



**Regionaltangente West  
PFA Nord**

**Anlage 18.2  
Anhang II**

**Bodenchemisches Gutachten  
Frankfurter Stadtwald**

25691892 **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Veranlassung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Untersuchungskonzept</b>	<b>6</b>
2.1	Bohransatzpunkte	6
2.2	Entnahmetiefen	6
2.3	Parameterumfang	7
<b>3</b>	<b>Probennahme</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Profilansprache</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Analyseergebnisse</b>	<b>18</b>
5.1	Physikalisch-chemische Eigenschaften	18
5.2	Säureneutralisationskapazität, Kationenaustauschkapazität und Basensättigung	21
5.3	Kohlenwasserstoffe und PAK	24
5.4	Pestizide	25
5.5	Schwermetalle	25
<b>6</b>	<b>Bewertung</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Empfehlungen</b>	<b>32</b>
	<b>Literatur</b>	<b>34</b>

## 25691892 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1	Entnahme von Bodenmaterial mit dem Lochspaten	9
Abb. 2	Kernkiste Bohransatzpunkt 1 (- 0,2 m A <sub>n</sub> , ~ 0,7 m B <sub>v</sub> , > 0,7 m C <sub>n</sub> )	11
Abb. 3	Kernkiste Bohransatzpunkt 2 (- 0,2 m A <sub>n</sub> , ~ 0,7 m B <sub>v</sub> , > 0,7 m C <sub>n</sub> )	12
Abb. 4	Kernkiste Bohransatzpunkt 3 (Auffüllungen bis 1,8 m Tiefe)	13
Abb. 5	Kernkiste Bohransatzpunkt 4 (Auffüllungen bis 1,8 m Tiefe)	14
Abb. 6	Kernkiste Bohransatzpunkt 5 (- 0,8 m Auffüllungen, > 0,8 m C <sub>n</sub> )	15
Abb. 7	Kernkiste Bohransatzpunkt 6 (- 0,1 m A <sub>n</sub> , - 0,4 m B <sub>v</sub> , > 0,4 m C <sub>n</sub> )	16
Abb. 8	Kernkiste Bohransatzpunkt 7 (- 1,5 m Auffüllungen, > 1,5 m C <sub>n</sub> )	17
Abb. 9	TOC-Gehalte der Bodenproben	19
Abb. 10	Elektrische Leitfähigkeit der Bodenproben	20
Abb. 11	pH-Werte der Bodenproben, Einstufung der Bodenreaktion nach SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL (2013)	20
Abb. 12	Säureneutralisationskapazität der Bodenproben	22
Abb. 13	Kationenaustauschkapazität der Bodenproben	23

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1	KW-Index (C <sub>10</sub> – C <sub>40</sub> ) im Feststoff [mg/kg TR]	24
Tab. 2	PAK nach EPA im Feststoff [mg/kg TR]	24
Tab. 3	Messwerte von Schwermetallen im Feststoff in Profil 1 und 2 [mg/kg TR]	26
Tab. 4	Messwerte von Schwermetallen im Feststoff in Profil 3 und 4 [mg/kg TR]	27
Tab. 5	Messwerte von Schwermetallen im Feststoff in Profil 5 und 6 [mg/kg TR]	27
Tab. 6	Messwerte von Schwermetallen im Feststoff in Profil 7 [mg/kg TR]	27
Tab. 7	Gemessene maximale Schadstoffkonzentrationen in den natürlichen Böden und in den Auffüllungen	30

**Anlagenverzeichnis**

Anlage 1	Übersichtslageplan mit Bohransatzpunkten
Anlage 2	Protokoll der Ortsbegehung am 19.08.14
Anlage 3	Fotodokumentation der Bohransatzpunkte
Anlage 4	Geländeformblätter der Profilansprachen
Anlage 5	Fotodokumentation der Probennahme
Anlage 6	Analyseergebnisse

## 25691892 1 **Veranlassung**

Im Scoping zum Vorhaben Regionaltangente West (RTW) wurde von Seiten der Stadt Frankfurt gefordert, ein Fachgutachten zu erstellen, das die Belastung und Gefährdung des Bodens aus dem Betrieb der RTW darstellt. Auf der Grundlage bodenchemischer Untersuchungen sollten die aktuelle Bodenbelastung und Bodenreaktion ermittelt sowie die Versauerungsgefährdung und das damit einhergehende Risiko einer Tiefenverlagerung von Schwermetallen bewertet werden. Die natürlich anstehenden sandigen Böden im Frankfurter Stadtwald weisen auf Grund ihrer Substrateigenschaften eine nur geringe Puffer- und Filterkapazität auf. Ein Gefährdungspotential wird v.a. in dem Eintrag und der Verlagerung von Schwermetallen und Herbiziden gesehen.

Das Untersuchungskonzept wurde von BGS UMWELT aufgestellt und mit der zuständigen Unteren Wasserbehörde der Stadt Frankfurt in einem Beteiligungsverfahren im Frühsommer 2014 abgestimmt. Für die Untersuchungen wurden im Bereich des Knotens Sportfeld entlang der bestehenden Bahntrasse über eine Streckenlänge von ca. 3 km an sieben Standorten Bodenproben aus verschiedenen Tiefen entnommen. Die Entnahme der Bodenproben fand im Oktober 2014 statt.

Die Analyseergebnisse der bodenchemischen Untersuchungen und die sich daraus ableitende Bewertung der Belastung und des Gefährdungspotentials des Bodens werden im nachfolgenden Gutachten vorgestellt.

## 2 Untersuchungskonzept

### 2.1 Bohransatzpunkte

**Anlage 1** zeigt in einem Übersichtsplan das Untersuchungsgebiet mit den anstehenden Bodenformen sowie den Bohransatzpunkten (Probennahmepunkte). Grundlage der Bodenkarte sind die digitalen Bodenflächendaten 1:50.000 (BFD 50) des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG). Untersucht wurde ein ca. 3 km langer Abschnitt der geplanten RTW-Strecke im Umfeld des Bahnhofs Sportfeld.

Auf diesem Streckenabschnitt wurden in Absprache mit der Unteren Wasserbehörde der Stadt Frankfurt (UWB) sieben Ansatzpunkte für die Entnahme von Bodenproben festgelegt. Die Probennahmepunkte 3 – 5 liegen im Siedlungs- bzw. Verkehrsbereich und sind anthropogen überprägt. Die Probennahmepunkte 1, 2, 6 und 7 liegen im Wald. Alle Bodenproben werden mit Ausnahme des Bohransatzpunktes 2 in wenigen Metern Abstand zum Schotterkörper der Bahntrasse genommen. Der Bohransatzpunkt 2 wurde auf Vorschlag der UWB ca. 10 m von der Bahntrasse abgerückt und soll als Referenzprobe für vom Bahnverkehr weitgehend unbeeinflusste Verhältnisse dienen.

In dem genannten Streckenabschnitt stehen in Trassennähe auf den nicht anthropogen überprägten Flächen überwiegend Braunerden an. Am Bohransatzpunkt 7 werden nach den Daten der BFD 50 auf einem kurzen Streckenabschnitt podsolige Braunerden mit Bändern, d.h. mit bänderförmigen wenige Zentimeter mächtigen Tonanreicherungshorizonten, angesprochen. Diese Bodenform wurden jedoch nicht erbohrt (s. Kapitel 4). Auf Höhe der Bohransatzpunkte 1 und 2 verlaufen die Gleise einige Meter über Gelände auf einem Damm.

Die Bohransatzpunkte wurden in einer Begehung am 19.08.14 u.a. mit der Hessenwasser, der Unteren Wasserbehörde der Stadt Frankfurt (UWB), dem HLUG, der RTW, der Deutschen Bahn (DBI) und dem StadtForst Frankfurt besichtigt und ihre endgültige Lage mit Bohrpfählen markiert. Das Protokoll zur Begehung vom 19.08.14 wurden dem Gutachten in **Anlage 2** beigelegt. In **Anlage 3** finden sich Fotos der markierten Bohransatzpunkte.

### 2.2 Entnahmetiefen

Entlang des genannten Streckenabschnittes stehen nach BFD 50 auf den anthropogen nicht überprägten Flächen überwiegend Braunerden aus pleistozänen Flusssanden mit der charakteristischen Horizontabfolge  $A_h - B_v - C_n$  an. Die Schichtunterkanten liegen bei ca. 5 cm, 50 cm und 200 cm. Diese Einteilung entspricht auch den erbohrten Bodenprofilen (s. Kapitel 4).

Die Probennahme an den anthropogen nicht überprägten Standorten erfolgte aus dem  $A_h$ , dem  $B_v$ -Horizont und aus zwei Tiefen des C-Horizontes. Die Probennahmetiefe im B-Horizont lag wie vorgesehen bei ca. 30 cm, im C-Horizont bei ca. 1 m und 1,5 m.

25691892 Die Probenmasse des nur wenige Zentimeter mächtigen A-Horizontes und des oberen B-Horizontes (Entnahmetiefe ca. 30 cm) wurde horizontdifferenziert jeweils als Flächenmischprobe genommen. Die Probenmasse des C-Horizontes wurde mit dem Lochspaten gewonnen.

Auf den anthropogen überprägten Standorten (Bohransatzpunkt 3 – 5) wurde der A-Horizont nicht beprobt. Aus den tieferen Lagen wurden wie bei den natürlichen Standorten Bodenproben aus ca. 30 cm Tiefe als Flächenmischprobe und aus 1 m und 1,5 m Tiefe mit dem Lochspaten genommen.

## 2.3 Parameterumfang

Der Parameterumfang der Bodenanalysen wurde in Absprache mit der UWB festgelegt. Durch die Untersuchungsergebnisse sollten eine Charakterisierung des aktuellen Belastungszustandes des Bodens und auch eine Prognose der Austragsgefährdung von Schadstoffen in das Grundwasser ermöglicht werden (Wirkungspfad Boden-Grundwasser nach BBodSchV).

Folgende Parameter wurden untersucht:

- Trockenmasse des Bodens
- pH-Wert
- TOC in der Festsubstanz
- Hauptanionen und –kationen sowie Leitfähigkeit im Eluat
- Schwermetalle in der Festsubstanz mit Königswasseraufschluss
- Schwermetalle im Eluat nach DIN 19529 (2:1 Schüttelverfahren)
- Pestizide im Säuleneluat (DIN 19528)
- PAK in Feststoff und Säuleneluat
- Kohlenwasserstoffe in Feststoff und Säuleneluat
- Säureneutralisationskapazität
- Effektive Kationenaustauschkapazität und Basensättigung (DIN 11260)

Die Analyse der Schwermetalle im Eluat und im Königswasseraufschluss erfasst die in der GWS-VwV aufgelisteten Schwermetalle sowie die in der Bundesbodenschutzverordnung zur Beurteilung des Wirkungspfades Boden - Grundwasser genannten Schwermetalle. Dies sind:

Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Selen, Thallium, Vanadium, Zink und Zinn.

Die zu analysierende Pestizidliste umfasst die derzeit bei der DB eingesetzten Pestizide Glyphosat, Flumioxazin und Flazasulfuron, Pestizide, die im Rahmen des Grundwassermonitorings der Hessenwasser nachgewiesen wurden (z.T. jedoch unterhalb des GFS-Wertes der GWS-

25691892 VwV) und früher im Bahnbetrieb eingesetzte Pestizide. Folgende Pestizide sowie deren Hauptmetabolite wurden analysiert:

Atrazin, Desethylatrazin, Bromacil, Dimefuron, Diuron, DMS, Glyphosat, AMPA, Flumioxazin, Flazasulforon, Hexazinon, Simazin und Propazin

Auf eine Analyse der Hauptanionen und -kationen im Sediment wurde verzichtet, da sie v.a. Aufschluss über die Elementgehalte der bodenbildenden Mineralien geben würde.

Zusätzlich war eine Abschätzung zu treffen, wie groß die Puffer- und Speicherkapazität des Bodens ist bzw. inwieweit eine Versauerung des Bodens und damit einhergehend eine Schwermetallmobilisierung zu befürchten ist. Für diese Fragestellung wurden die Säureneutralisationskapazität, die Kationenaustauschkapazität und die Basensättigung der Bodenproben untersucht. Die Basensättigung entspricht dem Anteil der Kationen  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  und  $\text{Ca}^{2+}$  an der Kationenaustauschkapazität.



### 25691892 3 Probennahme

Die Entnahme der Bodenproben erfolgte am 16.10.2014 (Bohransatzpunkte 1 - 5) und am 22.10.2014 (Bohransatzpunkte 6 - 7). Die Probennahme wurde nach BBodSchV, Anhang 1, durchgeführt. Ausführende Bohrfirma war die Fa. Stölben.

Die Proben wurden aus ca. 30 cm Tiefe (B-Horizont) sowie ca. 1,0 und 1,5 m Tiefe (C-Horizont) entnommen. An den Waldstandorten werden in diesen Tiefenlagen der B- (30 cm) und der C-Horizont (1,0 und 1,5 m) angetroffen. An den Bohransatzpunkten 1, 2, 6 und 7 wurden zusätzlich noch die oberen 10 cm (A-Horizont) beprobt.

Die Bodenproben aus dem A und B-Horizont bzw. entsprechender Tiefenlage wurden mit dem Spaten als Flächenmischprobe gewonnen. Dazu wurde Bodenmaterial aus mehreren Ansatzpunkten vermischt. Die Proben aus dem C-Horizont wurden mit dem Lochspaten aus einer einzelnen Grabung entnommen (Abb. 1). Pro Entnahmehorizont wurde eine Entnahmemenge von 4 kg homogenem Probenmaterial benötigt. Größere Steine, Schotter oder Beimengungen wurden bereits vor Ort aussortiert.

Das mit Spaten bzw. Lochspaten entnommene Bodenmaterial wurde zur Ansprache in Kernkisten ausgelegt.



Abb. 1 Entnahme von Bodenmaterial mit dem Lochspaten

## 4 Profilansprache

Die Bodenansprache erfolgte nach der „Arbeitshilfe für die Bodenansprache im vor- und nachsorgenden Bodenschutz“ (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2009). Die für jedes Profil ausgefüllten Geländeformblätter finden sich in **Anlage 4**.

An den Standorten 1, 2 und 6 wurden natürliche Braunerden über Flusssanden angetroffen. Hier zeigte sich generell folgende Horizontabfolge:

- 0 - ca. 0,2 m: A<sub>h</sub>-Horizont, dunkelbraun, mittel – stark humos, carbonatfrei, schluffige Fein – Mittelsande, kiesführend,
- ca. 0,2 - 0,7 m: B<sub>v</sub>-Horizont, mittelbraun, schwach – mittel humos, carbonatfrei schluffige Feinsande, kiesführend,
- > 0,7 m: C<sub>n</sub>-Horizont, hellbraun – sehr hellbraun, humusfrei, carbonatfrei reine Sande, steinig, Flussschotter führend.

Die Standorte 3 und 4 liegen auf anthropogenen Auffüllungen und zeigten daher keine Horizontierung, die durch bodenbildende Prozesse entstanden ist. Natürlich anstehende Sedimente wurden bis zur Endbohrtiefe von 1,8 m nicht erreicht.

Der Standort 5 liegt in Höhe des Stadionbades am Fuße des Bahndammes unter einem Weg. An diesem Standort war bis ca. 30 cm eine humose und stark durchwurzelte Auflage zu erkennen. Ab ca. 80 cm wurden die natürlich anstehenden Flusssande erbohrt.

Auch am Standort 7 wurden entgegen den Erwartungen bis in ca. 1,6 m Tiefe Auffüllungen erbohrt. Die obersten 40 cm waren stark mit Steinen, Schottern und Ziegeln angereichert.

Im Folgenden werden die einzelnen Bohrprofile besprochen. Ergänzende Fotos der Probenahme finden sich in **Anlage 5**.

25691892 **Profil 1**

Der Bohransatzpunkt 1 befindet sich direkt am Böschungsfuß des an dieser Stelle ca. 4 – 5 m hohen Bahndammes (s. Anlage 3). Der Standort ist mit Brombeeren bewachsen und von Scheinakazien umsäumt.

Abb. 2 zeigt das in Kernkisten ausgelegte Bohrprofil. Bei ca. 20 – 25 cm Tiefe erfolgt der Übergang vom gut durchwurzelten  $A_h$ - zum B-Horizont. Bei ca. 40 cm unter GOK zeichnet sich eine Differenzierung des B-Horizontes in einen oberen etwas dunkleren Abschnitt (ca. 0,2 – 0,4 m, vermutlich durch Humusanreicherung bedingt) und einen unteren rötlich-mittelbraunen Abschnitt ab. Ab ca. 0,7 m unter GOK wurden humusfreie, hellbraune Sanden angetroffen, denen Flussschotter beigemengt sind. Ab ca. 1,4 m unter GOK ist eine violett-rötliche Marmorierung zu erkennen. Das gesamte Profil war carbonatfrei.



Abb. 2 Kernkiste Bohransatzpunkt 1 (- 0,2 m  $A_h$ , ~ 0,7 m  $B_v$ , > 0,7 m  $C_n$ )



25691892 **Profil 2**

Der Bohransatzpunkt 2 ist ca. 15 – 20 m vom Bahndamm abgerückt. Er soll als Referenzprobe für einen vom Bahnverkehr weitgehend unbeeinflussten Standort dienen. Der Standort ist von jüngeren Buchen bestanden und fast frei von Unterholz.

Am Bohransatzpunkt 2 wurde auf den oberen 20 cm ein stark durchwurzelter dunkelbrauner  $A_h$ -Horizont angetroffen. Diesem ist ein schwach durchwurzelter ca. 30 cm mächtiger B-Horizont unterlagert. In ca. 50 - 70 cm Tiefe folgt der Übergang zum C-Horizont. Dieser Übergangsbereich zeigt bereits Verbraunungsmerkmale, ist aber deutlich heller als der überlagernde B-Horizont.

In den oberen Lagen des C-Horizontes (ca. 0,7 – 0,9 m Tiefe) wurden Schotter > 15 cm erbohrt. Darunter finden sich wie am Standort 1 schotter- und kiesführende Sandlagen. Das gesamte Profil war carbonatfrei.



Abb. 3 Kernkiste Bohransatzpunkt 2 (- 0,2 m  $A_h$ , ~ 0,7 m  $B_v$ , > 0,7 m  $C_n$ )

25691892 **Profil 3**

Der Bohransatzpunkt 3 liegt auf einer mit Brombeeren und Gras bewachsenen Freifläche und ist ca. 3 m vom Schotterkörper der Bahngleise entfernt. Hier wurden bis in eine Endtiefe von 1,8 m unter GOK Auffüllungen erbohrt. In den oberen Dezimetern war der Aushub dunkelbraun und stark mit Bahnschottern durchsetzt. Ab ca. 40 cm bis in 90 cm Tiefe wurde eine schwarzbraune Lage mit Kohle- bzw. Aschebestandteilen angetroffen, die wiederum stark mit Schottern und kantigen Steinen durchsetzt war. Hierauf folgte bis in ca. 1,4 m Tiefe eine hellbraune fein – mittelsandige Lage und ab ca. 1,4 m Tiefe eine mittelbraune fein – mittelsandige Lage mit anthropogenen Beimengungen wie Schottern, Beton und Ziegeln. Das Profil war in allen Horizonten carbonatarm, d.h. zeigte eine schwache Reaktion auf die Zugabe von Salzsäure.



Abb. 4 Kernkiste Bohransatzpunkt 3 (Auffüllungen bis 1,8 m Tiefe)



**25691892 Profil 4**

Der Bohransatzpunkt 4 liegt ebenfalls ca. 3 m vom Schotterkörper der Bahngleise entfernt. Bis in 1,8 m Tiefe wurden nur anthropogene Auffüllungen erbohrt. Auf den ersten 70 cm war das Bodensubstrat dunkelbraun und mit pflanzlichem Material (Holzstückchen, Ästchen) und kleineren Schuttbestandteilen durchmischt. Ab 0,7 m nahm der Anteil anthropogenen Beimengungen zu. Es wurden u.a. Ziegel, Glasscherben, Kohlestückchen, Fliesen, ein Nagel, Betonbruchstücke und eine Suppenkelle erbohrt (s. Anlage 5). In einer Tiefe von ca. 1,0 – 1,4 m befanden sich größere Schuttbrocken und Ziegel.

Das Profil war über die gesamte Tiefe carbonathaltig.



Abb. 5 Kernkiste Bohransatzpunkt 4 (Auffüllungen bis 1,8 m Tiefe)

**25691892 Profil 5**

Profil 5 liegt im Süden des Gleisdreiecks. Der bei der Begehung vom 19.08.14 markierte Bohr-ansatzpunkt befindet sich direkt am Fuße der Böschung zum Bahndamm, am Rande des Verbindungsweges zwischen der Mörfelder Landstraße und der Commerzbank Arena. Hier wurden jedoch bei der Probennahme in ca. 1 m Tiefe Kabelstränge entdeckt, die vermutlich längs des Weges verlaufen. Der Bohransatzpunkt wurde daher um ca. 2 m in die Mitte des Weges versetzt (s. Anlage 5). Der oberste Meter beider Bohrungen war vom Substrat her sehr ähnlich.

Die obersten 35 cm der Bohrung bestehen jeweils aus einer stark humosen und gut durchwurzelten mittelbraune Bodenlage. Darunter befindet sich bis in ca. 80 cm Tiefe eine Bodenlage, die eine ähnliche Substratgröße zeigt, jedoch etwas heller und humusärmer ist. Es wird vermutet, dass bis in diese Tiefe das Bodenmaterial aufgefüllt bzw. durch den Wegbau und das Verlegen von Kabeln umgelagert wurde.



Abb. 6 Kernkiste Bohransatzpunkt 5 (- 0,8 m Auffüllungen, > 0,8 m C<sub>n</sub>)

Ab 80 cm Tiefe wurden reine Sande erbohrt, von Steinen und ab ca. 1,5 m Tiefe von größeren Flussschottern durchsetzt waren. Die Sande waren von 0,8 – ca. 1,3 m rötlich marmoriert.



25691892 Das Bodensubstrat war bis in 80 cm Tiefe carbonatarm. Die Sande (> 80 cm ) waren carbonatfrei.

### Profil 6

Der Bohransatzpunkt 6 liegt auf einer Höhenlage mit dem Gleisbett am Waldrand, ca. 3 m vom Schotterkörper entfernt. Er ist mit einer dichten Grasnarbe bewachsen. Das Bohrprofil zeigt auf den obersten 5 – 10 cm einen geringmächtigen, gut durchwurzelten  $A_h$ -Horizont und darunter einen ca. 20 – 30 cm mächtigen  $B_v$ -Horizont. Das Substrat der oberen Dezimeter wies viel Feinsubstanz auf und wird als schluffiger – stark schluffiger Feinsand angesprochen. Ab 40 – 50 cm Tiefe wurde der C-Horizont erbohrt, der mit kleinen gerundeten Steinen und ab 1,3 m Tiefe mit größeren Flusschottern durchsetzt war (Anlage 5). Das gesamte Bohrprofil war carbonatfrei.



Abb. 7 Kernkiste Bohransatzpunkt 6 (- 0,1 m  $A_h$ , - 0,4 m  $B_v$ , > 0,4 m  $C_n$ )



**25691892 Profil 7**

Im Bohrprofil 7 wurden entgegen den Erwartungen bis in ca. 1,5 m Tiefe Auffüllungen erbohrt. Der Standort ist mit Gras bewachsen. Er liegt wie der Bohransatzpunkt 6 in einer Höhe mit dem Gleisbett auf einer kleinen Schneise am Waldrand. Diese dient bzw. diente jedoch vermutlich als Zuweg zu den Gleisen. Vor allem der oberste halbe Meter des Bohrprofils 7 war stark mit Bahnschottern und Steinen durchsetzt. Es wurde u.a. auch ein größeres Ziegelstück erbohrt (s Anlage 5 und Abb. 8). Bis in ca. 1,5 m Tiefe wurden weiterhin Auffüllungen angetroffen, die überwiegend kleinere Beimengungen (Kiese und Steine < 10 cm) enthielten. Ab 1,5 m Tiefe wurden hellbraune Sande erbohrt, die als natürlicher C-Horizont angesehen werden.

Die Bodenprobe aus 0,4 m Tiefe zeigte eine schwache Reaktion auf Salzsäure. Die übrigen Proben des Bohrprofils waren carbonatfrei.



Abb. 8 Kernkiste Bohransatzpunkt 7 (- 1,5 m Auffüllungen, > 1,5 m C<sub>n</sub>)

## 5 Analyseergebnisse

Alle Analyseergebnisse finden sich in **Anlage 6**. Die Bodenproben wurden aus ca. 30 cm ( $B_v$ ), 1 m ( $C_{oben}$ ) und 1,5 m ( $C_{unten}$ ) Tiefe entnommen, an den Bohransatzpunkten 1, 2, 6 und 7 zusätzlich auch aus den obersten 10 cm ( $A_h$ ). Nachfolgend werden diese Proben einheitlich immer mit den Kürzeln  $A_h$ ,  $B$ ,  $C_{oben}$  und  $C_{unten}$  bezeichnet, auch wenn diese Ansprache für die Auffüllungen nicht korrekt ist. In den Prüfberichten der Anlage 6 werden die Proben folgendermaßen bezeichnet  $A_h$ ,  $B_{oben}$  (30 cm Entnahmetiefe),  $B_{mitte}$  (1 m Entnahmetiefe) und  $B_{unten}$  (1,5 m Entnahmetiefe).

### 5.1 Physikalisch-chemische Eigenschaften

Es wurden die Parameter Trockenmasse, gesamter organischer Kohlenstoff (TOC), pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit untersucht.

Der Anteil der Trockenmasse der untersuchten Bodenproben liegt generell zwischen 83 und 98 %. Nur in der Probe Profil 2 -  $A_h$  wird ein deutlich niedrigerer Wert von 60,5 % gemessen, der auf den beschatteten feuchten Standort und auf einen hohen Anteil humoser organischer Substanz zurückzuführen ist. Die Bodenprobe war stark durchwurzelt, vermutlich wurde darüberhinaus bei der Probennahme auch ein gewisser Anteil des Auflagehorizontes mit erfasst. Der TOC-Wert dieser Probe liegt bei 16,5 %.

In den übrigen Proben liegt der TOC deutlich niedriger mit Werten zwischen  $< 0,1$  % (v.a. in den tiefen humusfreien Horizonten) und 3,4 % (Abb. 9). Eine Ausnahme bildet neben der Probe Profil 2 -  $A_h$  der anthropogen überprägten Standort 3. Hier wird im Horizont  $B_{oben}$  ein erhöhter TOC-Gehalt von 7 % festgestellt.

Abb. 10 zeigt die elektrische Leitfähigkeit der Bodenproben. Hier zeigt sich deutlich ein qualitativer Unterschied zwischen den Auffüllungen (Profil 3 und 4) und den übrigen Entnahmeorten. Die elektr. Leitfähigkeit nimmt bei Profil 3 Werte von 36 – 71  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , bei Profil 4 Werte von 85 – 133  $\mu\text{S}/\text{cm}$  an. An den übrigen Standorten ist mit Ausnahme der Probe Profil 2 -  $A_h$  die Leitfähigkeit  $< 30$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Die relativ hohe Leitfähigkeit der Probe Profil 2 -  $A_h$  ist wiederum im Zusammenhang mit dem hohen Gehalt an organischer Substanz und damit auch an Huminsäuren zu sehen. Die Gehalte der Hauptanionen und -kationen dieser Probe bewegen sich in der gleichen Größenordnung wie sie auch an den anderen Waldstandorten gemessenen wurden. An den anthropogen überprägten Standorten fallen v.a. hohe Gehalte an Calcium, Kalium und Sulfat auf (Anlage 6).

Auch an der Bodenreaktion ist der Unterschied zwischen den unbeeinflussten Standorten unter Wald und den anthropogen überprägten Standorten gut zu erkennen. Die Bodenproben der Waldstandorte haben pH-Werte von 4,5 - 6 und sind damit als stark – mäßig sauer zu bezeichnen. In diesem pH-Bereich ist zum einen die Silikatverwitterung als Puffersysteme wirksam, was sich auch in der Verlehmung und Verbraunung des B-Horizontes zeigt. Zum anderen wirken die negativ geladenen Austauscheroberflächen von Tonmineralien, organischer Substanz, Oxiden

25691892 und Hydroxiden als Puffer für eine Protonenzufuhr (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005). Die generell noch hohe Basensättigung am Standort deutet daraufhin, dass dieses Puffersystem noch nicht erschöpft ist (s. Kapitel 5.2).

Die anthropogen überprägten Standorte 3, 4, 5 und 7 haben mit Ausnahme des B-Horizontes im Profil 5 pH-Werte  $> 6$ , am Standort 4 sogar  $> 8$ . In diesem pH-Bereich ist das Carbonatpuffersystem wirksam. Entsprechend finden sich in den Eluatzen dieser Standorte hohe  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentrationen  $> 10 \text{ mg/l}$  mit einem Maximalwert von  $64 \text{ mg/l}$  im Profil 4 (Anlage 6).

Nach den digitalen Bodenflächendaten 1:50.000 (BFD 50) ist die Absenkung des pH-Wertes auf eine Tiefe bis ca. 0,5 m unter GOK beschränkt. Bei der gegebenen vertikalen Auflösung der Beprobung ist keine Versauerungsfront in den untersuchten Bodenprofilen zu erkennen.

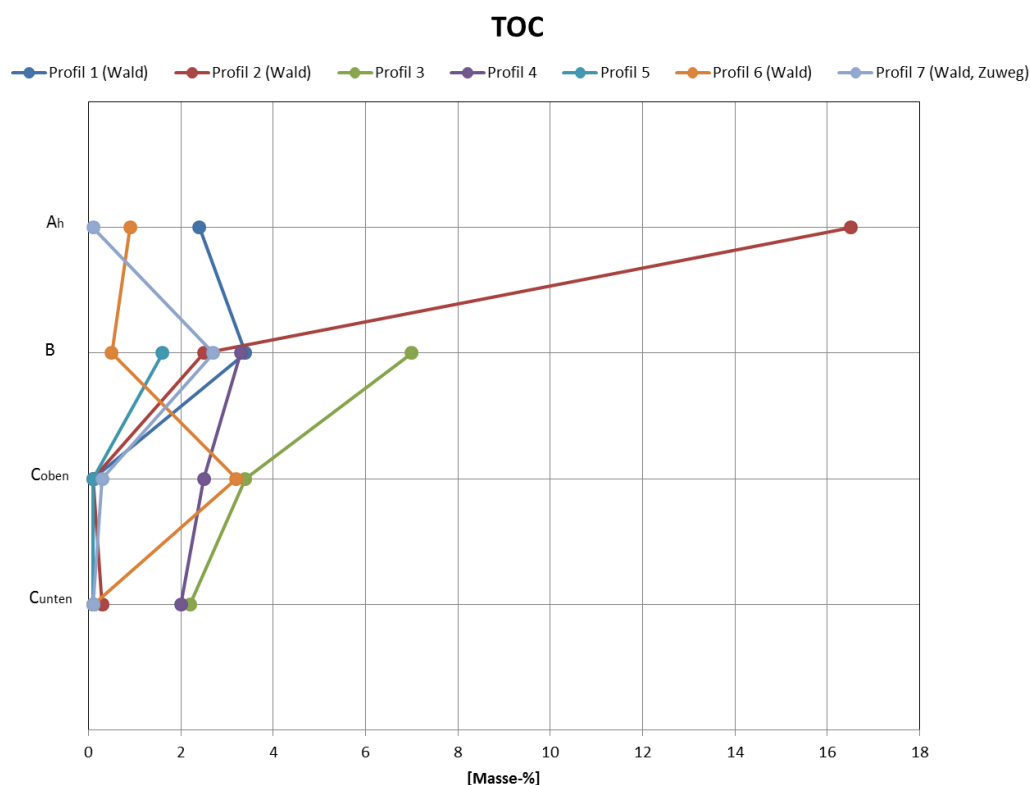


Abb. 9 TOC-Gehalte der Bodenproben

25691892

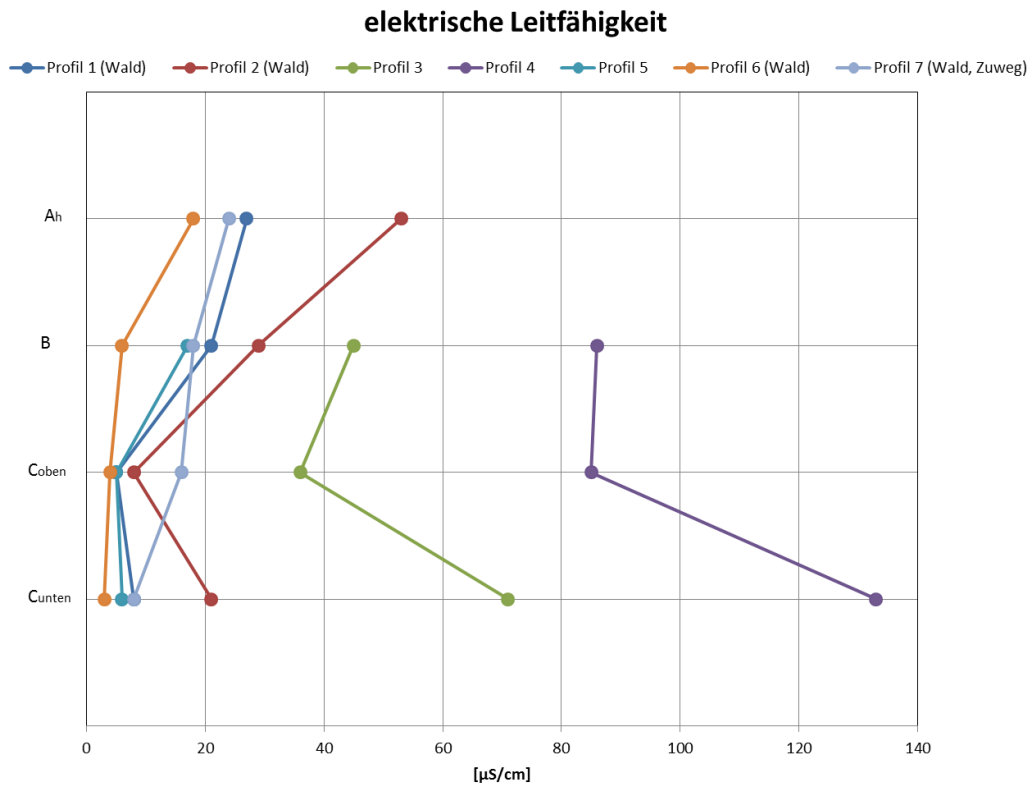


Abb. 10 Elektrische Leitfähigkeit der Bodenproben

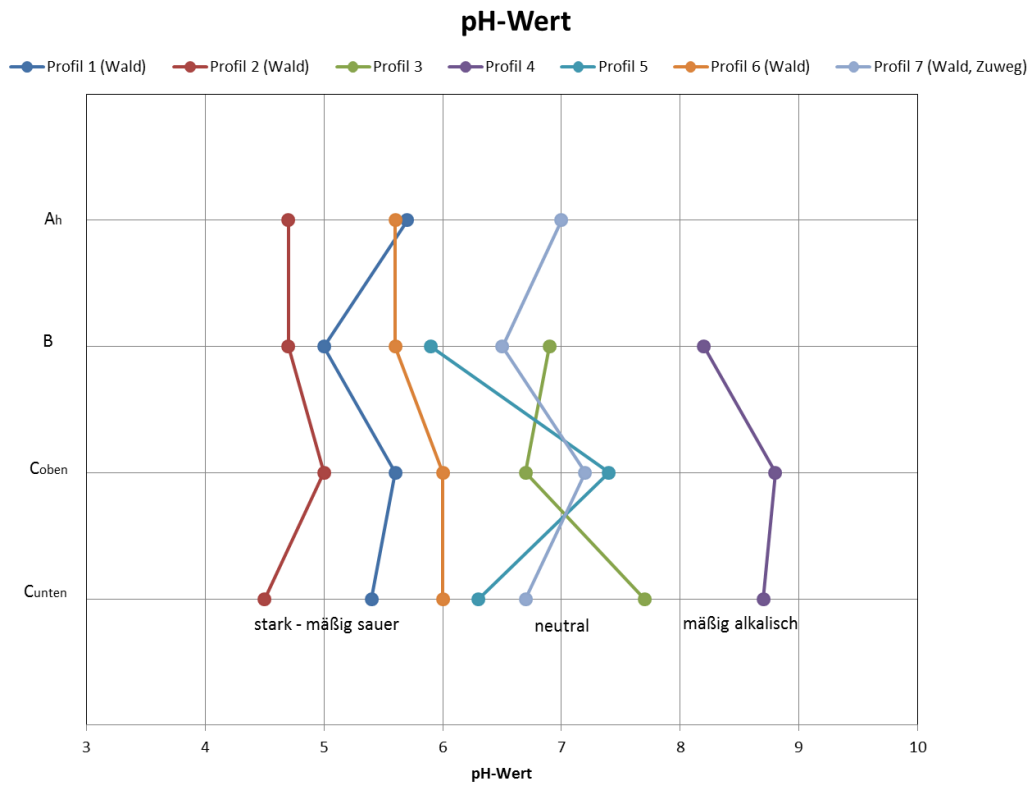


Abb. 11 pH-Werte der Bodenproben, Einstufung der Bodenreaktion nach SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL (2013)

## 5.2 Säureneutralisationskapazität, Kationenaustauschkapazität und Basensättigung

Die Säureneutralisationskapazität (SNK) bezeichnet die Fähigkeit eines Bodens, einen Säureeintrag abzupuffern. Das bedeutet, dass trotz eines Säureeintrags der pH-Wert der Bodenlösung konstant bleibt oder sich in geringerem Maße verändert als es dem Säureeintrag entspricht. Im Boden sind verschiedene Puffersysteme wirksam, u.a. die Pufferung durch Carbonate, die Pufferung durch negativ geladene Oberflächen (z.B. an Tonmineralen, Oxiden und Hydroxiden und Huminstoffen) und die Pufferung durch Silikatverwitterung. Allen Puffersystemen gemeinsam ist ihre Fähigkeit freie Protonen zu binden (SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL, 2013).

Die Bodenversauerung ist in humiden Klimaten ein natürlicher Prozess der Bodenbildung. Der Säureeintrag in den Boden erfolgt zum einen über den Niederschlag. Auch ohne anthropogene Säureeinträge ist natürliches Regenwasser wegen des gelösten Kohlendioxids bereits leicht sauer. Durch die Emission von Stickoxiden und Schwefeldioxyden wird in industriellen Regionen der pH-Wert jedoch noch weiter abgesenkt. In Frankfurt hat das Regenwasser derzeit einen pH-Wert von ca. 5,2, in den frühen 1980er Jahren lag der pH bei 4,3 (Quelle: Internetseiten des DWD). Wegen der ständigen Zufuhr von Protonen durch den Niederschlag nimmt in humiden Klimabereichen die SNK der Böden daher natürlicherweise kontinuierlich ab.

Bei den ermittelten Werten der SNK zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Auffüllungen und den Waldstandorten. Erwartungsgemäß sticht das Bodenprofil 4 mit sehr hohen Messwerten heraus (1930 mmol/kg im Horizont  $C_{oben}$  und 4760 mmol/kg im Horizont  $C_{unten}$ ). Dies entspricht der alkalischen Reaktion der Bodenlösung ( $pH > 8$ ). Im Diagramm in Abb. 12 sind diese beiden Messwerte nicht dargestellt. Die übrigen dargestellten Messwerte zeigen, dass an den Waldstandorten (Profil 1, 2, 6 und 7) die SNK im  $A_h$ -Horizont wegen der Pufferwirkung der organischen Substanz (Huminstoffe) deutlich höher ist als in den tieferen Horizonten. Sie liegt an den Standorten 1, 5 und 6 über 500 mmol/kg (Abb. 12).

In den tieferen Horizonten der Waldstandorte ist die SNK geringer mit Werten, die generell  $\leq 250$  mmol/kg und punktuell  $\leq 25$  mmol/kg sind.

Am Standort 2 wird mit 150 mmol/kg im  $A_h$ -Horizont ein deutlich geringerer Wert der SNK ermittelt als in den anderen Proben. Dies wird jedoch v.a. auf den niedrigeren Anteil an Festsubstanz in der Bodenprobe zurückgeführt. Die SNK wird am feldfeuchten und nicht am getrockneten Boden bestimmt. Die Probe Profil 2 -  $A_h$  besitzt nur einen Trockensubstanzanteil von 60,5 Masse-%, alle anderen Bodenproben dahingegen einen Trockensubstanzanteil  $> 80$  Masse-% (Anlage 6).

Im Folgenden wird überschlägig berechnet, über welchen Zeitraum die ermittelte Pufferkapazität der Waldstandorte ausreicht, um den atmosphärischen Säureeintrag abzupuffern. Der  $A_h$ -Horizont wird hierfür mit einer Mächtigkeit von 0,1 m angesetzt.



25691892

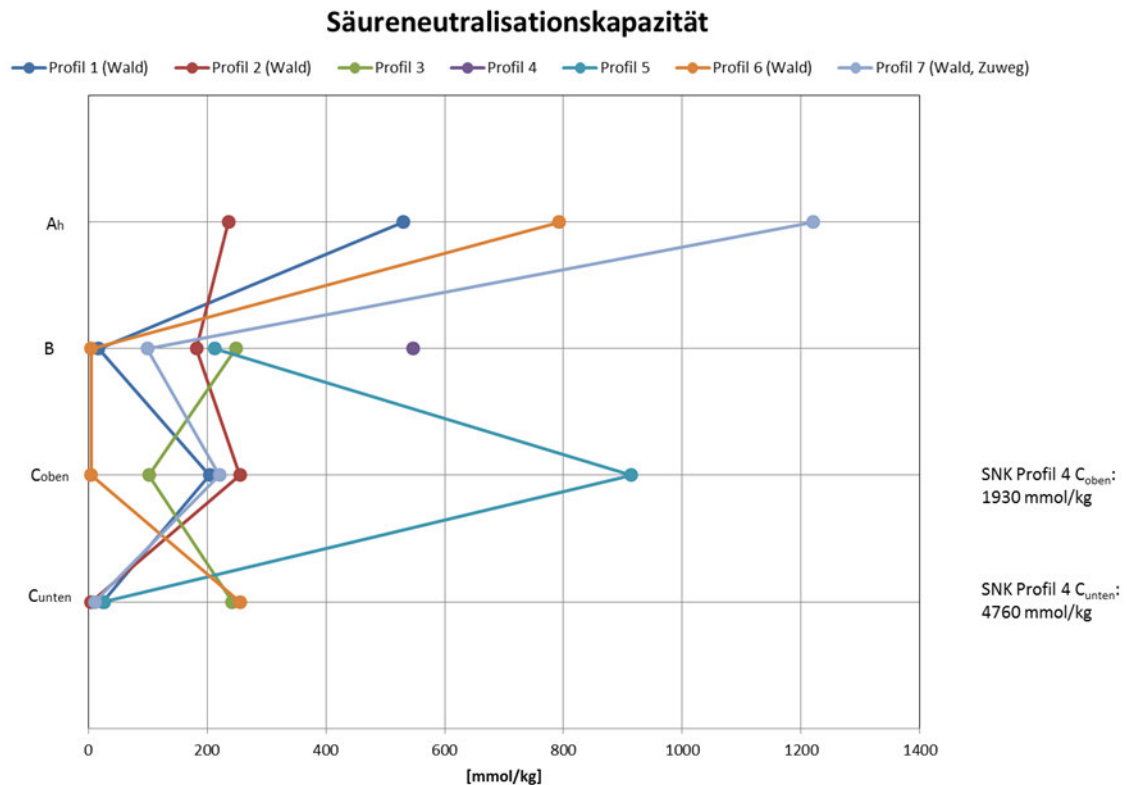


Abb. 12 Säureneutralisationskapazität der Bodenproben

Bei einer Lagerungsdichte von  $1,4 \text{ g/cm}^3$  bzw.  $1400 \text{ kg/m}^3$  besitzt eine Fläche von einem Hektar ein Bodenvolumen von  $1000 \text{ m}^3$  und eine Bodenmasse von  $1,4 \cdot 10^6 \text{ kg}$ . Bei einer SNK von  $250 \text{ mmol/kg}$  stellt diese Bodenmasse eine gesamte Säureneutralisationskapazität von  $3,5 \cdot 10^5 \text{ mol}$  bzw.  $350 \text{ kmol}$  bereit. Nach SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL (2013) beträgt die gesamte jährliche  $\text{H}^+$ -Zufuhr (unter Berücksichtigung von  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HNO}_3$  und  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) durch Niederschläge in Deutschland zwischen  $<1$  und  $5 \text{ kmol/ha}$ . Dies bedeutet, dass die derzeitige SNK im oberen humosen Horizont ausreicht, den atmosphärischen Säureeintrag über die nächsten Jahrzehnte hinweg abzuf puffern. In den tieferen, rein sandigen Horizonten würde dahingegen ein entsprechender Säureeintrag in wenigen Jahren zu einer Versauerung des Bodens führen.

Da sich die Säurebildner im Regenwasser teilweise gegenseitig neutralisieren (Stickoxide, Schwefeldioxid und Ammonium) bzw. durch andere Inhaltsstoffe des Regenwassers neutralisiert werden, ist die Gesamtsäuredeposition deutlich größer als der aus dem pH-Wert des Regenwassers, also den freien Protonen, berechnete  $\text{H}^+$ -Eintrag (APPELO, C.A.J., POSTMA, D., 2010).

Während der Versauerung eines Bodens verändert sich die Belegung der negativ geladenen Austauscheroberflächen eines Bodens. Die Summe aller negativ geladenen Oberflächen eines Bodens, d.h. die Summe aller Kationen, die dieser Boden adsorbieren könnte, wird als Kationenaustauschkapazität bezeichnet. Diese Oberflächen, z.B. von Tonmineralien, Oxiden und Hydroxiden sind zunächst v.a. mit  $\text{Ca}^{2+}$  und in geringerem Maße mit  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  und  $\text{Na}^+$  belegt.

Bei abnehmendem pH-Wert werden diese als Basen-Kationen bezeichneten Kationen von den Austauscheroberflächen verdrängt und durch  $H^+$  und bei pH-Werten  $\leq 4,5$  auch durch  $Al^{3+}$  ersetzt. Der prozentuale Anteil der Basen-Kationen an der Kationenaustauschkapazität wird als Basensättigung bezeichnet und ist ein Anzeichen dafür, wie weit die Versauerung des Bodens schon fortgeschritten ist, aber auch darüber, wie gut ein weiterer Säureeintrag abgepuffert werden kann.

Nach den Untersuchungen vom Fresenius-Institut war die Basensättigung generell hoch und mit Ausnahme des Standortes 2  $> 80\%$ . Im Profil 2 mit den niedrigsten pH-Werten nahm die Basensättigung Werte zwischen  $20\%$  im B-Horizont und  $60 - 70\%$  im C-Horizont an (Anlage 6).

Abb. 13 zeigt die effektive Kationenaustauschkapazität der Bodenproben, d.h. die beim vorliegenden pH-Wert tatsächlich vorhandene Austauschkapazität. Sie ist erwartungsgemäß an den Auffüllungen (Profil 3 und 4 sowie Profil 5 und Profil 7 obere Horizonte) deutlich höher als an den natürlichen Standorten.

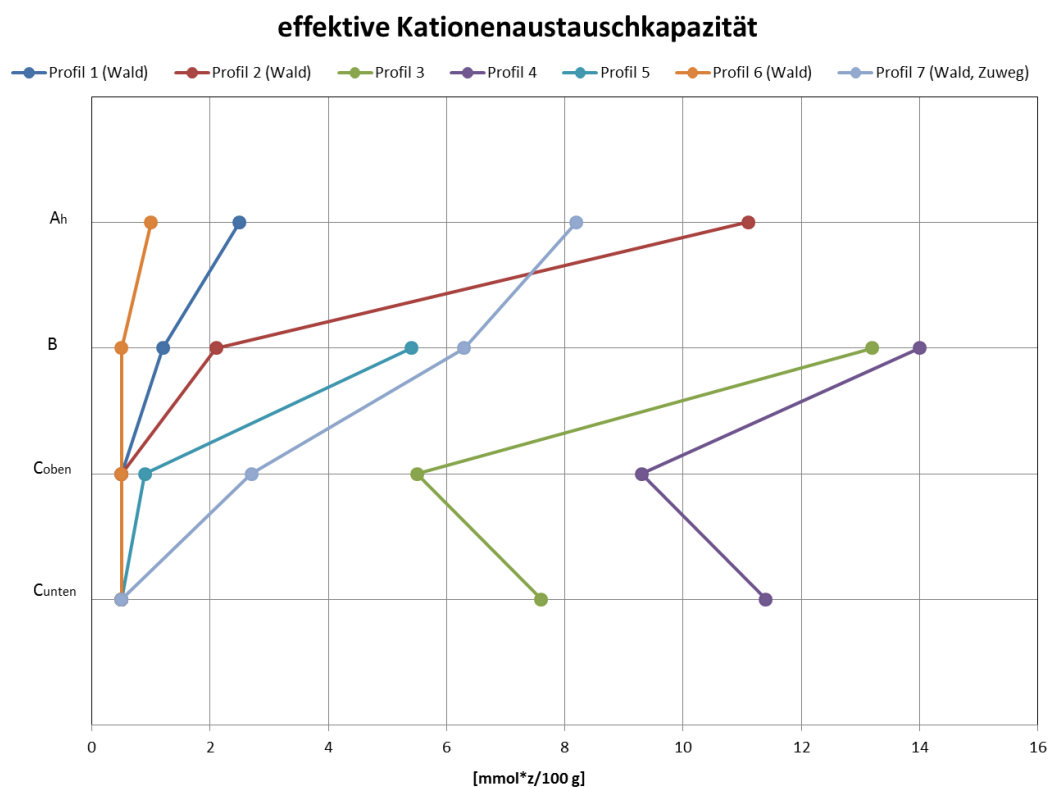


Abb. 13 Kationenaustauschkapazität der Bodenproben

An den Waldstandorten ist die  $KAK_{eff}$  im  $A_h$ -Horizont wegen des hohen Austauschvermögens von Humus wiederum deutlich höher als in den tieferen Horizonten. Daher rührt auch der sehr hohe Messwert des  $A_h$ -Horizontes im Profil 2. Im B- und C-Horizont der natürlichen Böden wurden dem sandigen Substrat entsprechend geringe Werte für  $KAK_{eff} \leq 2 \text{ mmol}/100\text{g}$  bzw.  $\leq 2 \text{ cmol}/\text{kg}$  ermittelt.

### 25691892 5.3 Kohlenwasserstoffe und PAK

#### Feststoffuntersuchung

Tab. 1 fasst die Analyseergebnisse der Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen (KW) im Feststoff zusammen, Tab. 2 die der Untersuchungen auf PAK im Feststoff.

Der Vorsorgewert für PAK bei Böden mit einem Humusgehalt  $\leq 8\%$  liegt nach BBodSchV bei 3 mg/kg. Für die Gruppe der Kohlenwasserstoffe (KW) ist in der BBodSchV kein Vorsorgewert vorgegeben. In Tab. 2 sind alle Werte gelb hinterlegt, die den Vorsorgewert der BBodSchV für PAK überschreiten.

Tab. 1 KW-Index ( $C_{10} - C_{40}$ ) im Feststoff [mg/kg TR]

	A <sub>h</sub>	B	C <sub>oben</sub>	C <sub>unten</sub>
Profil 1 (Wald)	95	93	< 10	< 10
Profil 2 (Wald)	680	140	< 10	< 10
Profil 3	/	150	180	790
Profil 4	/	250	110	270
Profil 5	/	78	< 10	< 10
Profil 6 (Wald)	26	11	200	< 10
Profil 7 (Wald, Zuweg)	< 10	190	< 10	< 10

Tab. 2 PAK nach EPA im Feststoff [mg/kg TR]

	A <sub>h</sub>	B	C <sub>oben</sub>	C <sub>unten</sub>
Profil 1 (Wald)	n.b	n.b	n.b	0,64
Profil 2 (Wald)	0,51	n.b	n.b	n.b
Profil 3	/	1,81	2,42	16,70
Profil 4	/	8,63	10,74	37,08
Profil 5	/	1,78	n.b	0,16
Profil 6 (Wald)	n.b	n.b	3,93	n.b
Profil 7 (Wald, Zuweg)	n.b	3,25	n.b	n.b

n.b nicht bestimmbar

Deutliche Überschreitungen der Vorsorgewerte für die PAK und hohe KW-Konzentrationen wurden in den Auffüllungen (Profil 3 und Profil 4) festgestellt. Sie sind auch darauf zurückzuführen, dass Verbrennungsrückstände mitverfüllt wurden. Bei der Bodenansprache wurden explizit Holzkohlestückchen und Aschebestandteile erwähnt.



25691892 Geringere Überschreitungen des Vorsorgewertes für PAK wurden an den Waldstandorten Profil 6 und 7 festgestellt.

Auffällig ist der hohe Messwert für KW von 680 mg/kg TR in der Probe Profil 2 - A<sub>h</sub>. Dieser entspricht vermutlich nicht einer besonders hohen Belastung, sondern ist durch den sehr hohen TOC-Gehalt dieser Probe und die bevorzugte Adsorption von Kohlenwasserstoffen an die organische Substanz bedingt.

Die Profile 1 und 5 sind bzgl. der Belastung mit PAK und KW unauffällig.

#### Eluatuntersuchung

Eine Verlagerung von der Festsubstanz in die Bodenlösung konnte für die PAK nicht festgestellt werden. In keiner Bodenprobe waren PAK im Eluat bestimmbar.

Kohlenwasserstoffe (KW) wurden nur am Standort 3 im obersten Horizont („B“, 30 cm Tiefe) in einer Konzentration von 0,2 mg/l bestimmt, was dem Prüfwert zur Beurteilung des Wirkungspfad des Boden – Grundwasser nach BBodSchV entspricht. Der Prüfwert der BBodSchV gilt jedoch nicht für die gesamte Bodenzone, sondern für den Übergangsbereich zwischen ungesättigter und gesättigter Zone (Ort der Beurteilung). Wegen der hohen Flurabstände im Untersuchungsgebiet liegt dieser Ort der Beurteilung ca. 8 - 10 m unter den beprobten Horizonten.

## **5.4 Pestizide**

Bei der Bestimmung der Pestizide aus einem Säuleneluat (DIN 19528) wurden nur im Profil 6 nachweisbare Konzentrationen eines Wirkstoffs bzw. Metabolits festgestellt. Es handelte sich dabei um die Substanz AMPA, das Hauptabbauprodukt des Wirkstoffs Glyphosat.

AMPA wurde in Profil 6 im A<sub>h</sub>-Horizont in einer Konzentration von 0,37 µg/l und im B-Horizont mit einer Konzentration von 0,08 µg/l bestimmt. Der GFS-Wert im Grundwasser für einen Einzelstoff aus der Gruppe der Pflanzenschutzmittel und Biozidprodukte beträgt 0,1 µg/l.

In den anderen Bodenproben konnte keine der untersuchten Substanzen nachgewiesen werden (s. Pestizidliste in Kapitel 2.3).

## **5.5 Schwermetalle**

#### Feststoffuntersuchung

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Schwermetallen im Feststoff wurden zunächst bzgl. der Vorsorgewerte der BBodSchV ausgewertet. Folgende Metalle sind mit Vorsorgewerten belegt: Cd, Pb, Cr, Cu, Hg, Ni und Zn. Die entsprechenden Messwerte finden sich nach Profilen geordnet in Tab. 3 - Tab. 6.

Tab. 3 zeigt die Messwerte der Waldstandorte Profil 1 und 2. Überschreitungen der Vorsorgewerte treten für Pb, Cu, Ni und Zn überwiegend im A<sub>h</sub>-Horizont, am Standort 1 nur für Zn auch im B-Horizont auf.

25691892 Tab. 4 zeigt die Messergebnisse der Standorte 3 und 4, die auf anthropogenen Auffüllungen liegen. An beiden Standorten werden über die gesamte Profiltiefe die Vorsorgewerte der BBodSchV deutlich überschritten. Hiervon sind alle aufgeführten Schwermetalle betroffen. Die auffälligsten Überschreitungen der Vorsorgewerte um den Faktor 10 – 20 ergeben sich für Blei. Bei Kupfer und Zink werden die Vorsorgewerte um bis zum Achtfachen überschritten.

An den Standorten 5 und 6 werden Überschreitungen der Vorsorgewerte nur im A<sub>h</sub>-Horizont festgestellt. Diese Überschreitungen betreffen alle aufgeführten Schwermetalle mit Ausnahme von Cadmium. Die Messwerte liegen generell deutlich niedriger als in den Profilen 3 und 4.

Profil 7 liegt unter einem Zuweg. Hier finden sich mit Ausnahme von Cd für alle Schwermetalle Überschreitungen der Vorsorgewerte in den beiden oberen Horizonten A<sub>h</sub> und B. Deutliche Überschreitungen der Vorsorgewerte um einen Faktor 5 - 10 resultieren für Quecksilber und Nickel.

Die höchsten Arsenkonzentrationen werden im Profil 2- A<sub>h</sub>-Horizont (12 mg/kg TR) sowie im Profil 4 in 1 – 1,5 m Tiefe (11 – 13 mg /kg TR) gemessen. Die Thalliumkonzentrationen im Feststoff betragen bei allen Bodenproben ≤ 0,2 mg/kg TR.

Tab. 3 Messwerte von Schwermetallen im Feststoff in Profil 1 und 2 [mg/kg TR]

Vorsorgewerte nach BBodSchV		Profil 1				Profil 2			
		A <sub>h</sub>	B	C <sub>oben</sub>	C <sub>unten</sub>	A <sub>h</sub>	B	C <sub>oben</sub>	C <sub>unten</sub>
Blei	40	14	25	3	4	110	15	3	6
Cadmium	0,4	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Chrom	30	11	14	4	4	19	15	6	9
Kupfer	20	31	12	3	6	49	9	5	8
Nickel	15	10	14	4	4	17	14	6	11
Quecksilber	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,4	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Zink	60	230	68	10	11	67	40	13	22

25691892 Tab. 4 Messwerte von Schwermetallen im Feststoff in Profil 3 und 4 [mg/kg TR]

Vorsorgewerte nach BBodSchV		Profil 3			Profil 4		
		B	C <sub>oben</sub>	C <sub>unten</sub>	B	C <sub>oben</sub>	C <sub>unten</sub>
Blei	40	70	49	430	83	620	830
Cadmium	0,4	0,4	0,2	0,5	0,3	0,5	0,6
Chrom	30	110	16	14	46	20	22
Kupfer	20	170	64	170	57	36	41
Nickel	15	47	20	13	40	22	23
Quecksilber	0,1	0,3	0,4	0,9	0,4	0,3	0,1
Zink	60	220	93	400	190	500	510

Tab. 5 Messwerte von Schwermetallen im Feststoff in Profil 5 und 6 [mg/kg TR]

Vorsorgewerte nach BBodSchV		Profil 5			Profil 6			
		B	C <sub>oben</sub>	C <sub>unten</sub>	A <sub>h</sub>	B	C <sub>oben</sub>	C <sub>unten</sub>
Blei	40	57	5	6	17	13	3	3
Cadmium	0,4	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Chrom	30	24	8	7	52	10	3	7
Kupfer	20	41	10	6	33	14	3	4
Nickel	15	26	9	7	59	12	3	5
Quecksilber	0,1	0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Zink	60	63	15	13	36	28	6	7

Tab. 6 Messwerte von Schwermetallen im Feststoff in Profil 7 [mg/kg TR]

Vorsorgewerte nach BBodSchV		Profil 7			
		A <sub>h</sub>	B	C <sub>oben</sub>	C <sub>unten</sub>
Blei	40	110	67	9	5
Cadmium	0,4	0,4	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Chrom	30	96	27	14	6
Kupfer	20	87	52	7	4
Nickel	15	150	34	13	5
Quecksilber	0,1	0,5	1,1	< 0,1	< 0,1
Zink	60	110	70	20	7

#### 25691892 Eluatuntersuchung

In der BBodSchV werden für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser für mehr Schwermetalle Prüfwerte im Eluat vorgegeben als mit Vorsorgewerten bzgl. des Gehaltes im Feststoff belegt sind (s. oben). Die folgenden Schwermetalle sind mit einem Prüfwert belegt:

Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Mb, Ni, Hg, Se, Zn und Sn.

Eine Überschreitung eines Prüfwertes für den Wirkungspfad Boden – Grundwasser nach BBodSchV wurde nur in einer einzigen Probe festgestellt. Dies ist im Profil 5 in 30 cm Tiefe der Blei-Messwert von 27 µg/l. Der Prüfwert für Blei beträgt 25 µg/l.

Darüberhinaus wurde im Profil 5 ebenfalls in 30 cm Tiefe der Prüfwert für Antimon (10 µg/l) erreicht, im Profil 3 in 30 cm Tiefe der Prüfwert für Kupfer (70 µg/l). In allen anderen Proben sowie in den gesamten Profilen 1, 2, 6 und 7 lagen alle Messwerte der in der BBodSchV aufgeführten Schwermetalle unterhalb der Prüfwerte.

Thallium und Bor waren in keiner Probe im Eluat bestimmbar. Vanadium wurde in den Profilen 5 – 7 in Konzentrationen von 6 – 21 µg/l bestimmt. Für Vanadium existiert kein Prüfwert in der BBodSchV, der Geringfügigkeitsschwellenwert (GFS-Wert) im Grundwasser nach der Verwaltungsvorschrift zur Erfassung, Bewertung und Sanierung von Grundwasserverunreinigungen liegt bei 4 µg/l (GWS-VwV, HESSISCHER STAATSANZEIGER vom 07.03.2011).

## 25691892 6 Bewertung

Die bodenchemischen Untersuchungen an sieben Bodenprofilen belegen einen klaren Unterschied zwischen den natürlichen Standorten (Profile 1, 2 und 6) und den Auffüllungen (Profil 3 und 4 sowie Profil 5 und Profil 7, obere Horizonte). Dieser Unterschied zeigt sich bereits in den physikalisch-chemischen Eigenschaften (elektr. Leitfähigkeit und pH-Wert, Abb. 10 - Abb. 11). Er ist aber ebenso deutlich in der stofflichen Belastung des Feststoffs der Bodenproben zu erkennen (Tab. 1- Tab. 6).

In den Profilen 3 und 4 werden im Feststoff über die gesamte Profiltiefe, in Profil 5 und 7 in den aufgefüllten Horizonten die Vorsorgewerte der BBodSchV für Pb, Cu, Ni, Hg und Zn - zum Teil um ein Vielfaches - überschritten. Ebenso ergeben sich an den genannten Profilen in einzelnen Horizonten Überschreitungen der Vorsorgewerte für Cd und Cr.

Die PAK-Konzentrationen im Feststoff liegen in Profil 4 über die gesamte Profiltiefe über dem Vorsorgewert der BBodSchV, in Profil 3 im untersten Horizont ( $C_{\text{unten}}$ ) und im Profil 7 in ca. 30 cm Tiefe („B-Horizont“). Kohlenwasserstoffe ( $C_{10}$ - $C_{40}$ ) sind in der BBodSchV nicht mit einem Vorsorgewert belegt.

Da der Schadstoffeintrag mit dem Einbau von belastetem Material erfolgte, ist weder bei den organischen Schadstoffen noch bei den Schwermetallen in der Schadstoffverteilung ein einheitliches Verteilungsmuster zu erkennen.

Bei den natürlichen Böden in Profil 1, 2 und 6 zeigt sich ein völlig anderes Belastungsbild. Stoffliche Belastungen im Feststoff über den Vorsorgewerten sind hier fast ausschließlich im  $A_h$ -Horizont festzustellen, was auf einen atmosphärischen Eintrag zurückzuführen ist.

In den C-Horizonten der genannten Profile, ebenso wie in den C-Horizonten von Profil 5 und 7, werden die Vorsorgewerte der BBodSchV für Schwermetalle im Feststoff in keiner Probe erreicht. Im B-Horizont ergibt sich nur in einer Probe (Profil 1) eine geringfügige Überschreitung des Vorsorgewertes für Zink (Vorsorgewerte 60 mg/kg TR, Messwert 68 mg/kg TR).

Eine Hintergrundbelastung von Schwermetallen und PAK wird im Untersuchungsgebiet durch atmosphärische Deposition hervorgerufen. Potentielle Emittenten sind neben Industrieanlagen und Straßenverkehr auch der Flugbetrieb (DEUTSCHER BUNDESTAG, 2012). In SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL (2013) werden für Schwermetalle und PAK sowohl Werte für atmosphärische Einträge als auch für den Bereich der Hintergrundkonzentrationen angegeben.

In den  $A_h$ -Horizonten der Profile 1, 2 und 6 werden im Feststoff mit Ausnahme von Cd für alle Schwermetalle Überschreitungen der Vorsorgewerte gemessen.

Bei den untersuchten organischen Schadstoffen im Feststoff wird im Profil 6 in der Probe  $C_{\text{oben}}$  der Vorsorgewert für PAK in relativ geringem Maße überschritten. Die Profile 1, 2 und 5 sind bzgl. PAK unauffällig. Bei den Kohlenwasserstoffen fällt der sehr hohe Messwert von 680 mg/kg TR im  $A_h$ -Horizonten des Profils 2 auf. Dies entspricht jedoch vermutlich nicht einer besonders hohen Belastung, sondern ist durch den sehr hohen TOC-Gehalt dieser Probe und die bevorzugte Adsorption von Kohlenwasserstoffen an die organische Substanz bedingt.

25691892 In Tab. 7 sind zum Vergleich die gemessenen maximalen Schadstoffkonzentrationen im Feststoff in den natürlichen Böden einerseits und in den Auffüllungen andererseits gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass durch die Auffüllungen ein wesentlicher Schadstoffeintrag in den Boden erfolgte, der den potentiellen Eintrag durch Emissionen vom Bahnbetrieb oder allgemeine atmosphärische Depositionen deutlich überwiegt.

Tab. 7 Gemessene maximale Schadstoffkonzentrationen in den natürlichen Böden und in den Auffüllungen

	<b>Max. Messwert</b> natürliche Böden [mg/kg TR]	<b>Max. Messwert]</b> Auffüllungen [mg/kg TR]
Blei	110	830
Cadmium	0,2	0,6
Chrom	52	110
Kupfer	49	170
Nickel	59	150
Quecksilber	0,4	0,9
Zink	230	510
PAK	0,64	37
Kohlenwasserstoffe	680	790

Entscheidend für die Einschätzung des Risikos einer Grundwassergefährdung ist die Belastung des Sickerwassers und die Mobilität der Schadstoffe. Eine Überschreitung der Prüfwerte nach BBodSchV für die Schwermetalle im Bodeneluat war nur in einer einzigen Probe in einem geringfügigem Maße feststellbar (Pb in Profil 5 – „B-Horizont“, Messwert = 27 µg/l, Prüfwert = 25 µg/l). In zwei Proben in Profil 3 und 5 wurde, wiederum in ca. 30 cm Tiefe, der Prüfwert für Antimon bzw. für Kupfer im Bodeneluat erreicht, jedoch nicht überschritten. In allen anderen Proben sowie in den gesamten Profilen 1, 2, 6 und 7 lagen alle Messwerte im Eluat unterhalb der Prüfwerte der BBodSchV. In diesem Zusammenhang ist auch zu berücksichtigen, dass die Prüfwerte der BBodSchV nicht für die gesamte ungesättigte Zone gelten, sondern für den Übergangsbereich zwischen ungesättigter und wassergesättigter Zone gelten, der im Untersuchungsgebiet ca. 8 - 10 m unter GOK liegt.

Die absolut gemessenen Konzentrationen der Schwermetalle im Eluat geben in ihrer vertikalen Verteilung keine Hinweise auf eine Verlagerung der Schadstoffe.

Bei den organischen Schadstoffen konnten in keiner Probe PAK im Bodeneluat bestimmt werden. Kohlenwasserstoffe im Eluat wurden in einer Probe in Höhe des Prüfwertes der BBodSchV gemessen (Profil 3 – „B-Horizont“, c = 0,2 mg/l).

25691892 Dies bedeutet, dass die Schadstoffe derzeit fest an die Bodenmatrix gebunden sind. Trotz der teilweise sehr hohen Stoffkonzentrationen an der Festsubstanz werden die Prüfwerte für Stoffkonzentrationen im Sickerwasser nach BBodSchV fast durchgängig eingehalten.

Ein Mobilisierung von Schwermetallen durch einen Abfall des pH-Wertes ist an den untersuchten Standorten innerhalb der nächsten Jahrzehnte mit Ausnahme des Profils 2 nicht zu befürchten. Die Standorte 1 sowie 3 - 7 haben derzeit pH-Werte  $> 5$ , die Auffüllungen sogar pH-Werte  $> 6$  bei einer sehr hohen Basensättigung  $> 80\%$ . Diese Böden sind gegenüber weiteren Säureinträgen noch sehr gut über Silikatverwitterung und Austauscherguppen abgepuffert. Der Standort 4 besitzt eine alkalische Bodenreaktion und liegt damit sogar im pH-Wert-Bereich des Carbonatpuffers (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005).

Wegen der Nähe zur Bahntrasse bzw. zum Bahndamm ist mit Ausnahme des Bohransatzpunktes 2 bei allen Bohrprofilen mit einem Stoffeintrag durch Oberflächenabfluss, Sprühnebel und Windverdriftung auszugehen. Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass der Abfluss von Gleiskörpern generell neutral bis alkalisch ist (BGS UMWELT, 2009, BUWAL, 2002).

Der abgerückte Bohransatzpunkt des Profils 2 kann dahingegen als repräsentativ für einen natürlichen Boden unter Mischwald gelten. Hier zeigt sich ein anderes Bild: Die pH-Werte des Profils 2 liegen bei 4,5 – 5,0 und damit komplett im Austauscher-Pufferbereich (AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005). Die SNK liegt in diesem Bodenprofil in den Horizonten  $A_h$ , B und  $C_{oben}$  noch bei ca. 200 mmol/kg und würde damit ausreichen, den Säureeintrag durch Niederschlag über mehrere Jahrzehnte abzuf puffern. Die Basensättigung nimmt in den oberen Horizonten ( $A_h$  und B) jedoch mit ca. 20 – 35 % deutlich niedrigere Werte an als an den übrigen Standorten und zeigt, dass es bereits zu einer Auswaschung basischer Kationen ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  und  $K^+$ ) und damit zu einer Zehrung der Pufferkapazität gekommen ist. Nach SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL (2013) ist ein schnelleres Absinken des pH-Wertes zu befürchten, wenn das Austauscherpuffersystem „weitgehend erschöpft“ ist. Im unteren C-Horizont des Profils 2 ist die SNK nahe Null.

Das derzeitige Belastungsbild zeigt deutlich, dass der wesentliche Schadstoffeintrag in das Untersuchungsgebiet bzgl. Schwermetallen, PAK und Kohlenwasserstoffen mit dem aufgefüllten Bodenmaterial erfolgte (Tab. 7). Dem Bahnbetrieb zuzuordnen ist dahingegen der AMPA-Befund im A- und B-Horizont des Bohransatzpunktes 6.

Bei den natürlichen Böden weisen die Profile der trassennahen Bohransatzpunkte 1 und 6 bzgl. der organischen Schadstoffe (Kohlenwasserstoffe und PAK) und der Schwermetalle das gleiche Belastungsmuster und Belastungsniveau auf wie der als Referenz für einen unbeeinflussten Standort ausgewählte Bohransatzpunkt 2.

## 7 Zusammenfassung und Empfehlungen

Im Scoping zum Vorhaben Regionaltangente West (RTW) wurde von Seiten der Behörden gefordert, die Belastung und das Gefährdungspotential für Boden und Grundwasser durch den Betrieb der RTW zu untersuchen. Auf der Grundlage bodenchemischer Untersuchungen sollten die aktuelle Bodenbelastung und Bodenreaktion ermittelt sowie die Versauerungsgefährdung und das damit einhergehende Risiko einer Tiefenverlagerung von Schwermetallen bewertet werden.

Entlang der bestehenden Bahnstrecke im Frankfurter Stadtwald wurden hierzu auf einer Streckenlänge von ca. 3 km an sieben Bohransatzpunkten bis in eine Tiefe von 2 m unter GOK Bodenproben entnommen. Zwei Standorte lagen bis zur Endbohrtiefe auf Auffüllungen, drei Standorte waren weitgehend natürlich, bei zwei Standorten bestanden die oberen Horizonte ( $\leq 1,5$  m) aus Auffüllungen. An den natürlichen Standorten wurden der  $A_h$ -, der B- und der C-Horizont beprobt. Bei den Auffüllungen wurden drei Bodenproben aus jeweils ca. 30 cm, 1 m und 1,5 m Tiefe entnommen. Die Bodenproben wurden auf organische Schadstoffe und Schwermetalle am Feststoff und im Eluat, Pestizide im Eluat sowie weitere kennzeichnende bodenchemische Eigenschaften untersucht.

Bzgl. der Belastung der Festsubstanz wurden an verschiedenen Proben deutliche Überschreitungen der Vorsorgewerte der BBodSchV für diverse Schwermetalle und PAK festgestellt.

Während sich an den natürlichen Standorten die Schwermetallbelastung jedoch im Wesentlichen auf den  $A_h$ -Horizont beschränkte, waren bei den Auffüllungen Überschreitungen der Vorsorgewerte über die gesamte Profiltiefe festzustellen. Die gemessenen Schadstoffkonzentrationen waren bei den Auffüllungen deutlich höher als an den natürlichen Standorten.

Die Messwerte des Bodeneluates waren dahingegen an allen Standorten weitgehend unauffällig. Nur in einer Bodenprobe aus Auffüllungsmaterial kam es zu einer geringfügigen Überschreitung des Prüfwertes der BBodSchV für Blei.

Die Ergebnisse der bodenchemischen Untersuchungen führten zusammenfassend zu folgender Einschätzung bzgl. der Gefährdung von Boden und Grundwasser:

- Der wesentliche Schadstoffeintrag in die Bodenzone des Untersuchungsgebietes erfolgte mit dem Auffüllungsmaterial.
- Schwermetalle und organische Schadstoffe sind fest an die Bodenmatrix gebunden. Eine Mobilisierung oder Tiefenverlagerung der Schadstoffe ist nicht erkennbar.
- Bei den natürlichen Standorten ist zwischen den trassennahen Bohransatzpunkten und der abgerückten Referenzprobe kein Unterschied in der stofflichen Belastung von Schwermetallen, PAK und Kohlenwasserstoffen zu erkennen.
- Die Analysen der Referenzprobe zeigen, dass im Untersuchungsgebiet eine Grundbelastung durch die atmosphärischen Deposition von Schwermetallen vorliegt.
- Dem Bahnbetrieb zuzuordnen ist der Nachweis von AMPA am Standort 6.



25691892

- Die Auffüllungen und die trassennahen Standorte haben pH-Werte  $> 5$ . Ihre Pufferkapazitäten sind nicht erschöpft und ein rasches und deutliches Absinken des pH-Wertes ist nicht zu befürchten. Eine nachteilige Beeinflussung der Pufferkapazität durch den Bahnbetrieb ist nicht zu erkennen.
- Der abgerückte Standort (Profil 2) kann als repräsentativ für „natürliche“ Verhältnisse im Untersuchungsgebiet gelten. Hier liegt der pH-Wert bei 4,5 – 5. Die geringe Basensättigung im Oberboden ist ein Hinweis darauf, dass die Pufferkapazitäten bereits teilweise aufgebraucht ist.

Brandt·Gerdes·Sitzmann  
Umweltplanung GmbH

Darmstadt, den 12.03.2015



Dr.-Ing. M. Kämpf



Dipl.-Geoökol. A. Spinola

25691892 **Literatur**

AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, Hannover, 2005.

AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2009: Arbeitshilfe für die Bodenansprache im vor- und nachsorgenden Bodenschutz, 1. Auflage, Hannover, 2009.

APPELO, C.A.J., POSTMA, D., 2010: Geochemistry, groundwater and pollution, 2<sup>nd</sup> edition, CRC Press, Amsterdam, 2010.

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, 2010: Abfall-Merkblatt Nr. 3.4/2 „Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Gleisschotter (Gleisschottermerkblatt)“, Augsburg, August 2010.

BGS UMWELT, 2009: ICE Neubaustrecke Rhein-Main / Rhein-Neckar, Gutachten zur Entwässerungswasserqualität, Darmstadt, Oktober 2009.

BGS UMWELT, 2013: Hydrologisches Gutachten Umbau Knoten Frankfurt (M) – Sportfeld, 2. Ausbaustufe, Darmstadt, Januar 2013.

BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT, BUWAL, 2002: Entwässerungsverhalten und Schadstoffaustrag von Gleiskörpern, Umwelt-Materialien Nr. 149 Umweltgefährdende Stoffe, Bern.

DEUTSCHE BAHN AG, 2003: Richtlinie 880.4010 "Bautechnik; Verwertung von Altschotter", München, Februar 2003.

DEUTSCHER BUNDESTAG, 2012: Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage div. Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE, Gesundheitsgefährdung durch Schadstoffemissionen des Luftverkehrs, Drucksache 17/9815, 26.05.2012

HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE: Bodenflächendaten 1:50.000.

HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE, 2011: Hintergrundwerte von Spurenstoffen in hessischen Böden, Wiesbaden, 2011.

HESSISCHER STAATSANZEIGER vom 07.03.2011: Verwaltungsvorschrift zur Erfassung, Bewertung und Sanierung von Grundwasserverunreinigungen (GWS-VwV).

IFG DR. ZIRFAS, 2009: Abfalltechnisches Gutachten zum Projekt Rückbau S-Bahn Strecke 3683, Limburg, Dezember 2009.

LAGA – LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL, 2004: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung 1.2 Bodenmaterial (TR Boden), (Stand 05.11.2004).

RP DARMSTADT, RP GIESSEN, RP KASSEL, 2009: Merkblatt „Entsorgung von Bauabfällen“, Stand 15.05.2009.

25691892 SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL, 2013: Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.

UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG, 2008: Handlungshilfe für die Verwertung von Gleisschotter in Baden-Württemberg, Stuttgart, März 2008.

<http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/schwermetalldepositionen>