niederschlagsabflüssen von unbeschichteten Dachmaterialien aus Kupfer und Zink
- Abflussquantität und Qualität bei großen bzw. kaskadierten Anlagen (Versickerung in Gewerbegebiete bzw. Bereiche mit Versickerungskaskaden in ungünstiger Geländetopographie/Gefällesituationen)
- Prognose der Standzeiten und Maßnahmen für bestehende und neu zu errichtende Anlagen
- Fehlende Langzeituntersuchungen großer kaskadierter Anlagen
- Fehlen einheitlicher Prüfkriterien bzw. eines Prüfverfahrens bei auslaufenden wasserrechtlichen Erlaubnissen zu Behebung von Unsicherheiten für Behörden und Betreiber
- im Hinblick auf Weiterführung des Betriebs, Notwendigkeit einer fundierten Regelungsbedarf zur Überarbeitung und Aktualisierung bestehender Broschüren zur Regenwasserbewirtschaftung mit dezentralen Maßnahmen

10 Literaturverzeichnis

- Abel, Stefan (2015): Building rubble composed soils - Contamination status and sulfate release. Doktorarbeit an der Technische Universität Berlin, Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt.
- BBodSchV, A. (1999). Bundes-Bodenschutz-und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999. Bundesgesetzblatt (Teil I), 1554-1582.
- Beenen et.al., (2007): Lessons from ten years storm water infiltration in the Dutch Delta, Novatech, Lyon.
- Blanchard M, Teil MJ, Ollivon D, Garban B, Chesterikoff C, Chevreuil M. (2001): Origin and distribution of polyaromatic hydrocarbons and polychlorobiphenyls in urban effluents to wastewater treatment plants of the Paris area (FRANCE). *Water Research* 35:3679-3687.
- Blecken, Godecke-Tobias, Jiri Marsalek, and Maria Viklander (2011): "Laboratory study of stormwater biofiltration in low temperatures: total and dissolved metal removals and fates." *Water, Air, & Soil Pollution* 219 (1-4): 303-317.
- Boden, Landesarbeitsgemeinschaft (2003): "Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden." Bund Länder Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, 170 S.
- Boivin P, Saade M, Pfeiffer HR, Hammecker C, Degoumois Y. Depuration of highway runoff water into grass-covered embankments(2008): *Environmental Technology* 29:709-720.
- Boogaard et. al. (2014): Lessons Learned From Over Two Decades of Global Swale Use, 14th ICUD, Kuching, Malaysia.
- Bowne et.al. (2011): Modeling the development and consequences of clogging for storm water infiltration trenches, 13th ICUD, Porto Allgre, Brasil.
- Brown, J. N., & Peake, B. M. (2006). Sources of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban stormwater runoff. *Science of the total environment*, 359(1), 145-155.
- County, P. G. S. (2002). Bioretention manual. Prince George's County (MD) Government, Department of Environmental Protection. Watershed Protection Branch, Landover, MD.
- Davis AP, Shokouhian M, Sharma H, Minami C (2001): Laboratory study of biological retention for urban stormwater management. *Water Environment Research* 73(1): 5-14.
- Davis AP, Shokouhian M, Sharma H, Minami C.(2006) Water quality improvement through bioretention media: Nitrogen and phosphorus removal. *Water Environment Research* 78(3): 284-293.
- DBU (1998): Untersuchung und Weiterentwicklung der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung am, Beispiel des Mulden-Rigolen-Systems in der Schüngelbergsiedlung, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau (Uni Hannover)/Institut für Wasserforschung GmbH (Dortmund), gefördert von der Deutschen Bundstiftung Umwelt Az 04685, Osnabrück

Dierkes C, Geiger WF. Pollution retention capabilities of roadside soils (1999). *Water Science and Technology* 1999; 39:201–208.

Dietz, ME. Low impact development practices (2007): A review of current research and recommendations for future directions. *Water Air Soil Pollut* 186(1-4): 351-363.

DIN /ISO 13877 (1995): Bodenbeschaffenheit–Bestimmung von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK)–Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (HPLC) Verfahren.

DIN 11885 (1997): Wasserbeschaffenheit-Bestimmung von 33 Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie.

DIN 1483 (2007): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser-, und Schlammuntersuchung. Wasserbeschaffenheit – Teil 12: Bestimmung von Quecksilber mittels. Atomabsorptionsspektrometrie (AAS).

DIN 19683-9 (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau – Physikalische Laboruntersuchungen – Teil 9: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderbodenproben.

DIN 19684-3 (2000): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Chemische Laboruntersuchungen - Teil 3: Bestimmung des Glühverlusts und des Glührückstands. Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 38407 F8 (1995): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Gemeinsam erfassbare Stoffgruppen (Gruppe F) - Teil 8: Bestimmung von 6 polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) in Wasser mittels Hochleistungs-Flüssigkeitschromatographie (HPLC) mit Fluoreszenzdetektion (F 8)

DIN 38414-4 (1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser. Abwasser-und Schlammuntersuchung: Schlamm und Sedimente (Gruppe S): Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4).

DIN/ ISO 10390 (2005): Bodenbeschaffenheit–Bestimmung des pH-Wertes. Deutsches Institut für Normung e. V.

DIN/ ISO 10694 (1996): Bodenbeschaffenheit-Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse). Beuth, Berlin.

DIN/ ISO 11265 (1997): Bodenbeschaffenheit-Bestimmung der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit. Beuth, Berlin.

DIN/ ISO 11272 (2001): Bodenbeschaffenheit–Bestimmung der Trockenrohddichte. Beuth, Berlin.

DIN/ ISO 11277 (2002): Bodenbeschaffenheit—Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Mineralböden—Verfahren mittels Siebung und Sedimentation.

DIN/ ISO 11464 (1996): Bodenbeschaffenheit-Probenvorbehandlung für physikalisch-chemische Untersuchungen. Beuth, Berlin.

DIN/ ISO 11465 (1996): Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf der Grundlage der Masse.

- DIN/ ISO 11466 (1997): Bodenbeschaffenheit; Extraktion in Königswasser löslicher Spurenelemente (ISO 11466: 1995). DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN/ ISO 16703 (2005): Bodenbeschaffenheit - Gaschromatographische Bestimmung des Gehalts an Kohlenwasserstoffen von C10 bis C40.
- DIN/ ISO 9377-2 (2003): Water Quality-Determination of Hydrocarbon Oil Index-Part, 2.
- Dohmann, M., Hamacher, R. (1998): Wartung und Betrieb von Anlagen zur Regenwasserversickerung. – Forschungsvorhaben Land NRW-MURL IVB6-042 202.
- DWA-A 138 (2005): DWA-Regelwerk, Arbeitsblatt DWA-A 138 , Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser; ISBN-10:3-937758-66-6, Hennef 2005.
- Folkeson L, Bækken T, Brenčič M, Dawson A, François D, Kuřimská, P et al. (2009): Sources and fate of water contaminants in roads (pp. 107-146). Springer Netherlands.
- Förster, J. (1999): Variability of roof runoff quality. *Water Science and Technology*, 39(5), 137-144.
- García P, Pérez ME, Guerra A.(2014): Using TM images to detect soil sealing change in Madrid (Spain). *Geoderma*;214: 135-140.
- Göbel P, Dierkes C, Coldewey WG (2007): Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of contaminant hydrology* 91(1):26-42.
- Gonzalez-Merchan et.al. (2011): Monitoring of clogging evolution in the infiltration system, Novatech 2010, Lyon.
- Gonzalez-Merchan, Barraud (2011): Characterization & main factors affecting clogging evolution of the bottom of stormwater infiltration systems, 13th ICUD, Porto Alegre, Brasil
- Haile, T. M., Hobiger, G., Kammerer, G., Allabashi, R., Schaerfing, B., & Fuerhacker, M. (2016): Hydraulic Performance and Pollutant Concentration Profile in a Stormwater Runoff Filtration Systems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(1), 1-16.
- He, W, Wallinder, IO, Leygraf, C. (2001): A comparison between corrosion rates and runoff rates from new and aged copper and zinc as roofing material. *Water Air Soil Pollut. Focus*, 1(3-4): 67-82.
- Hiller, D. A.; Winzig, G. & Dornauf, C. (2001): Abschlussbericht - Bodenchemische Untersuchungen von Versickerungsanlagen als Grundlage für eine nachhaltige Niederschlagswasserbewirtschaftung im Sinne des Boden- und Grundwasserschutzes. Universität Essen.
- Hunt, W., A. Jarrett, J. Smith, and L. Sharkey (2006): Evaluating Bioretention Hydrology and Nutrient Removal at Three Field Sites in North Carolina. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 132(6):600-608
- Hütter, U. & Remmler, G. (1997): Analytisches Begleitprogramm für die Versickerung von Niederschlagsabflüssen an einem Pilotprojekt bei kritischen Untergrundverhältnissen.

Information und Technik Nordrhein-Westfalen (2013): Bodenflächen in NRW nach Art der tatsächlichen Nutzung, Ausgabe 2013. <https://webshop.it.nrw.de/ssearch.php?kategorie=1800&prefix=C17>

Ingvertsen, ST., Cederkvist, K, Régent, Y, Sommer, H, Magid, J, Jensen, MB (2012): Assessment of existing roadside swales with engineered filter soil: I. Characterization and lifetime expectancy. *Journal of Environmental Quality* 41(6): 1960-1969.

Kaiser, M. (1998): Nutzungsdauer und Regenerierungsmöglichkeiten von Regenwasserwasserversickerungsanlagen. In: Dohmann, M. (Hrsg.): *Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Impulse aus Europa – Impulse für Europa*. Aachen.

Kaiser, M. (1999): Aus Erfahrungen lernen – Was man zur Planung und Ausführung wissen muss. In: Londong, D.; Nothnagel, A.: *IBA Emscher Park* (Hrsg.): *Bauen mit dem Regenwasser. Aus der Praxis von Projekten*. S.99-115, München (1999)

Kaiser, M. (2000): Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung – Hinweise zum Erhalt und zur Entwicklung der Regenerationspotentiale. In: *Fachzeitschrift EntsorgungsPraxis* 11/2000, S. 43-47, Wiesbaden (2000)

Kaiser, M., MUNLV (Hrsg.) (2003): *Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung. Betrieb von Anlagen zur naturnahen Niederschlagsversickerung*.

Kandra et.al. (2011): Investigation of biological clogging in storm water filters, 13th ICUD, Porto Allgre, Brasil.

Kayhanian, M, Fruchtman, BD, Gulliver, JS, Montanaro, C, Ranieri, E, Wuertz, S. (2012): Review of highway runoff characteristics: comparative analysis and universal implications. *Water Research* 2012; 46: 6609- 6624.

Kluge, B., Wessolek, G. (2010): Heavy metal pattern and solute concentration in soils along the oldest highway of the world – the AVUS Autobahn. *Environmental Monitoring and Assessment* 184(11):6469-81.

Kluge, B., Werkenthin, M., Wessolek, G. (2014): Metal leaching in a highway embankment on field and laboratory scale. *Science of The Total Environment*, 493, 495-504.

Kocher B. (2008): *Schadstoffgehalte von Bankettmaterial – bundesweite Datenauswertung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 167, NW-Verlag, Bremerhaven, 2008*

Länderarbeitsgemeinschaft Abfall - LAGA (2003): *Merkblatt M 20: Anforderungen an die Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen–Technische Regeln*.

Landesarbeitsgemeinschaft Boden - LABO (2003). "Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Böden." *Bund Länder Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz*, 170 S.

LANUV NRW - Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (2007): Leitfaden zur Erstellung digitaler Bodenbelastungskarten Teil II: Siedlungsbereiche Recklinghausen: 107 S.

Le Coustumer, S, Fletcher, TD, Deletic, A, Barraud, S, Poelsma, P. (2012): The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: a large-scale column study. *Water research*; 46(20): 6743-6752.

Le Coustumer, S, Fletcher, TD, Deletic, A, Barraud, S, Lewis, JF. (2009): Hydraulic performance of biofilter systems for stormwater management: Influences of design and operation. *Journal of hydrology*; 376(1): 16-23.

LeFevre, GH, Paus, KH, Natarajan, P, Gulliver, JS, Novak, PJ, Hozalski, RM. (2014): Review of dissolved pollutants in urban storm water and their removal and fate in bioretention cells. *Journal of Environmental Engineering*; 141(1): 04014050.

Li, H, Davis, A. Urban Particle Capture in Bioretention Media (2008). I: Laboratory and Field Studies. *Journal of Environmental Engineering*; 134(6): 409–418.

Li, YL, Deletic, A, McCarthy, DT. (2014): Removal of E. coli from urban stormwater using antimicrobial-modified filter media. *Journal of Hazardous Materials*; 271: 73-81.

Lim, HS, Lim, W, Hu, JY, Ziegler, A, Ong, SL. (2015): Comparison of filter media materials for heavy metal removal from urban stormwater runoff using biofiltration systems. *Journal of Environmental Management*; 147:24-33.

Lindsey, G, Roberts, L, Page, W. Inspection and maintenance of infiltration facilities (1992): *J. Soil and Water Cons.*; 47 (6): 481-486.

Liu, J, Sample, DJ, Bell, C, Guan, Y. (2014): Review and research needs of bioretention used for the treatment of urban stormwater. *Water*; 6(4), 1069-1099.

Lundy, L, Ellis, JB, Revitt, DM. Risk prioritisation of stormwater pollutant sources (2012): *Water research*; 46 (20): 6589-6600.

Marsalek, J., Oberts, G., Exall, K., & Viklander, M. (2003). Review of operation of urban drainage systems in cold weather: Water quality considerations. *Water Science and Technology*, 48(9), 11–20

Mullane JM, Flury, M, Iqbal, H, Freeze, PM, Hinman, C, Cogger, CG, Shi, Z. (2015): Intermittent rainstorms cause pulses of nitrogen, phosphorus, and copper in leachate from compost in bioretention systems. *Science of The Total Environment*; 537: 294–303.

MURL - Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft (1998): RdErl. d. IV B 5 – 673/2-29010 / IV B 6 – 031 002 0901 v. 18.5.1998

Nordrhein-Westfalen, L. N. L. (2003): Hintergrundwerte für anorganische und organische Stoffe in Oberböden Nordrhein-Westfalens - Auswertung aus dem Fachinformationssystem Stoffliche Bodenbelastung (FIS StoBo).

Nordrhein-Westfalen, L., NRW, L. (2000): Empfehlungen für die Durchführung und Auswertung von Säulenversuchen gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV).

Panning, F., Sieker, F., Hillbrecht, B. (2006): Untersuchung eines Ölfalles im Bereich eines Mulden-Rigolen-Systems, gwf Wasser/Abwasser, München

Parker, JK, McIntyre, D, Noble, RT. (2010): Characterizing fecal contamination in stormwater runoff in coastal North Carolina, USA. *Water research*; 44 (14): 4186-4194.

Piguet, P, Parriaux, A, Bensimon, M. (2008): The diffuse infiltration of road runoff: an environmental improvement. *Science of the Total Environment*; 397: 13-23.

Preciado, HF, Li, LY. (2006): Evaluation of metal loadings and bioavailability in air, water and soil along two highways of British Columbia, Canada. *Water Air Soil Pollut*;172:81–108.

Roy-Poirier, A, Champagne, P, Filion, Y. (2010): Review of bioretention system research and design: Past, present, and future. *Journal of Environmental Engineering*;136 (9): 878-889.

Sauvé, S, Hendershot, H, Allen, HE (2000): Solid-solution partitioning of metals in contaminated soil: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter. *Environmental Science and Technology*; 34: 1125–1131.

Scheffer, F., Schachtschabel, P. et al. (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg. 2010. 16. Auflage.

Schöttler, U., Remmler, F. Hütter, U. (1997): Analytisches Begleitprogramm für die Versickerung von Niederschlagsabflüssen an einem Pilotprojekt bei kritischen Untergrundverhältnissen. Abschlussbericht zum F+E AZ 04684/01 und 02. Institut für Wasserforschung, Dortmund.

SenStadtUm - Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt (2016): Hinweise für Antragsteller zur Niederschlagsentwässerung (II), Berlin.

Sieker, F., Bandermann, S., Holz, E., Lilienthal, A., Sieker, H., Stauss, M., & Zimmermann, U. (1999). Innovative Hochwasserreduzierung durch dezentrale Maßnahmen am Beispiel der Saar-Zwischenbericht. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, DBU, Projekt AZ, 7147.

Sieker, F., Sieker, H., Bandermann, S., Huhn, V., Stecker, A. (2003): *Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten, Grundlagen und Anwendungsbeispiele – Neue Entwicklungen*, expert-Verlag, Renningen (2003)

Sieker, F., Kaiser, M., Sieker, H. (2006): *Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung – im privaten, gewerblichen und kommunalen Bereich. Grundlagen und Ausführungsbeispiele*, Stuttgart.

Søberg, Laila C., Maria Viklander, and Godecke-Tobias Blecken (2014): The influence of temperature and salt on metal and sediment removal in stormwater biofilters. *Water Science & Technology* 69 (11): 2295-2304.

Sommer (2013): Bericht zur zentralen Versickerungsanlage in Neu-Isenburg, Dienstleistungsbetrieb Neu-Isenbburg (unveröffentlicht)

Sommer, H. (2000): Messtechnische Untersuchung zur Funktion des Mulden-Rigolen-Systems im Stadtentwicklungsgebiet Rummelsburger Bucht der Wasserstadt GmbH gemäß Auflagen der wasserbehördlichen Genehmigung, Befreiung und Erlaubnis vom 17.7.1997. Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH.

Trinkwasserverordnung (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001).

Trowsdale, SA, Simcock, R. (2011): Urban stormwater treatment using bioretention. *Journal of Hydrology* 397 (3): 167-174.

Utermann et al. (2005): Entwicklung eines Verfahrens zur Quantifizierung von Stoffkonzentrationen im Sickerwasser auf der Grundlage chemischer und physikalischer Pedotransferfunktionen. Endbericht. BMBF-Förderkennzeichen 02 WP 0206.

UWC (2008): Final report – project summary, Urban Water Cycle, Interreg IIIB North Sea Region, Hamburg, Bradford, Fryslan. (unveröffentlicht).

Wessolek, G., Duijnisveld, W.H.M., Trinks, S. (2008): Hydro-pedotransfer functions (HPTFs) for predicting annual percolation rate on a regional scale. *Journal of Hydrology*, 356(1), 17-27.

Westerlund, C., Viklander, M. (2006): Particles and associated metals in road runoff during snowmelt and rainfall. *Science of the Total Environment*, 362(1), 143-156.

Anhang

A.1 Eingabeparameter Modellmulde

1.1 Niederschlag und Zuflussmengen

Die Berechnung der Niederschlagsmenge erfolgte aus Messdaten des Deutschen Wetterdienst (DWD - Station Tempelhofer Feld - Nr: 433). Im langjährigen Mittel liegt die Niederschlagsmenge bei 580 mm. Die jährliche Sickerwasserrate wurde über das Verhältnis von angeschlossener undurchlässiger Fläche A_u zu angeschlossener, wirksamer Sickerfläche A_s ermittelt. In diesem Fall wurde ein Verhältnis von ca. 13:1 angenommen (Muldengröße 40 m², zu entwässernde Fläche 500 m²). Weiterhin wurde angenommen, dass an jedem Punkt der Muldenfläche die gleiche Wassermenge versickert. Zur Berechnung der Sickerwasserrate wurde das TUB-BGR Verfahren nach Wessolek et al. (2008) genutzt. Für die Berechnungen an diesem Standort wurde die Berechnungsvorschrift auf die wesentlichen Parameter und die Standortbedingungen reduziert:

Vegetation: Gras, Grundwasserfern, Oberflächenabfluss der A_u

Damit vereinfacht sich die allgemeine Wasserhaushaltsgleichung

$$SWR_M = Nd_M + A_{Au} - E_{\text{real}M} \quad \text{Formel 6}$$

und nur die reale Verdunstung muss berechnet werden.

$$SWR_M = Nd_M + A_{Au} - E_{\text{real}M} \quad \text{Formel 7}$$

SWR_M - bodenbürtige Sickerwasserrate (mm/a); Nd_M - Niederschlag (mm/a); A_{Au} - Abfluss angeschlossene undurchlässige Fläche (A_u) (mm/a); $E_{\text{real}M}$ - reale Verdunstung Muldenvegetation (mm/a)

Die Eingabe der jährlichen Sickerwassermenge in das Simulationsmodell erfolgte in Form einer täglichen Rate, die über die tägliche Niederschlagsmenge mit Gleichung 3 berechnet wurde. Die mittlere jährlich berechnete Versickerungsmenge (V) in die Mulde über den Simulationszeitraum von 20 Jahren beträgt ~3300 mm/m²/a.

1.2 Parameter des Wassertransports

Die Parameter für den gesättigten und ungesättigten Wasserfluss (van Genuchten Parameter) der angenommenen Bodenart mSfS wurden aus der Veröffentlichung von (Renger et al., 2009) abgeleitet (Tabelle A 1).

Tabelle A 1 : Bodenphysikalische Kennwerte: Parameter nach Van Genuchten und Mualem der drei Horizonte für die Simulation (Renger et al., 2009).

Θ_r	Θ_s	α	N	K_s	l
0	0.389	0.262	1.353	507.500	0.500

Θ_r = Residualer Wassergehalt ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); Θ_s = Gesättigter Wassergehalt ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), α Kehrwert des Lufteintrittspunkt (cm^{-1}) und n = Porengrößenverteilung (-), K_s =Gesättigte Leitfähigkeit ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$), l =Parameter der Tortuosität (-).

1.3 Sorptionseigenschaften

Die Sorptionseigenschaften der Muldenhorizonte wurden über die substratübergreifenden Sorptionsisothermen (Pedotransferfunktionen) nach Utermann et al. (2005) abgeleitet. Anhand der Beziehung zwischen den Bodenkenngrößen pH-Wert, Tongehalt, Corg, sowie weiteren Sorptionsparametern kann anhand dieser Funktionen das Retentionsvermögen von Böden unterschiedlicher Herkunft, Genese und stofflicher Zusammensetzung gegenüber verschiedenen Schwermetallen quantifiziert werden. In Tabelle A 1 sind die nach Freundlich angepassten Parameter für die drei Horizonte aufgeführt.

Als Eingangsparameter dienen die ermittelten Mediangehalte der Mulden mit dem Substrat Sand für die Parameter pH, Corg und Ton (Tabelle A 2). Ungewöhnlich sind die zunehmenden Freundlich-Koeffizienten (K_f) mit der Tiefe. Erfahrungsgemäß müssten diese mit der Tiefe abnehmen, da auch der Corg- und der Tongehalt abnehmen. Die Sorptionsfähigkeit für Schadstoffe in Böden wird maßgeblich durch den pH-Wert, den Gehalt an Tonmineralen, Sesquioxiden, Komplexbildnern sowie organischer Bodensubstanz bestimmt. In diesem Fall nimmt der pH-Wert mit der Tiefe zu und bestimmt so maßgeblich den Freundlich-Koeffizienten der abgeleiteten substratübergreifenden Sorptionsisothermen für die Modellmulde (siehe Tabelle A 1 und Tabelle A 2).

Tabelle A 1 : Abgeleitete Freundlich-Parameter über Pedotransferfunktionen (Utermann et al. 2005).

Tiefe (cm)	Cd		Zn		Pb		Cu	
	$K_f (\mu\text{g}^{1-n} \cdot \text{L}^{n \cdot \text{kg}^{-1}})$	n(-)	$K_f (\mu\text{g}^{1-n} \cdot \text{L}^{n \cdot \text{kg}^{-1}})$	n(-)	$K_f (\mu\text{g}^{1-n} \cdot \text{L}^{n \cdot \text{kg}^{-1}})$	n(-)	$K_f (\mu\text{g}^{1-n} \cdot \text{L}^{n \cdot \text{kg}^{-1}})$	n(-)
0-10	879	0.83	3489	0.57	20842	0.61	1475	0.78
10-20	1021	0.83	4057	0.57	27970	0.61	1827	0.78
20-30	1089	0.83	4340	0.57	31970	0.61	2028	0.78

Tabelle A 2 : Eingabeparameter zur Ermittlung der Freundlichparameter ermittelt aus Mediangehalten der untersuchten Anlagen mit der Bodenart Sand

Tiefe (cm)	pH	C_{org} (%)	Ton (%)
0-10	6.5	2.25	4.0
10-20	6.9	1.25	3.2
20-30	7.0	1.0	3.3

B.1 Fragebogen Betreiber

<p>Ihre Daten</p> <p>Name: _____</p> <p>Position: _____</p>	<p>Ihr Kontakt und Adressat ihrer Antwort</p> <p>Name: _____</p> <p>_____</p> <p>Fax: _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>
--	--

1. Allgemeine Angaben zur betrachteten Anlage

1.1 **Standort** (Straße, PLZ, Stadt): _____

1.2 Typ

- Mulde
- Mulden-Rigolen-Element ohne Ableitung
- Mulden-Rigolen-Element mit gedrosselter Ableitung

1.3 Lage

- Straße , Gewerbe
- Privatfläche
- Privatfläche Gewerbe

1.4 Angeschlossene Flächen

- Straße _____ m²
- Gehweg _____ m²
- Dach _____ m²
- _____ _____ m²
- _____ _____ m²
- _____ _____ m²

1.5 Bepflanzung der Mulde

- Rasen anderes: _____

1.6 Größe und Aufbau

Mulde _____

Fläche _____ [m]

Tiefe _____ [m]

Böschung Gefälle _____ [1/n]

Rigole: _____

Länge _____ [m]

Breite _____ [m]

Tiefe _____ [m]

Drosselabfluss _____ l/s*ha

Drosselart:

Lochblende

Kegeldrossel

anderes _____

Füllmaterial _____

1.7 Betriebszeit

Baujahr: _____

Inbetriebnahme: _____

2. Angaben zur Trägerschaft der Anlage

2.1 **Eigentümer:** _____

2.2 **Betreiber:** _____

2.2.1 Wenn Sie Betreiber sind, seit wann?

seit Inbetriebnahme seit _____

2.2.2 Gab es während der Anlagenlaufzeit einen Betreiberwechsel?

nein ja (wer, wann)

2.3 **Inhaber** der wasserrechtlichen Erlaubnis: _____

2.4 **Laufzeit** der Erlaubnis: _____

3. Angaben zum Bau und Unterlagen der Anlage

3.1 Bauherr/Planer: _____

3.2 Baubetrieb/ Bauausführender: _____

3.3 Sind die Planungsunterlagen vorhanden? x ja nein

3.4 Sind Unterlagen aus der Bauphase bzw. Bestandsunterlagen

nach Abschluss der Bauphase vorhanden? ja nein

3.5 Sind Umbauten vorgenommen worden?

nein ja (wann, was): _____

Grund:

- Erweiterungen/Reduzierungen des Einzugsgebietes
- Veränderung der Dachfläche
- Verlegung des Einlassbereiches
- Bodenauftrag oder Bodenaushub
- Sonstiges: _____

3.6 Können Unterlagen zu den Punkten 3.3./ 3.4/ 3.5 zur Verfügung gestellt werden?

nein ja (bitte beachten Sie dann den Punkt 10: Bereitstellung von Daten)

4. Angaben zur Wartung und Pflege der Anlage

4.1 Wird die Wartung und Pflege selbst durchgeführt oder vergeben?

- selbst durchgeführt
- teilweise selbst durchgeführt, teilweise vergeben
- komplett vergeben

4.2 Wenn **Vergabe**, dann Firmentyp

(z.B. Tiefbau, Gärtnerei, Landschaftsbau): Zeitvertrag, Tiefbaufirma,

4.3 Wenn Vergabe, welche Aufgaben

werden vergeben: _____

5. Angaben zur Betriebssicherheit der Anlagen

5.1 Ist die Anlage ihrer Meinung nach langfristig

funktionssicher, bzw. erfüllt die Anlage Ihre Erwartungen ja nein

5.2 Wurden im Umfeld **Gebäudevernässungen** beobachtet? ja nein

5.3 Wurden **Überflutungen** beobachtet? ja nein

5.4 Wurde eine Verminderung der **Versickerungsleistung** beobachtet? ja nein

5.4.1 Wenn ja, nach wieviel Jahren: nachJahren, nur 1 am Kreisverkehr

5.5 Wurden regelmäßig längere **Anstauzeiten** (> 24 h) in den Mulden beobachtet? ja nein

5.6 Gibt es in der Anlage dauerhaft nasse Bereiche ja nein

5.6.1 Wenn ja, mit welchem Flächenanteil? _____%

5.7 Sind **Mulden- oder Rigolenüberläufe** vorhanden ja nein

5.7.1 funktionieren die Überläufe ja nein

5.7.2 Wie häufig kam es zum Überlaufen

kein Überlauf weniger als 1 mal pro Jahr mehr als 1 mal pro Jahr

5.8 Traten Funktionsstörungen auf?

ja nein

5.8.1 Wenn ja, welche: _____

5.9 Sind innerhalb der Anlage Setzungen des Oberbodens aufgetreten ja nein

unbekannt

5.9.1 Wenn ja, wann wurde das beobachtet: _____

5.10 Sind innerhalb der Anlage Sedimentablagerungen aufgetreten

ja nein

unbekannt 5.10.1

Wenn ja, wann wurde das beobachtet: _____

5.10 Wie sind die Straßenreinigungszyklen _____

5.11 Gab es besondere Störfälle oder Unfälle

ja nein

5.11.1 Wenn ja, welche: _____

5.12 Gibt es bei Ihnen eine Anleitung zum Betrieb

von Versickerungsanlagen?

ja

nein _____

5.12.1 Wird diese auch für die externe Wartung

und Betrieb als Grundlage verwendet?

ja

nein _____

5.1.2.2 Was sollte eine Betriebsanleitung ihrer Meinung nach beinhalten

- Funktionsbeschreibung der Anlage
- Planunterlagen zu der Anlage
- Wartungshinweise zu wichtigen Betriebspunkten der Anlagen
 - Zulauf Mulde Überlauf Rigole Drosselschacht
- Bemessungsrichtlinie Anlage
- Bestandsunterlagen:
- Kamerabefahrung

6. Angaben zu potentiellen Belastungen der Anlage

6.1 Winterbetrieb ja nein

6.1.1 Wenn ja, was wird verwendet (Streusalz, Sole, Splitt, etc.): _____

6.2 Stark eisenhaltiges Grund- und Schichtenwasser ja nein

6.3 Wühltätigkeit (Mäuse, Maulwurf, etc.) ja nein

6.4 Bautätigkeiten im Umfeld ja nein

6.5 sonstige: Überfahrten bei Bautätigkeit, Beparken der Mulden, Straßen ohne Gehwege

7. Angaben zur Kontrolle der Anlage

7.1 Wie häufig wird die Versickerungsanlage überprüft?

- gar nicht
- alle ____ Jahre
- jährlich
- halbjährlich
- vierteljährlich
- nach Bedarf
- Wartungsfirma berichtet Schäden

7.2 Haben Kontrollgänge / Begehungen der Aufsichtsbehörden

(Untere Wasserbehörde/Tiefbauamt etc.) stattgefunden? ja nein

7.2.1 Falls ja, wie oft? ____ mal

8. Ihre Einschätzungen zum Betrieb von Versickerungsanlagen

8.1 Welches sind aus Ihrer Sicht die kritischen Bauteile und Bereiche der Anlagen?

8.2 Haben Sie aus Ihrer Erfahrung eigene Anregungen für eine Verbesserung der Betriebsbedingungen von Anlagen zur Regenwasserbewirtschaftung (u. a. Vermeidung wartungs- bzw. pflegeintensiver Detaillösungen z. B. bei der offenen Ableitung) bzw. Bauliche Veränderungen?

9. Welche kritischen Betriebspunkte sind aus Ihrer Sicht wartungs- / unterhaltungsrelevant und welche Maßnahmen wurden in welchen zeitlichen Abständen durchgeführt?

9.1 Zulauf

- Hochbord auf Lücke gesetzt
- Punktueller Zulauf über Muldenböschung und Einlauf
- Flächiger Zulauf über Böschung mit Tiefbord
- Sonstiges _____

9.2 Zulaufleitung

- Fallrohr _____ mal pro Jahr
- offene Pflaster-/Betonrinne _____ mal pro Jahr
- Rasenrinne _____ mal pro Jahr
- Wegequerung Rinne _____ mal pro Jahr
- Übergang Rinne zu Rasenmulde _____ mal pro Jahr
- Sonstiges _____ mal pro Jahr

9.3 Mulde/Mulde-Rigole

- Sohle _____ mal pro Jahr
 Böschung _____ mal pro Jahr
 Muldenüberlauf _____ mal pro Jahr
 Mulde Mahd _____ pro Jahr
 Wegequerung Mulde _____ mal pro Jahr
 Rigole _____ mal pro Jahr
 Drosselschacht _____ mal pro Jahr
 Kontrollschacht _____ mal pro Jahr
 Sonstiges Punkte _____ mal pro Jahr

Was sind die Problempunkte:

- Laub Sand/Sediment Aufwuchs Rasen Unkraut
 Sonstiges _____

10 Sind Sie bereit die Daten für das Projekt zur Verfügung zu stellen?



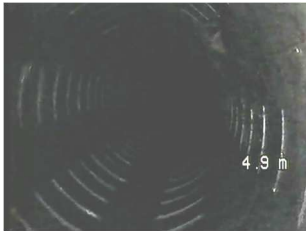
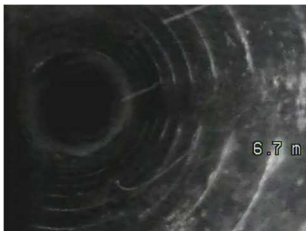


- Ausführungspläne ja nein
Bemessungsansätze ja nein
ggf. Prüfzeugnisse und Nachweise im Rahmen des Baus ja nein
Wasserrechtliche Erlaubnis, Inhalt, Anforderung für Erneuerung ja nein
Wartung und Betrieb (Arbeiten, Kosten) ja nein
Dokumentation oder Aufnahme von Schäden, Problemen ... ja nein
sonstiges: _____ ja nein

separater Ansprechpartner: _____

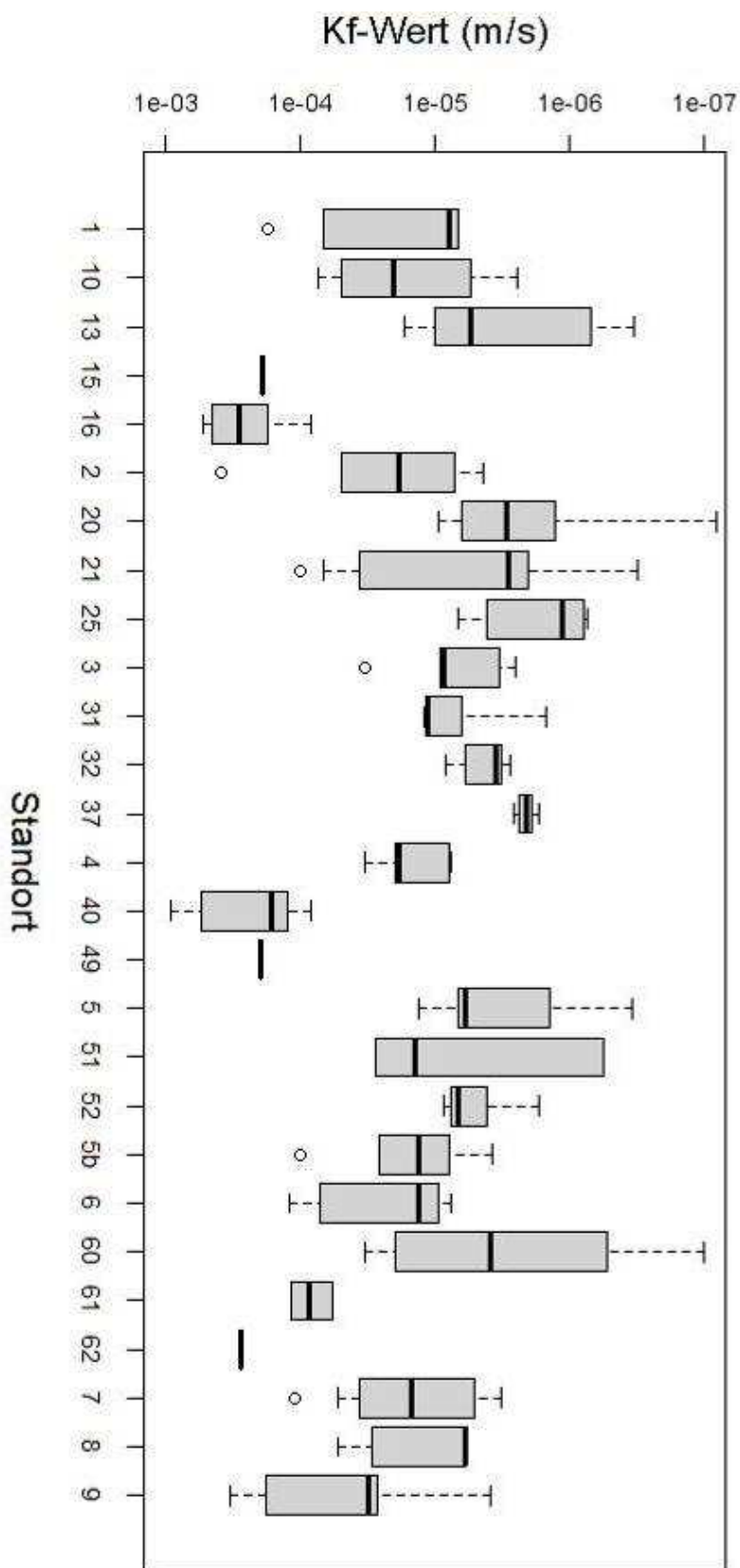
Sind Sie damit einverstanden, dass die verwendeten Daten in anonymer Form ausgewertet und veröffentlicht werden?

- ja nein

C.1 Fotodokumentation der Dränrohrinspektion

Standort	Befund	Foto
Anlage 9	Dränrohr intakt . Geringfügig mineralische Ablagerung. Keine Wurzeln sichtbar	
Anlage 10	Dränrohre intakt , geringfügig Ablagerungen, geringfügig Feinwurzeln, Dränstrang teilweise verplomt.	
Anlage 25	Dränrohr intakt , keine Ablagerungen, geringfügig Feinwurzeln	
Anlage 4	Dränrohr intakt , geringfügig Ablagerungen, geringfügig Feinwurzeln	
Anlage 1	Dränrohr intakt , keine Ablagerungen, geringfügig Feinwurzeln	
Anlage 5	Dränrohr intakt, leichte Ablagerungen, keine Wurzeln	

D.1 Übersicht der gemessenen Kf-Werte für alle Anlagen



Veröffentlichungen, Präsentationen LEIREV

Publikationen über das F+E Vorhaben „LEIREV“

INTERNATIONAL

Kluge, B., Markert, A., Facklam, M., Sommer, H., Kaiser, M., Pallasch, M., & Wessolek, G. (2016). Metal accumulation and hydraulic performance of bioretention systems after long-term operation. *Journal of Soils and Sediments*, 1-11. doi:10.1007/s11368-016-1533-z

NATIONAL

Kluge, B., Kaiser, M., Sommer, H. (2016): 20 Jahre dezentrale Regenwasserbewirtschaftung – Eine Bestandsaufnahme. *Gwf Wasser/Abwasser 06|2016*. 628-636.

Sommer, Harald; Kaiser, Mathias; Kluge, Björn; Markert, Arvid; Pallasch, Matthias (2015): Regenentwässerung in Kombination mit Vegetation, Bestandsaufnahme und Zukunft. *Wasser Schutz Mensch*. 5. Aqua Urbanica und 90. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium; Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft. S. 323-332.

Kluge, B., Kaiser, M., Markert, A., Pallasch, M., Sommer, H. (2015): Leistungsfähigkeit und Zustand langjährig betriebener dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen. *Tagungsband IKT Forum*. S. 59-69.

Vorträge und Poster auf Konferenzen über das F+E Vorhaben „LEIREV“

Sommer, H., Kaiser, M. und Kluge, B. (2016): 25 Jahre dezentrale Regenwasserbewirtschaftung – Zustand, Funktionserfüllung und Betriebsperspektiven langjährig betriebener Versickerungsanlagen. *DWA Regenwassertage 2016*

Kluge, B., Markert, A., Facklam, M., Wessolek, G. (2015): Pollutant accumulation in long-term used bioretention systems. *SUITMA 8 CONGRESS*. Mexico City.

Sommer, H., Kaiser, M. und Kluge, B. (2015): Regenentwässerung in Kombination mit Vegetation, Bestandsaufnahme und Zukunft. *AQUA URBANICA*. Stuttgart.

Kluge, B., Markert, A., Facklam, M., Wessolek, G. (2015): Schadstoffbelastung der Böden langjährig betriebener, dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen. *JAHRESTAGUNG DER DEUTSCHEN BODENKUNDLICHEN GESELLSCHAFT 2015*. München.

Kaiser, M., Kluge, B., Sommer, H. (2015): Leistungsfähigkeit und Zustand langjährig betriebener dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen. *IKT FORUM – Niederschlagswasser, Vegetation & Infrastruktur*. Gelsenkirchen.

Kaiser, M., Kluge, B., Sommer, H. (2015): Leistungsfähigkeit und Zustand langjährig betriebener dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen. *LANUV Erfahrungsaustausch 2/2016*.

Kluge, B., Sommer, H. und Kaiser, M. (2015): Leistungsfähigkeit und Zustand langjährig betriebener dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen. SENSTADTUM Berlin Erfahrungsaustausch, 2015.