

3 114 001

Messprogramm

Mulden-Rigolen-Monitoring Taucha

Abschlussbericht



Vorhabensträger:



Stadtverwaltung Taucha
Fachbereich Bauwesen
Schloßstr. 13
04425 Taucha



Stadt Leipzig

Stadt Leipzig
Amt für Stadtgrün und Gewässer
Abteilung Gewässerentwicklung,
Sachgebiet Regionale Entwicklung
Prager Straße 118-136
04317 Leipzig

Verfasser:

Leipzig, den 22.01.2024



**IWS - Institut für Wasserbau und
Siedlungswasserwirtschaft GmbH**
Lausener Dorfplatz 7a
04207 Leipzig

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungen und Formelzeichen	6
Anlagenverzeichnis.....	8
1 Veranlassung	9
1.1 Bewirtschaftung von Regenwasser.....	9
1.2 Abflussmessung an Mulden-Rigolen-Systemen	10
2 Dezentrale Versickerung von Regenwasser	11
2.1 Arten von Versickerungsmaßnahmen.....	11
2.2 Mulden-Rigolen-System	14
2.3 Wasserhaushalt.....	16
2.4 Versickerungsprozess	17
2.5 natürlicher Boden.....	18
2.6 Untersuchungen zur hydraulischen Leistungsfähigkeit.....	21
2.7 Reinigung in der Bodenpassage.....	24
2.7.1 Grenzwerte	26
2.8 Regelwerke und Gesetze im Zusammenhang mit der Versickerung von Niederschlagswasser.....	28
2.8.1 DWA-A 138.....	28
2.8.2 Sonstige Regelwerke.....	30
2.8.3 Gesetze und Verordnungen.....	30
2.9 Kosten von MRS.....	32
3 Untersuchungsprogramm an Mulden-Rigolen-Systemen	35
3.1 Ziele des Untersuchungsprogramms	35
3.2 Vorstellung und Beschreibung der Untersuchungsstandorte	36
3.2.1 Untersuchungsstandort 1	36
3.2.2 Untersuchungsstandort 2.....	36
3.2.3 Untersuchungsstandort 3.....	37
3.3 k_f -Wert Doppelringinfiltrometer-Versuch	38
3.3.1 Beschreibung Versuchsaufbau	38
3.3.2 Ergebnisse der Doppelringinfiltrometer-Messungen	38

3.4	großflächiger Feldversuch/Flutung	41
3.4.1	Beschreibung der Versuchsdurchführung.....	41
3.4.2	Ergebnisse der Feldversuche	41
3.5	Stoffliche Untersuchungen.....	43
3.5.1	Probenahme	43
3.5.2	Auswertung Schwermetalle	47
3.5.3	Auswertung P, N, KAK, pH-Wert, Wassergehalt	57
3.5.4	Zusammenfassung nach Untersuchungsstandort.....	65
3.6	Vor-Ort-Probleme	75
3.7	Hydraulische Leistungsfähigkeit der Mulden (Nachrechnung).....	79
4	Handlungshinweise für die Bemessung und Bewirtschaftung von oberflächigen Versickerungsanlagen	80
4.1	In der Planungsphase.....	80
4.2	Bau	81
4.3	Bewirtschaftung, Überwachung und Betrieb.....	83
5	Zusammenfassung.....	85
	Literaturverzeichnis	87

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Flächenversickerung.....	11
Abb. 2-2: Muldenversickerung.....	11
Abb. 2-3: Mulden-Rigolen-Versickerung.....	12
Abb. 2-4: Rigolenversickerung	13
Abb. 2-5: Schachtversickerung	13
Abb. 2-6: Eigenschaften der Versickerungsarten, nach DWA-A 138	14
Abb. 2-7: Bestandteile eines Mulden-Rigolen-Systems.....	15
Abb. 2-8: Wasserhaushalt unbefestigter (li.) und befestigter Flächen (re.).....	16
Abb. 2-9: Zeitlicher Verlauf der Versickerungsrate (Schmitt T. G., et al., 2007) ...	18
Abb. 2-10: Bodeneigenschaften nach StMUGV (STMUGV, 2006).....	20
Abb. 2-11: Durchlässigkeitsbeiwerte und relevanter Versickerungsbereich (DWA-A 138, 2005).....	21
Abb. 2-12: Abschätzung des k_f -Wertes eines Bodens (Sebastian, 2018)	22
Abb. 2-13: Methoden zur Ermittlung der Durchlässigkeit von Böden nach (DWA-A 138-1 (GD), 2020).....	23
Abb. 2-14: Verschmutzungsquellen	24
Abb. 3-1: Doppelringinfiltrometer.....	38
Abb. 3-2: Ergebnisse Doppelringinfiltrometerversuche	39
Abb. 3-3: Infiltrationsganglinien aus der Doppelringinfiltrometer-Messung.....	40
Abb. 3-4: Feldversuche	41
Abb. 3-5: Ergebnisse der Flutung.....	42
Abb. 3-6: Probenahme MS 1-2: Standort 1 (l.) , starker Wurzeleinwuchs am Standort 2 (re.).....	43
Abb. 3-7: Probenahme MS1-2, Schichtaufbau	44
Abb. 3-8: Probenahme MS 2 (Standort 1)	44
Abb. 3-9: Probenahme MS 2 (Standort 2).....	45
Abb. 3-10: Probenahme MS2	45
Abb. 3-11: Probenahme MS 3 (Standort 1)	46
Abb. 3-12: Probenahme MS3 (Standort 2)	46
Abb. 3-13: Probenahme MS3	46
Abb. 3-14: Schwermetallgehalt aller Proben	48
Abb. 3-15: Verteilung der Schwermetallgehalte über die Tiefe	49
Abb. 3-16: Untersuchungsergebnisse Cadmium	51

Abb. 3-17: Untersuchungsergebnisse Chrom	52
Abb. 3-18: Untersuchungsergebnisse Blei	53
Abb. 3-19: Untersuchungsergebnisse Kupfer.....	55
Abb. 3-20: Untersuchungsergebnisse Kupfer mit einer Skalierung bis 50mg/kg....	55
Abb. 3-21: Untersuchungsergebnisse Nickel	56
Abb. 3-22: Untersuchungsergebnisse Zink	57
Abb. 3-23: P, N, KAK, pH-Wert	58
Abb. 3-24: Laborergebnisse Wassergehalt	59
Abb. 3-25: Wassergehalt im Feinkornanteil 0- 2 mm.....	59
Abb. 3-26: Laborergebnisse Stickstoff (N).....	60
Abb. 3-27: Laborergebnisse Phosphor (P)	61
Abb. 3-28: Laborergebnisse KAK.....	63
Abb. 3-29: Einfluss des pH-Wertes auf die Löslichkeit von Schwermetallen (Gibson & Farmer, 1986).....	63
Abb. 3-30: Bodenanalyse pH-Wert.....	64
Abb. 3-31: Schwermetallanteile MS 1-2 (1).....	65
Abb. 3-32: Schwermetallanteile MS1-2 (2).....	66
Abb. 3-33: Wasserprobe Rigolenauslauf MS1-2	67
Abb. 3-34: Schwermetallgehalt MS 2(1) - Überlauf	68
Abb. 3-35: Schwermetallgehalt MS 2(2).....	69
Abb. 3-36: Wasserprobe Rigolenauslauf MS2	70
Abb. 3-37: MS3 - Entnahmestelle 1 (Überlauf).....	71
Abb. 3-38: MS3 - Entnahmestelle 2 (punktuelle Zulauf Verkehrsfläche).....	71
Abb. 3-39: Faktor Grenzwertüberschreitung BBodSchV – Sand.....	73
Abb. 3-40: Faktor Grenzwertüberschreitung BBodSchV – Lehm/Schluff	74
Abb. 3-41: Laubansammlungen	75
Abb. 3-42: Zuläufe.....	76
Abb. 3-43: Zerstörung des Muldenquerschnittes.....	76
Abb. 3-44: Bepflanzung, Vegetation.....	77
Abb. 3-45: überhöhte Schulter, diffuse Versickerung	78
Abb. 3-46: diffuse Versickerung	78
Abb. 3-47: bauliche Mängel.....	78
Abb. 4-1: Blühende Versickerungsmulde (Eppel-Hotz, 2019)	81
Abb. 4-2: Beschilderung von Versickerungsanlagen.....	83

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	Durchlässigkeitsbereiche (DIN 18130-1, 1998)	21
Tab. 2-2:	durchschnittliche Schadstoffkonzentrationen nach Göbel (Reck & Kluge, 2020)	25
Tab. 2-3:	Vorsorgewerte nach Tabelle 1: BBodSchV (BBodSchV, 1999)	26
Tab. 2-4:	Prüfwertewerte nach Tabelle 4: BBodSchV(BBodSchV, 1999)	26
Tab. 2-5:	Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser im Sickerwasser nach Tabelle 2: BBodSchV (BBodSchV, 1999)	27
Tab. 2-6:	Geringfügigkeitsschwellen nach LAWA (LAWA, 2017)	27
Tab. 2-7:	Schwellenwerte nach Anlage 2: GrwV (GrwV, 2010).....	27
Tab. 2-8:	Schwellenwerte nach OGewV (OGewV, 2016).....	27
Tab. 2-9:	Entwicklung DWA-A 138.....	28
Tab. 2-10:	Investitionsvergleich verschiedener Versickerungsanlagen.....	32
Tab. 2-10:	Baukosten von Mulden-Rigolen	33
Tab. 2-11:	Betriebskosten von MRS	34
Tab. 3-1:	Ergebnisse Doppelringinfiltrometerversuche	40
Tab. 3-2:	Zusammenfassung Versickerungsleistung	42
Tab. 3-3:	Methoden zur Probenanalyse (LGU, 2023)	47
Tab. 3-4:	Schwermetallgehalte in mg/kg TM aller Bodenproben.....	48
Tab. 3-5:	Schwermetallgehalte über die Tiefe.....	49
Tab. 3-6:	P, N, KAK, pH-Wert	58
Tab. 3-7:	pH-Wert-Stufen nach (Umweltatlas Berlin, 2015)	64
Tab. 3-8:	Schwermetallgehalte MS 1-2	66
Tab. 3-9:	Laborergebnisse Wasserprobe MS1-2	67
Tab. 3-10:	Schwermetallgehalte MS 2	69
Tab. 3-11:	Laborergebnisse Wasserprobe MS2	70
Tab. 3-12:	Schwermetallgehalte MS 3	72
Tab. 3-13:	Grenzwertüberschreitung BBodSchV	74
Tab. 3-14:	Muldenaufmaße	79
Tab. 3-15:	Ergebnis Muldenberechnung bis Überlauf.....	79

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
a.a.R.d.T		Allgemein anerkannte Regeln der Technik
A _{bef}		Befestigte Fläche
AbwAG		Abwasserabgabengesetz
ATV		Abwassertechnische Vereinigung e.V.
BBodSchV		Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BMBF		Bundesministerium für Bildung und Forschung
B-Plan		Bebauungsplan
Cd		Cadmium
Cr		Chrom
Cu		Kupfer
DIN		Deutsches Institut für Normung
DWA		Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)
Fe		Eisen
FLL		Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.
GD		Gelbdruck
GFS		Geringfügigkeitsschwellen
GrwV		Grundwasserverordnung
KAK		Kationenaustauschkoeffizient
k _f		Durchlässigkeitsbeiwert in m/s
LAWA		Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
LWW		Leipziger Wasserwerke
Mn		Mangan
MRS		Mulden-Rigolen-System
MS		Messstelle
N		Stickstoff

Abkürzung	Einheit	Beschreibung
n		Häufigkeit in 1/a
NaCl		Natriumchlorid
nFK		nutzbare Feldkapazität
Ni		Nickel
OGewV		Oberflächengewässerverordnung
P		Phosphor
Pb		Blei
pH		pondus hydrogenii, Potential des Wasserstoffs
REWeS		Richtlinien für die Entwässerung von Straßen
SächsBO		Sächsische Bauordnung
T		Wiederkehrzeit in a
WHG		Wasserhaushaltsgesetz
WSP		Wasserspiegel
Zn		Zink

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 Untersuchungsstandorte (eingeschränkte Verfügbarkeit)
- Anlage 2 Fotodokumentation
- Anlage 3 Laborergebnisse
- Anlage 4 Broschüre

1 Veranlassung

1.1 Bewirtschaftung von Regenwasser

In der Vergangenheit war es gängige Praxis das Niederschlagswasser befestigter Flächen zu sammeln und über die Kanalisation im Trenn- oder Mischsystem abzuleiten. Dies führte zu nachteiligen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt in der Region, wie beispielsweise einer Verringerung der Grundwasserneubildung. In den letzten Jahren haben sich dezentrale Anlagen zur Regenwasserbewirtschaftung etabliert. Aufgrund der Zunahme von Starkregenereignissen und der Anpassung von Regelwerken, rückt nun ein verstärkter Fokus auf einen naturnahen Umgang mit Regenwasser, der den natürlichen Wasserkreislauf möglichst wenig beeinträchtigt.

Eine naturnahe Regenwasserbewirtschaftung, die Verdunstung, Versickerung, Speicherung und Ableitung kombiniert, soll dazu beitragen, die negativen Auswirkungen bebauter Gebiete durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden oder zu minimieren. Beispiele für solche Maßnahmen sind Gründächer, Mulden und Mulden-Rigolen. Das Regenwasser kann dort versickern, wo es anfällt. Die Ziele der naturnahen Regenwasserbewirtschaftung sind die Grundwasserneubildung, die Entlastung des Kanalnetzes, die Aufrechterhaltung des lokalen Wasserhaushalts und zum Teil der Schutz vor Starkregen.

Der Kontakt von Regenwasser mit befestigten Flächen führt je nach Material zu Verunreinigungen. Verkehrsflächenabflüsse können durch eine große Anzahl anorganischer Stoffe belastet sein. Dazu zählen Schwermetalle wie Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink. Auch Dachabwässer können durch die Verwendung von Zink und Kupfer stark verunreinigt sein. Sie können in Böden und Gewässer gelangen und zu einer Schadstoffanreicherung führen.

Das derzeit gültige DWA-Arbeitsblatt 138 regelt die Bemessung dezentraler Anlagen und gibt Hinweise zum Bau und Betrieb, enthält jedoch keine Aussagen zum Umfang der Schadstoffanreicherung und zur hydraulischen Leistungsfähigkeit im Langzeitbetrieb.

Das Hauptziel des Projekts war daher die Untersuchung von Mulden-Rigolen-Systemen nach einer Standzeit von über 25 Jahren. Dabei standen die Überprüfung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Mulden und der Nachweis der natürlichen Reinigungsleistung in der bewachsenen Bodenzone, nach jahrzehntelanger Nutzungsdauer, im Fokus. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um allgemeingültige Handlungsempfehlungen für den Umgang mit Mulden-Rigolen-Systemen abzuleiten.

1.2 Abflussmessung an Mulden-Rigolen-Systemen

Seit Jahrzehnten sind Mulden-Rigolen-Systeme bereits eine Möglichkeit zur Entwässerung von Regenabflüssen in Wohngebieten. Kritiker übten damals Bedenken bezüglich der dauerhaften Funktionsfähigkeit und dem tatsächlichen Versickerungsverhalten bei bestimmten klimatischen Bedingungen. Untersuchungen dazu lagen nur im geringem Maße vor.

Vor diesem Hintergrund wurde im Zeitraum von Juni 1996 bis März 1998 das vom BMBF geförderte Forschungsprojekt „Abflussmessung an Mulden-Rigolen-Systemen“ durchgeführt, mit dem Ziel verlässliche Daten für die Planungssicherheit zukünftiger Anlagen zu bekommen.

Neben umfangreichen Untersuchungen an einem Mulden-Rigolen-Modell im Labor wurden an der Mulden-Rigolen-Anlage „Bogumils Garten“ in Taucha Untersuchungen zu den Wasserhaushaltsgrößen und deren Bilanzierung, die Auswirkungen von Starkniederschlägen, Frost und der Eintrag von Feststoffen in Mulden-Rigolen, durchgeführt. Neben der Funktionsfähigkeit der Mulden wurde nachgewiesen, dass die Transportstrecken zur Versickerungsanlage maßgeblich zur Bilanzierung beitragen und zu einer Überbemessung der MRS führen. Weiter haben Makroporen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Systems bei Frost sowie beim Entleerungsvorgang der Mulde. Es wird vermutet, dass bei biologisch aktiven humusreichen Böden den Makroporen eine nicht unbedeutende hydraulische Wirksamkeit im Boden zukommt.

Das Institut für Wasserbau und Siedlungswasserwirtschaft verfügt über langjährige Erfahrung mit In-situ-Messungen bei der Erfassung von Starkregen, Niederschlags-Abfluss-Messungen, Fremdwasser- und Schmutzwassermessungen.

Aufgrund seiner langjährigen Erfahrungen in der Anwendung von Messgeräten zur Durchflussbestimmung in Abwasserkanälen ist der Institutsleiter darüber hinaus Mitglied der DWA-Arbeitsgruppe 1.7 „Qualitative und Quantitative Durchflussmessung“.

2 Dezentrale Versickerung von Regenwasser

2.1 Arten von Versickerungsmaßnahmen

Die einfachste und zugleich auch eine naturnahe Form der Versickerung ist die *Flächenversickerung* (Abb. 2-1), über die Schulter befestigter Flächen, ausgeführt als Grünfläche mit einer 20 - 30 cm starken Mutterbodenschicht. Durch das Versickern in der bewachsenen Bodenzone wird die Reinigung des Niederschlagswassers ermöglicht. Ein weiterer Vorteil ist die einfache Wartung und der geringe Herstellungsaufwand. Aufgrund des hohen Flächenbedarfs findet diese Art der Niederschlagswasserbewirtschaftung jedoch selten Anwendung.

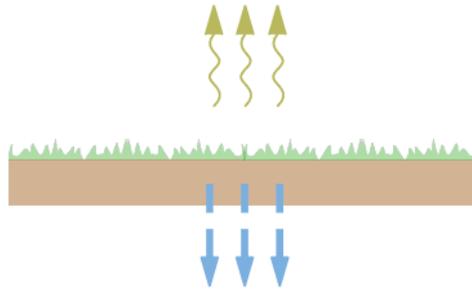


Abb. 2-1: Flächenversickerung

Eine dezentrale Maßnahme mit kurzzeitiger Speicherung ermöglicht die *Muldenversickerung* (siehe Abb. 2-2). Die Mulde wird als dauerhaft begrünte Geländevertiefung ausgeführt. Sie sammelt und speichert das Regenwasser kurzzeitig, wenn der Zufluss zur Mulde, die Sickerfähigkeit des Oberbodens übersteigt. Die Entleerung der Mulde erfolgt durch Versickerung und Verdunstung. Die Tiefe der Mulden beträgt in der Regel 20 - 30 cm. Voraussetzung für die Muldenversickerung ist ein ausreichende Flächenverfügbarkeit sowie ein gut versickerungsfähiger Boden. Vorteil ist auch hier die gute Reinigungsleistung in der bewachsenen Bodenzone und der geringe Herstellungsaufwand.

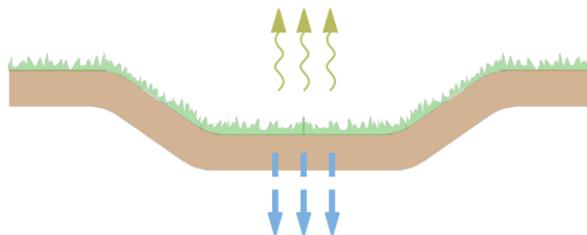


Abb. 2-2: Muldenversickerung

Bei schlechteren Durchlässigkeiten des Untergrundes ($k_f < 5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$) findet die *Mulden-Rigolen-Versickerung* Anwendung. *Mulden-Rigolen-Elemente* bestehen aus Mulden und Rigolen, die Speicherung erfolgt sowohl oberirdisch in der Mulde als auch unterirdisch in der Rigole. Die Versickerungsmulde wird entsprechend der Muldenversickerung als Mulde mit Begrünung ausgeführt. Das Wasser sickert durch die

Oberbodenschicht in die Rigole, welche aus porenhaltigem Material wie Kies (Porenvolumen 25 - 40 %) oder Fertigteilen (Porenvolumen bis 95 %), so genannten Rigolenfüllkörpern aus Kunststoff bestehen. Die Entleerung der Rigole erfolgt durch Versickerung in den Untergrund. Bei Überschreiten der Muldenbemessungsgröße, kann ein direkter Überlauf in die Rigole bei seltenen Starkregen erfolgen. Die Einstauzeiten der Rigolen sind im Gegensatz zu den Mulden (< 24 h) unbeschränkt. Vorteil der Mulden-Rigolen-Versickerung ist der deutlich geringere Flächenbedarf als bei der Mulden- und Flächenversickerung. Die unterirdischen Speicherräume ermöglichen zudem eine größere Minderung von Abflussspitzen.

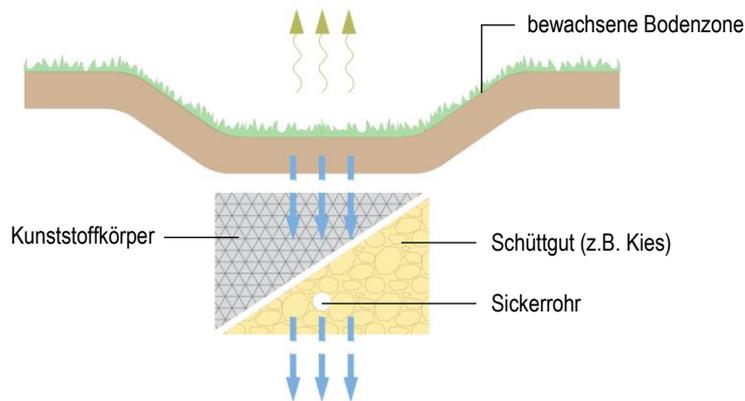


Abb. 2-3: Mulden-Rigolen-Versickerung

Rigolen- und Schachtversickerung sind den unterirdischen Versickerungsmöglichkeiten zuzuordnen. Ähnlich wie bei der Mulden-Rigolen-Versickerung besteht der unterirdische Speicher bei der *Rigolenversickerung* aus Kies oder Kunststoffelementen. Der Zufluss von Niederschlagswasser erfolgt unterirdisch, die Reinigungsoption über eine bewachsene Bodenzone ist hierbei nicht gegeben. Das bedeutet, dass das Niederschlagswasser in der Regel, durch vorgeschaltete Sedimentationsanlagen oder Filter, gereinigt werden muss. Vorteil bei dieser Methode ist, dass auf der Oberfläche kein Platzbedarf erforderlich ist und die Rigole mit Gehwegen bzw. Parkflächen überbaut werden kann.

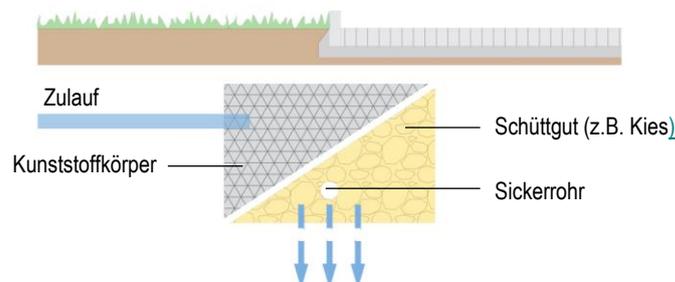


Abb. 2-4: Rigolenversickerung

Der *Versickerungsschacht* (Minstdurchmesser DN1000) ist ein unterirdischer Speicher zur kurzfristigen Zwischenspeicherung und Versickerung in den anstehenden Boden. Vorteil der Schachtversickerung ist, dass wenig Platz benötigt wird. Eine Reinigung des Niederschlagswassers über die bewachsene Bodenzone erfolgt nicht, somit ist diese Art der Versickerung nur für unbelastetes Niederschlagswasser geeignet. In der Regel muss auch eine zusätzliche Behandlung vorgeschaltet werden. Nachteilig ist weiterhin die hohe hydraulische Flächenbelastung. Daher sollten Versickerungsschächte nur in Ausnahmefällen eingesetzt werden.

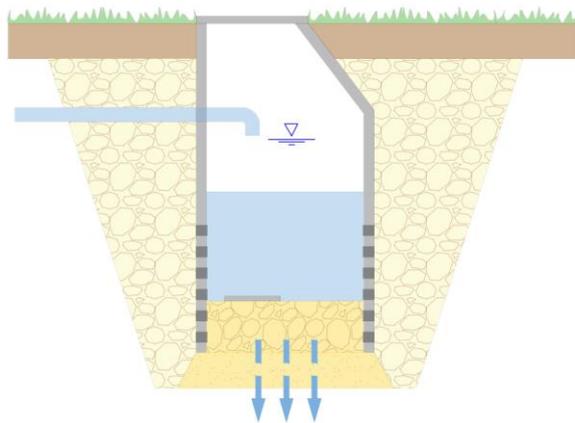


Abb. 2-5: Schachtversickerung

Es gibt eine Reihe von technischen Lösungen zur Versickerung von Niederschlagswasser. Welche Lösung gewählt wird, hängt auch mit den zu erreichenden Zielen für Versickerung und Verdunstung, in Hinblick auf die Annäherung an den natürlichen Wasserhaushalt ab. Naturnahe Lösungen haben einen hohen Flächenbedarf und bedürfen gleichzeitig einer hohen Versickerungsfähigkeit des Untergrundes. Die Anforderungen sind im Regelwerk DWA-A 138 (DWA-A 138, 2005) festgelegt.

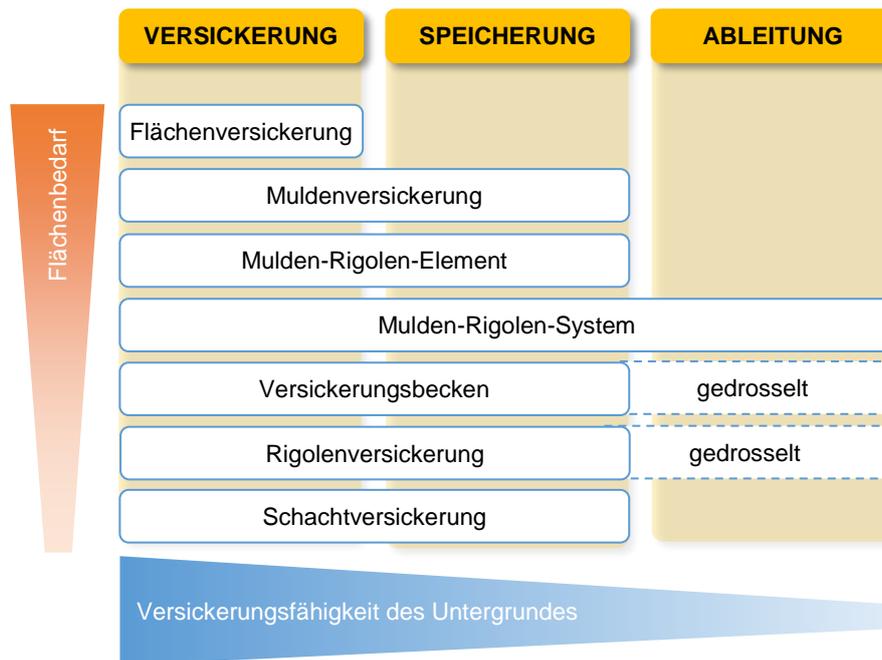


Abb. 2-6: Eigenschaften der Versickerungsarten, nach DWA-A 138

2.2 Mulden-Rigolen-System

Durch die Verbindung mehrerer Mulden-Rigolen-Elemente entsteht ein vernetztes Mulden-Rigolen-System (MRS), bei dem die Entleerung der Rigole neben der Versickerung auch durch gedrosselte Ableitung in die nächstfolgende Rigole erfolgt. Es kombiniert auf diese Weise Versickerung, Rückhaltung und Ableitung.

Der Zufluss zu den Mulden sollte oberflächlich in offenen Rinnen erfolgen. Dabei sollte der Zulauf möglichst weit entfernt vom Überlauf in die Rigole liegen, um die Einleitung ungereinigten Niederschlagswassers zu unterbinden. Die Tiefe der Mulden beträgt maximal 30 cm. Nach der aktuell gültigen Fassung des DWA-Arbeitsblattes 138 (DWA-A 138, 2005) ist mindestens eine 10 cm mächtige Oberbodenschicht zu gewährleisten. Da dies nicht mehr empfehlenswert ist, werden in der Überarbeitung des DWA-A 138-1 (GD), zur Sicherstellung der Reinigungs- und Versickerungsleistung mindestens 20 cm gefordert.

Die Ausführung der Rigolen erfolgt mit senkrechten Seitenwänden mit porenhaltigem Material aus Kies oder Fertigteilen, so genannten Rigolenfüllkörpern aus Kunststoff. Eine Ummantelung mit Geotextil dient dem Schutz gegen Einschlämmen des Porenraumes durch den Oberboden.

Durch einen Überlauf ist die Mulde mit der Rigole (über einen Schacht) direkt verbunden. Überschüssiges Niederschlagswasser, dass bei größeren Ereignissen ($T > 1$ a) nicht in der Mulde zurückgehalten werden kann, gelangt direkt in die Rigole, ohne die Bodenpassage passiert und eine Reinigung erfahren zu haben.

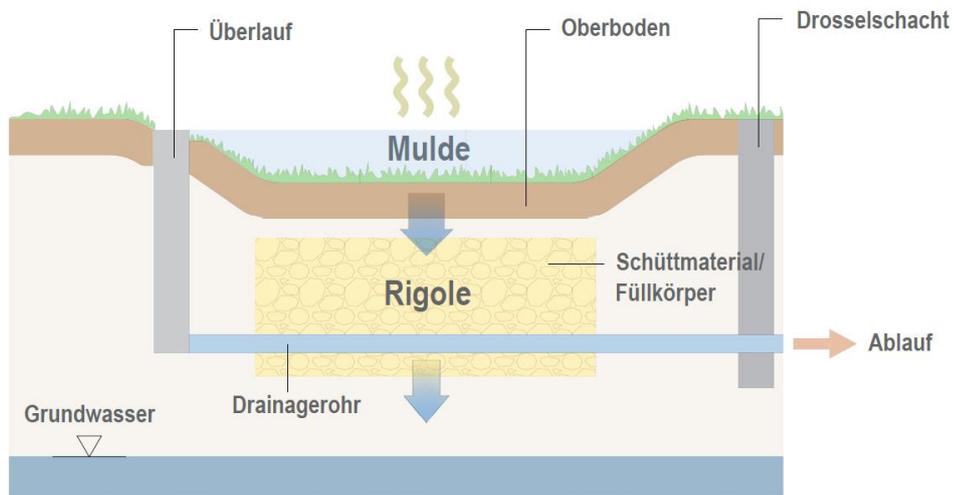


Abb. 2-7: Bestandteile eines Mulden-Rigolen-Systems

2.3 Wasserhaushalt

Im Gegensatz zur klassischen Ableitung in Kanalsystemen haben MRS, in Abhängigkeit von dem anstehenden Boden maßgeblichen Einfluss auf die Wasserhaushaltsbilanz.

Natürliche Einzugsgebiete weisen einen geringen Anteil an Oberflächenabfluss auf. Abhängig von der Vegetation, den Bodenverhältnissen und der Topographie können große Mengen verdunsten und versickern.

In städtischen Gebieten mit einem hohen Anteil versiegelter Flächen ist der Oberflächenabfluss besonders stark ausgeprägt, während Verdunstung und Versickerung nur eine geringe Rolle spielen. Diese Urbanisierung hat einen signifikanten Einfluss auf die Wasserbilanz, was sich in erhöhten Abflussspitzen und der Gefahr von Überflutungen nach Starkregenereignissen einerseits, sowie dem Fehlen verzögernder Nachläufe andererseits äußern kann. Naturnahe Maßnahmen zur Regenwasserbewirtschaftung, wie beispielsweise Versickerungsmulden, können dazu beitragen, diese negativen Auswirkungen zu mildern. Das übergeordnete Ziel besteht darin, einen naturnahen Umgang mit Regenwasser zu fördern, indem der Wasserhaushalt in urbanen Gebieten an den natürlichen Kreislauf angeglichen wird. Dies kann zu einem deutlich höheren Anteil an Verdunstung und Versickerung (Grundwasserneubildung) sowie einer erheblichen Reduzierung des Oberflächenabflusses führen.

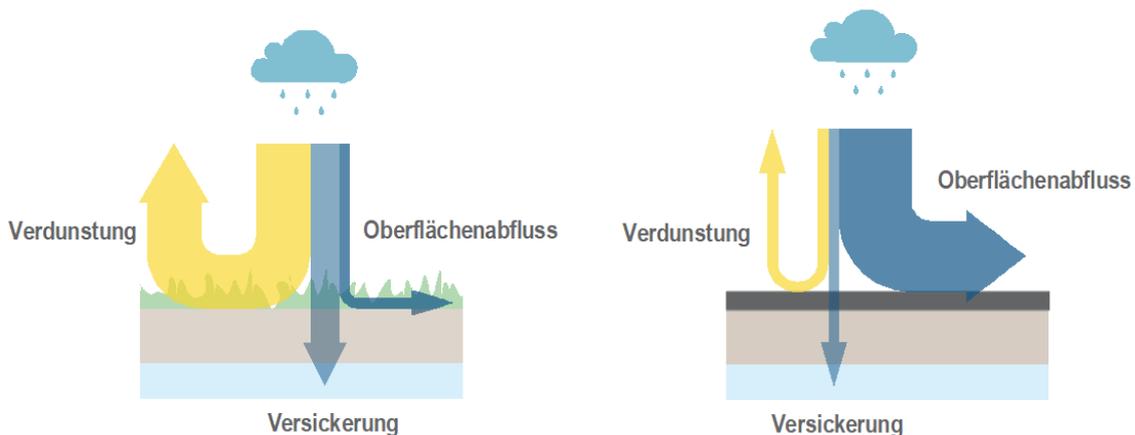


Abb. 2-8: Wasserhaushalt unbefestigter (li.) und befestigter Flächen (re.)

2.4 Versickerungsprozess

Der Wasserkreislauf unterscheidet verschiedene Prozesse. Wasser der Atmosphäre, das sich infolge der Schwerkraft zur Erdoberfläche bewegt, wird als *Niederschlag* bezeichnet

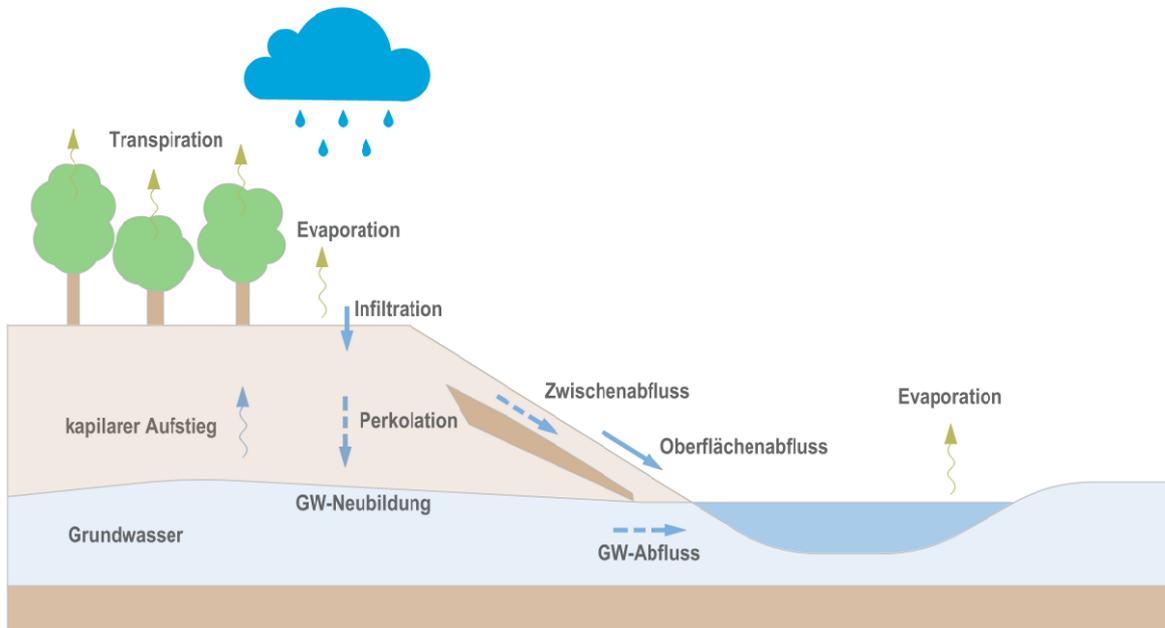


Abbildung 1: Wasserhaushaltsbegriffe

Verdunstung beschreibt den Vorgang, bei dem Wasser vom flüssigen bzw. festen Zustand in den gasförmigen Zustand übergeht. Die *Evapotranspiration* beschreibt die Gesamtverdunstung einer bewachsenen Oberfläche und setzt sich aus Evaporation (Verdunstung über einer Wasserfläche) und Transpiration (Anteil der Pflanzenverdunstung) zusammen.

Infiltration tritt an der Bodenoberfläche auf und beschreibt das Eindringen des Niederschlagswassers in den Bodenkörper. Die Infiltrationsrate definiert sich als die Intensität je Zeiteinheit, mit der das Wasser in den Boden eindringt. Die Infiltrationsrate ist abhängig vom Niederschlag, den Bodenverhältnissen und der Vegetation. Der Bewuchs hat durch die Wurzelbildung Einfluss auf das Entleerungsgeschehen der Mulde.

Bei langanhaltenden Versuchen ändert sich die Infiltrationsrate zeitlich nach nachfolgender Grafik. Zu Beginn werden Grob- und Makroporen gefüllt (A), dadurch ergeben sich hohe Anfangsinfiltrationsraten, bis sich eine konstante Versickerungsrate einstellt (B-Endinfiltrationsrate). Nach mehreren Stunden steigt die Infiltrationsrate durch Entweichen der eingeschlossenen Luftbläschen an (C). Nach Entweichen ist die gesättigte Leitfähigkeit erreicht (D). Infolge mikrobiellen Wachstums nimmt die Infiltrationsrate wieder ab (E).

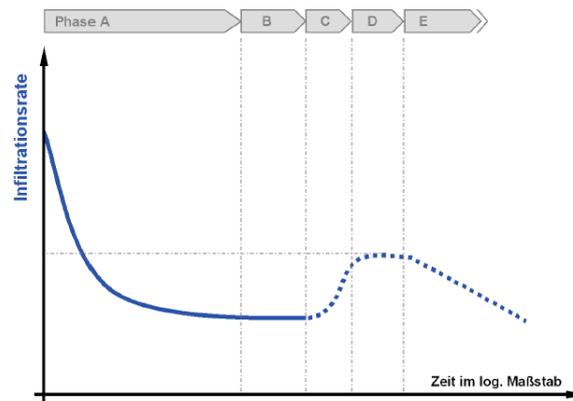


Abb. 2-9: Zeitlicher Verlauf der Versickerungsrate (Schmitt T. G., et al., 2007)

Mit der *Perkolat*ion wird die Durchsickerung des Bodenkörpers, überwiegend infolge der Schwerkraft beschrieben.

Der *Oberflächenabfluss* ist der Teil, der dem Vorfluter über die Bodenoberfläche zufließt.

2.5 natürlicher Boden

Auf den Versickerungsprozess im Boden nehmen verschiedene Faktoren, wie z.B. die Korngrößenverteilung, die Lagerungsdichte und die Verteilung des Bodengefüges Einfluss. Böden bilden ein so genanntes Drei-Phasen-System. Die feste Phase ist porös, so dass sie von den Phasen Luft (gasförmige Phase) und Wasser (flüssige Phase) aufgefüllt werden kann. Abhängig von der Korngrößenverteilung werden Böden in Feinböden (< 2 mm, z.B. Schluff und Sand) und Grobböden (> 2 mm, z.B. Kies) unterteilt.

Böden sind von Poren durchzogen, die wiederum das Ausmaß der Wasserspeicherung und den Transport bestimmen. Zum einen wird unterschieden in Primärporen, die die festen Bestandteile bilden. Sie werden unterteilt in Fein-, Mittel- und Grobporen. Grobporen (>0,01 mm) verfügen über eine schwache Wasserbindung, d.h. das Wasser versickert besonders schnell. In Mittel- (>0,0002-0,01mm) und Feinporen (<0,0002 mm) sind Kapillarkräfte wirksam, die das Wasser im Boden, gegen die Schwerkraft halten können (Feldkapazität). Mit wachsender Porengröße sinkt die Bindungsstärke, um das Wasser im Boden zu halten, ab.

Pflanzen saugen das Wasser gegen die Bindungskräfte zur Verdunstung aus dem Boden. Der Welkepunkt bezeichnet die Grenze der Saugspannungskräfte. Die Pflanzenverfügbarkeit wird über die nutzbare Feldkapazität beschrieben. Sie ist der Teil der Feldkapazität, der für die Vegetation verfügbar ist. Sie ergibt sich aus der Differenz der Feldkapazität und dem permanenten Welkepunkt (PWP). Die nutzbare Feldkapazität (nFK) ist u.a. abhängig von der Bodenart und dem Humusanteil.

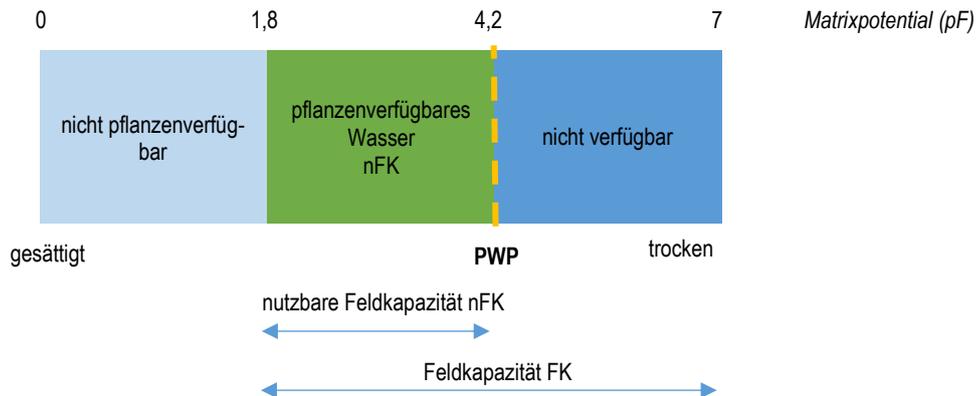


Abbildung 2 Feldkapazität

Darüber hinaus gibt es Makroporen, welche aus Schwundrissen, Wurzelkanälen und Gängen von Tieren bestehen. Makroporen sind röhrenförmig ($>2\text{mm}$ Durchmesser), verlaufen meist vertikal und stellen dabei Fließwege dar. Deren Anzahl wird auch durch die Vegetation bestimmt. Makroporen haben Einfluss auf die Funktionsfähigkeit des Systems bei Frost sowie beim Entleerungsvorgang der Mulde. Damit haben Makroporen eine nicht unbedeutende hydraulische Wirksamkeit im Boden.

Je trockener der Boden, desto größer ist die Saugspannung, d.h. desto größer ist die Bindungskraft die das Wasser im Boden hält. Umgekehrt bedeutet dies, dass die Wasserleitfähigkeit mit zunehmender Bodenfeuchte ansteigt.

Je grobkörniger der Boden ist, umso höher ist der Anteil an Grobporen und umso leichter kann das Wasser entzogen werden. Die Porosität feinkörniger Böden ist höher. Die Poren sind so klein, dass Kapillarkräfte wirken.

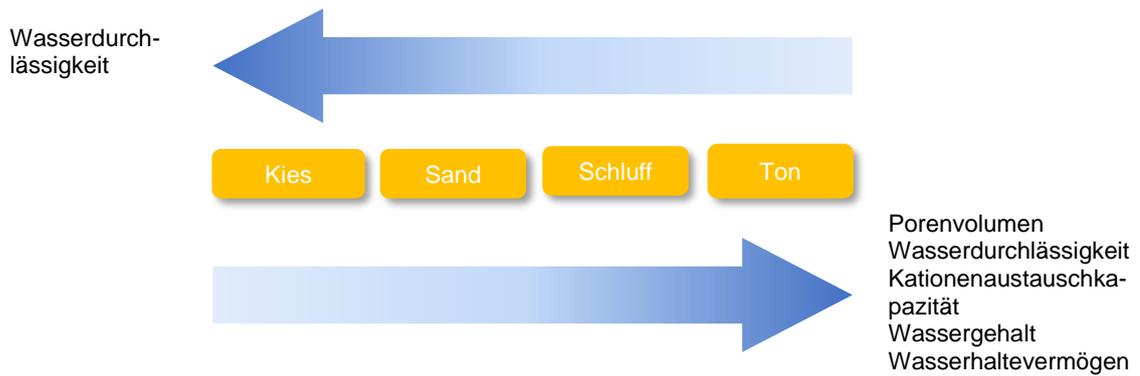


Abb. 2-10: Bodeneigenschaften nach StMUGV (STMUGV, 2006)

Als Oberboden wird die „oberste Schicht des durch physikalische, chemische und biologische Vorgänge entstandenen belebten Bodens“ (DIN 18915, 2018) verstanden. In der Regel beträgt die Mächtigkeit 20 – 30 cm. Der Oberboden enthält Humus und Bodenorganismen. Humus beschreibt die tote organische Substanz der Böden, bestehend aus abgestorbenen Resten von Pflanzen und Tieren. Die organische Substanz beeinflusst die Kationenaustauschkapazität und ist für die Bindung anorganischer Stoffe eine große Bedeutung (Scheffer & Schachtschabel, 2010).

2.6 Untersuchungen zur hydraulischen Leistungsfähigkeit

Wichtigster Parameter zur Bemessung von Versickerungsanlagen ist die Infiltrationsrate bzw. der Durchlässigkeitsbeiwert (k_f). Er definiert sich als Quotient aus Filtergeschwindigkeit und hydraulischem Gefälle (DIN 4049-3, 1994) und dient als Grundlage hydraulischer Berechnungen. Daher nimmt dessen qualitative Bestimmung einen hohen Stellenwert ein. Tab. 2-1 zeigt die verschiedenen Durchlässigkeitsbereiche auf.

Tab. 2-1: Durchlässigkeitsbereiche (DIN 18130-1, 1998)

k [m/s]	Bereich
$<10^{-8}$	sehr schwach durchlässig
10^{-8} bis 10^{-6}	schwach durchlässig
$>10^{-6}$ bis 10^{-4}	durchlässig
$>10^{-4}$ bis 10^{-2}	stark durchlässig
$>10^{-2}$	sehr stark durchlässig

Das DWA-A 138 empfiehlt einen entwässerungstechnisch relevanten Versickerungsbereich von $1 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $1 \cdot 10^{-6}$ m/s für Anlagen mit ausschließlicher Versickerung. Bei Werten über $1 \cdot 10^{-3}$ m/s ist die Aufenthaltszeit zu kurz, und hat eine ungenügende Reinigungsleistung bzw. einen begrenzten Schadstoffrückhalt zur Folge. Zu geringe Durchlässigkeiten ($< 1 \cdot 10^{-6}$ m/s) begünstigen zu lange Standzeiten und die Gefahr der Kolmation. Das Regelwerk DWA-A 138 empfiehlt daneben einen k_f -Wert der bewachsenen Bodenzone von $>1 \cdot 10^{-5}$ m/s, damit das Wasser zügig in die Rigole versickert.

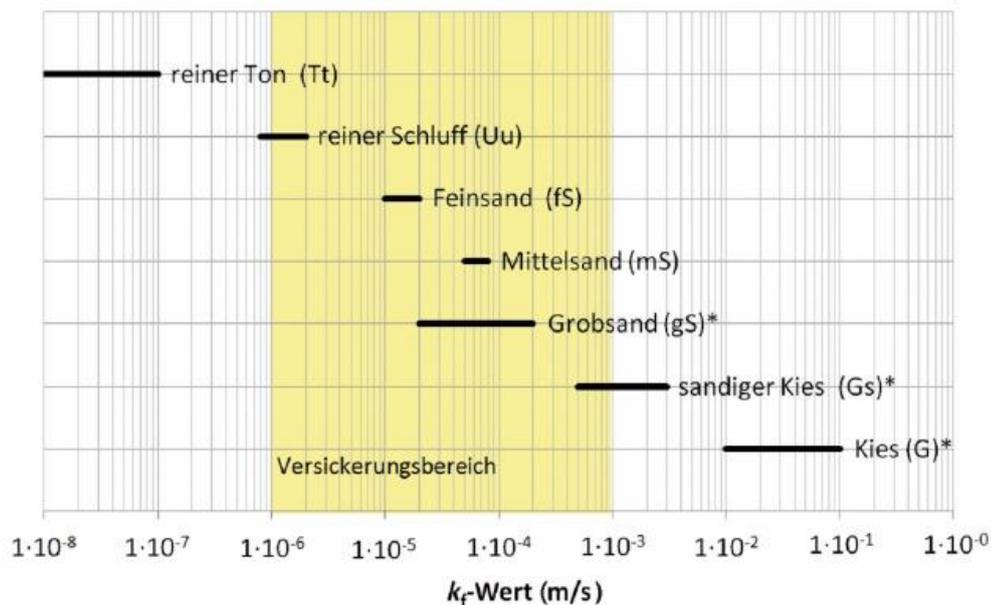


Abb. 2-11: Durchlässigkeitsbeiwerte und relevanter Versickerungsbereich (DWA-A 138, 2005)

Grundsätzlich sollten Versickerungsversuche in der Bodenschicht vorgenommen werden, über der das Wasser infiltriert. In Anlehnung an die Fortschreibung des DWA-A 138-1 (DWA-A 138-1 (GD), 2020) sind nachfolgend verschiedene Methoden und ihre qualitative Bewertung aufgeführt.

- Abschätzung
- Labor
- Feld

Eine überschlägige *Abschätzung mit Bodenkarten und Bodenansprache*, d.h. durch die Benennung und Beschreibung der Bodenarten, ist mit zu großen Unsicherheiten verbunden und für die Bemessung von Versickerungsanlagen ungeeignet.

Labormethoden (z.B. Permeameter, Stechzylinder, Sieblinienauswertung) können als Planungsgrundlage genutzt werden. Mittels Rammkernsondierung/Stechzylinder wird im Feld eine Probe gewonnen und im Labor die Durchlässigkeit bestimmt. Die Qualität der Werte ist als gering bis mittel einzustufen.

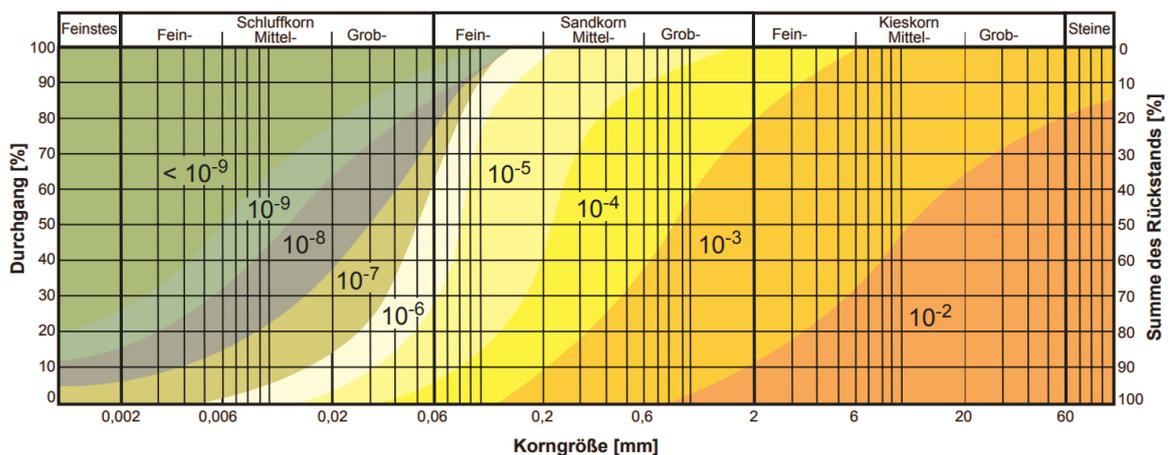


Abb. 2-12: Abschätzung des k_f -Wertes eines Bodens (Sebastian, 2018)

Feldmethoden sind den vorher genannten Praktiken vorzuziehen. Je nach Verfahren ist eine mittlere bis hohe Qualität der Ergebnisse gegeben. Die Bestimmung im Feld erfolgt mittels Doppelringinfiltrometer, Bohrlochmethode (Open-End-Test) oder Schürfung.

Doppelringinfiltrometer ermitteln den Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) punktuell, direkt an der Oberfläche. Dabei werden zwei unterschiedlich große Zylinder in den Boden gedrückt und mit Wasser gefüllt. Im Innenring wird die Infiltrationsrate bestimmt, als die Wassermenge die pro Oberflächenbereich und Zeiteinheit in den Boden eindringt.

Für größere Tiefen eignet sich die Bohrlochmethode/Open-End-Test. In den Boden wird bis zur benötigten Tiefe gebohrt und ein Messrohr eingebracht, welches mit

Wasser befüllt wird. Aus der Zeit und der eingefüllten Wassermenge wird die Versickerungsrate bestimmt. Vorteil ist, dass kein aufwendiger Aushub notwendig ist und die Bestimmung in verschiedenen Tiefen stattfinden kann. Allerdings erfolgt die Bestimmung der Infiltrationsrate auf einem kleinen Querschnitt.

Schurfversuche sind grabenartige Aufschlüsse die den späteren Bedingungen am nächsten kommen. Kleine Schürfe (< 1 m²) können per Handschachtung, größere mittels Bagger ausgehoben werden. Vorteil größerer Schürfe ist, dass die Heterogenität des Bodens berücksichtigt wird.

Abb. 2-13 zeigt die verschiedenen Methoden zur Durchlässigkeitsbestimmung, bezogen auf ihren qualitativen Nutzen, für die Bemessung von Anlagen zur Versickerung. Daran zeigt sich, dass Feldversuche allen anderen Methoden vorgezogen werden sollten.

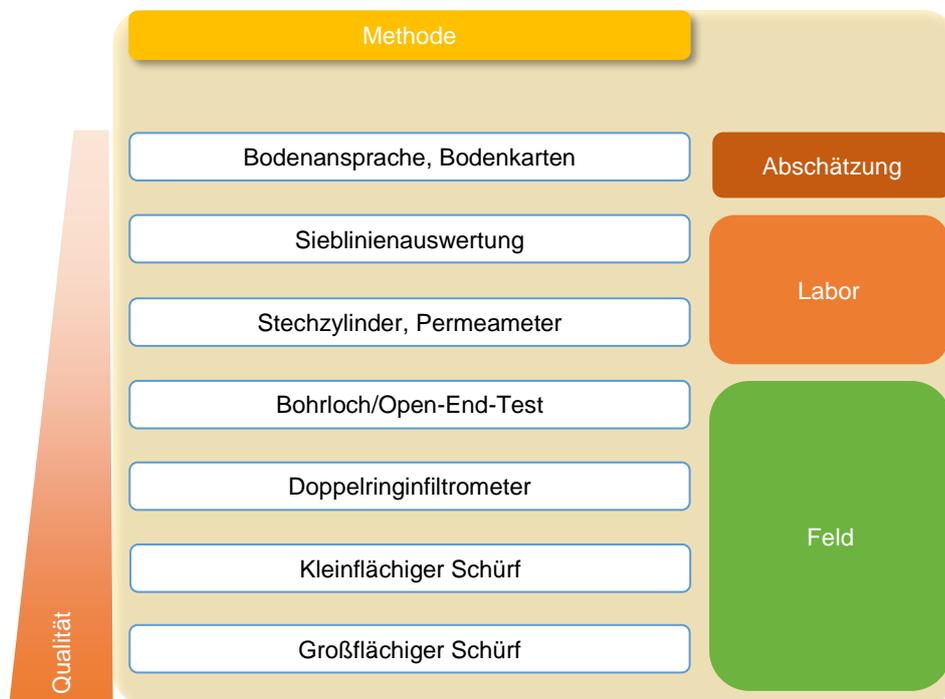


Abb. 2-13: Methoden zur Ermittlung der Durchlässigkeit von Böden nach (DWA-A 138-1 (GD), 2020)

2.7 Reinigung in der Bodenpassage

Natürlich vorkommende Schwermetalle in Gesteinen nehmen im Vergleich zu anthropogenen Quellen aus Industrie und Kraftfahrzeugen nur einen geringen Anteil ein. Verkehrsflächen können durch eine große Anzahl anorganischer Stoffe verunreinigt sein. Die sind in Reifen- und Bremsabrieb, Abtropfwasser von Schildern, Leitplanken, etc. enthalten. Schwermetalle, wie z. B. Kupfer, Blei und Zink sind dabei von besonderer Bedeutung, da sie nicht abgebaut werden und ins Grundwasser oder Gewässer gelangen können. Kupfer und Blei resultieren hauptsächlich aus dem Abrieb von Bremsbelägen. Einträge aus Zink sind vor allem durch Reifenabrieb und Masten für Beschilderung und Beleuchtung, Schutzplanken, etc. begründet. Detaillierte Ausführungen und Zusammenhänge zu Einträgen aus Kupfer, Zink und Blei kann dem Forschungsbericht (Hillenbrand, et al., 2005) entnommen werden. Der überwiegende Teil abgelösten Kupfers, Bleis und Zinks gelangt in die Seitenböschungen von Straßen. Ein großer Teil wird bei Niederschlag mit dem Straßenabwasser abgeschwemmt. Sehr feine partikuläre Stoffe werden über die Luft verfrachtet.

Dachabwässer gelten zwar als unbedenklich, können aber vor allem durch Kupfer und Zink aus Rinnen und Fallrohren verunreinigt sein.

Durch die Versickerung über eine aktive Bodenpassage werden die Schadstoffe in der bewachsenen Bodenzone durch Adsorption zurückgehalten und teilweise abgebaut.

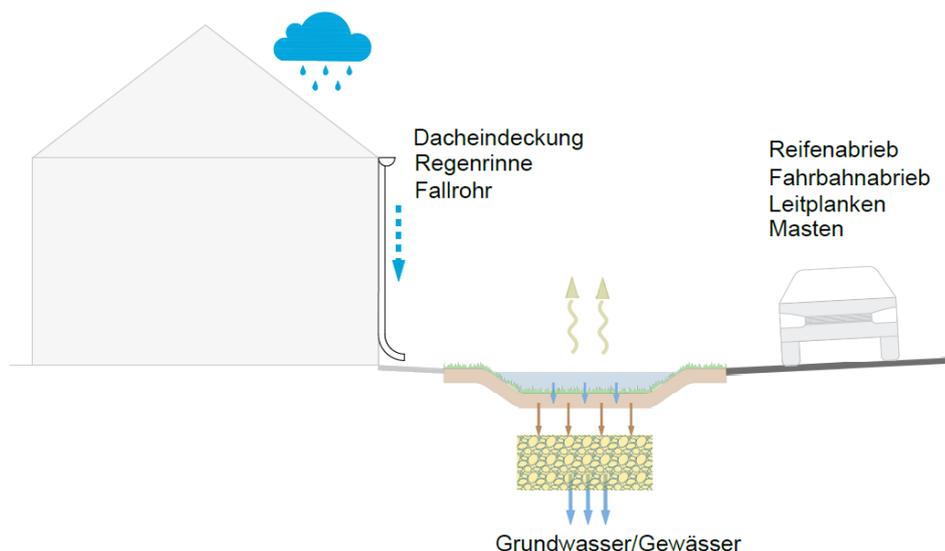


Abb. 2-14: Verschmutzungsquellen

Göbel. et al. (Göbel, Dierkes, & Coldeway, 2007) erstellten eine Matrix mit durchschnittlichen Konzentrationen von Schadstoffen in Dach- und Verkehrsabflüssen.

Tab. 2-2: durchschnittliche Schadstoffkonzentrationen nach Göbel (Reck & Kluge, 2020)

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 ohne Zinkrinnen	Beton, Zement, Bitumen, Glas ohne Zinkrinnen	Zement Grümdächer	Kupferdächer	Aluminiumdächer	Zinkdächer	Fußgänger- und Parkplatz Fahradweg Garten	Nebenstraße	Hauptstraße	Bundesstraße			
Physiko-chemische Parameter															
1	EC	µS/cm	50	141	141	71	141	141	-	-	-	470	414		
2	pH	-	5	5.7	5.7	7.5	5.7	5.7	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4		
Summenparameter															
3	TSS	mg/l	12	43	43	-	43	43	7.4	150	150	163	153		
4	BSB	mg/l	2	12	12	-	12	12	-	11	11	11	32		
5	CSB	mg/l	19	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	-	0.18	0.18	0.29	0.2		
7	NH ₄	mg/l	0.8	3.39	3.39	1.3	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	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		
10	Zn	µg/l	80	370	1851	468	370	370	6000	595	400	400	407		
11	Cu	µg/l	11	153	153	58	2600	153	23	80	86	97	85		
12	Pb	µg/l	9	69	69	6	69	69	107	137	137	170	224		
13	Ni	µg/l	2	4	4	3	4	4	-	-	14	11	27		
14	Cr	µg/l	3	4	4	3	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	-	-	-	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	-	-	-	15	39		
20	Cl	mg/l	2.26	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	1	3.5	4.5	1.65	2.61		
22	MKW	mg/l	0.36	0.7	0.7	-	0.7	0.7	0.16	0.16	0.16	4.17	4.76		

Anzahl der Daten
 > 15
 5-15
 < 5
 keine Daten

Mit der Einführung des Regelwerkes DWA-A 102 (DWA-A 102-2 / BWK-A 3-2, 2021) sind die Niederschlagsabflüsse in Abhängigkeit ihrer Herkunft zu kategorisieren und gegebenenfalls einer Behandlung zu unterziehen. Als Behandlung zählt dabei auch die Versickerung über einer bewachsenen Bodenschicht.

Reinigungsprozesse:

Ein wichtiger Prozess in Böden ist die Adsorption, d.h. die Anlagerung gelöster Stoffe an Oberflächen an die Feststoffoberfläche. Die Filtrations- (Filterwirkung des Korngerüsts) und Adsorptionsprozesse (Anlagerung von Stoffen an die Feststoffoberfläche) im Boden sind unter anderem abhängig vom Anteil organischer Substanz, Tongehalt und pH-Wert. Dadurch ist der Stoffrückhalt in der oberen bewachsenen Zone größer als in unteren Schichten. Voraussetzung dafür ist eine ausreichend dicke Bodenschicht und der Bewuchs mit Rasen. Die Effektivität des Rückhaltevermögens in den oberen Schichten wurde in umfangreichen Studien belegt (Kluge, Sommer, & Kaiser, 2016), (Engelhard, Fach, & Raucha, 2012), (Hillenbrand, et al., 2005) und (Reck & Kluge, 2020)). Die Oberbodenschicht muss ausreichend durchlässig sein, um eine schnelle Muldenentleerung zu gewährleisten. Allerdings darf die Körnung nicht zu grob gewählt werden, um eine ausreichende Verweilzeit im Boden und damit einhergehend eine gute Reinigungsleistung zu gewährleisten.

Durch Akkumulation der Schadstoffe sind Böden an der Einleitstelle oft stärker belastet. Bei dauerhafter Nutzung und sauren Milieubedingungen im Boden (pH <6) besteht die Gefahr der Mobilisierung/ Remobilisierung von Schadstoffen in die Tiefe und die Gefahr der Grundwasser-Verunreinigung nimmt zu.

Der Schwermetallrückhalt kann reversibel sein, bedingt durch pH-Wert-Änderung in den sauren Bereich sowie den Einsatz von Taumitteln (NaCl).

2.7.1 Grenzwerte

Infolge der Versickerung von Niederschlagswasser können Auswirkungen auf den Bodenhaushalt, das Grundwasser und Gewässer entstehen.

Zum Schutz des Bodens vor schädlichen Bodenveränderungen wurden mit der (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung) (BBodSchV, 1999) Prüfwerte erlassen, um einer schädlichen Veränderung des Bodens vorzubeugen. Dabei werden drei Risikobereiche unterschieden, die durch Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte abgegrenzt sind. Vorsorgewerte bilden den Bereich des Restrisikos bis zu dem Beginn eines unerwünschten Risikos. Ist der Vorsorgewert überschritten, ist mit einem Schadenseintritt bei anhaltender Einwirkung zu rechnen. Die Vorsorgewerte werden nach den Hauptbodenarten unterschieden.

Tab. 2-3: Vorsorgewerte nach Tabelle 1: BBodSchV (BBodSchV, 1999)

Schadstoff	Kurzzeichen	Vorsorgewert Sand [mg/kg]	Vorsorgewert Lehm/Schluff [mg/kg]
Blei	Pb	40	70
Cadmium	Cd	0,4	1
Chrom	Cr	30	60
Kupfer	Cu	20	40
Nickel	Ni	15	50
Zink	Zn	60	150

Darüber hinaus definiert die BBodSchV Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch. Dabei wird differenziert nach Kinderspielflächen, Wohngebieten, Park- und Freizeitanlagen sowie Gewerbegrundstücke (siehe Tab.2-4).

Tab. 2-4: Prüfwertewerte nach Tabelle 4: BBodSchV(BBodSchV, 1999)

Schadstoff	Kurzzeichen	Kinderspielflächen [mg/kg]	Wohngebiete [mg/kg]	Park- und Freizeitanlagen [mg/kg]
Blei	Pb	200	400	1.000
Cadmium	Cd	10	20	50
Chrom	Cr	200	400	400
Nickel	Ni	70	140	350

Für die Beurteilung des Wirkungspfades Boden-Grundwasser wurden Prüfwerte für das Sickerwasser am Ort der Beprobung definiert.

Tab. 2-5: Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser im Sickerwasser nach Tabelle 2: BBodSchV (BBodSchV, 1999)

Schadstoff	Kurzzeichen	Prüfwert [µg/l]
Blei	Pb	10
Cadmium	Cd	3
Chrom	Cr	50
Kupfer	Cu	50
Nickel	Ni	20
Zink	Zn	600

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) gibt für Schwermetalle Geringfügigkeitsschwellen (GFS) vor, die zum Schutz der Gesundheit und Umwelt festgelegt wurden (LAWA, 2017). Die Vorsorge gegen nachteilige Veränderung richtet sich nach § 48 WHG (WHG, 2009). Werden die Werte bei Eintritt in das Grundwasser überschritten, liegt ein Benutzungsstatbestand vor, der eine Prüfung der Erlaubnisfähigkeit nach sich zieht.

Tab. 2-6: Geringfügigkeitsschwellen nach LAWA (LAWA, 2017)

Schadstoff	Kurzzeichen	Geringfügigkeitsschwellenwert [µg/l]
Blei	Pb	10
Kupfer	Cu	20
Zink	Zn	400

Zum Schutz des Grundwassers wurden Schwellenwerte, zur Beurteilung des guten chemischen Zustandes erlassen.

Tab. 2-7: Schwellenwerte nach Anlage 2: GrwV (GrwV, 2010)

Schadstoff	Kurzzeichen	Schwellenwert [µg/l]
Blei	Pb	10
Cadmium	Cd	0,5

In der Oberflächengewässerverordnung sind die Anforderungen an einen guten Gewässerzustand geregelt (OGewV, 2016). Für die Parthe, mit Einordnung in Typ 17, ergeben sich nachfolgende Grenzwerte.

Tab. 2-8: Schwellenwerte nach OGewV (OGewV, 2016)

Schadstoff	Kurzzeichen	Schwellenwert [mg/l]
Gesamt-Phosphor	P	≤ 0,1

2.8 Regelwerke und Gesetze im Zusammenhang mit der Versickerung von Niederschlagswasser

2.8.1 DWA-A 138

Mit Fortschreiben des DWA-Arbeitsblattes 138 wurden die Anforderungen für die Bemessung und den Bau von Versickerungsanlagen ausgebaut und der Fokus immer weiter auf Wartung und Betrieb der Anlagen gelegt. Diese Thematik wird mit der Fortschreibung des Merkblattes noch weiter untersetzt.

Tab. 2-9: Entwicklung DWA-A 138

	ATV-A 138 (1990)	DWA-A 138 (2002, 2005)	DWA-A 138-1 (Gelbdruck)
relevante Durchlässigkeit k_f	$5 \cdot 10^{-3}$ bis $5 \cdot 10^{-6}$ m/s	$k_f = 1 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$ m/s Oberboden $k_f > 1 \cdot 10^{-5}$ m/s	$k_f = 1 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$ m/s
Bemessung	<ul style="list-style-type: none"> $n=0,2$ $k_f/2$ 	<ul style="list-style-type: none"> $n=0,2$ (Rigole) $n=1/a$ (Mulde) $k_f/2$ Entleerungszeit 24 h $n=1/a$ pH-Wert 6-8 	<ul style="list-style-type: none"> Bewertung nach DWA-A102-2 Häufigkeit in Abh. der Auswirkung auf Gesundheit, Schäden k_f Verfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeit Korrekturfaktor Durchlässigkeitsbeiwert Entleerungszeit < 84h $n=1/a$
	<ul style="list-style-type: none"> Abstand Keller 	<ul style="list-style-type: none"> Abstand Baugrube Abstand Bäume Bepflanzung Rasen, Bodendecker, Stauden 	<ul style="list-style-type: none"> Bepflanzung erweitert: Sträucher, Gehölze
Wartung	<ul style="list-style-type: none"> mindestens halbjährliche Kontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> Empfehlung Bauhandbuch ausführliche Empfehlungen zu Wartungsintervallen 	<ul style="list-style-type: none"> Betriebshandbuch erforderlich ausführliche Empfehlungen zu Wartungsintervallen
Betrieb	<ul style="list-style-type: none"> Auflockerungsarbeiten, Erhalt der Pflanzendecke, Entfernung Laub 	<ul style="list-style-type: none"> ausführliche betriebliche Maßnahmen 	<ul style="list-style-type: none"> ausführliche betriebliche Maßnahmen

Das ATV-Arbeitsblatt (ATV-A 138, Januar 1990) gibt für Versickerungsanlagen einen relevanten Versickerungsbereich von $k_f = 5 \cdot 10^{-3}$ bis $5 \cdot 10^{-6}$ m/s an, für die Bemessung wird eine Häufigkeit von $n = 0,2$ 1/a empfohlen. Zur Berechnung wird $k_f/2$ angewendet.

Bezüglich des Betriebs von Versickerungsanlagen wird eine mindestens halbjährliche Kontrolle empfohlen und betriebliche Maßnahmen kurz erwähnt (z.B. Minderung der Selbstdichtung Auflockerungsarbeiten, Erhalt der Pflanzendecke, Entfernung von Laub empfohlen).

In dem aktuell gültigen DWA-Arbeitsblatt (DWA-A 138, 2005) wird der entwässerungstechnisch relevante Bereich mit $k_f = 1 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$ m/s für eine ausschließliche Versickerung angegeben. Sickerraten $> 10^{-3}$ m/s sind durch eine zu kurze Aufenthaltszeit und damit ungenügender Reinigungsleistung gekennzeichnet, Raten $< 10^{-6}$ begünstigen zu lange Standzeiten. Der Oberboden sollte eine Durchlässigkeit von $k_f > 1 \cdot 10^{-5}$ aufweisen. Weiterhin ist ein pH-Wert von 6-8 im Boden anzustreben. Versickerungsanlagen werden ausschließlich für eine Häufigkeit von $n=0,2$ 1/a mit $k_f/2$ bemessen. Die Häufigkeit ist für das Gesamtsystem zu erbringen, d.h. bei MR oder

MRS kann die Mulde auch mit $n=1$ bemessen werden und erhält einen Überlauf in die Rigole. Es ist eine Entleerungszeit von 24h für $n=1/a$ einzuhalten. Der Abstand der Versickerungsanlage sollte das 1,5-fache der Baugrubentiefe (wenn der Keller nicht wasserdicht ausgeführt wird) nicht unterschreiten.

Im Gegensatz zum ATV-Regelwerk enthält das Arbeitsblatt erweiterte Hinweise zum Betrieb von MRS. So sollte der Überlauf der Mulde möglichst weit entfernt vom Zulauf angeordnet sein. Die Begrünung der Muldenfläche kann mit Rasenansaat, Bodendeckern oder Hochstauden erfolgen. Es ist darauf zu achten, dass in MRS nur Flachwurzler verwendet werden. Aufgrund der Verdichtung des Bodens ist von Koniferen abzuraten. Der Baumabstand sollte die Hälfte des möglichen Kronendurchmessers betragen.

Bei der Fortschreibung wurde der Fokus stärker auf Wartung und Betrieb von Versickerungsanlagen gelegt. Zur Qualitätssicherung wird angeraten bauliche Hinweise in einem Bauhandbuch darzulegen. Inhalt dessen sind technische Standards, Anforderungen und Wartungshinweise. Dies gilt sowohl für private als auch öffentliche Anlagen. Zum Betrieb der Anlage werden Wartungsintervalle vorgeschlagen. So sollte beispielsweise die Konzentration von Schadstoffen in Bodenschichten alle 10 a überprüft werden.

Die Anlagen sollten regelmäßig kontrolliert, Mulden von Laub entfernt und bei Bedarf Grünschnitt betrieben werden. Die Inspektion der Rigole sollte halbjährlich erfolgen. Da durch langzeitige Versickerung erhöhte Stoffkonzentration auftreten können, wird der Austausch der oberen Infiltrationsschicht empfohlen.

Derzeit erfolgt eine Weiterentwicklung des Arbeitsblattes *DWA-A 138-1* (DWA-A 138-1 (GD), 2020). Gleichzeitig wird damit die Konsistenz zu verwandten Arbeits- und Merkblättern (z.B. DWA-A102) angestrebt.

Als entwässerungstechnisch relevanter Bereich wird weiterhin die Durchlässigkeit $k_f = 1 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$ m/s für die ausschließliche Versickerung angegeben. Neu ist die Bewertung der Verschmutzung der Niederschlagsabflüsse aufgrund ihrer Herkunft und Einordnung nach Belastungskategorien I, II, III, analog des DWA-A 102-2.

Ein besonderer Fokus liegt auf einer differenzierten Bewertung der Methoden zur Durchlässigkeitsbestimmung von Böden (siehe 2.6) und Berücksichtigung eines Korrekturfaktors für den Durchlässigkeitsbeiwert.

Die Bemessungshäufigkeit wird in Abhängigkeit von den Auswirkungen auf Gesundheit, wirtschaftliche Schäden und der Nutzung (Schadenspotential) festgelegt.

Hinsichtlich der Bepflanzung von Versickerungsmulden, können künftig Gräser, Stauden, Sträucher und Gehölze verwendet werden.

Mit dem neuen Regelwerk wird ein Betriebshandbuch erforderlich (privat u. öffentlich) welches zum Inhalt Plandarstellungen der Anlagen, Wartungs- Betriebshinweise, Genehmigungen und Erlaubnisse haben soll.

Im Arbeitsblatt sind zudem Empfehlungen zu Wartungsintervallen und zur Funktionsüberwachung enthalten. Darüber hinaus sind die Rückhaltekapazitäten des Bodens regelmäßig zu überprüfen.

2.8.2 Sonstige Regelwerke

2.8.2.1 Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL)

Die Empfehlungen der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. bieten eine gute Ergänzung zu den gängigen technischen Regelwerken (DWA-A 138) in Hinblick auf Vegetation und Boden. Aktuell gültig ist das Merkblatt „Empfehlungen zur Versickerung und Wasserrückhaltung“ (FLL, 2005).

Derzeit erfolgt die Erarbeitung der „Empfehlungen für Planung, Bau und Instandhaltung von Versickerungsanlagen im Landschaftsbau“, welche neben den Ansätzen gültiger Regelwerke, Informationen zu Wartung und Instandhaltung der Anlagen beinhalten soll.

2.8.2.2 Richtlinien für die Entwässerung von Straßen (REWeS)

Für die Entwässerung von außerörtlichen Straßen gelten die „Richtlinien für die Entwässerung von Straßen“ (REwS, 2021). Es handelt sich dabei um die Fortschreibung der „Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Entwässerung Ausgabe 2005 (RAS-Ew 2005)“. Wie in der in Bearbeitung befindlichen DWA-A 138-1 erfolgt eine Einteilung in Belastungskategorien durch Differenzierung nach Verkehrsaufkommen. Bei schlechten Durchlässigkeiten des Untergrundes werden hier dränierte Versickerungsmulden vorgeschlagen.

2.8.3 Gesetze und Verordnungen

Für die Versickerung von Niederschlagswasser ergeben sich eine Reihe wasserrechtlicher Vorgaben im Bundes- und Landesrecht sowie auf der Gemeindeebene.

Das von bebauten und befestigten Flächen abfließende Niederschlagswasser ist, nach §54 des Gesetzes zur Ordnung des Wasserhaushalts (WHG, 2009) und § 2 des Abwasserabgabengesetzes (AbwAG, 1976), im rechtlichen Sinne Abwasser.

Niederschlagswasser soll möglichst ortsnahe versickern (§55 WHG), stellt nach WHG (§9) und AbwAG (§2) damit eine Benutzung eines Gewässers dar. Daraus resultiert die Erfordernis einer wasserrechtlichen Erlaubnis durch die Untere Wasserbehörde.

In Sachsen ist für bestimmte Fälle keine Erlaubnis für das Versickern von Niederschlagswasser erforderlich. Nach §1 der Erlaubnisfreiheits-Verordnung (ErlFreihVO, 2001) ist das Ableiten von Niederschlagswasser in das Grundwasser erlaubnisfrei, wenn es nicht aus häuslichen, landwirtschaftlichen oder gewerblich Nutzungen stammt. Dabei muss sichergestellt sein, dass die a.a.R.d.T. angewandt wurden (§3)

und ein ausreichender Abstand zw. Sohle und GW sowie eine ausreichende Versickerungsfähigkeit gewährleistet ist (§6).

Das schadlose Einleiten von Niederschlagswasser aus nicht gemeinsamen und gewerblich genutzten Flächen in oberirdische Gewässer, stellt nach §16 SächsWG (SächsWG, 2013) ein Gemeingebrauch dar, der ebenfalls ohne Erlaubnis möglich ist.

Nach §1 Abwasserabgabengesetz (AbwAG) ist für das Einleiten von Abwasser in Gewässer eine Abgabe zu entrichten. Gemäß §50 Abs. 3 SächsWG kann die Pflicht zur Überlassung des NW aufgehoben werden, wenn es auf dem Grundstück auf dem es anfällt bzw. nach Abs. 4 auch außerhalb des Grundstückes versickert.

Zudem kann es auf Antrag abgabefrei sein, wenn das Niederschlagswasser in unvermeidbarem Maß verunreinigt (§6 Sächsisches Ausführungsgesetz zum Abwasserabgabengesetz (SächsAbwAG, 2004).

Versickerungseinrichtungen stellen Abwasserbeseitigungsanlagen dar. Damit sind sie nach §43 SächsBO (SächsBO, 2016) „... so herzustellen und zu unterhalten, dass sie betriebssicher sind und Gefahren oder unzumutbare Belästigungen nicht entstehen können.“

Auf Gemeindeebene können weitere Festlegungen im B-Plan aufgeführt sein.

Da durch die Versickerung von Niederschlagswasser Schadstoffe in den Boden eingebracht werden können, sind außerdem bundesrechtliche Vorgaben zu beachten.

2.9 Kosten von MRS

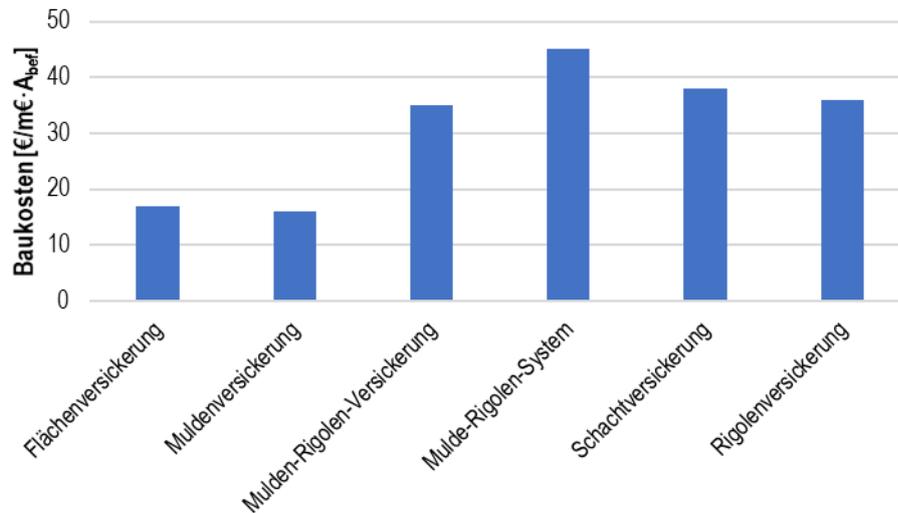
Die Kosten von Versickerungsanlagen hängen vor allem vom gewählten System ab, deren Wahl durch die Verfügbarkeit von Freiflächen, der Durchlässigkeit des Untergrundes und dem Grundwasserflurabstand bestimmt wird. Der Versickerung über eine bewachsene Bodenzone sollte der Vorrang gegeben werden. Die Flächenversickerung, ist durch die breitflächige Versickerung über gut durchlässige Flächen, beispielsweise über Wiesen, am preiswertesten. Aufgrund des erhöhten Flächenbedarfes ($> 50\% A_{\text{bef}}$ (Riechel, et al., 2017)) ist deren Nutzung oftmals nicht umsetzbar.

Für dezentrale Anlagen mit Zwischenspeicherung des Niederschlagswassers werden Mulden, Rigolen oder Versickerungsschächte genutzt. Neben der Beschaffenheit des Untergrundes und der Länge der Zuleitung zu den Anlagen hat auch der Umfang der Vernetzung einzelner Systeme Einfluss auf die Investitionskosten. Bei den Anlagen mit Zwischenspeicherung ist die Muldenversickerung, mit einem Flächenbedarf von ca. 20 % A_{bef} , das preiswerteste Verfahren.

Aus den Erhebungen von KURAS (Riechel, et al., 2017) und (Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, 2006), wurden mit Anpassung an den Baupreis 2023 folgende Baukosten, als Richtwert ermittelt. Anlagen der Flächen- und Muldenversickerung bilden die kostengünstigsten Varianten. Bedingt durch die Vernetzung von Mulden-Rigolen-Systemen entstehen zwangsläufig höhere Baukosten. Die Kosten für Schacht- und Rigolenversickerung liegen in ähnlicher Größenordnung wie einzelne Mulden-Rigolen-Versickerungen, auf diese sollte aufgrund der fehlenden bewachsenen Bodenzone jedoch verzichtet werden.

Tab. 2-10: Investitionsvergleich verschiedener Versickerungsanlagen

Versickerungsanlage	Baupreis 2023 [€/m ² ·A _{bef}]
Flächenversickerung	17
Muldenversickerung	16
Mulden-Rigolen-Versickerung	35
Mulden-Rigolen-System	45
Schachtversickerung	38
Rigolenversickerung	36



Im Folgenden wird lediglich ein Kostenvergleich der Mulden-Rigolen-Versickerung aufgeführt. Die Angaben in Tab. 2-11 und Tab. 2-12 stammen einerseits aus den Forschungsvorhaben LEIREV (Kluge, Sommer, & Kaiser, 2016), KURAS (Riechel, et al., 2017), (Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, 2006) und Sieker (Sieker, -). Die Herstellkosten werden in Abhängigkeit der angeschlossenen befestigten Fläche (€ pro m² · A_{bef}) angegeben. Die in Literaturrecherchen ermittelten Baukosten weisen eine hohe Spreizung auf. Angepasst an den aktuellen Baupreisindex des Jahres 2023 ergibt sich für Mulden-Rigolen ein Orientierungswert von 35 €/m²·A_{bef} und Mulden-Rigolen-Systemen von 45 €/m²·A_{bef}.

Tab. 2-11: Baukosten von Mulden-Rigolen

Baukosten [€/m ² ·A _{bef}]	Quelle	Anpassung Baupreis 2023 [€/m ² A _{bef}]
6 – 47,6 (MRS)	Kuras – Steckbrief 8: Kombinierte Versickerungssysteme (2017)	9 - 74
15 – 20 (MR) 27,5 (MRS)	Hamburg – Dezentrale naturnahe Regenwasserbewirtschaftung (2006)	30 – 40 (MR) 56 (MRS)
12,5 – 20 (MRS)	Sieker (Balke&Rudolph 1997)	26 - 42

Die angegebenen Kosten dienen nur als Richtwert, da sie aufgrund der oben erwähnten Randbedingungen und örtlichen Verhältnisse sowie Bemessungsansätzen erheblich variieren können. Es ist daher ratsam, frühzeitig Maßnahmen zur naturnahen Regenwasserbewirtschaftung bei der Erschließungsplanung zu berücksichtigen.

Die Betriebskosten für Anlagen der Versickerung, sind in erster Linie vom angewandten System abhängig. Für Versickerungsmulden resultiert die Wartung hauptsächlich aus der Vegetationspflege und Beräumung. Bei nachlassender Versickerungsleistung können Auflockerungsarbeiten bzw. das Nachsäen nötig werden. Bei erschöpftem Schwermetallrückhalt, wird der Austausch des Oberbodens notwendig, was den Herstellkosten einer Versickerungsmulde gleichkommt.

Bei unterirdischen Anlagen sind zusätzlich die Kontrollschächte und Rohre zu inspizieren und von Laub zu befreien.

Die in der Tabelle Tab. 2-12 angegebenen Werte, beziehen sich auf die Betriebskosten pro m² Mulde und Jahr. Mit Berücksichtigung des Baupreisindex 2023 belaufen sich die jährlichen Betriebskosten auf ca. 1-2 €/m². Der Austausch von Bodenmaterial ist darin nicht berücksichtigt.

Tab. 2-12: Betriebskosten von MRS

Betriebskosten [€/m ²]	Quelle
0,5 – 1,0	LEIREV – Leistungsfähigkeit und Zustand langjährig betriebener dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen (2016)
0,5 – 0,75	Sieker (Jahresangabe unbekannt)

Dem gegenübergestellt sei die Einleitung von Niederschlagswasser in das öffentliche Kanalnetz. Deren Bemessung erfolgt anhand der angeschlossenen befestigten Fläche. Bei 1,21 €/m² A_{bef}/Jahr würden sich die Betriebskosten je m² Mulde auf rund 20 € pro Jahr belaufen.

Bei Standzeiten der Anlagen von über 30 Jahren verursachen MRS nur geringe Betriebskosten, bei einem hohen Umweltnutzen, in Hinblick auf die Annäherung an natürlichen Wasserhaushalt und Minderung von Überflutungen bei Starkregen sowie multifunktionaler Nutzung der Versickerungsanlagen.

3 Untersuchungsprogramm an Mulden-Rigolen-Systemen

3.1 Ziele des Untersuchungsprogramms

Im Rahmen des Projektes zum Mulden-Rigolen-Monitoring in der Stadt Taucha, sollte die Funktionstüchtigkeit/ Effektivität bestehender Mulden-Rigolen-Systeme (MRS) hinsichtlich ihrer hydraulischen und stofflichen Leistungsfähigkeit nach langen Standzeiten nachgewiesen werden. Dabei sollten MRS unterschiedlicher Bauzeiten einerseits und verschiedenen Nutzungen andererseits überprüft werden.

Aufgrund der Erfahrungen vergangener Forschungsprojekte (siehe Kap. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), wurde als Untersuchungsstandort die Stadt Taucha ausgewählt, da die Stadt über Mulden-Rigolen-Anlagen unterschiedlicher Bauzeiten bis zu 30 Jahren verfügt.

An drei verschiedenen Standorten sollten Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit und zum kumulierten Schadstoffpotential durchgeführt werden. Der Untersuchungsraum wurde so gewählt, das möglichst vielfältige Rahmenbedingungen betrachtet werden konnten:

- Systeme verschiedener Standzeiten
- Nähe zu Straßen
- Niederschlagsabflüsse unterschiedlicher Nutzungen (Dachabflüsse, Straßenabfluss)
- Bereits untersuchte MRS in der Vergangenheit (Forschungsprojekt 1996, HTWK)

Für den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der Mulden-Rigolen war eine Messkampagne in mehreren Schritten angedacht. Um Aussagen zum Versickerungsvermögen der MRS treffen zu können, wurden hydraulische Feldversuche geplant. Mittels Doppelringinfiltrimeter wurde die Durchlässigkeit oberflächennah und punktuell (für den Bereich des Versuchsaufbaus) durchgeführt. Um die gesamte Leistungsfähigkeit des MRS einschließlich der Rigole prüfen zu können, wurde in einem zweiten Feldversuch der Einstau der gesamten MRS vorgenommen.

3.2 Vorstellung und Beschreibung der Untersuchungsstandorte

3.2.1 Untersuchungsstandort 1

Untersuchungsstandort 1 befindet sich in einem Wohnpark, deren Mulden-Rigolen-System seit fast 30 Jahren in Betrieb ist. Hauptanteil des Abflusses in die Mulden-Rigolen ist das Niederschlagswasser von Dachflächen, dass in Rinnen und Fallrohren aus Kupfer gesammelt wird. Daneben entwässern ebenfalls Geh- und Radwege in die Mulden. Das verschmutzte Niederschlagswasser der Straße entwässert über die Kanalisation. Die Zuleitung zu den Mulden erfolgt oberirdisch über Pflastermulden. Die Rigolen bestehen aus Kies mit großem Porenvolumen (30 %) und integriertem Sickerrohr. Das Niederschlagswasser versickert in das Grundwasser.

Bei den Begehungen konnte festgestellt werden, dass es gerade bei größeren Distanzen zu Verlusten bis zur Mulde kommt. Dies resultiert aus fehlendem Gefälle der Pflasterrinnen. Durch Laub und Sedimente verstopfte Rinnen, behindern ebenfalls den Zufluss zu den Mulden. Mit der Konsequenz, dass das Wasser dann über die Grünflächen versickert oder über die Straße der Kanalisation zufließt. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass ein Großteil der Schächte des MRS nicht zugänglich war, weil der Bewuchs mit dicken Ästen den Zugang verwehrte. Einige Mulden zeigten Defizite hinsichtlich der Bepflanzung, zum einen war keine geschlossene Grasnarbe mehr vorhanden, zum anderen wurde ein starker Wurzeleinwuchs in die Mulden registriert. Teils liegen auch bauliche Mängel vor. So liegt beispielsweise der Zulauf zu einer Versickerungsmulde am Notüberlauf dieser und bei den untersuchten Rigolen wurden defekte Sickerrohre festgestellt.

An Spielplätze angrenzende Mulden sind durch Splitt - und Sandeintrag sowie Verdichtung der Oberfläche durch spielende Kinder stärker belastet.

3.2.2 Untersuchungsstandort 2

Untersuchungsstandort 2 befindet in einem verkehrsberuhigten Bereich einer Reihenhaussiedlung. Das Mulden-Rigolen-System besteht seit ca. 25 Jahren. Der Niederschlagswasserabfluss setzt sich aus Dach-, Hof- und Verkehrsflächen zusammen. Der Zufluss der Dachabwässer erfolgt über Fallrohre und Rinnen, die übrigen Flächen entwässern oberirdisch über die gesamte Muldenlänge. Das MRS entwässert ins Grundwasser.

Bei diesem Standort fallen vor allem Baumaßnahmen (Gas, Kabelverlegung) durch die Mulden, durch unterbrochene Grasnarben und Kies auf der Oberfläche auf. Zudem wiesen die Zuleitungen verstopfte Rinnen durch Sedimente und Laub auf.

3.2.3 Untersuchungsstandort 3

Untersuchungsstandort 3 befindet sich in einem Einfamilien- und Reihenhausgebiet. Das MRS ist ca. 25 Jahre alt und befindet sich entlang einer Straße durch das Wohngebiet. Der Hauptabfluss wird durch die Straßenflächen generiert. Die untersuchte Mulde wird über einen punktuellen Zufluss durch das Straßenabwasser beschickt. Die Mulden-Rigolen wurden in der Planung ohne Versickerung angenommen und als Kanal mit Staupotential gewertet. Der Abfluss erfolgt in das Gewässer.

Die Besonderheit an diesem MRS ist, dass es aus privaten und öffentlichen Mulden bestand. Einige Anlieger duldeten die Mulden auf ihrem Grundstück nicht und entfernten diese. Damit ist die Funktionstüchtigkeit des gesamten MRS nicht mehr gegeben und die öffentliche Mulde hydraulisch überlastet.

3.3 k_f -Wert Doppelringinfiltrometer-Versuch

3.3.1 Beschreibung Versuchsaufbau

Um die hydraulische Versickerungsleistung des Bodens einschätzen zu können, wurden die Messungen mittels Doppelringinfiltrometer durchgeführt, der den Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) direkt an der Oberfläche punktuell ermittelt. Die Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Infiltrationsrate erfolgt gemäß Regelwerk DIN 19682-7 (DIN 19682-7, 2015). Die Infiltrationsrate wird bestimmt als die Wassermenge die pro Oberflächenbereich und Zeiteinheit in den Boden eindringt.

Die Messung erfolgt an zwei Standorten je Mulde, um Einflüsse von Vegetation und Boden, insbesondere Porenverteilung und Dichte zu berücksichtigen.

Das Messgerät besteht standardmäßig aus zwei Edelstahlingen mit verschiedenen Durchmessern. Außen- und Innenring werden auf die Muldenoberfläche aufgesetzt und in den Boden gedrückt. Zur Befeuchtung und Bildung einer Pufferzone wird zunächst der Außenring mit Wasser befüllt. Im Anschluss wird auch der Innenring mit Wasser gefüllt. Während des Versuchs ist auf ein Mindestwasserstand von 5 cm in den Ringen zu achten. Die Infiltrationsrate wird aus dem Wasserverlust des Innenringes ermittelt, da das Wasser senkrecht nach unten strömt. In bestimmten Zeitintervallen wird die Senkung des Wasserspiegels im Innenring dokumentiert. Das Ende der Messung ist erreicht, wenn die Infiltrationsrate einen konstanten Wert angenommen hat. Maßgebend ist der Endwert.



Abb. 3-1: Doppelringinfiltrometer

3.3.2 Ergebnisse der Doppelringinfiltrometer-Messungen

Da infolge örtlicher Einflüsse, wie zum Beispiel Makroporen, Bodenstruktur und -verdichtung variable Durchlässigkeiten möglich sind, wird mit dem Regelwerk DWA-A 138-1 (DWA-A 138-1 (GD), 2020) eine Korrektur des Durchlässigkeitsbeiwertes empfohlen.

$$k_i = k \cdot f_K$$

- k_i : bemessungsrelevante Infiltrationsrate in m/s
- k : Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens, z. B. k_r -Wert in m/s
- f_k resultierender Korrekturfaktor Wasserdurchlässigkeit

$$f_k = f_{Ort} \cdot f_{Methode} \leq 1$$

f_{Ort} Korrekturfaktor zur Erfassung der Variabilität der Bodenverhältnisse und Umfang/Anzahl der Versuchsstandorte

$f_{Methode}$ Korrekturfaktor für Bestimmungsmethode

- kleinflächige Feldversuche (Doppelringinfiltrometer) 0,9
- Großflächige Feldversuche 1

Für den korrigierten Durchlässigkeitsfaktor k_i wurde $f_{Ort} = 1$ gesetzt. Für die Korrektur der Untersuchungsmethode $f_{Methode}$ floss der Faktor 0,9 für kleinflächige Versuche ein.

Der entwässerungstechnisch relevante Versickerungsbereich gemäß DWA-A 138 liegt zwischen $1 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $1 \cdot 10^{-6}$ m/s. Diese Vorgabe wird an allen Messstellen erreicht, so dass aus hydraulischer Sicht davon ausgegangen werden kann, dass eine ausreichende Verweilzeit für die Reinigung des Niederschlagswassers in der Bodenzone gegeben ist. Weiter empfiehlt das Regelwerk für den Oberboden von Mulden-Rigolen eine Durchlässigkeit von k_r -Wert $\geq 1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Beide Messungen am Untersuchungsstandort der MS3 unterschreiten diesen Bereich.

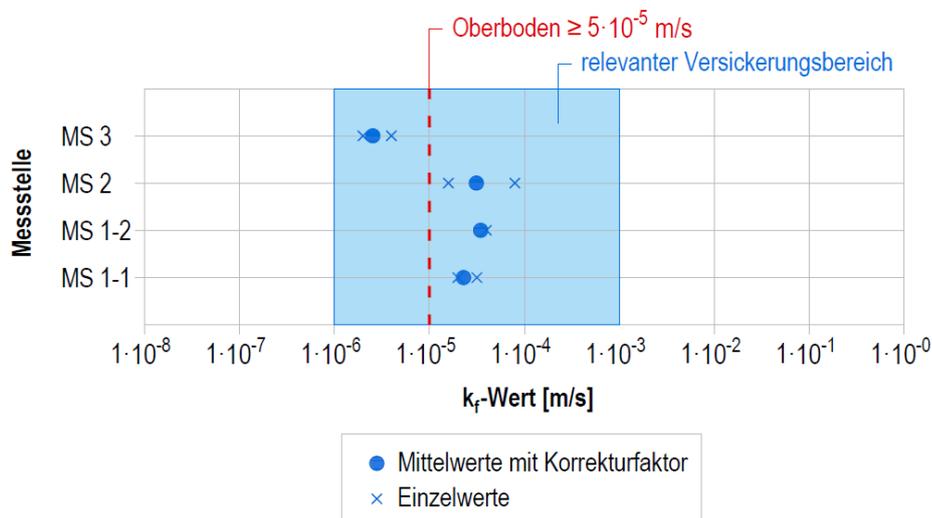


Abb. 3-2: Ergebnisse Doppelringinfiltrometerversuche

Die Grafik zeigt den aus den Einzelwerten kombinierten und korrigierten Mittelwert k_i (vergl. Tab. 3-1) sowie die Ergebnisse der Einzelmessung. Die Messwerte wurden in nachstehender Tabelle festgehalten.

Tab. 3-1: Ergebnisse Doppelringinfiltrometerversuche

MS	k _r -Wert Doppel. Standort 1 [m/s]	k _r -Wert Doppel. Standort 2 [m/s]	k _i [m/s]
1-1	5·10 ⁻⁵	3·10 ⁻⁵	3,6·10 ⁻⁵
1-2	6·10 ⁻⁵	6·10 ⁻⁵	5,4·10 ⁻⁵
2	2·10 ⁻⁵	9·10 ⁻⁵	5,0·10 ⁻⁵
3	6·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁶	4,1·10 ⁻⁶

Abb. 3-3 zeigt die Infiltrationsganglinien über die gesamte Messdauer. Die Ganglinien der Messstellen MS2-1 und MS3 zeigen zu Beginn der Messungen eine hohe Infiltrationsrate, diese verringern sich kontinuierlich, bis sie einen konstanten Wert annehmen. Anfängliche hohe Infiltrationsraten, können auf das Füllen von Grob- und Makroporen zurückgeführt werden (vergleiche hierzu Kap. 2.4). Deutlich wird auch eine deutliche Abweichung der Infiltrationsganglinien zwischen der Probenahmestelle 1 und 2. Dies lässt sich damit begründen, dass bei der Probenahme von Standort 2 (MS2) ein deutlich höherer Kiesanteil im Oberboden anzutreffen war, als an Standort 1 (MS 2) und somit weniger Porenraum zur Verfügung steht. Die Ganglinien innerhalb der Mulden von MS 1-1, 1-2 und 3 liegen dagegen in ähnlichen Größenordnungen.

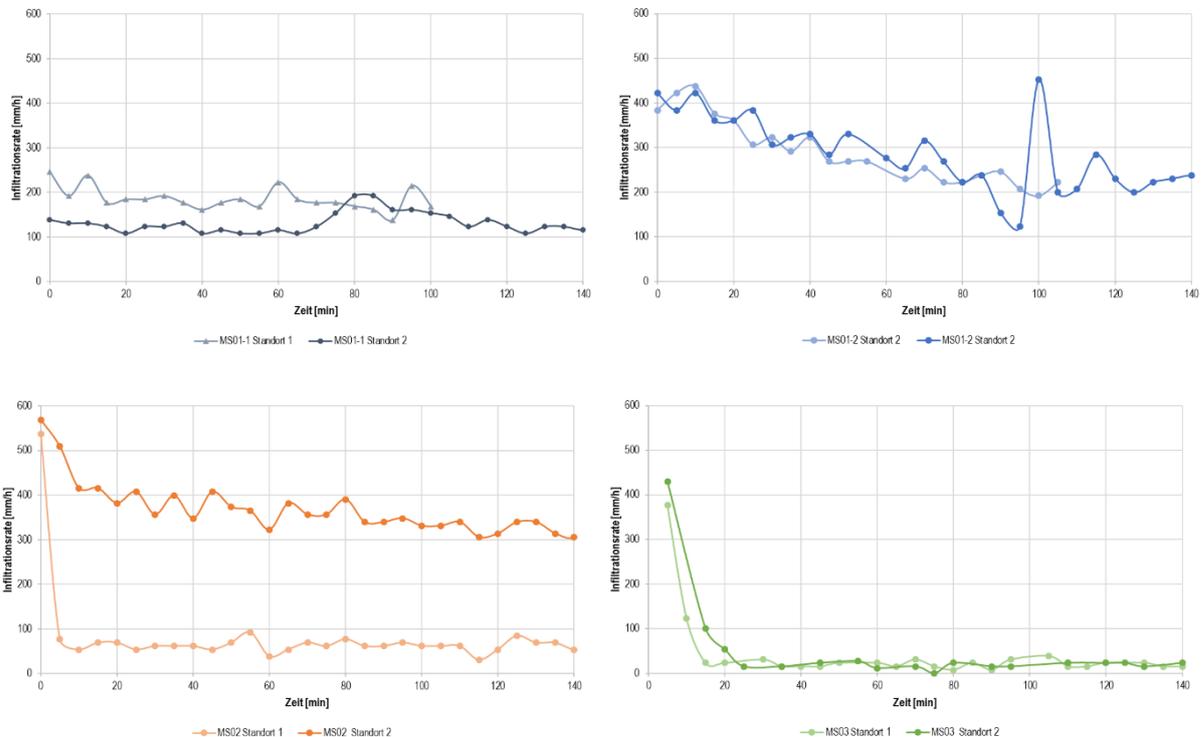


Abb. 3-3: Infiltrationsganglinien aus der Doppelringinfiltrometer-Messung

3.4 großflächiger Feldversuch/Flutung

3.4.1 Beschreibung der Versuchsdurchführung

Während bei der Messung mit Doppelringinfiltrometer nur kleine Teilbereiche einer Mulde berücksichtigt werden können, gibt die Flutung der gesamten Mulde das tatsächliche Versickerungsverhalten der Mulde wieder. Die gesamte Mulde wurde dabei bis zur Unterkante des Muldenüberlaufes mit Wasser gefüllt. Nach Erreichen des Füllzieles wurde die Wasserzufuhr eingestellt und über die Zeit die Wasserstandsänderung und die Infiltrationsrate ermittelt.

Für die Ermittlung der Gesamtdurchlässigkeit des gesamten Mulden-Rigolen-Systems wurden Messsensoren am Standort eingebracht. Der Einbau von Messtechnik in die Mulde und den Schacht der Rigole diente der Erfassung von Wasserständen und Durchflüssen. Nach dem Einbau der Messsysteme wurde der Mulde des MRS Wasser zugeführt. Dafür wurde ein Standrohr mit Wasserzähler aus dem Netz der Leipziger Wasserwerke (LWW) genutzt.



Abb. 3-4: Feldversuche

3.4.2 Ergebnisse der Feldversuche

Zur Berechnung des k_f -Wertes der gesamten Mulde, wurde während der Flutung die benetzte max. WSP-Fläche aufgenommen. Im Ergebnis der Untersuchungen kann festgestellt werden, dass der nach DWA-Arbeitsblatt 138 geforderte entwässerungstechnisch relevante Versickerungsbereich von $1 \cdot 10^{-3}$ m/s und $1 \cdot 10^{-6}$ m/s eingehalten

wird. Im Vergleich zur Methodik des Doppelringinfiltrometers wurden die erforderlichen Werte für die Durchlässigkeit des Oberbodens, von $1 \cdot 10^{-5}$ m/s, an der MS3 bei der Flutung eingehalten. Die Entleerungszeit der Mulden mit < 24 h ist ebenso gegeben. An der MS 1-1 musste der Flutungsversuch abgebrochen werden, da durch Kurzschlussströme keine Vollfüllung der Mulde möglich war.

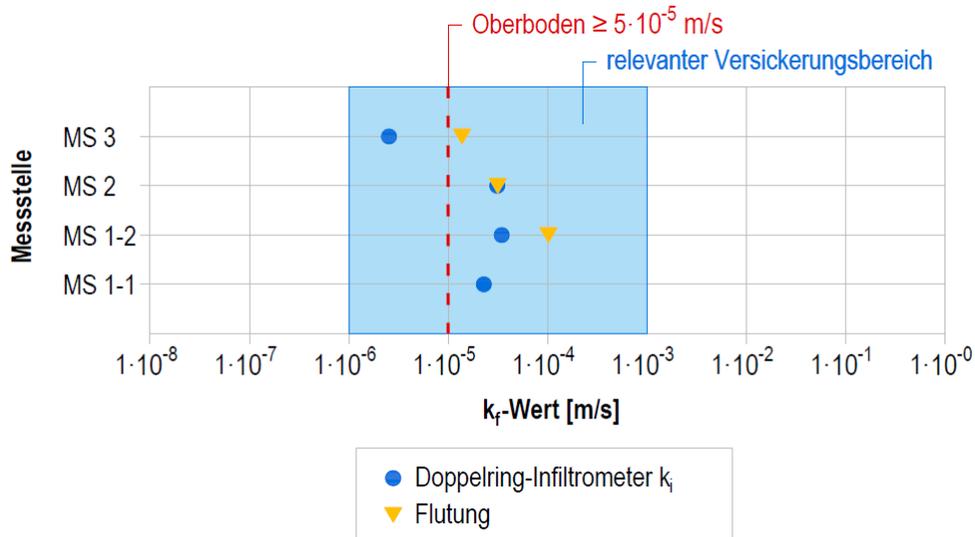


Abb. 3-5: Ergebnisse der Flutung

Die Ergebnisse der klein- und großräumigen Durchlässigkeitsversuche sind in nachfolgender Tabelle gegenübergestellt. Die Flutungsversuche liefern höhere Durchlässigkeiten. Grund dafür können Kurzschlüsse, aufgrund von nachträglichen Baumaßnahmen (Leitungskreuzungen o.ä.) an der Mulde oder Fließstrecken entlang von Schächten, an denen das Wasser sehr schnell versickert sein. Auch die Inhomogenität des Bodens kann eine Rolle spielen.

Tab. 3-2: Zusammenfassung Versickerungsleistung

MS	k_f -Wert Doppelringinf. [m/s]	k_f -Wert Flutung [m/s]
1	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
2	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$
3	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$

Aus hydraulischer Sicht ist nach fast 30-jähriger Nutzungsdauer eine ausreichende Durchlässigkeit der Versickerungsmulden gegeben.

3.5 Stoffliche Untersuchungen

3.5.1 Probenahme

Zur Ermittlung des Schadstoffpotentials wurden den Untersuchungsstandorten Bodenproben entnommen. Je Mulde wurden zwei Entnahmestellen für die Bodenproben ausgewählt. Die Beprobung erfolgte per Handschachtung bis zur Oberkante der Rigole. An jeder Entnahmestelle wurden wiederum drei Proben aus verschiedenen Tiefen der Mulde entnommen:

- 0 - 5 cm Tiefe
- 5 - 15 cm Tiefe
- 15 - 25 cm Tiefe

Bei der Probenahme wurde die Mächtigkeit der Mulde und die Beschreibung des Bodens (Kiesanteil, Durchwurzelung) vorgenommen und protokolliert. Die Probe werden am Entnahmetag in das Labor transportiert.

3.5.1.1 MS 1-2

Es handelt sich um einen sandigen Oberboden mit Grasbewuchs. Bereits nach 10-15 cm ist ein hoher Sand- und Kiesanteil vorhanden. Nach 25 cm befindet sich ein Vlies und darunter die Kiesrigole. An MS 1-2 wurde ein starker Wurzeleinwuchs, einer angrenzenden Hecke und eines größeren Baumes in der Nähe der Mulde registriert.



Abb. 3-6: Probenahme MS 1-2: Standort 1 (l.) , starker Wurzeleinwuchs am Standort 2 (re.)



Aufbau:

0-10 cm	Oberboden, dunkelbraun
10-15 cm	Sand/Kies, gelb-braun
25 cm	Vlies
>25 cm	Kies (Rigole)

Abb. 3-7: Probenahme MS1-2, Schichtaufbau

3.5.1.2 MS 2

Es handelt sich um einen sandigen Oberboden mit Grasbewuchs. Bereits nach 10 – 15 cm Zunahme von Sand und Kies (0 - 32 mm) im Oberboden. Nach 20 - 25 cm wurde Sand und Kies angetroffen. An Standort 2 wurde nach 10 - 15 cm ein hoher Kiesanteil im Randbereich angetroffen



Abb. 3-8: Probenahme MS 2 (Standort 1)



Abb. 3-9: Probenahme MS 2 (Standort 2)



Aufbau:

0-10 cm	Oberboden
10-15 cm	Sand/Kies 0-32 mm
20-25 cm	Sand/Kies

Abb. 3-10: Probenahme MS2

3.5.1.3 MS 3

MS 3 ist durch einen starken Grasbewuchs mit Wurzelbildung in tiefere Schichten gekennzeichnet. Der Oberboden ist sehr humos und im Gegensatz zu den anderen Messstellen von weniger Sand- und Kiesanteilen durchmischt. Die obere, recht homogene Schicht beträgt ca. 25 cm, darunter finden sich Sand und Kies (0-64 mm), was vermutlich der Rigole entspricht.



Abb. 3-11: Probenahme MS 3 (Standort 1)



Abb. 3-12: Probenahme MS3 (Standort 2)



Abb. 3-13: Probenahme MS3

Aufbau:

- 0-25 cm Oberboden, durchwurzelt bis 25 cm,
viel Rasen, leicht feucht, braun,
homogen
- > 25 cm Sand/Kies (0-64 mm), gelblich-braun

3.5.1.4 Laboranalysen

Zur Ermittlung der Schadstoffbelastung wurden die Bodenproben in einem zertifizierten Labor analysiert. Alle Proben wurden auf Schwermetallgehalte, Phosphor, Stickstoff, effektive Kationenaustauschkapazität KAK_{eff} (Maß für Bindungsvermögen) und den pH-Wert analysiert. Um repräsentative Analysenproben zu gewinnen war zunächst die Vorbehandlung der Proben nach DIN 19747 (DIN 19747, 2009) erforderlich. Die Bodenprobe wurde bei 40 °C getrocknet und die Grobanteile entfernt. Der Feinkornanteil (0-2 mm) wurde abgesiebt und der Massenanteil bestimmt. Für die Probenaufbereitung erfolgte eine untersuchungsspezifische Trocknung bei 105 °C. In Tab. 3-3 sind die dazu erforderlichen Methodiken aufgeführt. Alle Prüfergebnisse beziehen sich auf die Fraktion < 2 mm.

Tab. 3-3: Methoden zur Probenanalyse (LGU, 2023)

Parameter	Methode
Wassergehalt	DIN EN 14346; 2007-03
Königswasseraufschluss	DIN 13657; 2003-01
Blei	DIN ISO 22036; 2009-06
Cadmium	
Chrom, gesamt	
Kupfer	
Nickel	
Zink	
Phosphor	DIN EN 16168; 2012-11
Stickstoff *	
effektive Kationenaustauschkapazität* (KAK)	DIN EN ISO 11260, 2018-11
pH-Wert	DIN EN ISO 10523 (C5); 2012-04

3.5.2 Auswertung Schwermetalle

Als Schwermetalle werden Metalle mit einer Dichte > 5 g/cm³ bezeichnet. Dazu gehören unter anderem Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel und Zink. Sie kommen im natürlichen Kreislauf, als auch aus anthropogenen Quellen vor.

Die Mobilität der Schadstoffe im Boden, wird beeinflusst von den Bodeneigenschaften, der Bodenart, dem pH-Wert und den Eigenschaften der Stoffe selbst, da sich diese unterschiedlich verhalten. Beispielsweise sind Zink und Cadmium mobiler als Blei.

Ausgehend von allen untersuchten Bodenproben (LGU, 2023) wurden die geringsten Gehalte an Schwermetallen für Cadmium gemessen, allerdings ist die Toxizität deutlich höher als von anderen Metallen. Nickel, Chrom lagen in ähnlichen Größenord-

nungen vor. Für Blei, Zink und Kupfer wurden die größten Gehalte ermittelt. Die Median- und Mittelwerte, Minima und Maxima aller Bodenproben sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

Tab. 3-4: Schwermetallgehalte in mg/kg TM aller Bodenproben

Schwermetall	Mittelwert	Minimum	Maximum	Median
Pb	30,5	10	70,1	25,3
Cd	0,3	0,2	0,79	0,2
Cr	15,8	5,9	35,2	12,8
Cu	64,3	5	467	12,05
Ni	9,9	5,16	20,1	7,9
Zn	104,1	19,9	261	58,6

Die gemessenen Konzentrationen sind als Boxplot in Abb. 3-14 dargestellt. Zink zeigt im Median die größten Werte. Grund ist das Vorkommen des Schwermetalls für Dacheindeckungen und -entwässerung, Reifen, Schutzplanken, Schilder, Zäunen, etc..

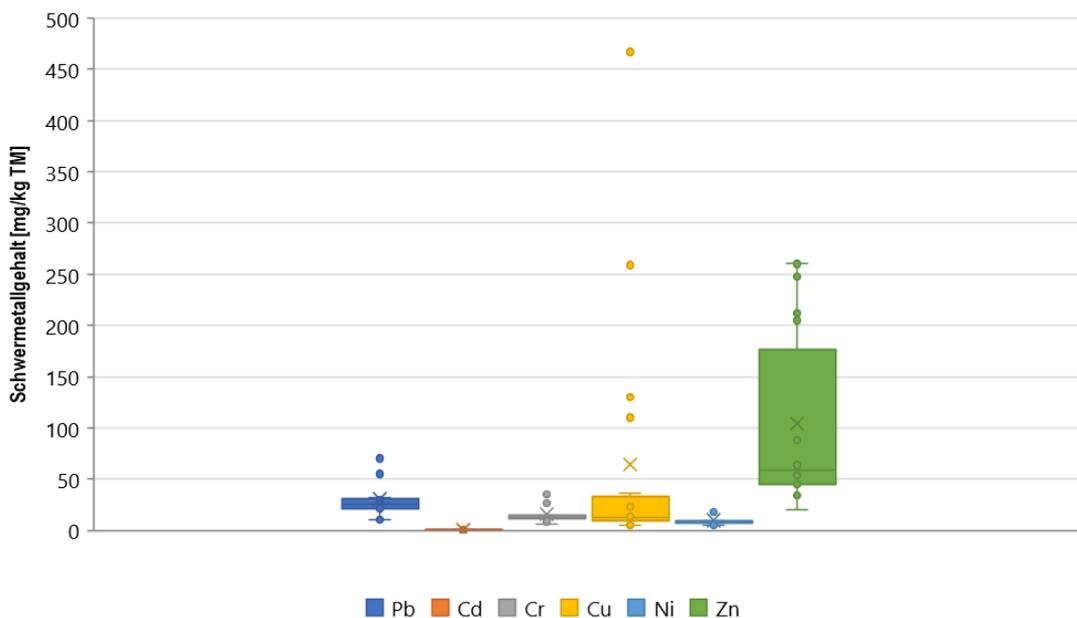


Abb. 3-14: Schwermetallgehalt aller Proben

Bei der Differenzierung nach der Tiefe, wird deutlich, dass der größte Schwermetallrückhalt in den oberen Schichten des Oberbodens erfolgt und mit zunehmender Tiefe abnimmt. Diese Erkenntnisse wurden in verschiedenen Studien von (siehe Kapitel 2.7) bestätigt. Der Gehalt an Zink verringert sich über die Tiefe deutlich.

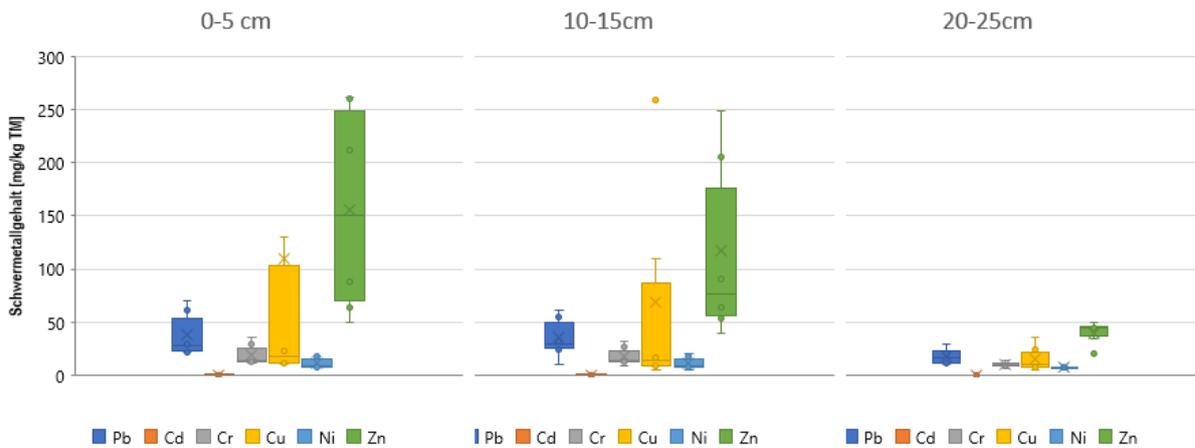


Abb. 3-15: Verteilung der Schwermetallgehalte über die Tiefe

Tab. 3-5: Schwermetallgehalte über die Tiefe

Messstelle	Tiefe	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn
MS1-2 (1)	0-5 cm	70,1	0,78	35,2	467	18	260
	5-15 cm	61,4	0,79	31,4	259	20,1	248
	15-25 cm	12,2	<0,2	8,9	35,8	7,2	45,3
MS1-2 (2)	0-5 cm	61,5	0,73	29,1	130	17,6	212
	5-15 cm	55,2	0,74	26,4	110	17,8	205
	15-25 cm	11,3	<0,2	8,79	24,6	7,43	44,9
MS2 (1)	0-5 cm	21,9	<0,2	11	10,2	7,27	64,2
	5-15 cm	<10	<0,2	8,8	<5	5,28	53,4
	15-25 cm	<10	<0,2	5,94	<5	5,16	19,9
MS2 (2)	0-5 cm	21	<0,2	14,3	13,3	8,43	261
	5-15 cm	24,6	<0,2	12,1	8,9	7,31	90
	15-25 cm	20,9	<0,2	11,3	9,15	7,07	45
MS3 (1)	0-5 cm	25,9	<0,2	12,6	10,8	7,83	50
	5-15 cm	27,5	<0,2	13	10,3	8,06	39,7
	15-25 cm	24,2	<0,2	12	7,15	7,35	33,8
MS3 (2)	0-5 cm	29,2	<0,2	14,8	23,2	8,95	87,6
	5-15 cm	32	<0,2	14,5	16,4	8,94	63,7
	15-25 cm	29,3	<0,2	13,5	10,7	8,34	49,6

Im Folgenden werden die jeweiligen Schwermetalle separat betrachtet und grafisch dargestellt. Je Messstelle erfolgten 2 Probenahmen über jeweils 3 Tiefen. Um das Risiko einer schädlichen Veränderung des Bodens abschätzen zu können, wurden die Vorsorgewerte der Bodenschutzverordnung für die Bodenarten Lehm/Schluff sowie Sand angegeben. Unterhalb der Vorsorgewerte ist nach derzeitigem Kenntnisstand eine schädliche Bodenveränderung ausgeschlossen.

3.5.2.1 Cadmium

In Deutschland liegt ein natürliches Vorkommen im Boden im Durchschnitt bei 0,1-1 mg/kg in Böden (WaBoLu, 1998), ist allerdings große Schwankungen unterworfen. Cadmium ist schon in geringsten Konzentrationen giftig.

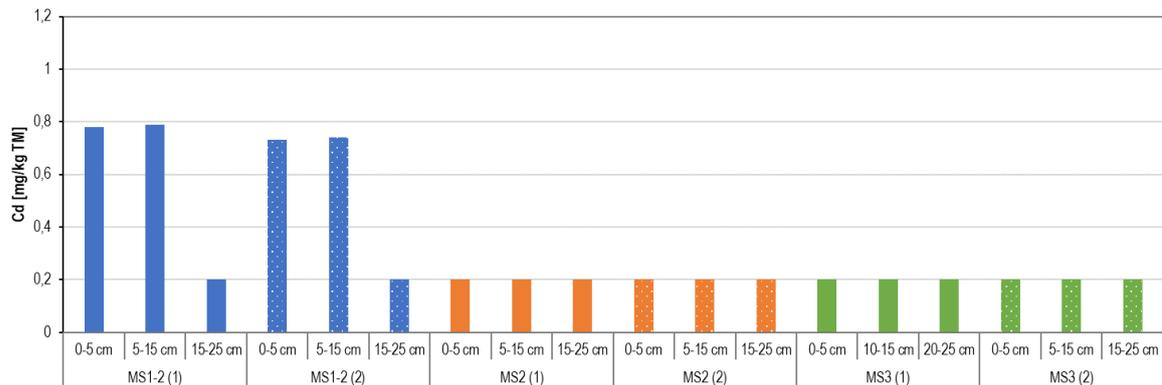
Verwendung:

- Rostschützende Überzüge (Korrosionsschutz)
- Düngemittel
- Bestandteil von Batterien
- Pigmente

Cadmium ist eines der mobilsten Schwermetalle im Boden (vergleiche hierzu Abb. 3-29). Dabei hat der pH-Wert einen wesentlichen Einfluss auf die Mobilität von Cadmium. Die Löslichkeit von Cd mit sinkendem pH-Wert, ist durch diverse Untersuchungen belegt (Gibson & Farmer, 1986), (Harrison, Laxen, & Wilson, 1981)). Cd hat die geringste Löslichkeit bei pH-Werten von 7 - 8. Unterhalb von 6,5 nimmt sie stark zu (Scheffer & Schachtschabel, 2010). Die Löslichkeit steigt mit pH-Werten unter 6,5. Neben dem pH-Wert wird Cadmium auch durch das Vorhandensein konkurrierender Kationen wie Ca und Zn beeinflusst. Diese konkurrieren mit Cd um Sorptionsstellen in Böden (Bradl, 2004). Die Cadmiumadsorption verringert sich bei hohen NaCl Konzentrationen (Norrström & Jacks, 1998).

Am Untersuchungsstandort 1 wurden in den ersten beiden Tiefenschichten Cadmium-Konzentrationen von 0,7 bis 0,8 mg/kg nachgewiesen. Der pH-Wert von MS1 liegt mit 7 - 8 im schwach alkalischen Bereich und einer damit verbundenen geringen Mobilität von Cd. Die Konzentration in der 3. Schicht beträgt < 0,2 mg/l. Dies weist auf eine ausreichende Sorptionsfähigkeit des Bodens hin. Allerdings ist die Adsorptionsfähigkeit bei sandigen Böden geringer. Die Cadmium-Gehalte der MS 2 und 3 mit einem Bestimmungswert < 0,2 sind zu vernachlässigen.

Zum Schutz der Böden vor Cd-Belastungen sind durch die BBodSchV Grenzwerte für Gesamtgehalte festgelegt worden. Für sandige Böden beträgt dieser 0,4 mg/kg, für lehmige Böden 1,0 mg/kg Boden. Die untersuchten Bodenproben liegen im Mittel bei rund 0,3 mg/kg (Median 0,2 mg/kg) und damit unterhalb der geforderten Grenzwerte. Der größte Wert trat an Untersuchungsstandort 1 mit 0,79 mg/kg auf.



*Die Gehalte unterhalb der Bestimmungsgrenze <0,2 wurden auf 0,2 gesetzt.

Abb. 3-16: Untersuchungsergebnisse Cadmium

3.5.2.2 Chrom

Chrom tritt in Böden in zwei Formen auf, einerseits als Cr(III) und Cr(VI). Cr(III) kommt als natürlicher Bestandteil in Gesteinen, Böden und Gewässern vor, Cr(VI) ist hauptsächlich anthropogenen Ursprungs oder entsteht durch Oxidation von Cr(III).

Verwendung:

- Korrosionsschutz
- Katalysator
- Oxidationsmittel
- Farbstoff
- Holzschutzmittel

Beide Formen haben ein unterschiedliches Verhalten in Bezug auf die Löslichkeit und Mobilität. Cr(VI) ist toxisch, löslich und mobiler. Cr(VI) wird im Oberboden durch organische Bodenbestandteile (Huminstoffe) zu Cr(III) reduziert. Ein hoher Gehalt an Phosphaten im Boden vermindert die Cr(VI)-Adsorption (Fischer, Cram, Lühr, & Böhm, 1998) Eine signifikante Adsorption von Cr(VI) findet bei sauren pH-Werten statt. Im alkalischen Bereich bis schwach sauren Bereich erfolgt wenig Adsorption und erhöhte Mobilität. Cr(III) wird bei höheren pH-Werten (6-12) als Chromhydroxid ausgefällt und bleibt immobil. Die Löslichkeit von Cr(III) ist meist nur bei geringen pH-Werten gegeben (Kim, 2008).

Zum Schutz der Böden vor Cr-Belastungen sind durch die BBodSchV Grenzwerte für Gesamtgehalte festgelegt worden. Für sandige Böden beträgt dieser 30 mg/kg, für lehmige Böden 60 mg/kg Boden. Die untersuchten Bodenproben liegen im Mittel bei rund 16 mg/kg (Median 13 mg/kg) und damit unterhalb der geforderten Grenzwerte.

Der größte Wert trat an Untersuchungsstandort 1 mit 35 mg/kg, in der obersten Bodenschicht auf.

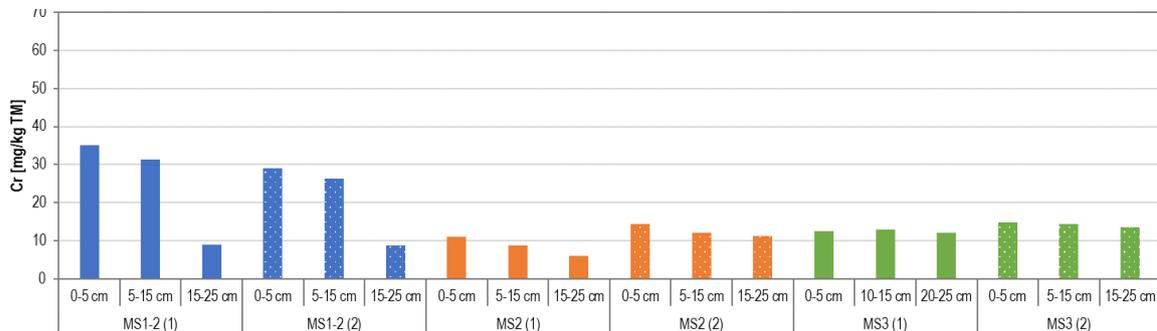


Abb. 3-17: Untersuchungsergebnisse Chrom

3.5.2.3 Blei

Natürlich kommen nur geringe Mengen an Blei (Pb) in der Erdkruste vor. Blei ist toxisch und wird aus Bleierzen bei der Erzeugung anderer Metalle (Cu, Zn) gewonnen. Der Durchschnittswert für Deutschland beträgt 30 mg/kg Boden, ist allerdings großen Schwankungen unterworfen.

Verwendung:

- Kabelmäntel
- Lötmaterial
- In Gewichten
- Akkumulatoren in Kraftfahrzeugen
- Bleiglas
- Glasuren,
- PVC-Stabilisatoren
- Kfz-Bereich (Bremsbeläge, Reifenabrieb)
- Bleibleche (Dachbereich)

Pb hat eine relativ geringe Löslichkeit, im Gegensatz zu Zink und Cadmium (siehe Abb. 3-29). Die Löslichkeit steigt mit sinkendem pH-Wert. Die Löslichkeit von Blei nimmt bei pH-Werten < 4 stark zu. Die geringe Menge von gelöstem Pb²⁺ bindet sich an Wurzeln, organische Substanz, Mn und Fe-Oxide. Es kommt zu einer Mobilisierung von Blei, durch organische Substanzen, bei pH-Werten >7 durch Bildung organischer Komplexe (Scheffer & Schachtschabel, 2010). Dadurch ergibt sich eine große Verweilzeit in Böden. Blei gilt als wenig mobil im Bodenkörper (Bradl, 2004). Verschiedene Studien zeigen, dass Blei in untere Schichten wandert (Roulier, Robinson, Kuster, & Schulin, 2008), (Knechtenhofer, Xifra, Scheinost, Flüher, &

Kretzschmar, 2003)). Pb in größeren Tiefen kann auf einen präferentiellen Schadstofftransport, durch Wurzeln und Makroporen hinweisen. Untersuchungen von Knechtenhofer (Knechtenhofer, Xifra, Scheinost, Flühler, & Kretzschmar, 2003) zeigten, dass es im Oberboden zu einer festen Metallbindung kommt. In unteren Schichten zeigte sich ein präferenzieller Fluss, verursacht durch große Baumwurzeln. In den Makroporen waren die Metallkonzentrationen signifikant erhöht. Das heißt, dass Blei im Oberboden sehr gut zurückgehalten wird, allerdings über Makroporen in unteren Schichten transportiert werden kann.

Für die MS 2 wurden alle Gehalte unterhalb der Bestimmungsgrenze <10 auf 10 gesetzt.

Zum Schutz der Böden vor Pb-Belastungen sind durch die BBodSchV Grenzwerte für Gesamtgehalte festgelegt worden. Für sandige Böden beträgt dieser 40 mg/kg, für lehmige Böden 70 mg/kg Boden. Die untersuchten Bodenproben liegen im Mittel bei rund 31 mg/kg (Median 25 mg/kg). Die Werte für die MS 2 und 3 liegen damit unterhalb der geforderten Grenzwerte. Bei den MS 2 (2) und MS 3 wird die höchste Konzentration an Blei in der mittleren Tiefenstufe festgestellt.

Die Grenzwerte werden an MS 1 (beide Standorte) in den ersten beiden Tiefenschichten überschritten. Der größte Wert trat an Untersuchungsstandort 1 mit 70 mg/kg, in der obersten Bodenschicht auf.

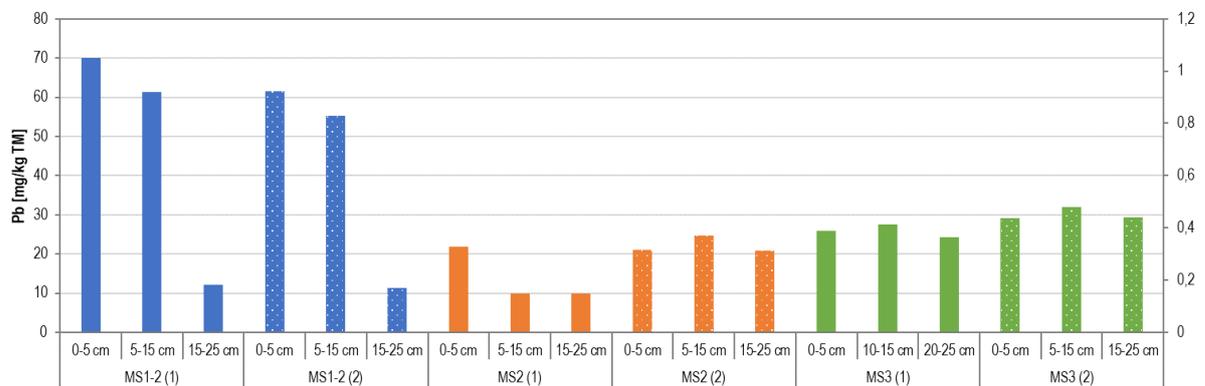


Abb. 3-18: Untersuchungsergebnisse Blei

3.5.2.4 Kupfer

Reines Kupfer ist rot. Bei normaler Luft entsteht ein grünlicher Überzug (Patina). Es ist ein hartes, dehnbares Material mit langer Haltbarkeit. Kupfer ist ein wichtiger Nährstoff für Pflanzen. Zu hohe Konzentrationen können toxisch wirken.

Verwendung:

- Hochbau Dacheinbauten, Regenrinnen, Fallrohre, Fassadenmaterial

- Rohrmaterial (Trinkwasser, Heizungsbau)
- Kfz-Bereich (Bremsbeläge)
- Trinkwasserbereich
- Pflanzenschutzmittel
- Oberleitungen
- Bremsanlagenabrieb Pkw 1,5 mg/km

Kupfer bevorzugt die Bindung an organische Substanz (Humus) und Mangan- und Eisenoxide ((Bradl, 2004), (Gibson & Farmer, 1986), (Harrison, Laxen, & Wilson, 1981)). In der Bodenlösung liegt Kupfer bei pH-Werten über 6 fast ausschließlich in Form organischer Komplexe vor.

Abnehmende pH-Werte können die Freisetzung von Kupfer begünstigen. Durch mikrobiellen Abbau organischer Substanz kann Kupfer in die Tiefe verlagert werden . Verschiedene Untersuchungen bestätigen diese Annahme (Kluge, Sommer, & Kaiser, 2016).

An Untersuchungsstelle 1 versickern ausschließlich Dachabwässer. Daher resultiert die hohe Konzentration von Cu aus der Korrosion der Kupfer-Regenrinnen und -Fallrohre. Anhand der Messwerte für MS3 zeigt sich am Standort (2) eine höhere Cu-Konzentrationen in allen untersuchten Schichten. Grund dafür ist die punktuelle Einleitung der Straßenabflüsse.

An allen Untersuchungspunkten ist die größte Konzentration in der obersten Schicht und nimmt in der Tiefe ab.

Zum Schutz der Böden vor Cu-Belastungen sind durch die BBodSchV Grenzwerte für Gesamtgehalte festgelegt worden. Für sandige Böden beträgt dieser 20 mg/kg, für lehmige Böden 40 mg/kg Boden.

Die Vorsorgewerte für die Bodenart Sand werden für den Standort MS 1-2 (1) sowie MS 1-2 (2) und MS 3 (2) überschritten. Für die Bodenart Lehm/Schluff erfolgt eine Grenzwertüberschreitung an MS 1-2 (1) und MS 1-2 (2).

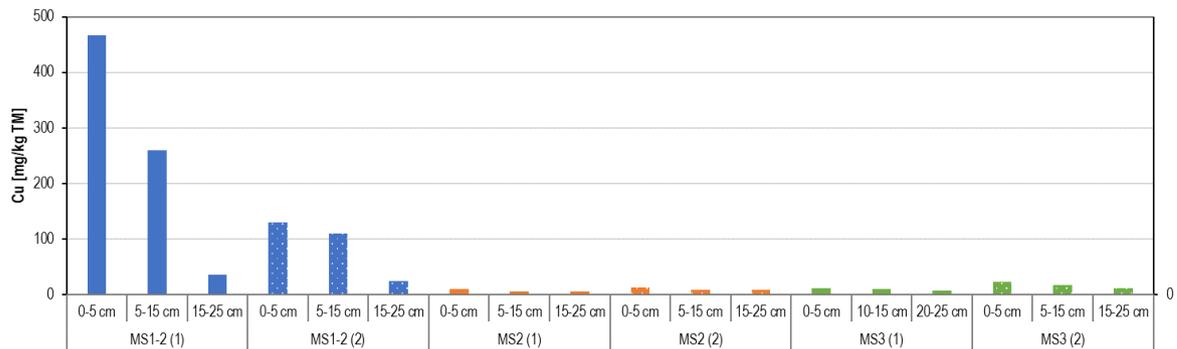


Abb. 3-19: Untersuchungsergebnisse Kupfer

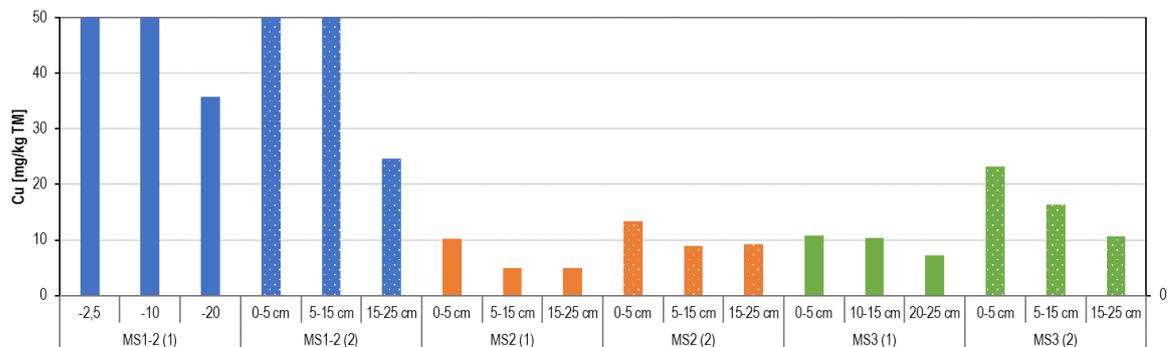


Abb. 3-20: Untersuchungsergebnisse Kupfer mit einer Skalierung bis 50mg/kg

3.5.2.5 Nickel

Das natürliche Nickelvorkommen ist in den oberen Bodenschichten sehr gering.

Verwendung:

- Stahlindustrie
- Vernickelung
- Nickel-Cadmium-Batterien

Nickel ist mobil und leicht verlagerbar. Die Löslichkeit hat eine deutliche Beziehung zur Bodenreaktion. Bei pH-Werten < 5,5 ist eine Zunahme von wasserlöslicherem und austauschbarem Nickels möglich, d.h. die Verfügbarkeit steigt mit abnehmendem (saure Böden) pH-Wert. Nickel adsorbiert hauptsächlich an Mangan-, Eisen- und Aluminiumoxide (STMUGV, 2006).

Zum Schutz der Böden vor Ni-Belastungen sind durch die BBodSchV Grenzwerte für Gesamtgehalte festgelegt worden. Für sandige Böden beträgt dieser 15 mg/kg, für lehmige Böden 50 mg/kg Boden.

Die Grenzwerte für Sand werden an MS 1 (beide Standorte) in den ersten beiden Tiefenschichten überschritten. Der größte Wert trat an Untersuchungsstandort 1 (1) mit 20 mg/kg, in der mittleren Bodenschicht auf.

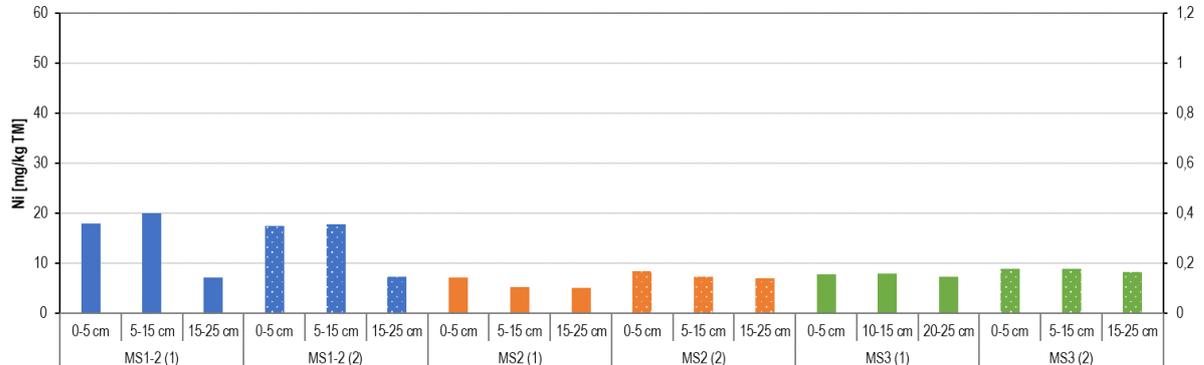


Abb. 3-21: Untersuchungsergebnisse Nickel

3.5.2.6 Zink

Zink (Zn) ist ein bläulich-weiß und glänzendes Metall. An feuchter Luft entstehen an der Oberfläche schwer lösliche Schichten, dadurch kann zum Beispiel Eisen durch Verzinken korrosionsbeständig gemacht werden. Die Schutzschicht kann wiederum durch Säuren aufgelöst werden. Zink ist ein natürlicher Bodenbestandteil (bis zu 80 mg/kg) und in Spuren für Mensch und Pflanzen lebensnotwendig.

Verwendung:

- Wichtigster Verwendungszweck ist Verzinkung
- Einträge aus Dach- und Fassadenbereich am höchsten (Bleche)
- Kfz-Bereich (Bremsbeläge, Reifenabrieb), genauere Ausführungen in (Hillenbrand, et al., 2005)
- Fahrbahnabrieb
- Verzinkte Produkte (Straßenausrüstung, Zäune)
- Trinkwasserversorgung
- Hochbau Dacheinbauten, Regentrinnen, Fallrohre → korrosionsbedingte Austräge können zu Belastungen im Boden führen

Zink besitzt die größte Mobilität im Boden. Die Sorption wird beeinflusst vom pH-Wert, Tonmineralgehalt, organischer Bodensubstanz und Bodentyp. Es wird leicht von Tonmineralien adsorbiert. Der größte Teil des Zinks liegt in humosen Oberböden in der Bodenlösung vor und ist stark vom pH-Wert abhängig. Die Konzentration in der Bodenlösung steigt mit abnehmendem pH-Wert.

Daneben liegt es als austauschbares/adsorbiertes Zn ($\text{pH} > 6$ Gehalte gering) vor. Mit abnehmendem pH-Wert steigen die Gehalte an austauschbarem Zn (Scheffer & Schachtschabel, 2010). Es kann ebenfalls als organisch gebundenes Zn vorliegen. Bei pH-Werten mäßig bis schwach sauer dominiert Zn in organischer Bindung. Bei pH-Werten > 7 nimmt die Zn-Affinität gegenüber Mn und Fe-Oxiden stark zu.

Um Zink-belastete Böden zu verbessern, ist eine Aufkalkung auf einen pH-Wert > 7 notwendig, da der Anteil des gelösten und austauschbaren Zinkes dann gering ist.

Zum Schutz der Böden vor Zn-Belastungen sind durch die BBodSchV Grenzwerte für Gesamtgehalte festgelegt worden. Für sandige Böden beträgt dieser 60 mg/kg, für lehmige Böden 150 mg/kg Boden.

Die Grenzwerte für Sand werden an MS 1 (beide Standorte) sowie MS 2(2) und MS 3 (2) in den ersten beiden Tiefenschichten überschritten. Der größte Wert trat an Untersuchungsstandort 1 (1) mit 226 mg/kg, in der oberen Bodenschicht auf. Für MS 1 (beide Standorte) wurde in den beiden obersten Schichten und für MS 2(2) in der obersten Schicht eine Grenzwertüberschreitung für Lehm festgestellt. Da die pH-Werte in einem optimalen Bereich liegen, ist von einer starken Zinkbindung auszugehen. Als Ursache für die hohen Zinkkonzentrationen werden die verzinkten Dachrinnen und Regenfallrohre für die Regenwasserableitung vermutet.

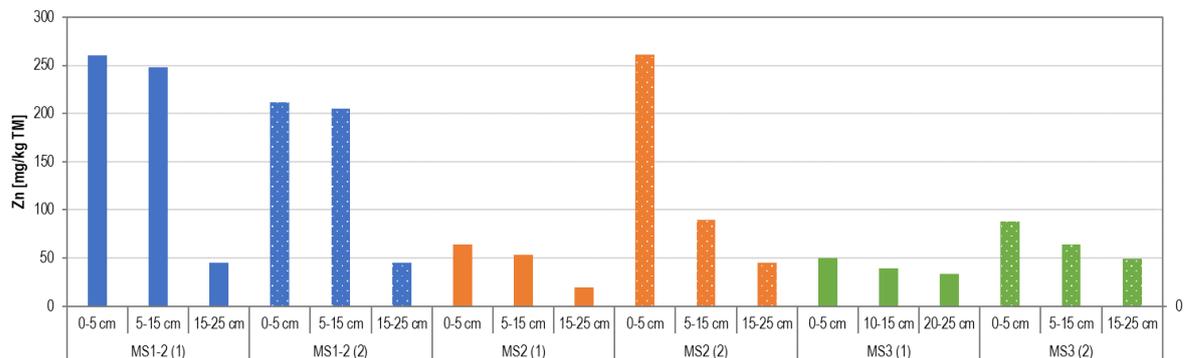


Abb. 3-22: Untersuchungsergebnisse Zink

3.5.3 Auswertung P, N, KAK, pH-Wert, Wassergehalt

Phosphor und Stickstoff sind wichtige Nährstoffelemente für das Wachstum von Pflanzen. Ein zu hoher Austrag kann allerdings zur Gefährdung von Grundwasser und Oberflächengewässern führen (Scheffer & Schachtschabel, 2010).

Hydraulische Bedingungen von Muldenversickerungen begünstigen die Anreicherung von N und P, durch das Verhältnis von angeschlossener zu Muldenfläche und damit einhergehender intensiveren Durchfeuchtung des Bodens und mangelnder Durchlüftung. Dies führt zu einer verminderten Aktivität von Mikroorganismen und damit verringerter Mineralisierung organischer Substanz (Kluge, Sommer, & Kaiser, 2016), (Scheffer & Schachtschabel, 2010)).

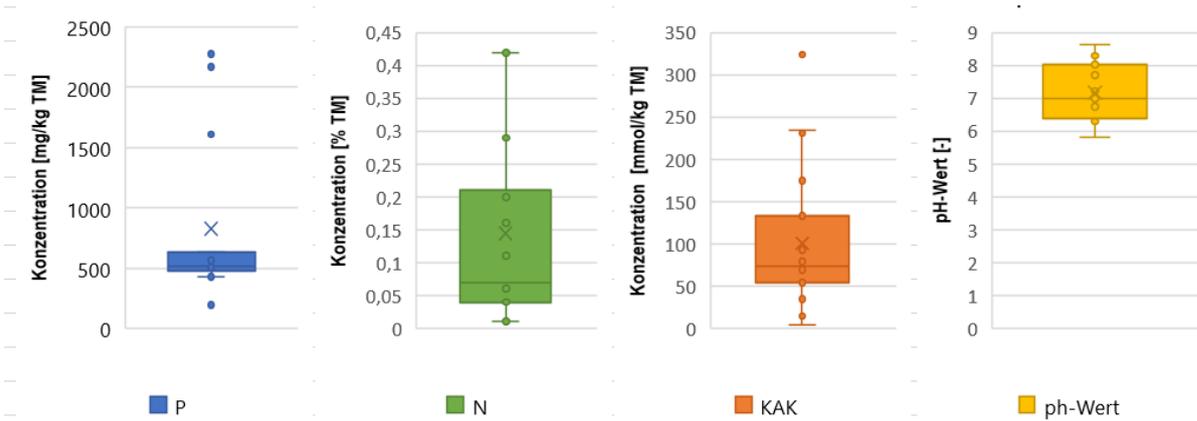


Abb. 3-23: P, N, KAK, pH-Wert

Tab. 3-6: P, N, KAK, pH-Wert

Parameter	Einheit	Median	Mittelwert	Min	Max
0-5 cm					
P	mg/kg TM	615	1031	512	2318
N	% TM	0,2	0,3	0,2	0,4
KAK	mmol/kg TM	114	157	77	324
pH-Wert	-	7,1	7,1	6,3	8,0
Wassergehalt	Masse-%	17,7	18,2	14,1	25,6
10-15 cm					
P	mg/kg TM	493	1055	431	2279
N	% TM	0,1	0,1	0,0	0,3
KAK	mmol/kg TM	65	109	54	235
pH-Wert	-	6,7	6,9	5,8	8,1
Wassergehalt	Masse-%	13,1	13,7	10,2	18,9
20-25 cm					
P	mg/kg TM	477	442	192	563
N	% TM	0,1	0,0	0,0	0,1
KAK	mmol/kg TM	37	43	4	93
pH-Wert	-	7,1	7,3	6,4	8,6
Wassergehalt	Masse-%	6,1	7,5	3,2	13,2

3.5.3.1 Wassergehalt

Das Bodenwasser wird durch Trocknung bei 105°C aus dem Boden entfernt. Der Wassergehalt wird als prozentualer Anteil am Boden angegeben. Die Bindungsstärke des Bodenwassers steigt mit zunehmendem Tongehalt (Sand < Schluff < Ton) an.

Dementsprechend zeigt die Auswertung der Bodenproben, den größten Wassergehalt in den obersten Bodenschichten. MS 1 und 2 weisen bereits ab 10-15 cm höhere Sand- und Kiesanteile auf. An MS3 ist bis zur Oberkante der Rigole einen höheren Humusanteil auf.

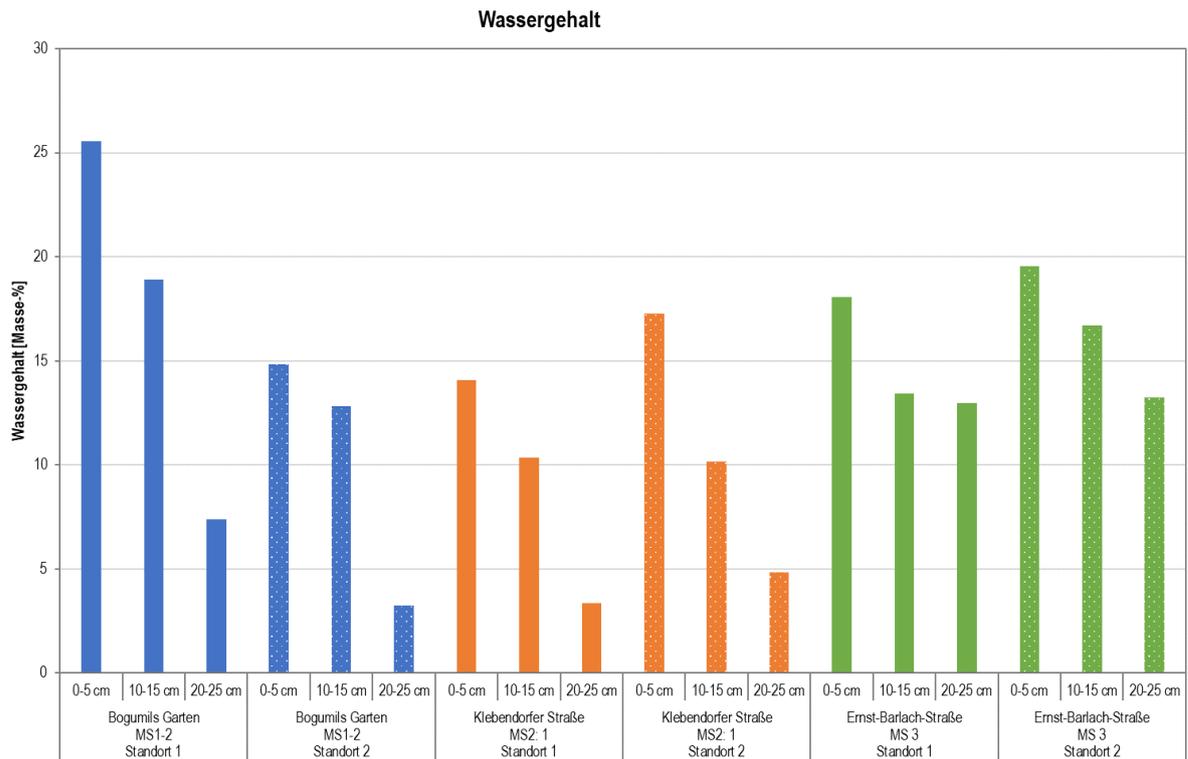


Abb. 3-24: Laborergebnisse Wassergehalt

Der Wassergehalt steigt mit dem Feinkornanteil der Proben.

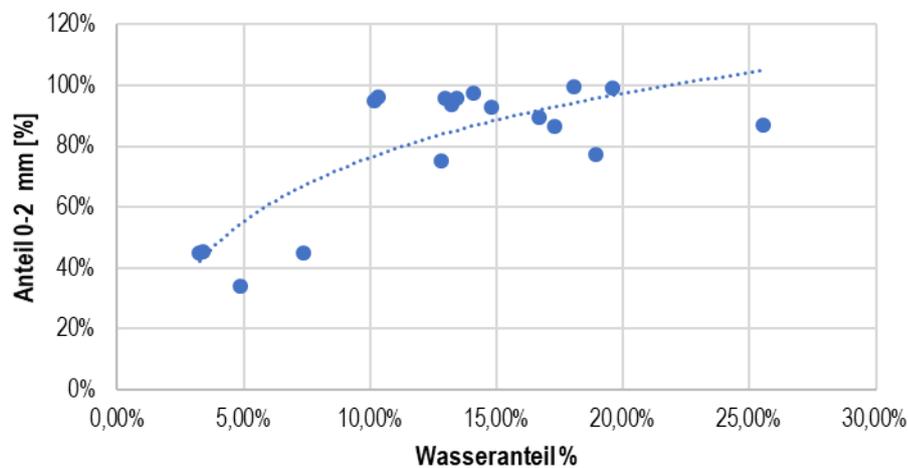


Abb. 3-25: Wassergehalt im Feinkornanteil 0- 2 mm

3.5.3.2 Stickstoff

Stickstoff (N) ist ein Nährelement für Pflanzen und Lebewesen. Eine Überlastung durch Überdüngung (Landwirtschaft) kann zu Beeinträchtigungen von Umwelt und Gesundheit führen. Gesamt-N-Gehalte meist 700 – 2.000 mg/kg Boden (Scheffer & Schachtschabel, 2010) .

Verwendung:

- Dünger

Durch Zersetzung abgestorbener Biomasse gelangt Stickstoff in den Boden. N kann im Boden als Ammonium (NH_4) vorliegen. In dieser Form ist er an Bodenpartikel gebunden. Später erfolgt eine Umwandlung in Nitrat (NO_3). Nitrat ist im Boden sehr mobil. Die Auswaschung erfolgt überwiegend als Nitrat in das GW.

Der Anteil von Stickstoff in Bezug auf die Trockenmasse ist in nachfolgender Grafik dargestellt. Die größten Anteile sind in der obersten Schicht des Oberbodens enthalten. In dieser ist auch der größte Anteil organischer Substanz enthalten.

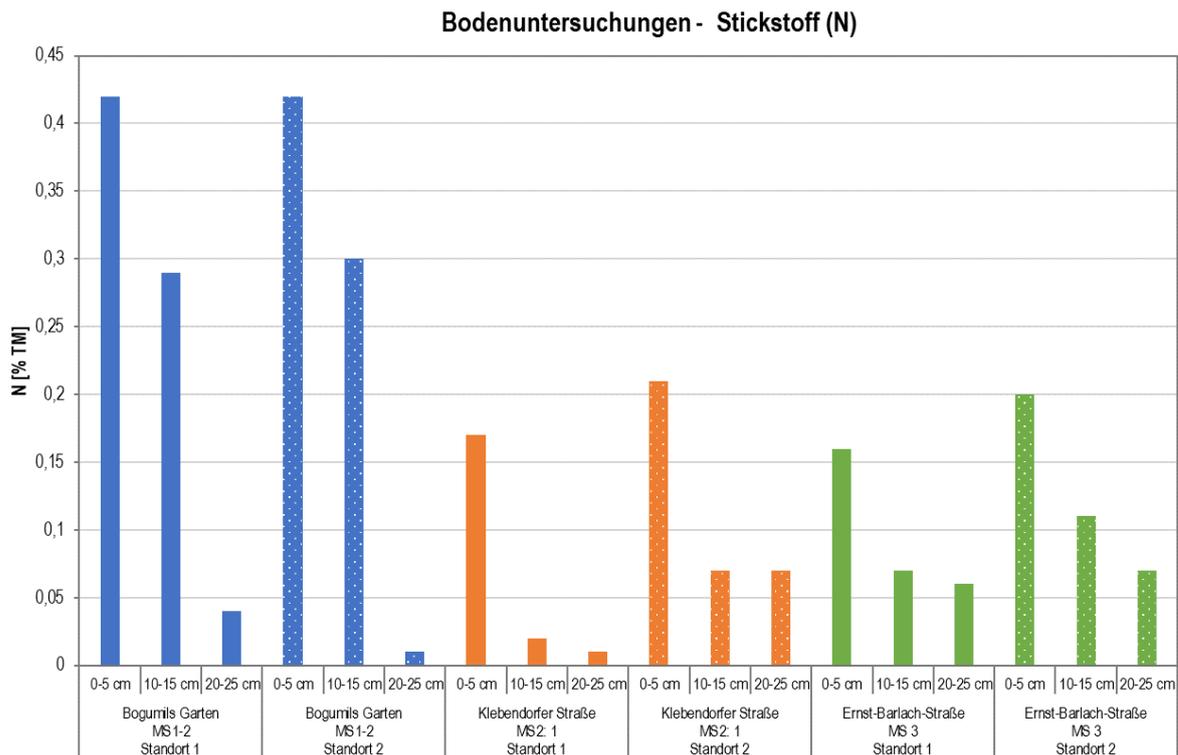


Abb. 3-26: Laboregebnisse Stickstoff (N)

3.5.3.3 Phosphor

Phosphor bildet ein Nährelement für Pflanzen und Lebewesen und hat ein natürliches Vorkommen in Gesteinen. Der Gesamtgehalt von Phosphor beträgt meist <1000 mg/kg Boden.

Verwendung:

- Dünger

Phosphor kommt im Boden in organischer und mineralischer Form vor. Phosphor zeichnet sich durch eine geringe Mobilität im Boden und kaum Auswaschung in mineralischen Böden (KBU, 2015) aus. P bindet sich an Eisen, Calcium und Kalk. Bei pH-Werten im alkalischen Bereich wird P als Ca-Phosphat gebunden.

Der Gesamtgehalt von Phosphor beträgt bei den untersuchten Proben 192 bis 2318, der Median liegt bei 514 mg/kg TM. Ausreißer MS1-2 mit 2318 mg/kg TM.

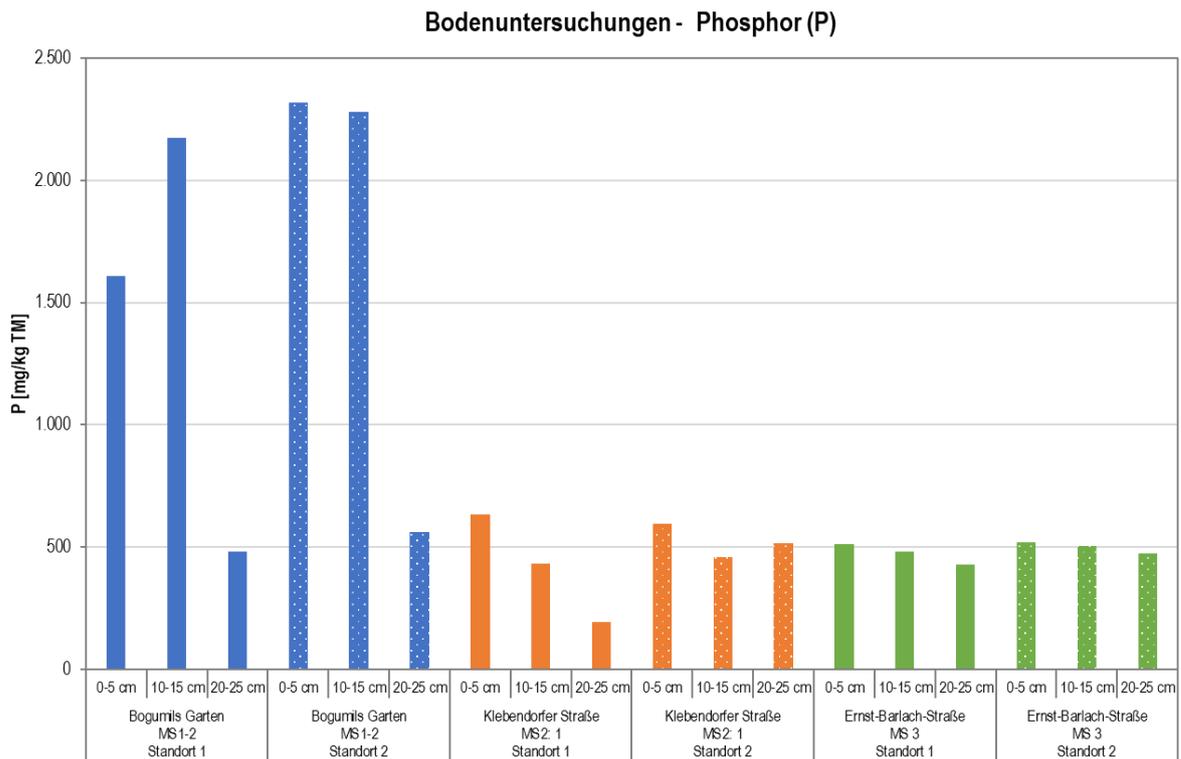


Abb. 3-27: Laborergebnisse Phosphor (P)

3.5.3.4 Effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff})

Mit dem Parameter KAK wird die Summe der austauschbaren Kationen eines Bodens in Millimol pro Kilogramm angegeben. KAK beschreibt damit die generelle Fähigkeit der festen Bodenmatrix, Nährstoffe und Schwermetalle zu binden. Die potentielle Kationenaustauschkapazität, gibt die maximale Austauschkapazität an und wird bei pH-Werten zwischen 7,5-8,2 gemessen. Die effektive Kationenaustauschkapazität wird beim jeweiligen pH-Wert des Bodens bestimmt. In sauren Böden ist KAK_{eff} kleiner als KAK_{pot} (Stahr, Kandeler, Herrmann, & Streck, 2020).

Die KAK steigt in der Reihenfolge Sand < Schluff < Ton an. In tonreichen und stark humosen Böden ist der Parameter besonders hoch. Tonminerale und Huminstoffe zeigen ein ausgeprägtes Kationenaustauschvermögen, da die geringe Partikelgröße für große Oberflächen und hohe Reaktivität sorgt. KAK werden vom pH-Wert beeinflusst. Bei sauren Bedingungen ($\text{pH} < 7$) nimmt der KAK ab. Ton- und humusreiche Böden mit neutraler Bodenreaktion können mehr Schadstoffe binden und Auswaschung verhindern als sandige humusarme Standorte (STMUGV, 2006).

An MS 1 betragen die pH-Werte 7,2 - 8,6. KAK_{eff} in den obersten Schichten beträgt 175-324 mmol/kg.

Die pH-Werte an MS 2 reichten von 6,4 - 7,2. KAK_{eff} in den obersten Schichten beträgt 58-133 mmol/kg.

An MS 3 mit pH-Werten von 5,8 - 7,3, liegen deutlich niedrigere Werte für KAK_{eff} von 59 - 94,5 mmol/kg in den obersten Schichten vor. Der Boden von MS3 ist humusreicher als MS 1 und 2.

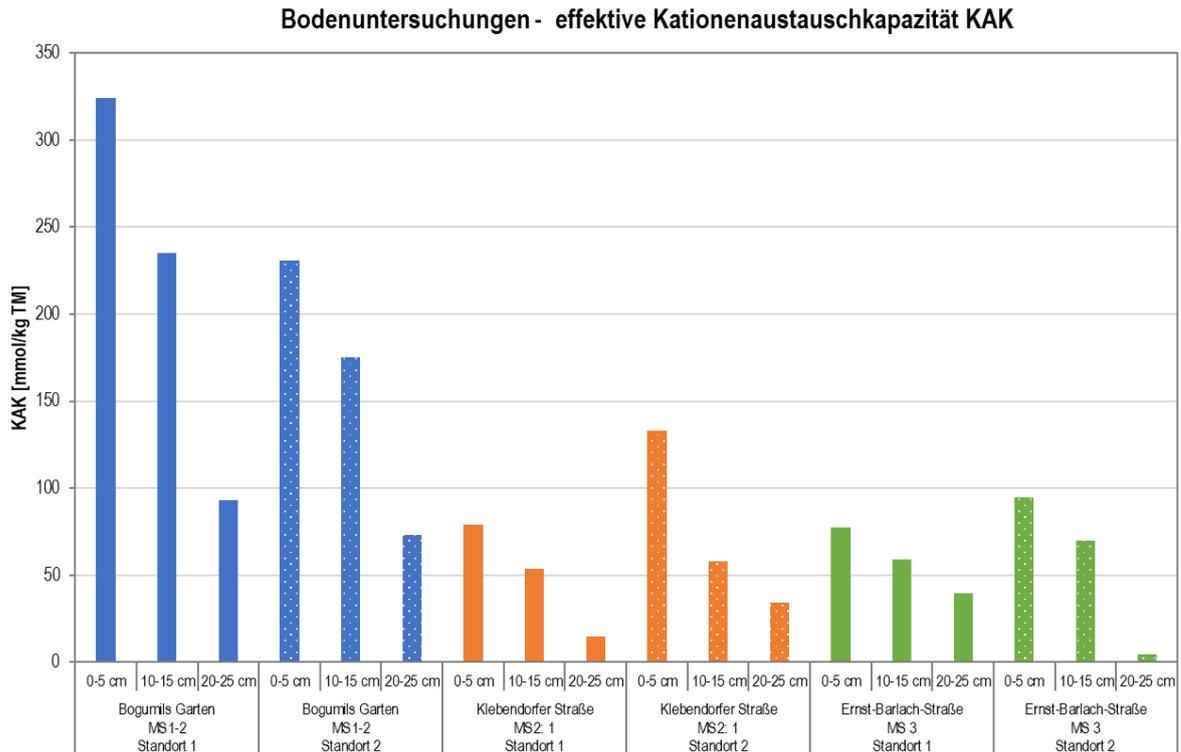


Abb. 3-28: Laborergebnisse KAK

3.5.3.5 pH-Wert

Das Sorptionsverhalten und die Verfügbarkeit von Nähr- und Schadstoffen wird durch den pH-Wert bestimmt. Bei pH-Werten über 7 sind Schwermetalle fast nicht mobil. Die Bindungsfähigkeit nimmt bei pH-Werten < 6 stark ab. Damit steigt die Gefahr der Remobilisierung und Verlagerung in tiefere Bodenschichten. Die Löslichkeit variiert bei den Schwermetallen. So ist nach (Gibson & Farmer, 1986) die stärkste Löslichkeit bei Zn und Cd.

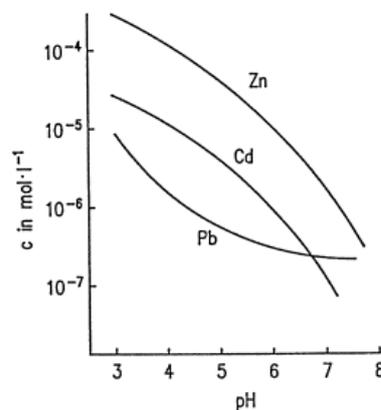


Abb. 3-29: Einfluss des pH-Wertes auf die Löslichkeit von Schwermetallen (Gibson & Farmer, 1986)

Die pH-Werte der untersuchten Bodenproben liegen mit 5,8 bis 8,64 im schwach sauren bis schwach alkalischen Bereich. Damit liegen die Proben in dem vom DWA-A 118 empfohlenen Wertebereich. MS3 liegt schon an unterer Grenze, MS1-2 leicht darüber.

Um einer Remobilisierung von Schwermetallen vorzubeugen, ist ein Monitoring des pH-Wertes sinnvoll. Durch Zugabe von Kalk kann der angestrebte pH-Wert zwischen 6 - 8 wieder hergestellt werden.

Tab. 3-7: pH-Wert-Stufen nach (Umweltatlas Berlin, 2015)

pH-Wert	pH-Stufe	Bezeichnung
≥ 11	1	äußerst alkalisch
10 - < 11	2	sehr stark alkalisch
9 - < 10	3	stark alkalisch
8 - < 9	4	mittel alkalisch
7,5 - < 8	5	schwach alkalisch
7 - < 7,5	6	sehr schwach alkalisch
6,5 - < 7	7	sehr schwach sauer
6 - < 6,5	8	schwach sauer
5 - < 6	9	mittel sauer
4 - < 5	10	stark sauer
3 - < 4	11	sehr stark sauer
< 3	12	äußerst sauer

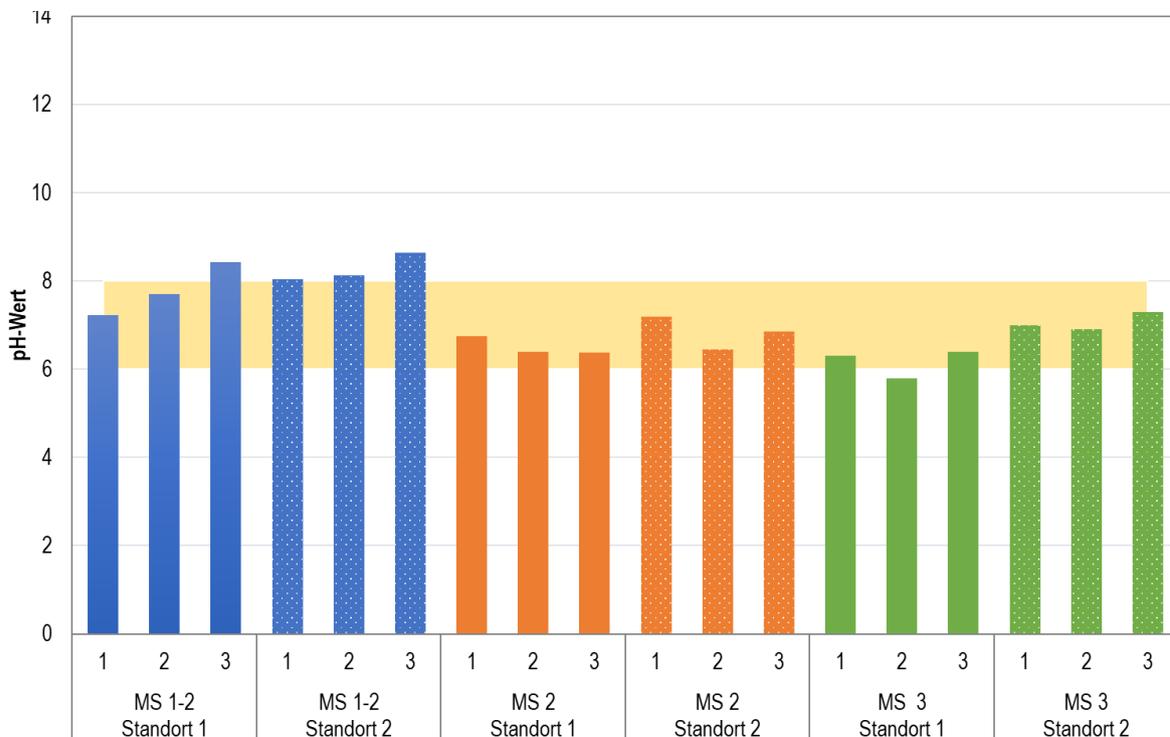


Abb. 3-30: Bodenanalyse pH-Wert

3.5.4 Zusammenfassung nach Untersuchungsstandort

3.5.4.1 Messstelle 1-2

In MS 1 entwässern ausschließlich Dachabwässer. Durch die Verwendung von Regenrinnen und Regenfallrohren aus Kupfer und Einläufen und Blechen aus Zink, kommt es zu einem besonders hohen Schwermetallaustrag an diesem Untersuchungsstandort. Die Eintragung der Schadstoffe erfolgte dabei über einen Zeitraum von ca. 30 Jahren. Die größten Konzentrationen an Kupfer, Zink, Blei und Chrom treten in der obersten Bodenschicht (0-5 cm) auf und nehmen über die Tiefe hin ab. Die höchste Konzentration von Nickel und Cadmium treten in der 2. Zone (5-15 cm) auf. In der 3. Schicht sind beide Schwermetalle deutlich reduziert. Nach den Ausführungen von (Scheffer & Schachtschabel, 2010) ist eine Mobilisierung von Cd bei pH-Werten <7 möglich. Ebenso kann eine Reduzierung der Adsorption durch NaCl-Konzentrationen vorgelegen haben. Die pH-Werte der MS 1 liegen im Bereich 7,2-8,6.

Die Dominanz von Kupfer und Zink ist dabei typisch für Dachabwässer.

Die erhöhten Cadmiumkonzentrationen können unter Umständen aus Düngungen der angrenzenden Hecke resultieren.

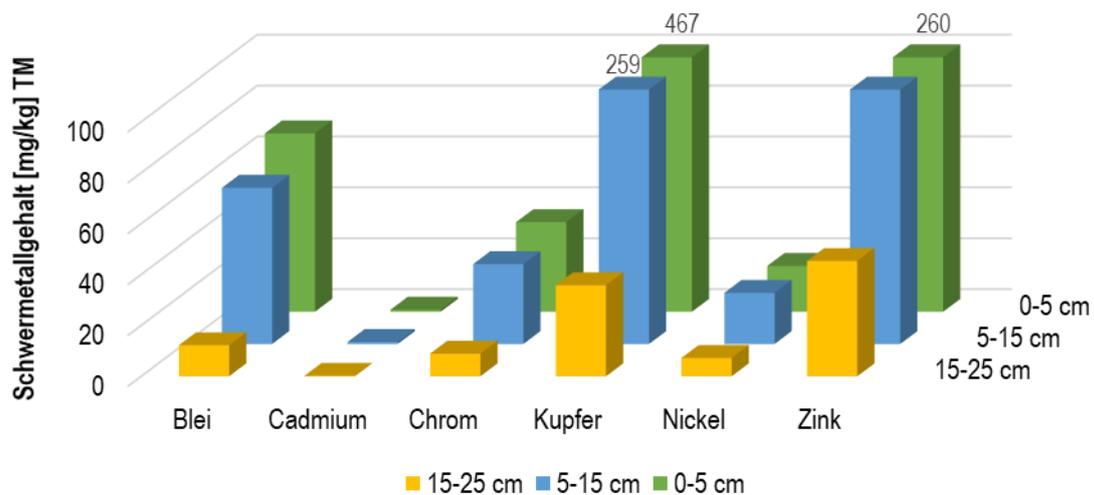


Abb. 3-31: Schwermetallanteile MS 1-2 (1)

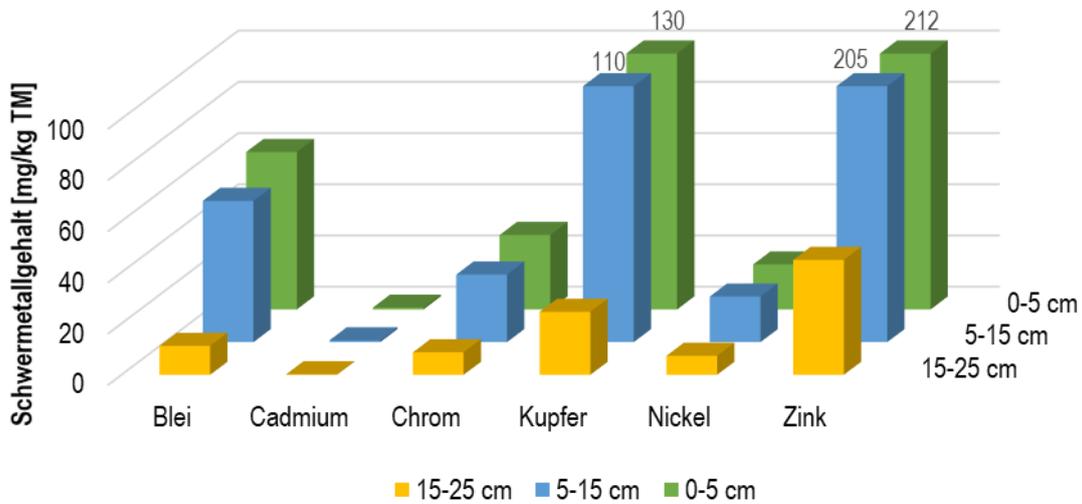


Abb. 3-32: Schwermetallanteile MS1-2 (2)

Legt man den Vorsorgewert Sand zugrunde, werden die Grenzwerte für Pb, Cd, Cr, Cu, Ni und Zn überschritten. Kupfer überschreitet die Grenzwerte in allen Bodenschichten, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich die Schwermetalle weiter in den Boden und Grundwasser verlagert.

Für die Bodenart Lehm/Schluff findet eine Überschreitung der Vorsorgewerte der Bodenschutzverordnung für die Schwermetalle Pb, Cu und Zn statt.

Tab. 3-8: Schwermetallgehalte MS 1-2

Schwermetall	Standort 1	Standort 2	Vorsorgewert Sand BBodSchV	Vorsorgewert Lehm/Schluff BBodSchV
Pb	70,1* 61,4 12,2	61,5 55,2 11,3	40	70
Cd	0,78 0,79 <0,2	0,73 0,74 <0,2	0,4	1
Cr	35,2 31,4 8,9	29,1 26,4 8,79	30	60
Cu	467* 259* 35,8	130* 110* 24,6	20	40
Ni	18 20,1 7,2	17,6 17,8 7,43	15	50
Zn	260* 248* 45,3	212* 205* 44,9	60	150

rot: Grenzwertüberschreitung Sand

*Grenzwertüberschreitung Lehm/Schluff

Es findet keine Überschreitung der Maßnahmewerte nach BBodschV für die Kategorien Kinderspielplatz und Wohngebiete statt.

Während der Flutung wurde im Rigolenauslauf eine Wasserprobe genommen um den Schwermetallgehalt durch Auswaschung zu ermitteln. Für den Feldversuch wurde Trinkwasser verwendet. Die ermittelten Schwermetalle in der Wasserprobe resultieren aus den ausgewaschenen Metallen aus dem Boden. Zum Vergleich wurden die Geringfügigkeitsschwellen (GFS) der LAWA gegenübergestellt. Diese sollen nachteilige Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit verhindern.

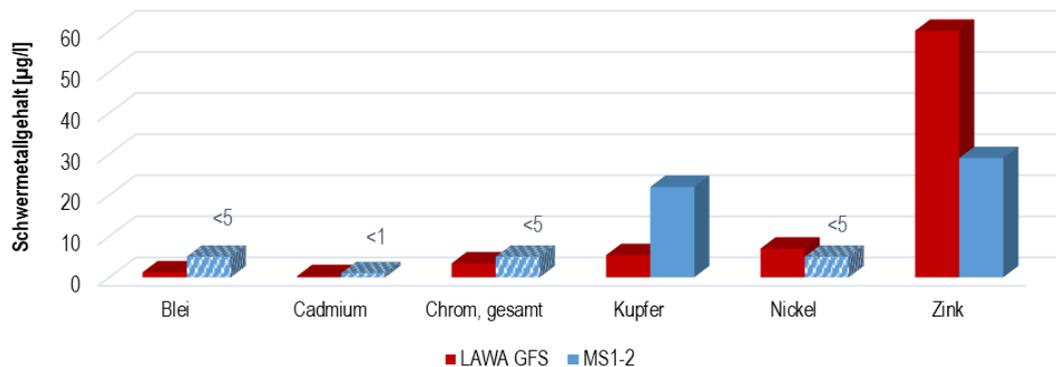


Abb. 3-33: Wasserprobe Rigolenauslauf MS1-2

In der Wasserprobe wird der Grenzwert der Geringfügigkeitsschwelle (LAWA) für das Schwermetall Kupfer überschritten.

Tab. 3-9: Laborergebnisse Wasserprobe MS1-2

Schwermetall	Messwert [µg/l]	GFS (LAWA) [µg/l]
Pb	<5	1,2
Cd	<1	0,3
Cr	<5	3,4
Cu	22	5,4
Ni	<5	7
Zn	29	60

Maßnahmen:

Da die Vorsorgewerte in allen Bodenschichten oberhalb der Rigole überschritten werden, ist mit einem Schadenseintritt bei anhaltender Einwirkung zu rechnen. Es ist daher ratsam, die betroffenen Schichten der Mulde austauschen.

3.5.4.2 Messstelle 2

In diese Messstelle entwässern Dach-, Hof- und Straßenflächen einer Wohnstraße. Abwasser von Verkehrsflächen enthalten typischerweise die Schwermetalle Kupfer, Blei und Zink. Beide Standorte liegen in unmittelbarer Nähe des Zulaufes der Dachflächen über Rinnen. Die Bleikonzentration an Standort 1 halbiert sich über die Tiefe und ist in der 2. und 3. Schicht konstant. Der Gehalt an Cd liegt in allen untersuchten Proben < 0,2 mg/kg. Chrom und Kupfer liegen in ähnlichen Größenordnungen vor. Die Gehalte von Blei, Kupfer und Nickel am Standort 1 sind in der 2. und 3. Schicht relativ konstant. Mit zunehmender Tiefe mehr Sand- und Kiesanteil.

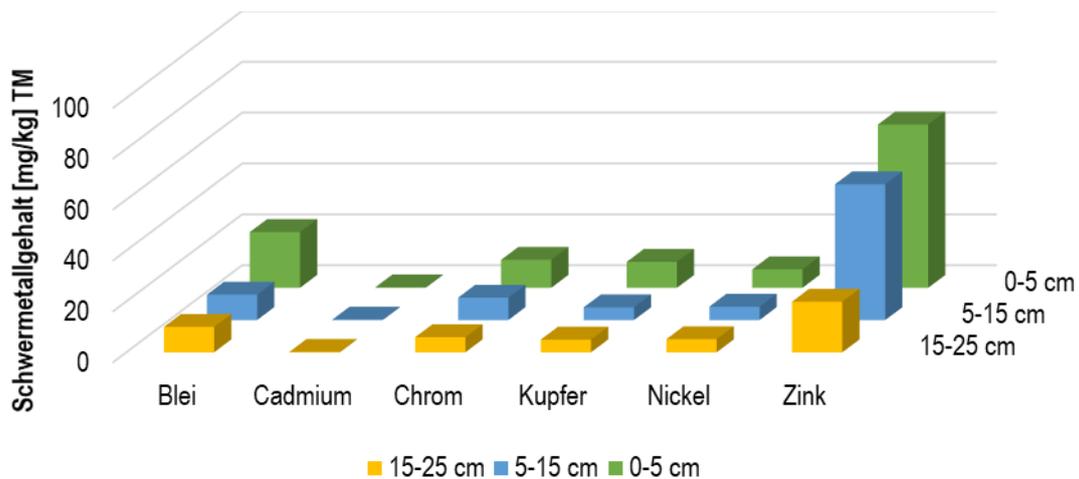


Abb. 3-34: Schwermetallgehalt MS 2(1) - Überlauf

Die Probenahme an Standort 2 erfolgte unmittelbar im Zulaufbereich der Entwässerungsrinne. Dabei ist eine deutlich höhere Konzentration (um das 4-fache höher) an Zink ersichtlich. Die Bleikonzentrationen an Standort 2 sind über die Tiefe in nahezu gleicher Konzentration, das Maximum liegt in der 2. Schicht.

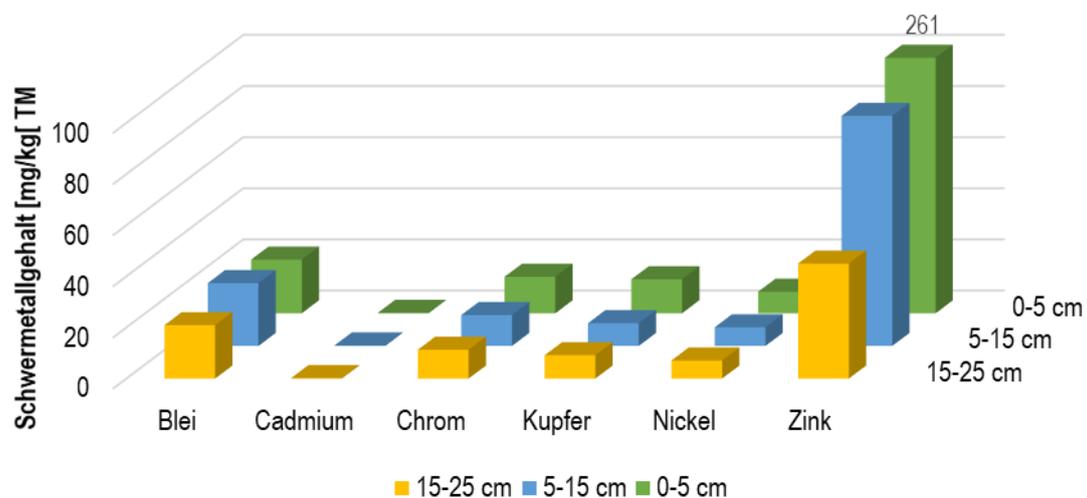


Abb. 3-35: Schwermetallgehalt MS 2(2)

Legt man den Vorsorgewert Sand zugrunde werden die Grenzwerte für Zn in der oberen Bodenschicht überschritten. Für die Bodenart Lehm/Schluff findet eine Überschreitung der Vorsorgewerte der Bodenschutzverordnung für Zn statt.

Tab. 3-10: Schwermetallgehalte MS 2

Schwermetall	Standort 1	Standort 2	Vorsorgewert Sand BBodSchV	Vorsorgewert Lehm/Schluff BBodSchV
Pb	21,9 <10 <10	21 24,6 20,9	40	70
Cd	<0,2 <0,2 <0,2	<0,2 <0,2 <0,2	0,4	1
Cr	11 8,8 5,94	14,3 12,1 11,3	30	60
Cu	10,2 <5 <5	13,3 8,9 9,15	20	40
Ni	7,27 5,28 5,16	8,43 7,31 7,07	15	50
Zn	64,2 53,4 19,69	261* 90 45	60	150

rot: Grenzwertüberschreitung Sand

*Grenzwertüberschreitung Lehm/Schluff

Während der Flutung wurde im Rigolenauslauf eine Wasserprobe genommen um den Schwermetallgehalt durch Auswaschung zu ermitteln. Für den Feldversuch wurde Trinkwasser verwendet. Die ermittelten Schwermetalle in der Wasserprobe resultieren aus den ausgewaschenen Metallen aus dem Boden. Zum Vergleich wurden die Geringfügigkeitsschwellen (GFS) der LAWA gegenübergestellt. sollen nachteilige Veränderungen der Grundwasserbeschaffenheit verhindern. In der Wasserprobe wird der Grenzwert für die Schwermetalle Kupfer geringfügig und Nickel überschritten.

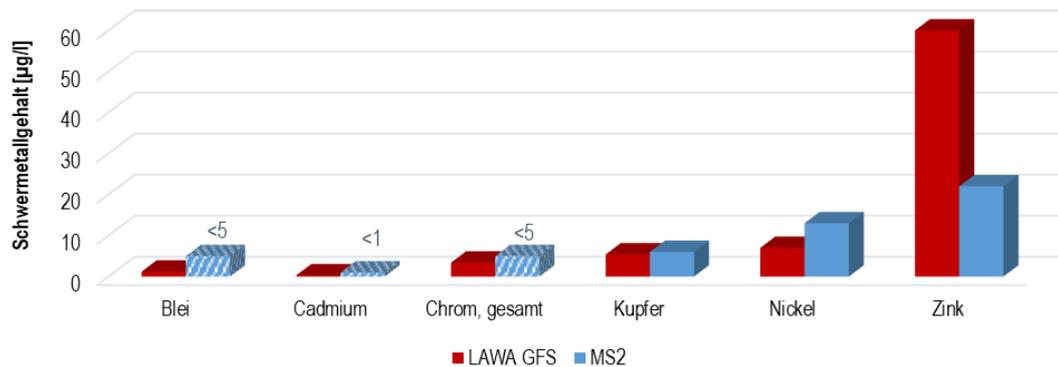


Abb. 3-36: Wasserprobe Rigolenauslauf MS2

Tab. 3-11: Laborergebnisse Wasserprobe MS2

Schwermetall	Messwert [µg/l]	GFS (LAWA) [µg/l]
Pb	<5	1,2
Cd	<1	0,3
Cr	<5	3,4
Cu	6	5,4
Ni	13	7
Zn	22	60

Maßnahmen:

Der Rückhalt der Schadstoffe in den oberen Bodenschichten ist noch gegeben.

3.5.4.3 Messstelle 3

An dieser Messstelle bindet fast hauptsächlich das Niederschlagswasser der Wohnstraße ein. Es ist nicht auszuschließen, dass Dach- und Hofflächen angrenzender Wohngrundstücke in die Mulde gelangen.

In der Auswertung sind die typisch für Verkehrsflächen vorkommenden Schwermetalle in höherer Konzentration enthalten. Im Vergleich beider Entnahmestellen wird deutlich, dass die Konzentration am Einlaufpunkt für Zink und Kupfer deutlich erhöht ist.

Für Blei ist eine relativ gleichmäßige Verteilung in allen untersuchten Tiefen zu beobachten. Die Werte sind an der Einleitstelle etwas erhöht. Die höchste Konzentra-

tion liegt an beiden Standorten in der 2. Schicht. Grund dafür könnte eine Mobilisierung von Blei in tiefere Schichten (vergl. Kap.3.5.2.3) sein. Ursächlich könnten pH-Wert-Änderungen (z.B. durch Taumitteleinsatz) oder Verlagerung durch Makroporen sein. Die Konzentrationen von Cd liegen in allen untersuchten Proben < 0,2 mg/kg. Der Anteil von Chrom sind in allen Tiefenschichten relativ gleich verteilt. Die Konzentration von Kupfer ist an der Einleitstelle des Straßenwassers in der obersten Schicht doppelt so hoch, als im Bereich des Überlaufes. Sie nimmt über die Tiefe hin ab, was für einen guten Rückhalt in den oberen cm des Oberbodens spricht. Nickel geringe Abnahme über die Tiefe. Zinkkonzentration an punktueller Einleitstelle deutlich höher als im Bereich des Überlaufes. Geringe Abnahme über die Tiefe. Das Bodengemisch oberhalb der Rigole war über alle Schichten relativ homogen verteilt und humos. Im Gegensatz zu den MS 1 und 2 nicht so starker Sand/Kiesanteil. Dadurch ist auch in tieferen Schichten Adsorption von Schwermetallen möglich.

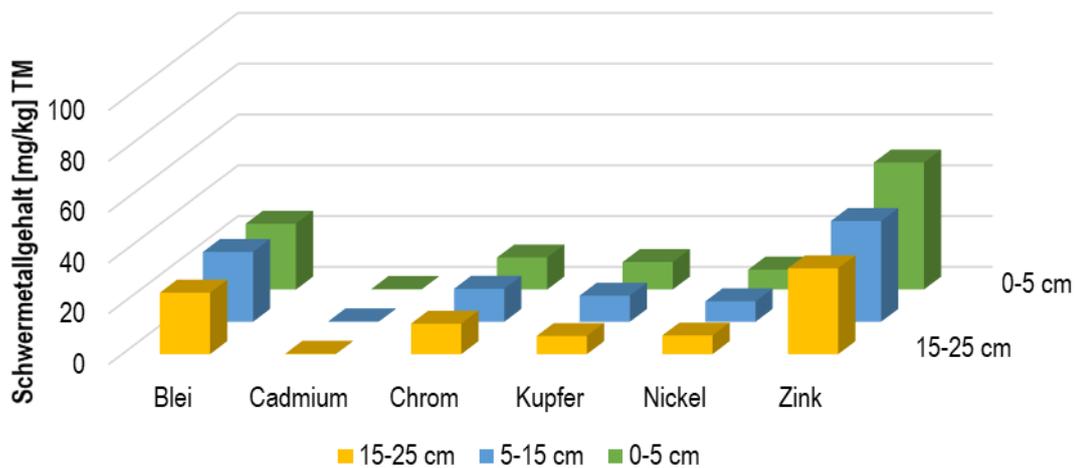


Abb. 3-37: MS3 - Entnahmestelle 1 (Überlauf)

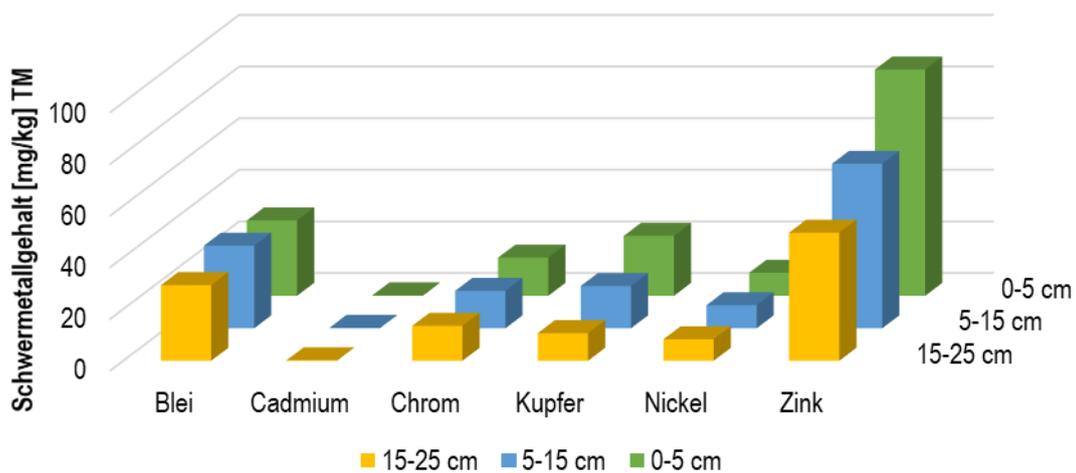


Abb. 3-38: MS3 - Entnahmestelle 2 (punktueller Zulauf Verkehrsfläche)

Legt man den Vorsorgewert Sand zugrunde werden die Grenzwerte für Cu an einem Standort, in der obersten Schicht und für Zn, an einem Standort in den oberen Schichten überschritten.

Für die Bodenart Lehm/Schluff findet keine Überschreitung der Vorsorgewerte statt.

Tab. 3-12: Schwermetallgehalte MS 3

Schwermetall	Standort 1	Standort 2	Vorsorgewert Sand BBodSchV	Vorsorgewert Lehm/Schluff BBodSchV
Pb	25,09 27,5 24,2	29,2 32 29,3	40	70
Cd	<0,2 <0,2 <0,2	<0,2 <0,2 <0,2	0,4	1
Cr	12,6 13 12	14,8 14,5 13,5	30	60
Cu	10,8 10,3 7,15	23,2 16,4 10,7	20	40
Ni	7,83 8,06 7,35	8,95 8,94 8,34	15	50
Zn	50 39,7 33,8	87,6 63,7 49,6	60	150

rot: Grenzwertüberschreitung Sand

Maßnahmen:

Der Rückhalt der Schadstoffe in den oberen Bodenschichten ist noch gegeben. Aufgrund der pH-Wertabsenkung sollte ein Monitoring des pH-Wertes stattfinden.

3.5.4.4 Grenzwertüberschreitung

Um die Belastungen im Boden mit Schadstoffen zu verdeutlichen, wurden die Grenzwertüberschreitungen der Vorsorgewerte nach BBodSchV, für die Bodenarten Sand und Lehm grafisch dargestellt. Dabei wird ausschließlich die Überschreitung als Faktor Messwert/Grenzwert dargestellt.

Für MS 1 wird deutlich, dass die Grenzwerte für Kupfer, Zink, Blei, Chrom, Cadmium und Nickel für die Bodenart Sand in den ersten beiden Tiefenschichten (0-5 cm und 5-15 cm) überschritten werden. Der Grenzwert für Kupfer wurde in der obersten Schicht um den Faktor 20 überschritten. In der 3. Schicht (15-25 cm), oberhalb der Rigole, wurde noch eine Überschreitung für Kupfer und Zink festgestellt. Es kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass Kupfer und Zink in untere Tiefenschichten bis ins Grundwasser verlagert werden, da der Schwermetallrückhalt vor allem durch organische Substanz und den Humusanteil gewährleistet wird. Empfehlung des Bodenaustausches.

Für MS 2 wird eine Grenzwertüberschreitung für Zink festgestellt. In der 3. Schicht werden die Werte eingehalten.

Für MS 3 wird eine Grenzwertüberschreitung für Zink und Kupfer festgestellt. In der 3. Schicht werden die Werte eingehalten.

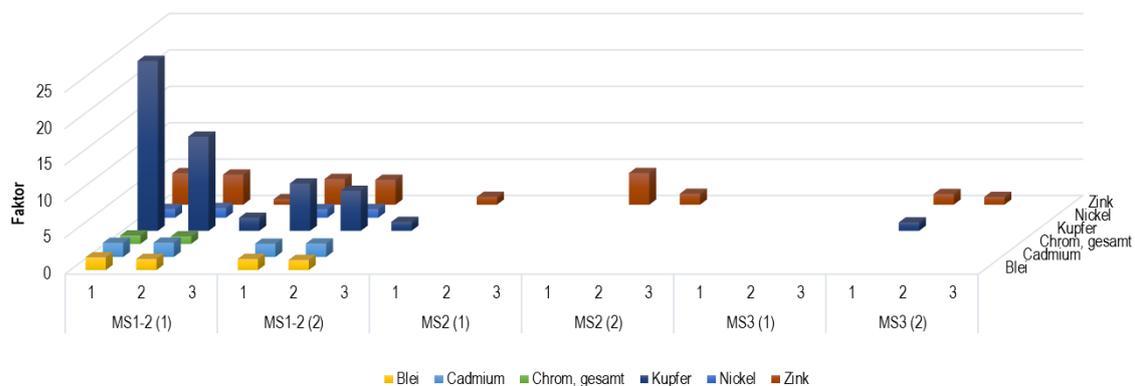


Abb. 3-39: Faktor Grenzwertüberschreitung BBodSchV – Sand

An MS 1 werden die Grenzwerte für Kupfer, Zink, Blei, Chrom, Cadmium und Nickel für die Bodenart Lehm in den ersten beiden Tiefenschichten überschritten. Der Grenzwert für Kupfer wurde in der obersten Schicht um den Faktor 10 überschritten. In der 3. Schicht wurde noch eine Überschreitung für Kupfer und Zink festgestellt.

Für MS 2 wird eine Grenzwertüberschreitung für Zink festgestellt. In der 3. Schicht werden die Werte eingehalten.

Für MS 3 wird eine Grenzwertüberschreitung für Zink und Kupfer festgestellt. In der 3. Schicht werden die Werte eingehalten.

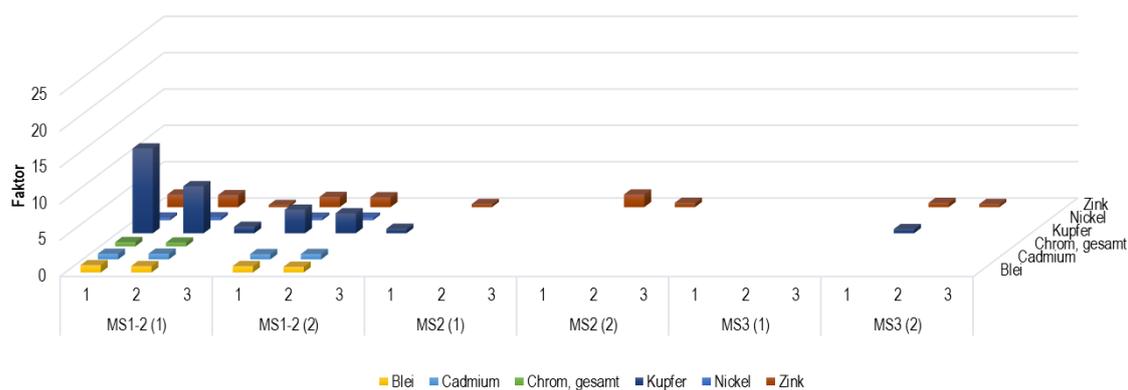


Abb. 3-40: Faktor Grenzwertüberschreitung BBodSchV – Lehm/Schluff

Tab. 3-13: Grenzwertüberschreitung BBodSchV

	MS1-2 (1)			MS1-2 (2)			MS2 (1)	MS2 (2)		MS3 (2)		Grenz- wert Sand	Grenzwert Lehm/Schluff
	1	2	3	1	2	3	1	1	2	1	2		
Blei	70,1	61,4		61,5	55,2							40	70
Cad- mium	0,78	0,79		0,73	0,74							0,4	1,0
Chrom, gesamt	35,2	31,4										30	60
Kupfer	467	259	35,8	130	110	24,6				23,2		20	40
Nickel	18	20,1		17,6	17,8							15	50
Zink	260	248	45,3	212	205		64,2	261	90	87,6	63,7	60	150

* fett gedruckt: Grenzwertüberschreitung Lehm/Schluff

3.6 Vor-Ort-Probleme

Um die stoffliche und hydraulische Leistungsfähigkeit von Mulden-Rigolen-Systemen voll ausschöpfen zu können, ist die Bewirtschaftung der Anlagen enorm wichtig. Während der Durchführung der Untersuchungen, wurden eine Reihe von Defiziten, hinsichtlich Wartung und Betrieb, aber auch bauliche Mängel waren ersichtlich.

Häufig ist ein ungehinderter Zufluss zu den Mulden nicht gegeben. Teilweise sind die Rinnen durch Laub- und Sedimentansammlungen verstopft. Das Niederschlagswasser fließt dann beispielsweise , vorbei an den Versickerungsmulden, der Straßentwässerung zu und beansprucht unnötigerweise Kanalvolumen.



Abb. 3-41: Laubansammlungen

Weiterhin konnten planerische Mängel beobachtet werden. Prinzipiell sollte der Zufluss zu den Mulden möglichst weit weg vom Muldenüberlauf angeordnet sein, damit das Wasser durch den Oberboden sickert und dort entsprechend gereinigt wird (siehe DWA-A 138). In einem Fall, wurde das Fallrohr direkt auf den Überlaufschacht ausgerichtet, so dass im Regenwetterfall das ungereinigte Wasser in den Versickerungschacht gelangt.



Abb. 3-42: Zuläufe

Bauarbeiten im Bereich der Mulden, beispielsweise durch Leitungsverlegung und deren nicht ordnungsgemäße Wiederherstellung des Muldenquerschnittes, können Einfluss auf die hydraulische und stoffliche Leistungsfähigkeit haben. Die fehlende Begrünung verringert die Bindungsfähigkeit der Schwermetalle. Kies auf der Oberfläche, kann Kurzschlussströmungen führen und eine unzureichende Reinigung nach sich führen. Bei nachträglichen Baumaßnahmen sollte daher auf eine ordnungsgemäße Wiederherstellung geachtet werden.



Abb. 3-43: Zerstörung des Muldenquerschnittes

Fehlende Bepflanzung verringert einerseits die Schadstoffbindung an den Wurzeln der Pflanzen und führen andererseits zur Verdichtung der Oberfläche, was schlechtere Durchlässigkeiten zur Folge haben kann.

Untersuchungen zeigten, dass starke Durchwurzelung zu bevorzugten Fließwegen von Schwermetallen führen kann. Weiterhin kann nicht ausgeschlossen werden, dass Beschädigungen kellerseitiger Abdichtungen hervorgerufen werden.



Abb. 3-44: Bepflanzung, Vegetation

Punktuelle Zuleitungen durch Rinnen oder Fallrohre begünstigen die Schadstoffkonzentration an der Einleitstelle. Eine gleichmäßige Beschickung der Mulde über die gesamte Muldenlänge führt zu einer Verringerung der Konzentration an einer Stelle. Oft ist allerdings eine Aufhöhung der Mulden zu beobachten, die keine gleichmäßige Beschickung zulassen.



Abb. 3-45: überhöhte Schulter, diffuse Versickerung

Fehlendes Gefälle der Muldenzuführung, verhindert den Zufluss zu den Mulden. Es kommt zu diffusen Versickerungen. Falsche Gefälleführung zur Außenwand.



Abb. 3-46: diffuse Versickerung

Für einen langjährigen Betrieb von Mulden-Rigolen-System ist die regelmäßige Wartung der Anlagen wichtig. Im Havariefall sollte eine schnelle Zugänglichkeit der Schächte möglich sein. Daher sollten diese regelmäßig von Ästen und Bewuchs freigeschnitten werden. Bei den Ortsbegehungen wurden überwachsene Schächte und zerborstene Rigolenrohre festgestellt.



Abb. 3-47: bauliche Mängel

3.7 Hydraulische Leistungsfähigkeit der Mulden (Nachrechnung)

Aufgrund fehlender Planungsunterlagen der Untersuchungsstandorte, ist eine Nachrechnung der Anlagen im vollen Umfang nicht möglich. Zur Ermittlung des erforderlichen Muldenvolumens für $n=1/a$, was der Mindestanforderung für Mulden, im Regelwerk DWA-A 138 entspricht, erfolgte eine simple Listenrechnung unter Zuhilfenahme der ermittelten k_f -Werte aus den Messungen durch Flutung und Doppelringinfiltrometer und den aufgenommenen Muldenabmessungen und Einstautiefen.

Die an den Mulden angeschlossenen Flächen, wurden überschläglich aus dem Luftbild abgegriffen und anhand der Lage der Fallrohre sinnvoll festgelegt. Die Muldenabmessungen und die Einstautiefe der Mulde bis zum Überlauf, wurden den Aufmaßen entnommen. Es ist ersichtlich, dass bis zum Anspringen des Überlaufes in die Rigole, ein geringeres Volumen ermittelt wurde, obwohl die Mulden deutlich größer sind.

Tab. 3-14: Muldenaufmaße

MS	A _{bef} [m ²]	Abflussbeiwert	V _{vorh} bis Überlauf Mulde [m ³]	Tiefe Mulde [m]
1-2	150	1	1,4	0,23
2	132 90 115 <u>335</u>	0,95 Straße 0,8 Pflaster 1 Dach	3,2	0,16
3	300	0,95 Straße	2,0	0,21

Vergleicht man vorhandenes und erforderliches Volumen und berücksichtigt die Annahmen für die befestigten Flächen, so muss eine Unterbemessung der untersuchten Messstellen konstatiert werden. Allerdings nähern sich die MS 1-2 und 2 dem erforderlichen Volumen an, während das Volumen von MS 3 deutlich zu klein ist. Die ist auf die zu große befestigte, angeschlossene Fläche zurückzuführen. An diesem Untersuchungsstandort wurden zusätzliche „private“ Mulden entfernt, was nun zur Überlastung der untersten Mulde führt.

Tab. 3-15: Ergebnis Muldenberechnung bis Überlauf

MS	k_f -Wert Flutung [m/s]	Nachweis Mulde T=1a	V _{erf} [m ³]	k_f -Wert Dopp.-Inf. [m/s]	Nachweis Mulde T=1a	V _{erf} [m ³]
1-2	$1,1 \cdot 10^{-4}$	×	1,8	$5,4 \cdot 10^{-5}$	×	2,3
2	$5 \cdot 10^{-5}$	×	4,4	$5 \cdot 10^{-5}$	×	4,4
3	$1,4 \cdot 10^{-5}$	×	6,6	$4,1 \cdot 10^{-6}$	×	8,9

4 Handlungshinweise für die Bemessung und Bewirtschaftung von oberflächigen Versickerungsanlagen

Mulden-Rigolen-Systeme sind wichtige Planungsinstrumente für eine naturnahen Umgang mit Niederschlagswasser, die in Hinblick auf die Erhaltung des Wasserhaushaltes durch Förderung von Verdunstung und Versickerung wesentliche Vorteile gegenüber der konventionellen Ableitung verfügen. Darüber hinaus bieten sie Retentionsmöglichkeiten zur Minderung des Überflutungsrisikos und ermöglichen gleichzeitig die Reinigung durch den Rückhalt von Schwermetallen.

4.1 In der Planungsphase

Eine frühzeitige **Integration in die Bauleitplanung** ist hilfreich, da für die naturnahe Regenbewirtschaftung zusätzliche Flächen in Anspruch genommen werden. Gleichzeitig können die Mulden als Rückhalteraum, gem. DIN 1986-100 für den Überflutungsschutz dienen.

Mulden entlang von Nutzungen, wie z.B. **Spielplätzen**, können ihre Durchlässigkeit im Laufe der Zeit verringern, weil dadurch der Boden häufig verdichtet wird.

Die **Materialwahl** sollte bereits im Planungsprozess überdacht und evtl. auf schädliche Materialien (z.B. Rinnen aus Kupfer) verzichtet bzw. beschichtete Materialien genutzt werden. Damit wird die Schadstoffanreicherung im Boden minimiert und die Standzeiten der Mulden verlängert.

Die **benötigte Fläche** für die Mulde ist einerseits abhängig von der Wasserdurchlässigkeit des Bodens, andererseits bestimmt der Anschlussgrad den Flächenbedarf. Bei sandigen Böden beträgt dieser ca. 10%, bei schluffigem Untergrund rund 20 % angeschlossener befestigter Fläche. Danach wären bei 200 m² Dachfläche 20 – 40 m² Muldenfläche nötig.

Weiterhin sollten ausreichende **Abstände** der Mulden zu Gebäuden und Grundstücksgrenzen bedacht werden, um das Vernässen von Kellern zu verhindern. Der Abstand der Versickerungsanlage sollte das 1,5 - fache der Baugrubentiefe nicht unterschreiten (DWA-A 138, 2005).

Wichtigster Aspekt für die Versickerung und die richtige Dimensionierung der Anlage ist die **Durchlässigkeit des Untergrundes**. Im Sohlbereich der Versickerungsanlage sollten Durchlässigkeitsbeiwerte von $1 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-6}$ m/s vorliegen. Vor der Planung sollte der Boden durch Versickerungsversuche (z.B. Doppelringinfiltrimeter, Open-End-Test, Schürfe) auf ausreichende Durchlässigkeit als Grundlage für die Bemessungsannahmen untersucht werden. Dabei ist auch auf eine ausreichende Dichte der Messstellen zu achten. Diese geht künftig auch in der Ortsfaktor für die Festlegung des k_f -Wertes ein. Damit wird einer möglichen Inhomogenität des Bodens entgegengewirkt.

Die Versickerung von Niederschlagswasser darf keine **Verunreinigung des Grundwassers** zur Folge haben. Daher sollte gemäß Regelwerk DWA-A 138 die Mächtigkeit des Sickerraumes, d. h. der Abstand des mittleren, höchsten Grundwasserstandes zur Unterkante der Versickerungsanlage mindestens 1 m betragen. Informationen zu GW-Flurabständen, -schutzzonen können über geologische Karten und Auskünften von Fachämtern (Katasteramt, Umweltamt, etc.) bezogen werden.

4.2 Bau

Bepflanzung:

In der aktuellen Fassung des DWA-Arbeitsblattes 138 ist die Begrünung i.d.R. als Rasensaat definiert, Bodendecker und Hochstauden sind möglich. Lediglich von flachwurzelnenden Koniferen wird abgeraten. Von Bäumen sollte mindestens der Abstand der Hälfte des möglichen Kronendurchmessers eingehalten werden. Dennoch werden die Mulden größtenteils ausschließlich mit Rasen begrünt. Dadurch ist oft zu beobachten, dass die Bepflanzung bei längeren Trocken- und Hitzephasen vertrocknet.

Im Gelbdruck der DWA-A 138-1 (DWA-A 138-1 (GD), 2020) ist zukünftig verankert, dass auch Gräser, Stauden, Sträucher und Gehölze für eine Bepflanzung von Mulden genutzt werden können. An der TU Berlin läuft derzeit ein von der DBU gefördertes Projekt zum Thema Stauden in Versickerungsmulden „Perennierende Pflanzen für innerstädtische Versickerungsmulden. Low-Tech-Konzepte mit Stauden zur Versickerung und zur Förderung der Biologischen Vielfalt“ (TU Berlin, 2023).

Artenreiche Bepflanzungen erhöhen die Versickerung und Verdunstung. Durch die gute Wasserversorgung der Pflanzen erfolgt ein besseres Wachstum, aus dem ein erhöhter Kühleffekt resultiert. Außerdem wird durch die Schaffung neuer Lebensräume die Biodiversität im Gebiet erhöht und das Überfahren bzw. Übertreten in diesen Bereichen verhindert.



Abb. 4-1: Blühende Versickerungsmulde (Eppel-Hotz, 2019)

Geeignete Pflanzen (Stauden und Gräser) für Versickerungsmulden finden sich:

- Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG, 2010), (Eppel-Hotz, 2019)
- Neugebauer Landschaftsarchitekten (Neugebauer, 2013)
- p2mBerlin (Balder, Goll, Nickel, & Rehfeld-Klein, 2018)

Untersuchungen (Balder, Goll, Nickel, & Rehfeld-Klein, 2018) zeigen, dass Bäume durchaus für die Verwendung in Mulden möglich sind. Alle Risiken und Probleme (Wurzelbildung, Kurzschlussströmung, Verschattung) in dem Zusammenhang sind noch nicht abschließend erforscht. Höhere Unterhaltskosten (Bewässerung, Kontrolle) sind aber grundsätzlich zu berücksichtigen.

Rechtliches:

Bereits bei der Errichtung von MRS, sollte eine klare Benennung des Unterhaltspflichtigen und den Zuständigkeiten erfolgen, um eine ordnungsgemäße Wartung, auch nach langjähriger Nutzung, zu gewährleisten.

Eine Trennung privater und öffentlicher Mulden eines MRS wäre ratsam. Andernfalls sollten vertragliche Regelungen der Unterhaltspflicht oder eine dingliche Sicherung angestrebt werden.

Eine Kennzeichnung der wasserwirtschaftliche Anlage wäre hilfreich, um zum einen einer Nutzungsänderung vorzubeugen, aber trotzdem eine multifunktionale Nutzung der Grünflächen zuzulassen. Anwohnern muss das Bewusstsein geschaffen werden, dass es sich um eine Entwässerungsanlage handelt und durch das Verfüllen von Mulden, Defizite bezüglich der Rückhaltung bei Regenereignissen entstehen können. Schautafeln in Wohngebieten, mit Hinweisen zum Entwässerungssystem kann als eine Art der Bildungsfunktion dienlich sein und den Nutzen der Anlagen informieren. Am Beispiel eines Gewerbeparks in Leipzig, wurden Schautafeln errichtet, um das Überfahren der Mulden zu unterbinden.



Abb. 4-2: Beschilderung von Versickerungsanlagen

4.3 Bewirtschaftung, Überwachung und Betrieb

Die Unterhaltung von Mulden-Rigolen-Systemen ist mit einem geringen Aufwand verbunden. Trotzdem ist eine regelmäßige Überwachung (Eigenkontrolle), Pflege und ggf. Instandsetzung erforderlich, um Verstopfungen und Verschlammungen zu vermeiden und einen ordnungsgemäßen Betrieb der Versickerungsanlagen zu gewährleisten. Wichtig ist das Freihalten der Zuläufe zu den Mulden und Rinnen von Laub und Ablagerungen.

Von wesentlicher Bedeutung ist der Erhalt einer geschlossenen Vegetationsdecke der bewachsenen Bodenzone, die durch Ausbringen neuer Aussaat erreicht werden kann. Bei Bedarf ist auch ein Pflanzenschnitt notwendig. Andernfalls kann sich eine Reduzierung der Filterwirkung bzw. ein verringerter Schadstoffrückhalt einstellen oder die Kolmationsgefahr (Verschlammung) steigt. Die Erhöhung der Bindungskapazitäten von Schwermetallen, kann durch die Anhebung des Tonmineralgehaltes erfolgen. Auch das Steigern des Gehaltes an organischer Substanz sowie die Stabilisierung des pH-Wertes durch Kalkung, können entsprechende Effekte haben.

Das Durchlässigkeitsvermögen des Bodens ist nach gegebener Zeit zu überprüfen, beispielsweise alle 10 Jahre. Die Untersuchung der Versickerungsleistung kann z.B. mittels Doppelringinfiltrometerverfahren erfolgen.

Bedingt durch den Rückhalt von Schadstoffen in der obersten Bodenzone hat diese Schicht eine begrenzte Funktionsdauer. Durch langjährigen Schadstoffeintrag kann eine Erschöpfung der Adsorptionsfähigkeit oder eine Remobilisierung der Schwermetalle bei $\text{pH} < 6$ eintreten. Die Schadstoffanreicherungen sind durch Intervallmäßige Beprobung und Analyse in einem zertifizierten Labor zu überwachen. Dazu sollten regelmäßig Inspektionen der Anlagen erfolgen (spätestens nach 20 bis 25 Jahren). Auf Basis der Laboranalysen können entsprechende Maßnahmen (z.B. Bodenaustausch) abgewogen werden. Vorschläge für Überwachungs- und Bewirtschaftungsintervalle sind im Regelwerk DWA-A 138 enthalten.

Nach aktuellem Stand der Technik wird empfohlen ein **Betriebshandbuch** zu führen, welches zum Inhalt Plandarstellungen der Anlagen, Wartungs- und Betriebshinweise, Genehmigungen, Erlaubnisse und Untersuchungsergebnisse hat. Mit Überarbeitung des DWA-A 138-1 wird die Empfehlung zur Pflicht umgewandelt. Dabei ist es unerheblich ob es sich um private oder öffentliche Mulden handelt. Außerdem ist es beispielsweise bedingt durch bauliche Änderungen oder dem Anschluss weiterer Flächen zu ergänzen.

Nach Baumaßnahmen, die einen Eingriff in das MRS darstellen, sollte eine sachgerechte Kontrolle der Wiederherstellung des Systems erfolgen, um auch weiterhin die Funktionen hinsichtlich hydraulischem und stofflichem Rückhalt zu erhalten.

5 Zusammenfassung

Dezentrale Anlagen zur Bewirtschaftung von Regenwasser haben sich in den letzten Jahren etabliert. Der bewachsene Oberboden wirkt als Filter zum Schutz des Grundwassers von Verunreinigungen. Das DWA-Arbeitsblatt 138 regelt zwar die Bemessung dezentraler Anlagen und gibt Hinweise zum Bau und Betrieb der Anlagen, Aussagen zum Umfang der Schadstoffanreicherung und die hydraulische Leistungsfähigkeit im Langzeitbetrieb fehlen jedoch.

Schwerpunkt des Vorhabens war es daher, Mulden-Rigolen-Systeme nach Standzeiten über 25 Jahren, zu untersuchen. An drei ausgewählten Mulden-Rigolen-Systemen wurde neben der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Mulden auch der Schwermetallrückhalt in der bewachsenen Bodenzone nach jahrzehntelanger Nutzungsdauer überprüft.

Aus **hydraulischer** Sicht liegt die Durchlässigkeit der untersuchten Anlagen prinzipiell innerhalb des relevanten versickerungsfähigen Bereiches der DWA-A 138. Damit steht einer weiteren Nutzung der Anlagen nichts im Weg. Die Empfehlung des aktuellen DWA-A 138 für den Oberboden von k_f -Wert $\geq 1 \cdot 10^{-5}$ m/s wird an MS 3, unter der Methode Doppelringinfiltrimeter, unterschritten. Die Gesamtdurchlässigkeit liegt über dem empfohlenen Wert für den Oberboden. Die Reduzierung von Versickerungsmulden führt zur hydraulischen Überlastung der Einzelmulde MS 3. Kritisch wird auch die Stärke der Muldensohle unter dem Aspekt der aktuellen Forschung gesehen. Im DWA A138-1GD wird von einer Mindeststärke von 20cm ausgegangen. Diese sollte dann auch aus einem homogenen Bodengemisch bestehen. Tatsächlich wurden Muldensohlstärken von max. 10cm vorgefunden.

Die **stoffliche** Analyse der Bodenproben zeigte typische, für die Nutzung, auftretende Schwermetallkonzentrationen. Nach mehr als 25 Jahren Nutzungsdauer lässt sich der Zustand hinsichtlich der Reinigungsleistung von zwei Mulden als gut bewerten. An MS 2 übersteigt Zink in der obersten Bodenschicht die Konzentration die Vorsorgewerte der BBodSchV. An MS 3 werden die Vorsorgewerte für Zink in der ersten und zweiten Schicht und Kupfer in der ersten Schicht überschritten. Das lässt auf eine gute Rückhaltekapazität im Boden schließen.

An MS 1 ist eine Grenzwertüberschreitung der BBodSchV für alle untersuchten Parameter in den ersten beiden Schichten zu verzeichnen. Die 3. Schicht zeigt eine Überschreitung für Zink und Kupfer an. Zum einen zeigt die Auswertung eine starke Akkumulation der Schwermetalle im Boden an. Kupfer übersteigt die Vorsorgewerte allerdings deutlich, durch die Anreicherung der von der Regenrinne gelösten Schwermetalle Kupfer hauptsächlich in oberen Bereichen des Bodens.

Grundsätzlich lässt die Abnahme von Schwermetallkonzentrationen über die Tiefe darauf schließen, dass bisher ein wirksamer Schadstoffrückhalt vorliegt. Die Einleitstelle ist oft stärker belastet. Es kommt zu keiner Überschreitung der Maßnahmenwerte der BBodSchV in der Kategorie Kinderspielplatz und Wohngebiete. Es wird jedoch empfohlen, insbesondere an den Mulden mit überproportional hohen Cu- und

Zn-Konzentrationen einen Bodenaustausch der Muldensohlen vorzunehmen. Dabei sollte dann eine Mutterbodenschicht von 20 – 30 cm Stärke eingebaut werden.

Defizite wurden bei der **Instandhaltung** der Anlagen registriert. Unterirdische Anlagen werden nicht gewartet, Schächte sind zum Teil nicht begehbar, die bewachsene Bodenzone ist nicht überall erhalten und die Zuläufe zu den Mulden sind teilweise verstopft. Eine Mulde wies Einschränkungen der Leistungsfähigkeit durch Reduzierung des Muldenvolumen des Mulden-Rigolen-Systems auf.

Für einen ordnungsgemäße Funktionstüchtigkeit ist die Wartung und Instandhaltung dezentraler Anlagen von enormer Bedeutung, um diese Anlage jahrzehntelang betreiben zu können.

Bearbeiter: M. Sc. Tilo Sahlbach
Dipl.-Ing. (FH) Katrin Krause

Literaturverzeichnis

- ATV-A 138. (Januar 1990). *Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser*. Heneff: Abwassertechnische Vereinigung e.V.
- BAKEMAN, S., GARIEPY, D., HOWIE, D., KILLELEA, J., LABIB, F., & O'BRIEN, E. (2014). *Stormwater Management Manual for Western Washington (SMMWW) – Volume III Hydrologic Analysis and Flow Control BMPs*.
- Balder, H., Goll, L., Nickel, D., & Rehfeld-Klein, M. (2018). Befunde zur Verwendung von Bäumen in Muldensystemen im Rahmen der Regenwasserbewirtschaftung. *Pro Baum*.
- BBodSchV. (1999). *Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung*. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).
- Bradl, H. (2004). Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituent. (U.-C. B. Department of Environmental Engineering, Hrsg.) *Journal of Colloid and Interface Science*.
- DIN 18130-1. (1998). *Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts, Teil 1: Laborversuche*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN 18915. (2018). *Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Bodenarbeiten*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- DIN 19682-7. (2015). *Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 7: Bestimmung der Infiltrationsrate mit dem Doppelring-Infiltrimeter*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DIN 19747. (2009). *Untersuchung von Feststoffen – Probenvorbehandlung, -vorbereitung und -aufarbeitung für chemische, biologische und physikalische Untersuchungen*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4049-3. (1994). *Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DWA-A 102-2 / BWK-A 3-2. (2021). *Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 2: Emissionsbezogene Bewertungen und Regelungen*. Heneff: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- DWA-A 138. (2005). *Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).

- DWA-A 138-1 (GD). (2020). *Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser-Teil 1: Planung, Bau, Betrieb (Gelbdruck)*. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
- Engelhard, C., Fach, S., & Raucha, W. (2012). *Langzeitverhalten der hydraulischen und stofflichen Leistungsfähigkeit von Muldenversickerungen im Sommer- und Winterbetrieb, Endbericht*. Bau fakultät Universität Innsbruck: Arbeitsbereich Umwelttechnik, Institut für Infrastruktur.
- Eppel-Hotz, A. (2019). *Pflanzen für Versickerung und Retention*. Veitshöchheim: Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau.
- Fischer, W., Cram, S., Lühr, C., & Böhm, B. (1998). Verhalten von Chrom in belasteten Böden. *Bodenökologie & Bodengenese Heft 26, Tagungsband: Mobilität und Wirkung von Schadstoffen in urbanen Böden*.
- FLL. (2005). *Empfehlungen zur Versickerung und Wasserrückhaltung*. Bonn: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.
- (1976). *Gesetz über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz - AbwAG)*.
- Gibson, M. J., & Farmer, J. G. (1986). Multi-step sequential chemical extraction of heavy metals from urban soils. *Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical*, 11.
- Göbel, P., Dierkes, C., & Coldeway, W. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, S. 26-42.
- Hamacher, R. (2000 (47) Nr. 4). Bau- und Betriebskosten von Anlagen zur Regenwasserversickerung. *KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall*, 560-568.
- Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt. (2006). *Dezentrale naturnahe Regenwasserbewirtschaftung, Ein Leitfaden für Planer, Architekten, Ingenieure und Bauunternehmer*. Hamburg.
- Harrison, R., Laxen, D., & Wilson, S. (1981). Chemical associations of lead, cadmium, copper, and zinc in street dusts and roadside soils. *Environmental Science & Technology*.
- Heintz, A. (1993). *Chemie und Umwelt*. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.
- Hillenbrand, T., Toussaint, D., Böhm, E., Fuchs, S., Scherer, U., Rudolphi, A., . . . Kotz, C. (2005). *Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden. Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen*. Forschungsbericht 20224220/02 UBA-FB 000824. Umweltbundesamt.

- Horstmeyer, N., Huber, M., Drewese, J., & Helmreich, B. (2018). Räumliche Verteilung der Schwermetallgehalte in den Oberböden von 35 Versickerungsmulden für Verkehrsflächenabflüsse. *gwf Wasser | Abwasser*, 42-52.
- IB Hirsch. (1997). *Bestandsplan Rigolen, Wohngebiet Bebauungsplan Nr. 8a, Taucha, Innere Erschließung*. Ingenieurbüro Hirsch Planung im Straßen- und Tiefbau Leipzig.
- IB Hirsch. (2014). *Hydraulische Berechnung der Oberflächenentwässerung Gärtnerweg und Wohngebiet 8a/8b in Taucha*. Ingenieurbüro Hirsch.
- ISWT. (1992). *Planunterlagen Ausführungsplanung Regenwasserentsorgung BOGUMILS - Garten*. Leipzig: Ingenieurbüro für Siedlungswasserwirtschaft & Tiefbau GmbH.
- ISWT. (1992). *Leistungsbeschreibung Regenwasserentsorgung Wohnpark „Bogumils Garten“*. Leipzig: Ingenieurbüro für Siedlungswasserwirtschaft & Tiefbau GmbH.
- ISWT. (1994). *Planunterlagen Ausführungsvariante Regenwasserentsorgung Wohnpark „Bogumils Garten“ in Taucha*. Leipzig: Ingenieurbüro für Siedlungswasserwirtschaft & Tiefbau Prof. Bosold & Partner GmbH.
- KBU. (2015). *Schonung von Phosphor-Ressourcen aus Sicht einer nachhaltigen Bodennutzung und des Bodenschutzes*. Dessau-Roßlau: Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (KBU).
- Kim, R.-Y. (2008). *Chrom(VI)-Analyse, Chrom(VI)-Belastungen nordrhein-westfälischer Böden und Modellversuche zur Chrom(VI)-Reduktion und Chrom(III)-Oxidation in Böden*. Hohe Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- Kluge, B., Sommer, H., & Kaiser, M. (2016). *Leistungsfähigkeit und Zustand langjährig betriebener dezentraler Regenwasserversickerungsanlagen (LEIREV) Abschlussbericht*. Technische Universität Berlin, Kaiser Ingenieure, Sieker. gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Knechtenhofer, L., Xifra, I., Scheinost, A., Flühler, H., & Kretzschmar, R. (2003). Fate of heavy metals in a strongly acidic shooting-range soil: small-scale metal distribution and its relation to preferential water flow. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*.
- LAWA. (2017). *Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser*. Stuttgart: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser.

- LGU. (2023). *Laborergebnisse Bodenproben*. Hartha: Labogesellschaft für umweltschutz mbH (LGU).
- LWG. (2010). *Mit Pflanzen versickern, Versickerungsmulden standortgerecht bepflanzt*. Veitshöchheim: Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, Abteilung Landespflege.
- LWW. (kein Datum). *Lageplan Netzdaten Bogumils Garten*. Leipziger Wasserwerke.
- Neugebauer, H. (2013). *Regenwasserversickerung - Ein Leitfaden für den Bauherren*. Rheda-Wiedenbrück: Heuschneider Landschaftsarchitekten.
- Norrström, A., & Jacks, G. (1998). Concentration and fractionation of heavy metals in roadside soils receiving de-icing salts. *The Science of the Total Environment*, 161-174.
- Reck, A., & Kluge, B. (2020). *Konzepte für eine nachhaltige Nutzung von langjährig betriebenen Versickerungsanlagen (KONVERT), Teil: Sickerwasserkonzentrationen, Abschlussbericht*. Technische Universität Berlin.
- REwS. (2021). *Richtlinien für die Entwässerung von Straßen*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (Hrsg.) Arbeitsgruppe „Erd- und Grundbau“.
- Riechel, M., Remy, C., Matzinger, A., Schwarzmüller, H., Rouault, P., Schmidt, M., . . . Rehfeld-Klein, M. (2017). *Maßnahmensteckbriefe der Regenwasserbewirtschaftung - Ergebnisse des Projektes KURAS*. Berlin.
- Roulier, S., Robinson, B., Kuster, E., & Schulin, R. (2008). Analysing the preferential transport of lead in a vegetated roadside soil using lysimeter experiments and a dual-porosity model. *European Journal of Soil Science*, 61-70.
- (2016). *Sächsische Bauordnung*.
- (2004). *Sächsisches Ausführungsgesetz zum Abwasserabgabengesetz (SÄchsAbwAG)*.
- (2013). *Sächsisches Wassergesetz*.
- Scheffer, F., & Schachtschabel, P. (2010). *Lehrbuch der Bodenkunde 18. Auflage*. Springer-Verlag GmbH Deutschland.
- Schmitt, T. G., Welker, A., Illgen, M., Bosseler, B., Harting, K., & Brüggemann, T. (2007). *Untersuchung des Abfluss- und Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Flächenbeläge*. Bochum und Gelsenkirchen: im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, bearbeitet durch

Technische Universität Kaiserslautern - Fachgebiet
Siedlungswasserwirtschaft und IKT - Institut für Unterirdische.

- Sebastian, U. (2018). *Gesteinskunde – Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender 4. Auflage*. Springer Spektrum, Springer-Verlag GmbH Deutschland.
- Sieker. (-). *Sieker, Die Regenwasserexperten*. (I. P. mbH, Herausgeber) Abgerufen am 2023 von Maßnahmen der dezentralen Regenwasserbewirtschaftung: <https://www.sieker.de/fachinformationen/article/massnahmen-der-dezentralen-regenwasserbewirtschaftung-58.html>
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., & Streck, T. (2020). *Bodenkunde und Standortlehre, 4. Auflage*. Stuttgart: Ulmer Verlag.
- Stecker, A. (1997). *Anwendung der Mulden-Rigolen-Kombination zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung in urbanen Entwässerungssystemen*. Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. F. Sieker, Schriftenreihe für Stadtentwässerung und Gewässerschutz, Nr. 16.
- STMUGV. (2006). *Lernort Boden, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt*. Von <https://www.lfu.bayern.de/boden/erdausstellung/bodenbestandteile/index.htm> Gesundheit und Verbraucherschutz abgerufen
- Technische Universität Kaiserslautern, IKT-Institut für Unterirdische Infrastruktur. (2007). *Untersuchungen des Abfluss- und Versickerungsverhaltens wasserdurchlässiger Flächenbeläge*. Düsseldorf: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV).
- TU Berlin. (2023). *Perennierende Pflanzen für innerstädtische Versickerungsmulden. Low-Tech-Konzepte mit Stauden zur Versickerung und zur Förderung der Biologischen Vielfalt*. Berlin: Technische Universität Berlin FG Vegetationstechnik und Pflanzenverwendung, gefördert von der Deutschen Bundestiftung Umwelt. Von <https://regenwasseragentur.berlin/versickerungsmulde-bepflanzen/?msckid=c829e84db4c911ec879fd3b5c36ab9ad> abgerufen
- Umweltatlas Berlin. (2015). *Bodenkundliche Kennwerte*. Von <https://www.berlin.de/umweltatlas/boden/bodenkundliche-kennwerte/2015/methode/> abgerufen
- Umweltatlas Berlin. (2023). *Bodenkundliche Kennwerte 2001*. Von <https://www.berlin.de/umweltatlas/boden/bodenkundliche-kennwerte/2001/methode/> abgerufen
- (2001). *Verordnung des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft über die Erlaubnisfreiheit von bestimmten Benutzungen des Grundwassers (Erlaubnisfreiheits-Verordnung - ErlFreihVO)*.

- (1997). *Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV).*
- (2016). *Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV).*
- (2010). *Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung - GrwV).*
- WaBoLu. (1998). Stoffmonographie Cadmium - Referenz- und Human-Biomonitoring-(HBM)-Werte, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Umweltbundesamtes. *Bundesgesundhbl. Bd. 41 (5), 218-226.*
- (2009). *Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 320 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.*