

TEXTE

97/2026

Schlussbericht

Screeninguntersuchungen zur Implementierung der DIN 19738 und Bewertung der Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen im Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung

von:

Dr. Heike Böhme
Eurofins Umwelt Ost GmbH, Bobritzsch-Hilbersdorf

Dr. Frank Küchler, Carmen Jaggi e. K., Erik Küchler
Umwelt Projekt Consult, Rehfelde OT Werder

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 97/2026

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3718 74 299 0

Schlussbericht

Screeninguntersuchungen zur Implementierung der DIN 19738 und Bewertung der Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen im Vollzug der Bundes- Bodenschutz- und Altlastenverordnung

von

Dr. Heike Böhme

Eurofins Umwelt Ost GmbH, Bobritzsch-Hilbersdorf

Dr. Frank Kuchler, Carmen Jaggi e. K., Erik Kuchler

Umwelt Projekt Consult, Rehfelde OT Werder

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Eurofins Umwelt Ost GmbH
Löbstädter Straße 78
07749 Jena

Abschlussdatum:

Februar 2024

Redaktion:

Fachgebiet II 2.6 Maßnahmen des Bodenschutzes
Dr. Urs Dippon-Deißler

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8564>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Die Resorptionsverfügbarkeit ist der unter Laborbedingungen prozentual ermittelte Anteil oral aufgenommener Schadstoffe (z. B. mit kontaminierten Bodenpartikeln oder Staub), die im Magen-Darmtrakt freigesetzt werden und vom Organismus über den Verdauungsprozess resorbiert werden können.

Insgesamt wurden zur Resorptionsverfügbarkeit 816 Altdaten nach DIN 19738: 2004-07 verwendet und 2071 Ergebnisse nach DIN 19738: 2017-06 aktuell ermittelt. Damit werden neue umfangreiche Informationen für den Vollzug der BBodSchV und die Anwendung des Verfahrens zur Ermittlung und Beurteilung der Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen für den Wirkungspfad Boden-Mensch bereitgestellt.

Es wurden insgesamt 1742 statistisch auswertbare Untersuchungsergebnisse zur Resorptionsverfügbarkeit in eine Datenbank eingepflegt. Bei anteilig 735 Datensätzen fand die Integration der eigens für das Projekt erhobenen bodenkundlichen Daten statt.

Die Auswertung der Datenbank ergab arithmetische Mittelwerte der Resorptionsverfügbarkeiten der Parameter (siehe Tabelle 7 und Tabelle 25). Basierend auf der Datenauswertung wurden tendenzielle Abhängigkeit der Resorptionsverfügbarkeit bezüglich Bodenart, Humusgehalt und Carbonatgehalt abgeleitet. Außerdem wurden die arithmetischen Mittelwerte der Resorptionsverfügbarkeiten den Prüfwerten der BBodSchV Wirkungspfad Boden-Mensch zugeordnet. Die Übersicht der Ergebnisse des Screenings der Resorptionsverfügbarkeitsdatensätze bilden die Grundlage weiterführender Untersuchung gemäß der im Rahmen dieses Projektes erstellten Handlungsanleitung für die Handhabung der Resorptionsverfügbarkeit im Vollzug des Bodenschutzes.

Abstract

The bioaccessibility is the fraction of a substance in soil or soil material (e.g. contaminated soil particles or dust) that is liberated in (human) gastrointestinal juices and thus available for absorption.

A total of 816 old data according to DIN 19738: 2004-07 were used for bioaccessibility and 2071 results according to DIN 19738: 2017-06 were currently determined. This provides new comprehensive information for the implementation of the BBodSchV and the application of the procedure for determining and assessing the bioaccessibility of pollutants for the soil-human pathway.

A total of 1742 statistically evaluable test results on bioaccessibility were entered into a database. The integration of the pedological data collected specifically for the project took place for a proportion of 735 data sets.

The evaluation of the database resulted in arithmetic mean values of bioaccessibility of the parameters (see Figure 7 and Table 25). Based on the data analysis, tendential dependence of the bioaccessibility with respect to soil type, humus content and carbonate content were derived. In addition, the arithmetic mean values of the bioaccessibility were assigned to the test values of the BBodSchV soil-human impact pathway. The overview of the results of the screening of the bioaccessibility datasets form the basis of further investigations according to the guidance for handling of the bioaccessibility in the implementation of soil protection, which was prepared within the scope of this project.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	8
Abbildungsverzeichnis.....	9
Anlagenverzeichnis.....	20
Abkürzungsverzeichnis	21
Zusammenfassung.....	22
Summary	27
1 Einführung.....	32
2 Zielstellung	33
3 Leistungsmerkmale - Arbeitspakete.....	35
4 Ergebnisse A1: Auswahl von Probenahmestellen sowie Probennahme kontaminierter Böden unter der Vorgaben des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO).....	36
5 A2: Probenvorbereitung und –aufbereitung entsprechend DIN 19747 sowie analytische Untersuchungen der kontaminierten Böden zur Bestimmung der Resorptionsverfügbarkeit nach DIN 19738 für die ausgewählten anorganischen und organischen Schadstoffe.....	40
5.1 Voruntersuchungen zu den Gesamtgehalten des Probenmaterials.....	40
5.2 Methodik der Resorptionsuntersuchungen.....	41
5.3 Ergebnisse der Resorptionsuntersuchungen	43
5.3.1 Metalle	44
5.3.2 Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	46
5.3.3 Polychlorierte Biphenyle (PCB)	52
5.3.4 Sprengstofftypischen Verbindungen (STV).....	52
5.3.5 Organochlorpestizide (OCP).....	58
6 A3: Verarbeitung und Bewertung der gewonnenen Daten	61
7 A4: Verallgemeinerung der Daten und Ableitung typischer Resorptionsverfügbarkeiten für die untersuchten anorganischen und organischen Schadstoffe unter Beachtung unterschiedlicher Bodenarten und Anteile organischer Bodensubstanz.....	65
7.1 Methodik.....	65
7.2 Parameterübergreifende vergleichende Auswertung	66
7.3 Parameterbezogener arithmetischer Mittelwert der Resorptionsverfügbarkeit bezüglich der Bodenartenhauptgruppen, Humus- und Carbonatgehalte	76
7.4 Parameterweise vergleichende Auswertung.....	86
7.4.1 Antimon	87
7.4.2 Arsen	95

7.4.3	Blei	104
7.4.4	Cadmium	114
7.4.5	Chrom	123
7.4.6	Cobalt	129
7.4.7	Nickel.....	135
7.4.8	Quecksilber	145
7.4.9	Thallium	155
7.4.10	2,4-Dinitrotoluol	161
7.4.11	Hexyl	166
7.4.12	Hexogen	170
7.4.13	Nitropenta.....	176
7.4.14	TNT (2,4,6-Trinitroluol)	181
7.4.15	Tetryl	186
7.4.16	Benzo[a]pyren.....	189
7.4.17	Benzo[k]fluoranthen	199
7.4.18	Benzo[a]anthracen.....	208
7.4.19	Benzo[b]fluoranthen.....	217
7.4.20	Benzo[ghi]perylen.....	226
7.4.21	Chrysen	235
7.4.22	Dibenzo[a,h]anthracen	244
7.4.23	Indeno[1,2,3-cd]pyren	253
7.5	Resorptionsverfügbarkeit bezüglich der Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV.....	262
8	A5: Erstellung einer Handlungsanleitung in Bezug auf die Handhabung der Resorptionsverfügbarkeit für den Vollzug des Bodenschutzes.....	270
9	Quellenverzeichnis	272

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Parameterbezogene ALA/Länder - gemeldete Probenahmestellen	38
Tabelle 2:	Analysenmethoden zur Bestimmung der Gesamtgehalte	41
Tabelle 3:	Tests nach Parametergruppe (Anzahl der Datensätze) der UBA-Proben	44
Tabelle 4:	Gesamtgehalte des Referenzmaterials (BGS Guidance Material 102)	45
Tabelle 5:	Resorptionsverfügbarkeit des Referenzmaterials (BGS Guidance Material 102) ..	46
Tabelle 6:	Referenzmaterial PAK (BAM-U013)	47
Tabelle 7:	Referenzmaterial PAK - (RV) und Bilanz für Benzo[a]pyren	48
Tabelle 8:	Referenzmaterial PAK - Resorptionsverfügbarkeit (RV) und Bilanz für 8 PAK	49
Tabelle 9:	Referenzmaterial PAK - Resorptionsverfügbarkeit (RV) und Bilanz für 8 PAK (Säule RXI-17SilMS)	50
Tabelle 10:	Referenzmaterial PAK - Resorptionsverfügbarkeit (RV) und Bilanz für 8 PAK (neues Gerät)	51
Tabelle 11:	Übersicht STV	53
Tabelle 12:	Wiederfindungsversuche zu STV am Mobilisat des Resorptionsversuchs	55
Tabelle 13:	Ausgewählte Ergebnisse STV	56
Tabelle 14:	Ausgewählte Ergebnisse STV	56
Tabelle 15:	Ausgewählte Ergebnisse STV	57
Tabelle 16:	Ausgewählte Ergebnisse STV	57
Tabelle 17:	Ausgewählte Ergebnisse STV	58
Tabelle 18:	Wiederfindungsversuche im Resorptionsblindwert (Mobilisat)	59
Tabelle 19:	Wiederfindungsversuche im Resorptionsblindwert (Sediment)	59
Tabelle 20:	Auszug Zertifikat (Referenzmaterial OCP BAM ERM®-CC007a)	60
Tabelle 21:	Wiederfindungsversuche im Resorptionsblindwert (Mobilisat)	60
Tabelle 22:	Resorptionsverfügbarkeit Referenzmaterial ausgewählter OCP	61
Tabelle 23:	Gegenüberstellung der Datenbank erfasster Untersuchungsergebnisse und den Probenvorschlägen des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA) der Bund/Länder- Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)	64
Tabelle 24:	Resorptionsverfügbare Anteil, Vergleich Altdaten mit Daten des Ringversuchs..	72
Tabelle 25:	Übersicht der Ergebnisse des Screenings der Resorptionsverfügbarkeitsdatensätze	270

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Physiologie der menschlichen Verdauung	42
Abbildung 2:	RV-Daten des Referenzmaterials für Parameter des Ringversuchs	46
Abbildung 3:	RV-Daten des Referenzmaterials BAM U013 C für BaP	48
Abbildung 4:	Extraktion von STV aus dem Mobilisat	54
Abbildung 5:	Extraktion von STV aus dem Sediment.....	54
Abbildung 6:	In der Datenbank aktuell erfasste Parameter und die Anzahl der Untersuchungsergebnisse	62
Abbildung 7:	Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o) der Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN-Methoden, Sortierung RV absteigend	67
Abbildung 8:	Parameterweiser arithmetischer Mittelwert der Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Qualitätskriterien erfüllt und nicht erfüllt nach DIN 19738:2017, Sortierung RV absteigend	69
Abbildung 9:	Parameterweiser arithmetischer Mittelwert und Median der Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach Anwendung des Hampel-Filters	71
Abbildung 10:	Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o) der Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung RV absteigend	73
Abbildung 11:	Parameterspezifische Standardabweichung der Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	75
Abbildung 12:	Parameterweiser arithmetischer Mittelwert von RV [%] nach Bodenartenhauptgruppe und Parameter.....	77
Abbildung 13:	Standardabweichung von RV [%] nach Bodenartenhauptgruppe und Parameter	79
Abbildung 14:	Parameterbezogener arithmetischer Mittelwert von RV [%] der Humusstufen ...	81
Abbildung 15:	Parameterbezogener arithmetischer Mittelwert von RV [%] bezogen auf den arithmetischen Mittelwert von Humus [Masse-%]	83
Abbildung 16:	Parameterbezogener arithmetischer Mittelwert von RV [%] bezogen auf den arithmetischen Mittelwert von Carbonat	85
Abbildung 17:	Antimon – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	88
Abbildung 18:	Antimon – Datensätze Feststoffgehalte [log ₁₀ _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log ₁₀ _RV, %].....	89
Abbildung 19:	Antimon – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	90
Abbildung 20:	Antimon – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	91
Abbildung 21:	Antimon – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	92
Abbildung 22:	Antimon – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	93
Abbildung 23:	Antimon – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	94

Abbildung 24:	Arsen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte	95
Abbildung 25:	Arsen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte	96
Abbildung 26:	Arsen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	97
Abbildung 27:	Arsen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	98
Abbildung 28:	Arsen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden	98
Abbildung 29:	Arsen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	99
Abbildung 30:	Arsen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	100
Abbildung 31:	Arsen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	101
Abbildung 32:	Arsen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	102
Abbildung 33:	Arsen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend.....	103
Abbildung 34:	Blei – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte	104
Abbildung 35:	Blei – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte	105
Abbildung 36:	Blei – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	106
Abbildung 37:	Blei – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	107
Abbildung 38:	Blei – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden	107
Abbildung 39:	Blei – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	108
Abbildung 40:	Blei – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	109
Abbildung 41:	Blei – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	110
Abbildung 42:	Blei – Bodenartenhauptgruppe T, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	111
Abbildung 43:	Blei – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	112
Abbildung 44:	Blei – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend.....	113

Abbildung 45:	Cadmium – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte	114
Abbildung 46:	Cadmium – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte	115
Abbildung 47:	Cadmium – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	116
Abbildung 48:	Cadmium – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	117
Abbildung 49:	Cadmium – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden	117
Abbildung 50:	Cadmium – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	118
Abbildung 51:	Cadmium – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	119
Abbildung 52:	Cadmium – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	120
Abbildung 53:	Cadmium – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	121
Abbildung 54:	Cadmium – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend.....	122
Abbildung 55:	Chrom – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	123
Abbildung 56:	Chrom – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	124
Abbildung 57:	Chrom – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	124
Abbildung 58:	Chrom – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	125
Abbildung 59:	Chrom – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	126
Abbildung 60:	Chrom – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	127
Abbildung 61:	Chrom – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend.....	128
Abbildung 62:	Cobalt – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	129
Abbildung 63:	Cobalt – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	130
Abbildung 64:	Cobalt – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	130
Abbildung 65:	Cobalt – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	131

Abbildung 66:	Cobalt – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	132
Abbildung 67:	Cobalt – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	133
Abbildung 68:	Cobalt – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	134
Abbildung 69:	Nickel – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte	135
Abbildung 70:	Nickel – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte	136
Abbildung 71:	Nickel – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	137
Abbildung 72:	Nickel – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], Sortierung aufsteigende Feststoffgehalte.....	138
Abbildung 73:	Nickel – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden	138
Abbildung 74:	Nickel – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	139
Abbildung 75:	Nickel – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	140
Abbildung 76:	Nickel – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	141
Abbildung 77:	Nickel – Bodenartenhauptgruppe T, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	142
Abbildung 78:	Nickel – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	143
Abbildung 79:	Nickel – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	144
Abbildung 80:	Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	145
Abbildung 81:	Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	146
Abbildung 82:	Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	147
Abbildung 83:	Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	148
Abbildung 84:	Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden	148
Abbildung 85:	Quecksilber – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	149

Abbildung 86:	Quecksilber – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	150
Abbildung 87:	Quecksilber – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	151
Abbildung 88:	Quecksilber – Bodenartenhauptgruppe T, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	152
Abbildung 89:	Quecksilber – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	153
Abbildung 90:	Quecksilber – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	154
Abbildung 91:	Thallium – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	155
Abbildung 92:	Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	156
Abbildung 93:	Thallium – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	156
Abbildung 94:	Thallium – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	157
Abbildung 95:	Thallium – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	158
Abbildung 96:	Thallium – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	159
Abbildung 97:	Thallium – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	160
Abbildung 98:	2,4-Dinitrotoluol – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	161
Abbildung 99:	2,4-Dinitrotoluol – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	162
Abbildung 100:	2,4-Dinitrotoluol – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	162
Abbildung 101:	2,4-Dinitrotoluol – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	163
Abbildung 102:	2,4-Dinitrotoluol – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	164
Abbildung 103:	2,4-Dinitrotoluol – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	165
Abbildung 104:	Hexyl – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	166
Abbildung 105:	Hexyl – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	167

Abbildung 106:	Hexyl – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	168
Abbildung 107:	Hexyl – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	169
Abbildung 108:	Hexyl – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	170
Abbildung 109:	Hexogen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	171
Abbildung 110:	Hexogen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	172
Abbildung 111:	Hexogen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	172
Abbildung 112:	Hexogen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	173
Abbildung 113:	Hexogen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	174
Abbildung 114:	Hexogen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	175
Abbildung 115:	Nitropenta – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	176
Abbildung 116:	Nitropenta – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	177
Abbildung 117:	Nitropenta – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	178
Abbildung 118:	Nitropenta – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	179
Abbildung 119:	Nitropenta – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend.....	180
Abbildung 120:	TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	181
Abbildung 121:	TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	182
Abbildung 122:	TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	182
Abbildung 123:	TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	183
Abbildung 124:	TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend.....	184
Abbildung 125:	TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	185

Abbildung 126:	Tetryl – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	186
Abbildung 127:	Tetryl – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	187
Abbildung 128:	Tetryl – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	188
Abbildung 129:	Tetryl – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend.....	189
Abbildung 130:	Benzo[a]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	190
Abbildung 131:	Benzo[a]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	191
Abbildung 132:	Benzo[a]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	192
Abbildung 133:	Benzo[a]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	193
Abbildung 134:	Benzo[a]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden	193
Abbildung 135:	Benzo[a]pyren – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	194
Abbildung 136:	Benzo[a]pyren – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	195
Abbildung 137:	Benzo[a]pyren – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	196
Abbildung 138:	Benzo[a]pyren – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend.....	197
Abbildung 139:	Benzo[a]pyren – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend.....	198
Abbildung 140:	Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	199
Abbildung 141:	Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	200
Abbildung 142:	Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	201
Abbildung 143:	Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], Sortierung aufsteigende Feststoffgehalte.....	202

Abbildung 144:	Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden	202
Abbildung 145:	Benzo[k]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	203
Abbildung 146:	Benzo[k]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	204
Abbildung 147:	Benzo[k]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	205
Abbildung 148:	Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	206
Abbildung 149:	Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	207
Abbildung 150:	Benzo[a]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte	208
Abbildung 151:	Benzo[a]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte	209
Abbildung 152:	Benzo[a]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	210
Abbildung 153:	Benzo[a]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	211
Abbildung 154:	Benzo[a]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden	211
Abbildung 155:	Benzo[a]anthracen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	212
Abbildung 156:	Benzo[a]anthracen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	213
Abbildung 157:	Benzo[a]anthracen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	214
Abbildung 158:	Benzo[a]anthracen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	215
Abbildung 159:	Benzo[a]anthracen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	216
Abbildung 160:	Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte	217

Abbildung 161:	Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	218
Abbildung 162:	Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	219
Abbildung 163:	Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	220
Abbildung 164:	Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden	220
Abbildung 165:	Benzo[b]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppen, unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	221
Abbildung 166:	Benzo[b]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	222
Abbildung 167:	Benzo[b]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	223
Abbildung 168:	Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend.....	224
Abbildung 169:	Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	225
Abbildung 170:	Benzo[ghi]perylen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	226
Abbildung 171:	Benzo[ghi]perylen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	227
Abbildung 172:	Benzo[ghi]perylen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	228
Abbildung 173:	Benzo[ghi]perylen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], Sortierung aufsteigende Feststoffgehalte.....	229
Abbildung 174:	Benzo[ghi]perylen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden	229
Abbildung 175:	Benzo[ghi]perylen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	230
Abbildung 176:	Benzo[ghi]perylen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	231
Abbildung 177:	Benzo[ghi]perylen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	232

Abbildung 178:	Benzo[ghi]perylen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend.....	233
Abbildung 179:	Benzo[ghi]perylen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	234
Abbildung 180:	Chrysen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	235
Abbildung 181:	Chrysen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	236
Abbildung 182:	Chrysen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	237
Abbildung 183:	Chrysen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	238
Abbildung 184:	Chrysen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden.....	238
Abbildung 185:	Chrysen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]	239
Abbildung 186:	Chrysen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	240
Abbildung 187:	Chrysen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	241
Abbildung 188:	Chrysen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend	242
Abbildung 189:	Chrysen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend.....	243
Abbildung 190:	Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	244
Abbildung 191:	Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	245
Abbildung 192:	Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	246
Abbildung 193:	Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]	247
Abbildung 194:	Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden.....	247
Abbildung 195:	Dibenzo[a,h]anthracen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%].....	248
Abbildung 196:	Dibenzo[a,h]anthracen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	249

Abbildung 197:	Dibenzo[a,h]anthracen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	250
Abbildung 198:	Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend.....	251
Abbildung 199:	Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	252
Abbildung 200:	Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	253
Abbildung 201:	Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	254
Abbildung 202:	Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	255
Abbildung 203:	Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], Sortierung aufsteigende Feststoffgehalte.....	256
Abbildung 204:	Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden	256
Abbildung 205:	Indeno[1,2,3-cd]pyren – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%].....	257
Abbildung 206:	Indeno[1,2,3-cd]pyren – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte.....	258
Abbildung 207:	Indeno[1,2,3-cd]pyren – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte	259
Abbildung 208:	Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend.....	260
Abbildung 209:	Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend	261
Abbildung 210:	Antimon - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu).....	263
Abbildung 211:	Arsen - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)	263
Abbildung 212:	Blei - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)	264
Abbildung 213:	Cadmium - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu).....	264
Abbildung 214:	Chrom - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu).....	265

Abbildung 215:	Nickel - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu).....	265
Abbildung 216:	Quecksilber - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu).....	266
Abbildung 217:	Thallium - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu).....	266
Abbildung 218:	2,4 Dinitrotoluol - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu).....	267
Abbildung 219:	Hexyl - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)	267
Abbildung 220:	Hexogen - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu).....	268
Abbildung 221:	Nitropenta - Resorptionsverfügbarkeit Bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu).....	268
Abbildung 222:	TNT (2,4,6-Trinitrololuol) - Resorptionsverfügbarkeit Bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)	269
Abbildung 223:	Benzo[a]pyren - Resorptionsverfügbarkeit Bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu).....	269

Anlagenverzeichnis

- 1 Probenahmeprotokolle
- 2 Datenbank ALA-Probenahmestellen (digital)
- 3 Probenübersicht
- 4 Datenbank der Untersuchungsergebnisse Resorptionsverfügbarkeit (digital)

Abkürzungsverzeichnis

AQS	Analytische Qualitätssicherung
AK	Arbeitskreis
ALA	Ständiger Ausschuss Altlasten
As	Arsen
BaP / B(a)P	Benzo(a)pyren
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
Cd	Cadmium
cm	Centimeter
DIN	Deutsches Institut für Normung
DN	Diameter Nominal
EN	Europäische Norm
ENV	Europäischer Freiwilligendienst in Norm
FBU	Fachbeirat Bodenuntersuchungen
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GPS	Global Positioning System
h	Stunden
l	Liter
KA	Kartieranleitung
kg	Kilogramm
LAGA	Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LABO	Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz
m	Meter
mm	Millimeter
m³	Kubikmeter
mg	Milligramm
ml	Milliliter
NA	Normausschuss
NaHCO₃	Natriumhydrogencarbonat
OCP	Organochlorpestizide
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
RSD	Relative Standardabweichung
SD	Standardabweichungen
RV	Resorptionsverfügbarkeit
STV	Sprengstofftypischen Verbindungen
z.B.	zum Beispiel

Zusammenfassung

Die novellierte BBodSchV tritt am 01.08.2023 in Kraft. In § 13 Abs. 3 wird vorgegeben, dass in der Detailuntersuchung zur abschließenden Gefährdungsabschätzung die für die jeweils betroffenen Wirkungspfade im Sinne des § 11 Absatz 2 und 3 maßgeblichen Expositionsbedingungen sowie die bedeutsamen resorptionsverfügbaren, mobilen oder mobilisierbaren Anteile der Schadstoffgehalte ermittelt werden sollen.

In diesem Projekt, werden Daten zur Resorptionsverfügbarkeit aus der Praxis erhoben und ausgewertet. Es sollen Informationen für den Vollzug der BBodSchV und die Anwendung des Verfahrens zur Ermittlung und Beurteilung der Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen bereitgestellt werden. Für das Projekt stehen die Parameter der Anlage 2, Tabelle 4: Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch im Vordergrund.

Die Resorptionsverfügbarkeit ist der unter Laborbedingungen prozentual ermittelte Anteil oral aufgenommener Schadstoffe (z. B. mit kontaminierten Bodenpartikeln oder Staub), die im Magen-Darmtrakt freigesetzt werden und vom Organismus über den Verdauungsprozess resorbiert werden können. Das Funktionsprinzip der Verdauung wird im Labor normiert nachgestellt. Zur Ermittlung der Resorptionsverfügbarkeit ist gemäß der Methodensammlung Feststoffuntersuchung Version 2.0 Stand: 15.06.2021 [8] die DIN 19738: 2017-04 [3] anzuwenden.

Von einer Bodenprobe einer altlastverdächtigen Fläche werden mindestens zwei getrennte Ansätze untersucht. Es werden zweimal 2 g des kontaminierten Materials ≤ 2 mm gemäß Norm für den Resorptionsversuch eingesetzt. Die Mobilisierung wird jeweils als Doppelbestimmung mit zwei Teilproben durchgeführt.

Zur Umsetzung des Projektes wurden 5 Arbeitspakete formuliert:

A1: Auswahl von Probenahmestellen, Probenahme prioritärer Schadstoffe; Datenbeschaffung und Recherche bereits untersuchter Proben, Standortverifizierung

A2: Probenvorbereitung und Analytik der Proben (ALA ca. 100) unter Einbeziehung kommerzieller Proben (ca. 400)

A3: Zusammenstellung und Bewertung der Daten, Datenvergleich mit vorliegenden Daten (Länder, ALA, FBU/UBA)

A4: Datenverallgemeinerung, Ableitungen für Vollzug, Prüf- und Maßnahmewertdarstellung auf der Grundlage der Resorptionsverfügbarkeit

A5: Erstellung der Handlungsanleitung mit Abstimmung (ALA, LABO) und Veröffentlichung

Zu A 1: Die Vorgehensweise der Probenahme entsprach der aktuell gültigen BBodSchV und der am 01.08.2023 in Kraft tretenden BBodSchV für den Pfad Boden-Mensch. Die Bodenansprache erfolgte gemäß BBodSchV mit der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 / Arbeitshilfe für die Bodenansprache im vor- und nachsorgenden Bodenschutz - Auszug aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 [4]. Folgende Parameter wurden mindestens ermittelt: Tiefe [OG m bis UG m], Horizont, Farbe, Humus, Bodenfeuchte, Hydromorphie, Lagerungsdichte, Genese, Bodenart, Bodenartenhauptgruppe, Grobboden, Korngrößenzusammensetzung gemäß SEP, Kohlenstoff, Carbonat, Ausgangsgestein.

Zu A 2: Es wurden Resorptionsdaten aus dem Laborarchiv, ermittelte Daten aus dem operativen Geschäft während der Projektlaufzeit und die Ergebnisse, die im Zuge des Forschungsvorhabens erhalten wurden, in die Datenbank eingetragen. Dabei wurden parameterspezifisch die

Gesamtgehalte < 2 mm, der mobilisierbare und nichtmobilisierbare Anteil, die RV erfasst, sowie die Unterscheidung nach altem und neuen Normausgabestand vorgenommen.

Im Rahmen des Projektes wurden Proben zur Verfügung gestellt, die Kontaminationen der Parametergruppen Metalle / Halbmetalle (vereinfacht folgend als Gruppe der Metalle zusammengefasst), PAK, STV, PCB, OCP enthalten sollten. Von allen Proben wurden die Gesamtgehalte an der < 2 mm Fraktion bestimmt, welche in Abhängigkeit der Größenordnung der Werte die Entscheidungsgrundlage darstellten, an welchen Proben der Resorptionsversuch durchgeführt werden sollte.

Für die Bestimmung der Resorptionsverfügbarkeit gab es nur für die Metalle und Benzo[a]pyren eine etablierte Analysenvorschrift. Es wurde geprüft, ob die Methoden, welche für Boden- bzw. Wasseranalytik in der Routine zum Einsatz kommen, auch geeignet sind, um die genannten Analyten im Resorptionsmobilisat und –sediment zu erfassen. Eine Methodenentwicklung bzw. –validierung war nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens.

Für diese Prüfungen wurde, so vorhanden, auf zertifiziertes Referenzmaterial für die Resorptionstests zurückgegriffen. Weiterhin wurden Aufstockungsversuche durchgeführt.

Bei den Metallen gab es keine analytischen Probleme. Es lagen Daten aus dem Ringversuch [5] zur Resorptionsverfügbarkeit für ausgewählte Parameter vor und im Labor hat man jahrelange Erfahrung für diese Analytik.

Bei den PAK wurde vor dem Projektstart nur Benzo[a]pyren im Resorptionsversuch analysiert. Hierbei wurde nach der im Anhang D der DIN 19738: 2017-06 beschriebenen Methode gearbeitet. Bei der Erweiterung des Parameterumfangs auf die 8 PAK (Benz[a]anthracen, Chrysen, Benzo[b]fluoranthren, Benzo[k]fluoranthren, Benzo[a]pyren, Indeno[1,2,3-cd]pyren, Dibenz[a,h]anthracen und Benzo[ghi]perylen) zeigten sich teilweise größere Schwankungen bei den Messwerten bzw. Abweichungen von den vorgegebenen QS-Kriterien der Norm. Es wurden unterschiedliche Säulen verwendet, um Trennprobleme zu eliminieren. Auch die Geräteperformance spielt eine Rolle. Bei der Verwendung des Referenzmaterials konnte gezeigt werden, dass die Analytik der 8 PAK im Resorptionsversuch möglich ist. Es ist aber mit größeren Schwankungsbreiten der RV- und Bilanzwerte zu rechnen, da selbst bei dem eingesetzten zertifizierten Referenzmaterial die angegebene Messunsicherheit zum Teil größer ist, als die zulässige Abweichung vom Mittelwert (QS-Kriterium $\pm 10\%$) im Resorptionsversuch.

Für die PCB-Bestimmung gab es keine geeigneten Proben. Prinzipiell steht im Labor eine Methode zur Verfügung, welche auch im Ringversuch zur Anwendung kam. Es wurden hierzu aber keine weiteren Analysen durchgeführt.

Für die STV gab es bisher keine Analysenmethode. Im Ringversuch wurde nur TNT untersucht. Die Ringversuchsprobe hatte sehr hohe Gehalte, so dass die Analytik in stark verdünnter Probe erfolgte, quasi die Matrix der Resorptionslösung durch Verdünnung vernachlässigbar gering wurde. Für die in Tabelle 11 aufgeführten Substanzen wurden Wiederfindungsversuche durchgeführt, um zu testen, ob die Substanzen in dieser Matrix stabil sind und ob diese die Magenstufe „überstehen“. Für die Resorptionsversuche stand hier kein Referenzmaterial zur Verfügung, so dass die Realproben untersucht wurden. Dabei erwies sich schon die Bestimmung der Gesamtgehalte in einigen Fällen als schwierig. Die Schwankungen der ermittelten Werte zeigte, dass oftmals eine Doppelbestimmung nicht ausreicht. Es waren daher für die Werte im Resorptionsmobilisat noch größere Streuungen zu erwarten, was sich auch bestätigte. Mit der getesteten analytischen Methode wurden erste Ergebnisse erhalten, diese sind jedoch nicht statistisch abgesichert. Außerdem sind nicht alle Parameter mit dieser Methode zu analysieren, Hierzu wäre eine umfangreiche Methodenentwicklung notwendig.

Für die OCP gab es nur wenige Proben, welche auch nur HCH kontaminiert waren. Hierbei zeigte sich, dass schon die Bestimmung der Gesamtgehalte nicht zuverlässig möglich war. Die Inhomogenität der Proben war zu groß. Es wurden aber erste Untersuchungen zur Wiederfindung der Analyten in Resorptionsblindwertlösungen und Resorptionstests an verschiedenen Referenzmaterialien durchgeführt. Auch hier war eine Methodenentwicklung nicht Gegenstand des Projekts. Mit der angewendeten Methode konnten erste Ergebnisse für die RV und die Bilanz ermittelt werden. Die Schwankungen sind jedoch recht groß. Aufgrund der wenigen Daten können keine Schlussfolgerungen für die zu erwartenden Resorptionsverfügbarkeiten gezogen werden.

Zu A 3: Es wurden insgesamt 1742 Untersuchungsergebnisse zur Resorptionsverfügbarkeit in eine Datentabelle eingepflegt. Bei anteilig 735 Datensätzen fand die Integration der eigens für das Projekt erhobenen bodenkundlichen Daten statt.

Die Auswertung der Datenbank ergab arithmetische Mittelwerte der Resorptionsverfügbarkeiten der Parameter, für die Untersuchungsdaten im Projekt ermittelt werden konnten (siehe Abbildung 2 und Tabelle 25). Es wird darauf hingewiesen, dass die angegebenen Werte ausschließlich der Orientierung dienen. Bei zahlreichen Parametern ist die Datenbasis zu gering (vergleiche Abbildung 1) oder das Analytikverfahren ist nicht sicher validiert (u. a. fehlende oder zu wenige Ringversuche).

Bei der Auswertung der Daten der alten und der neuen DIN-Methode wurde deutlich, dass sich die parameterweise die arithmetischen Mittelwerte aus allen zur Verfügung stehenden Daten ermittelten Resorptionsverfügbarkeiten nur wenig unterscheiden. Aufgrund weitreichender Qualitätssicherung haben die Ergebnisse gemäß der neuen Norm eine höhere Beweiskraft.

Es wurde auch deutlich, wie wichtig es ist, die Einhaltung der Qualitätskriterien gemäß DIN 19738: 2017-04 bei der Beurteilung der schädlichen Bodenverunreinigung zu beachten. In den meisten Fällen liegen die Werte der erfüllten und nicht erfüllten Qualitätskriterien relativ dicht beieinander. Nur bei Thallium und Nickel differieren die Spannen mehr als 10 bis 20 %.

Die Angaben der Resorptionsverfügbarkeiten für Cobalt und den sprengstofftypischen Verbindungen sind aufgrund völlig fehlender Werte mit erfüllten Qualitätskriterien nur als grobe Orientierung zu betrachten. Insbesondere da, wo die Resorptionsverfügbarkeit über 100 % angegeben wurde (TNT). Bei der Auswertung des Validierungsringversuchs [5] für die DIN 19738:2017 wurde auch auf analytische Schwierigkeiten bei der Untersuchung von PCB und TNT auf Resorptionsverfügbarkeit hingewiesen. Das Problem zeigte sich ebenfalls bei den aktuellen TNT-Untersuchungen. Leider lag im Projekt kein geeignetes Probenmaterial für PCB und OCP vor.

Basierend auf der Datenauswertung (zusammengefasst in Tabelle 24) leiten sich tendenziell folgende Abhängigkeit der Resorptionsverfügbarkeit ab:

Bodenart: Für eine repräsentative Auswertung mit den Bodenartengruppen lagen für die meisten Untersuchungsparameter zu wenige Daten vor. Bei den Bodenartenhauptgruppen Sand Lehm/Schluff waren Auswertungen für zahlreiche Parameter möglich. Für Ton gab es nahezu keine Daten. Bei den meisten organischen Parametern besteht ein Trend der Abnahme der Resorptionsverfügbarkeit in Richtung Feinstkorn. Bei einigen Metallen und Halbmetallen (As) steigt die Resorptionsverfügbarkeit mit der Abnahme der Korngröße.

Humusgehalt: Mit Ausnahme einzelner Metalle (Cd, Ni, Hg) und Arsen sowie Chrysen und Indeno[1,2,3-cd]pyren als PAK-Einzelkomponenten, lassen die bislang vorliegenden Daten keine konkreten Abhängigkeiten der Resorptionsverfügbarkeit (RV) vom Humusgehalt ableiten.

Nur bei Cadmium zeichnet sich die Verringerung der RV bei steigenden Humusgehalt ab. Für Nickel, Quecksilber, Thallium und Indeno[1,2,3-cd]pyren können steigende Humusgehalte höhere Resorptionsverfügbarkeiten bedingen. Bei den Humusstufen nach KA 5 [4] ist das Ergebnis differenzierter. Wie am Beispiel der PAK-Einzelparameter zu erkennen ist, sind stoffbezogene Einzelbetrachtungen erforderlich.

Carbonatgehalt: Eine Beeinflussung der Resorptionsverfügbarkeit durch die Carbonatkonzentration war tendenziell nur bei Cadmium, Cobalt, Quecksilber und Thallium ableitbar. Alle übrigen Parameter ließen keine Korrelationen ableiten. Bei den genannten Ausnahmen verringert sich die Resorptionsverfügbarkeit bei steigendem Carbonatgehalt.

Zu A 4: Zur Umsetzung der Anforderungen gemäß BBodSchV § 13 Abs. 3 u.a. die bedeutsamen resorptionsverfügbaren Schadstoffgehalte zu ermitteln, wurden die Prüfwertspannen der Stoffe den jeweiligen arithmetischen Mittelwerten der Resorptionsverfügbarkeiten zugeordnet. Es handelt sich grundsätzlich um folgende Spannen

- ▶ unterhalb Kinderspielflächen bis Kinderspielflächen,
- ▶ Kinderspielflächen bis Wohngebiete,
- ▶ Wohngebiete bis Park- und Freizeitanlagen,
- ▶ Park- und Freizeitanlagen bis Industrie- und Gewerbegrundstücke,
- ▶ Industrie- und Gewerbegrundstücke bis über diese Prüfwerte.

Die Trends sind parameterspezifisch unterschiedlich und als Orientierung zu verstehen.

Für Antimon scheint die Resorptionsverfügbarkeit bezüglich der Spanne für Kinderspielflächen um mehr als das Doppelte gegenüber der Spanne für Industrie- und Gewerbegrundstücke sowie Park- und Freizeitanlagen zuzunehmen.

Bei Cadmium nimmt die Resorptionsverfügbarkeit von Park- und Freizeitanlagen zu den Kinderspielflächen um knapp 20 % zu.

Bei Nickel nimmt die Resorptionsverfügbarkeit von industriell-gewerblicher Nutzung hin zu Wohngebietenutzung kaum zu, steigt aber darunter (Kinderspielflächen) um ca. 20 % an.

Die Resorptionsverfügbarkeit von Thallium nimmt im Richtung Prüfwertspanne Kinderspielflächen in geringen Schritten, jedoch sukzessive zu und liegt unterhalb des Prüfwertes für Kinderspielflächen über 10 % höher.

Für Benzo[a]pyren zeigen die Resorptionsverfügbarkeiten zwischen den Prüfwertspannen keine signifikanten Unterschiede, nehmen aber in Richtung des oberen Prüfwertes (Industrie / Gewerbe) zu.

Für Blei und Arsen sind keine Trends ableitbar. Bei Chrom und 2,4 Dinitrotoluol sowie Sprengstoffe und sprengstofftypische Verbindungen die in der BBodSchV geregelte Prüfwerte besitzen, liegen zu wenig Daten vor, die die Qualitätskriterien erfüllen.

Für 2,4 Dinitrotoluol sind zu wenige belastbare Daten (Qualitätskriterien nicht erfüllt) für die Betrachtungen der Spannen der Prüfwerte für die Resorptionsverfügbarkeit vorhanden. Das gilt auch für die Sprengstoffe und sprengstofftypischen Verbindungen, die in der BBodSchV geregelte Prüfwerte besitzen.

zu AP 5: Die Erstellung einer Handlungsanleitung in Bezug auf die Handhabung der Resorptionsverfügbarkeit für den Vollzug des Bodenschutzes wurde nach Fertigstellung des Arbeitspaketes 4 begonnen. In diesem Bericht wird bereits die Übersicht der Ergebnisse des Screenings der Resorptionsverfügbarkeitsdatensätze in der Tabelle 24 veröffentlicht. Diese Übersicht ist lediglich eine Hilfe, inwieweit es sinnvoll ist, konkrete weiterführende Untersuchungen auf Resorptionsverfügbarkeit durchführen zu lassen. Sie ersetzt nicht das Erfordernis der Amtsermittlung im Sinne des § 11 Absatz 2 und 3 zu maßgeblichen Expositionsbedingungen sowie zu den bedeutsamen resorptionsverfügbaren, mobilen oder mobilisierbaren Anteilen der Schadstoffgehalte.

Summary

The amended German Soil Protection Ordinance (BBodSchV) comes into force on 01.08.2023. Section 13 (3) specifies that the detailed investigation for the final risk assessment should determine the relevant exposure conditions for the respective pathways affected within the meaning of Section 11 (2) and (3) as well as the significant resorption-available (RV), mobile or bioaccessible content of the pollutant content.

In this project, data on bioaccessibility from contaminated areas is collected and analysed. The aim is to provide information for the enforcement of the BBodSchV and the application of the procedure for determining and assessing the bioaccessibility of pollutants. The project focusses on the parameters in Annex 2, Table 4: “Test values for the soil-human direct impact pathway”.

The bioaccessibility is the percentage of orally ingested pollutants (e.g. with contaminated soil particles or dust) determined under laboratory conditions that are liberated in the gastrointestinal tract and can be available for absorption by the organism via the digestive process. The functional principle of digestion is standardised in the laboratory. To determine the resorption availability, DIN 19738: 2017-04 [3] is to be used in accordance with the collection of methods for the examination of solids version 2.0 as of 15 June 2021 [8].

At least two separate batches of a soil sample from a suspected contaminated site are analysed. Twice 2 g of the contaminated material ≤ 2 mm is used for the bioaccessibility test in accordance with the standard. The mobilisation is carried out as a double determination with two subsamples.

Five work packages (WP) were formulated for the realisation of the project:

WP1: Selection of sampling sites, sampling of priority pollutants; data procurement and research of already analysed samples, site verification

WP2: Sample preparation and analysis of the samples (ALA approx. 100) including commercial samples (approx. 400)

WP3: Compilation and evaluation of data, data comparison with available data (German “Bundesländer”, ALA, FBU/UBA)

WP4: Data generalisation, derivations for enforcement, test and measure value presentation based on resorption availability

WP5: Preparation of the guidance with coordination (ALA, LABO) and publication

Re WP 1: The sampling procedure complied with the currently valid BBodSchV and the BBodSchV for the soil-human pathway, which comes into force on 1 August 2023. The soil was analysed in accordance with BBodSchV using the “Bodenkundliche Kartieranleitung KA5“ / „Arbeitshilfe für die Bodenansprache im vor- und nachsorgenden Bodenschutz - Auszug aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5“ [4]. The following parameters were determined as a minimum: Depth [below ground surface in m], horizon, colour, humus, soil moisture, hydromorphism, soil density, genesis, soil type, main soil type group, coarse soil, grain size composition according to SEP, carbon, carbonate, parent rock.

Re WP 2: Bioaccessibility data from the laboratory archive, data obtained from the operational business during the project period and the results obtained in the course of the research project were entered into the database. The total content < 2 mm, the bioaccessible and non-bioaccessible fraction, the RV were recorded on a parameter-specific basis and a distinction was made between the old and new standard issue status.

As part of the project, samples were provided that contained contaminants from the parameter groups metals / semi-metals (summarised below as the metals group), PAHs, explosives, PCBs and organochlorine pesticides. The total contaminant content of the < 2 mm fraction of all samples was determined, which, depending on the magnitude of the values, formed the basis for deciding on which samples the resorption test should be carried out.

For the determination of bioaccessibility, there was only an established analytical procedure for metals and benzo[a]pyrene. It was examined whether the methods that are routinely used for soil and water analysis are also suitable for detecting the analytes mentioned in the **mobilised phase** and **centrifugation sediment**. Method development and validation were not part of the research project.

Where available, certified reference material for the tests was used. Furthermore, spiking tests were carried out.

There were no analytical problems with the metals. Data from the interlaboratory test [5] on the bioaccessibility for selected parameters was available and the laboratory has many years of experience in this type of analysis.

For PAHs, only benzo[a]pyrene was analysed in the bioaccessibility test before the start of the project. The method described in Annex D of DIN 19738: 2017-06 was used for this. When the parameter scope was expanded to include the 8 PAHs (benzo[a]anthracene, chrysene, benzo[b]fluoranthene, benzo[k]fluoranthene, benzo[a]pyrene, indeno[1,2,3-*cd*]pyrene, dibenzo[a,h]anthracene and benzo[ghi]perylene), there were sometimes greater fluctuations in the measured values or deviations from the specified QA criteria of the standard. Different columns were used to eliminate separation problems. Device performance also plays a role. When using the reference material, it was shown that it is possible to analyse the 8 PAHs in the bioaccessibility test. However, larger variations of the RV and total contents are to be expected, as even with the certified reference material used, the specified measurement uncertainty is sometimes greater than the permissible deviation from the mean value (QA criterion $\pm 10\%$) in the bioaccessibility test.

There were no suitable samples for PCB determination. In principle, a method is available in the laboratory which was also used in the round robin test. However, no further analyses were carried out.

No analysis method has been available for explosives and components of explosive materials to date. Only TNT was analysed in the round robin test. The interlaboratory test sample had a very high content, so that the analysis was carried out in a highly diluted sample, so that the matrix of the **mobilised phase** became negligible due to dilution. For the values shown in Tabelle 11 recovery tests were carried out to test whether the substances are stable in this matrix and whether they "survive" the gastric stage. No reference material was available for the bioaccessibility tests, so the real samples were analysed. The determination of the total content proved to be difficult in some cases. The fluctuations in the values determined showed that a double determination was often not sufficient. Even greater scatter was therefore to be expected for the values in the **mobilised phase**, and this was confirmed. Initial results were obtained using the analytical method tested, but these are not statistically validated. Furthermore, not all parameters can be analysed with this method; extensive method development would be necessary for this.

There were only a few samples for the organochlorine pesticides, which were only contaminated with HCH. This showed that it was not possible to reliably determine the total content. The samples were too inhomogeneous. However, initial investigations were carried out to recover

the analytes in **mobilised phase** blank value solutions and bioaccessibility tests on various reference materials. Here too, method development was not part of the project. With the method used, initial results for the RV and the balance could be determined. However, the variations are quite large. Based on the limited data, no conclusions can be drawn about the expected bioaccessibility.

Re WP 3: A total of 1742 test results on bioaccessibility were entered into a data table. Soil science data collected specifically for the project was integrated into 735 data sets.

The evaluation of the database resulted in arithmetic mean values of the bioaccessibility of the substances for which test data could be determined in the project (see Abbildung 2 and Tabelle 25). It should be noted that the values given are for guidance only. For many substances, the database is too small (see Figure 1) or the analytical method is not validated (e.g. lack of or too few interlaboratory tests).

When analysing the data from the old and the new DIN method, it became clear that the arithmetic mean values of the parameters determined from all available data differed only slightly. Due to extensive quality assurance, the results according to the new standard are more conclusive.

It also became clear how important it is to observe compliance with the quality criteria in accordance with DIN 19738: 2017-04 when assessing harmful soil contamination. In most cases, the values of the fulfilled and unfulfilled quality criteria are relatively close to each other. Only in the case of thallium and nickel do the ranges differ by more than 10 to 20 %.

The bioaccessibility data for cobalt and the compounds typical of explosives should only be regarded as a rough guide due to the complete lack of values with fulfilled quality criteria. This is particularly the case where the bioaccessibility was given as over 100 % (TNT). In the evaluation of the validation ring test [5] for DIN 19738:2017, analytical difficulties were also pointed out when analysing PCB and TNT for absorption availability. The problem was also evident in the current samples containing TNT. Unfortunately, no suitable sample material for PCBs and OCPs was available in the project.

Based on the data analysis (summarised in Tabelle 24), the following dependencies of bioaccessibility tend to be derived:

Soil type: For a representative evaluation with the soil type, too little data was available for most of the test substances. Analyses were possible for numerous substances for the main soil type groups sand, loam and silt. There was almost no data for clay. For most organic substances, there is a trend of decreasing resorption availability for increasing content of very fine grain sizes. For some metals and semi-metals (As), the bioaccessibility increases with the decrease in grain size.

Humus content: With the exception of individual metals (Cd, Ni, Hg) and arsenic as well as chrysene and indeno[1,2,3-*cd*]pyrene as individual PAH components, the data available to date do not allow any specific dependencies of bioaccessibility (RV) on humus content to be derived.

Only cadmium shows a reduction in RV with increasing humus content. For nickel, mercury, thallium and indeno[1,2,3-*cd*]pyrene, increasing humus content can result in higher bioaccessibility. For the humus levels according to KA 5 [4], the result is more differentiated. As can be seen from the example of the individual PAH parameters, substance-related individual analyses are required.

Carbonate content: Only cadmium, cobalt, mercury and thallium tended to be affected by the carbonate concentration. No correlations could be derived for any of the other parameters. For the metals listed above, bioaccessibility decreases with increasing carbonate content.

Re WP 4: In order to implement the requirements according to BBodSchV section 13 (3), including the determination of the significant bioaccessible pollutant contents, the test value ranges of the substances were assigned to the respective arithmetic mean values of the bioaccessibility. The ranges are basically as follows

- ▶ below threshold values for children's play areas up to threshold values for children's play areas,
- ▶ Children's play areas to residential areas,
- ▶ residential areas to parks and leisure centres,
- ▶ Park and leisure facilities to industrial and commercial properties,
- ▶ Threshold values for industrial and commercial properties and concentrations above these test values.

The trends vary from parameter to parameter and should be seen as statistically non-significant hints.

For antimony, the bioaccessibility appears to be more than double the range for children's play areas compared to the range for industrial and commercial sites as well as parks and leisure facilities.

In the case of cadmium, the bioaccessibility from parks and leisure facilities to children's play areas increases by almost 20 %.

In the case of nickel, the bioaccessibility hardly increases from industrial/commercial use to residential use, but rises by approx. 20 % below this (children's play areas).

The bioaccessibility of thallium increases in the direction of the test value range for children's play areas in small steps, but successively, and is more than 10 % higher below the test value for children's play areas.

For benzo[a]pyrene, the bioaccessibility between the test value ranges shows no significant differences, but increases towards the upper test value (industry / commerce).

No trends can be derived for lead and arsenic. For chromium and 2,4 dinitrotoluene as well as explosives and compounds typical for explosive materials that have test values regulated in the BBodschV, too little data is available that fulfils the quality criteria.

For 2,4-dinitrotoluene, too little reliable data (quality criteria not fulfilled) are available for the consideration of the ranges of the test values for the bioaccessibility. This also applies to explosives and compounds typical of explosives, which have test values regulated in the BBodSchV.

WP 5: The creation of an instruction manual regarding the handling of bioaccessibility for the enforcement of soil protection was started after the completion of work package 4. This report already contains an overview of the results of the screening of the bioaccessibility data sets in Tabelle 24. This overview is merely an aid to the extent to which it makes sense to have specific further analyses of bioaccessibility carried out. It does not replace the requirement for official

investigations within the meaning of Section 11 (2) and (3) BBodSchV on relevant exposure conditions and on the significant bioaccessible or mobilizable fractions of the pollutant content.

1 Einführung

Mit In-Kraft-Treten des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) am 01.03.1999 liegen bundesweit einheitliche Vorgaben zum Umgang mit Bodenbelastungen vor. Vorsorge, Prüf- und/oder Maßnahmenwerte bilden die Grundlage für die Bewertung von Schadstoffen in Böden.

Werden nach BBodSchV (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung) Prüfwert-Überschreitungen für die jeweils relevanten Nutzungen festgestellt, sind laut § 3 (4) der BBodSchV Detailuntersuchungen durchzuführen.

Hinsichtlich des Schutzgutes der menschlichen Gesundheit sollten insbesondere die Resorptionsverfügbarkeit für den Wirkungspfad Boden-Mensch (Direktpfad) sowie die Pflanzenverfügbarkeit für den Wirkungspfad Boden-Nutzpflanze (-Mensch) im Rahmen der Detailuntersuchung Berücksichtigung finden.

In der novellierten BBodSchV (Inkrafttreten 01.08.2023) ist in § 13 Abs. 3 vorgegeben, dass im Rahmen der Detailuntersuchung zur abschließenden Gefährdungsabschätzung die für die jeweils betroffenen Wirkungspfade im Sinne des § 11 Absatz 2 und 3 maßgeblichen Expositionsbedingungen sowie die bedeutsamen resorptionsverfügbaren, mobilen oder mobilisierbaren Anteile der Schadstoffgehalte ermittelt werden sollen. Die Resorptionsverfügbarkeit wurde entsprechend der 2017 neu implementierten DIN 19738:2017-04 bestimmt.

Die DIN 19738:2017-04 Bodenbeschaffenheit – Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial wurde vom Arbeitskreis NA 119-01-02-02-01 AK „Bioverfügbarkeit“ des Unterausschusses NA 119-01-02-02 UA „Chemische und physikalische Verfahren“ im DIN-Normenausschuss Wasserwesen (NAW) erarbeitet. Zur Weiterentwicklung der Vorgängernorm und Validierung dieser Norm wurde das Projekt „Robustheitsuntersuchung zur Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen in Böden“ [5] gemäß Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Forschungskennzahl 37 14 71 217 0 durchgeführt. Schwerpunkte waren die Defizitanalyse der alten Norm, Gewinnung von Bodenproben, die auf Empfehlung des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) nach Vorgaben der BBodSchV entnommen wurden. Die Bodenproben wurden analytischen Untersuchungen zur Überprüfung der Robustheit (Gesamtgehalte, resorptionsverfügbare Anteile/Gehalte, nicht resorptionsverfügbare Anteile/Gehalt) unterzogen. Daran anschließend fanden im Rahmen des Projektes die Organisation von Laborvergleichsuntersuchungen als Validierungsringversuch des Entwurfes der neuen DIN 19738 statt. Die Ergebnisse des Projektes flossen in enger Zusammenarbeit mit dem Normenausschuss NA 119-01-02-02-01 AK "Bioverfügbarkeit" direkt in die Norm ein.

Dieses Projekt, Screeninguntersuchungen zur Implementierung der DIN 19738 und Bewertung der Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen im Vollzug der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung, baut auf dem Projekt „Robustheitsuntersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen in Böden“ [5] auf. Durch die Auswertung von im Rahmen dieses Projektes ermittelter Daten und Daten aus dem laufenden Laborbetrieb sollen Informationen für den Vollzug der BBodSchV in der praktischen Anwendung des Verfahrens zur Ermittlung und Beurteilung der Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen bereitgestellt werden.

2 Zielstellung

In Vorbereitung der Novellierung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) wurden Themengruppen eingerichtet. Diese wiesen darauf hin, dass teilweise großen Unterschiede zwischen festgestellten Gesamtgehalten und deren resorptive Verfügbarkeit vorliegen. Dies betrifft jedoch nicht nur Dioxine und Furane (Beispiel Kieselrot), sondern auch die weiteren anorganischen und organischen Schadstoffe, für die Prüf- und Maßnahmenwerte für den Pfad Boden-Mensch im Anhang 2 der BBodSchV festgelegt sind.

Am 01.08.2023 wird die neue BBodSchV in Kraft treten. Für das Projekt „Screeninguntersuchungen zur Implementierung der DIN 19738 und Bewertung der Resorptionsverfügbarkeit ...“ sind daraus die Parameter und deren Maßgaben gemäß Anlage 2, Tabelle 4: Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch heranzuziehen.

Die für den Pfad Boden-Mensch geltenden Prüf- und Maßnahmewerte sowie die im Rahmen der Novellierung eingeführten weiteren Stoffe erfordern im Hinblick auf die Einschätzung ihrer Resorptionsverfügbarkeit erprobte und validierte Vorgehensweisen, um diese im Rahmen der Untersuchung und Bewertung der schädlichen Bodenveränderung oder Altlast zu berücksichtigen.

Grundlagen des Verfahrens

Zur Ermittlung der Resorptionsverfügbarkeit ist gemäß der „Methodensammlung Feststoffuntersuchung“ Version 2.0 Stand: 15.06.2021 die DIN 19738 (2017-04) anzuwenden. Die Vorgängernorm DIN 19738 (2004-07) soll nicht mehr angewendet werden, ist jedoch als optionale Untersuchungsmethode Bestandteil des aktuell gültigen FACHMODUL's BODEN UND ALTLASTEN Stand 16. August 2012. Diese Analytik wird aufgrund der fehlenden Schritte zur Validitätssicherung der Ergebnisse immer noch preisgünstiger auf dem Markt angeboten, als die gemäß der aktuellen Fassung. Die Vorgängerfassung ist aber mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einer höheren Ergebnisunsicherheit behaftet. Unter anderem aus diesem Grund, wurde die Norm überarbeitet und die DIN 19738 (2017-04) vom Fachbeirat Bodenuntersuchung zur Anwendung empfohlen.

Die Probenahme zur Ermittlung der Resorptionsverfügbarkeit erfolgt gemäß den zusätzlichen Anforderungen an die Probenahme bei orientierenden Untersuchungen und Detailuntersuchungen [BBodSchV neu § 22 (2), (3)].

Im Projekt „Robustheitsuntersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen in Böden“ (FKZ 37 14 71 217 0) wurde anhand ausgewählter Parameter (As, Cd, Pb, Sb, PCB6, 2,4,6-TNT und PAK) die Robustheit des Verfahrens gemäß DIN 19738 (2017-04) durch Versuchsreihen und durch einen Ringversuch grundsätzlich nachgewiesen.

Es hat sich in der Vollzugspraxis herausgestellt, dass es stoffspezifisch sehr unterschiedliche Resorptionsverfügbarkeiten geben kann. Inwieweit die Resorptionsverfügbarkeit z. B. unter vergleichbaren Konzentrationen streut, welchen Einfluss die Bodenart, der Humusgehalt oder der Carbonatgehalt im Boden haben, wurde noch nicht weiter untersucht. Im DIN Arbeitskreis Bioverfügbarkeit (NA 119-01-02-02-01) wurden diese Umgebungsbedingungen bei der Betrachtung der Ergebnisunsicherheit bereits diskutiert und der Bedarf von Screening Untersuchungen festgestellt.

Gegenwärtig wird die Ermittlung und Beurteilung der Resorptionsverfügbarkeit in der Altlasten-Praxis mit einer Vielzahl von Parametern in mehreren Bundesländern (z.B. NRW, Freistaat Sachsen, Niedersachsen) genutzt. Es liegen jedoch nur wenig systematisch ermittelte Ergebnisse und Erfahrungen für die gesamte geregelte Schadstoffbreite vor.

Ziel des Vorhabens ist es, die Praktikabilität des Verfahrens für anorganische und organische Parameter durch Laboruntersuchungen unter Routinebedingungen zu prüfen. Auf der Grundlage einer solchen breiten Datenbasis sind Bewertungsgrundlagen für die Anwendung der Resorptionsverfügbarkeit für den Vollzug des Bodenschutzes abzuleiten und in einer Handlungsanleitung vorzulegen.

Das Projektziel wird durch das systematische Abarbeiten der im folgenden Kapitel aufgeführten Arbeitspakete A1 bis A5 erreicht.

3 Leistungsmerkmale - Arbeitspakete

Wie in der Leistungsbeschreibung vorgegeben werden folgende Arbeitspakete, die aufeinander aufsetzen und zum Teil parallel laufen abgearbeitet:

A1: Auswahl von Probenahmestellen, Probenahme prioritärer Schadstoffe; Datenbeschaffung und Recherche bereits untersuchter Proben, Standortverifizierung

Dieses Arbeitspaket beinhaltet im Wesentlichen die Probenahmeplanung und Durchführung der Probenahme in Verbindung mit der Auswertung bereits entnommener Proben und laufender Probenahmen kommerzieller Aufträge des im Projekt eingebundenen Labors.

Die Probenahme von ca. 100 Proben aus kontaminierten Böden erfolgt unter Berücksichtigung der Vorgaben des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO). Dazu werden Abfragen über den ALA an die Länder bis hin zu den zuständigen Bodenschutzbehörden verteilt. Die Rückmeldungen werden gesammelt und ein Probenahmeplan erstellt. Dieser wird unter Berücksichtigung des Schadstoffspektrums, der Validität der Erkundungsdaten und der Lage der Probenahmestellen über die Laufzeit des Arbeitspaketes fortgeschrieben.

Ca. 400 weitere untersuchte oder zu untersuchende Proben stammen aus dem laufenden Geschäftsbetrieb. Die Proben und Untersuchungsdaten (Standortverifizierung) werden auf Brauchbarkeit für das Projekt geprüft und ggf. übernommen.

Die Validität und Brauchbarkeit der Proben und Untersuchungsergebnisse werden mindestens auf folgenden Vorgaben geprüft:

- ▶ Deutschlandweite Verteilung der Probenahmestellen
- ▶ Mindestens 3 Bodenarten-Hauptgruppen gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5, Hannover 2005 und der Arbeitshilfe für die Bodenansprache im vor- und nachsorgenden Bodenschutz, Hannover 2009 mit unterschiedlichen Anteilen organischer Bodensubstanz
- ▶ Proben aus Territorien in denen bereits bekanntermaßen Prüfwerte überschritten sind
- ▶ Breites Spektrum organischer und anorganischer Schadstoffe die in der BBodSchV:2021 mit Prüf- und Maßnahmewerten für den Pfad Boden-Mensch geregelten Schadstoffe

A2: Probenvorbereitung und Analytik der Proben (ALA ca. 100) unter Einbeziehung kommerzieller Proben (ca. 400)

Mit diesem Arbeitspaket erfolgt die eigentliche Probenvorbereitung und Analytik der Proben gemäß DIN 19747. Es werden sowohl die ca. 100 Proben ALA/LABO wie die Proben aus den laufenden Projekten des Laboratoriums analysiert. Die ca. 400 Proben aus den laufenden Projekten des Laboratoriums sind nicht über die Mittel dieses Forschungsvorhabens abgedeckt, sondern sind über die kommerziellen Aufträge finanziert und deshalb anonymisiert. Lediglich der allgemeine Standort, aber nicht die genaue Lage und die Auftraggeber wurden dokumentiert. Einen großen Pool an Daten bildet zusätzlich das Laborinformationssystem des im Projekt eingebundenen Labors zur Vermeidung von unnötigem Analysen- und Kostenaufwand.

A3: Zusammenstellung und Bewertung der Daten, Datenvergleich mit vorliegenden Daten (Länder, ALA, FBU/UBA)

Über die Laufzeit werden die gewonnenen Daten zusammengestellt. Dazu wurde eine geeignete Datenbank erarbeitet, um eine stets aktuelle Übersicht zu haben. Gemäß dieser Übersicht wurde auch auf das Arbeitspaket A1 zurückgegriffen, um z. B. bestimmte Schadstoffe und Bodenarten gezielt durch Recherche im Laborinformationssystem, Standortsuche und Probenahme zu ergänzen.

Weiterhin wurden in die Datenbank bereits vorliegenden Daten aus den Bundesländern zusammen mit ALA und dem Fachbeirat für Bodenuntersuchungen eingepflegt.

A4: Datenverallgemeinerung, Ableitungen für Vollzug, Prüf- und Maßnahmewertdarstellung auf der Grundlage der Resorptionsverfügbarkeit

Die gewonnenen und erfassten Daten zur Resorptionsverfügbarkeit wurden mit dem Ziel analysiert, typischer Resorptionsverfügbarkeiten für die untersuchten anorganischen und organischen Schadstoffe für den Vollzug des Bodenschutzes abzuleiten. Diese werden den Prüf- und Maßnahmenwerten der BBodSchV gegenübergestellt. Weiterhin wurden die Bodenarten und Humusgehalte der Böden dabei berücksichtigt. Auf dieser Grundlage wurde eine Risikobewertung der der Prüf- und Maßnahmenwerten der BBodSchV bezüglich der typischen Resorptionsverfügbarkeiten durchgeführt. Dabei wurde u. a. das bereits abgeschlossene Projekt UFOPLAN 3715 74 299 0 „Umgang mit der Messunsicherheit bei der Überschreitung von Prüf- und Maßnahmewerten für den Vollzug der Bundesbodenschutz- und Altlastenverordnung“ genutzt.

A5: Erstellung der Handlungsanleitung mit Abstimmung (ALA, LABO) und Veröffentlichung

Die Erstellung der Handlungsanleitung in Bezug auf die Handhabung der Resorptionsverfügbarkeit für den Vollzug des Bodenschutzes erfolgte auf der Basis der vorangegangenen Arbeitspakete, in Abstimmung und gemäß den Vorgaben des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO).

Das Ergebnis des Forschungsvorhabens ist eine Handlungsanleitung zur Anwendung der Resorptionsverfügbarkeit für die Bewertung von Schadstoffen im Vollzug des Bodenschutzes.

Das Projekt endet mit der Veröffentlichung der Handlungsanleitung.

4 Ergebnisse A1: Auswahl von Probenahmestellen sowie Probennahme kontaminierter Böden unter Berücksichtigung der Vorgaben des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO).

Es sollte ein breites Spektrum der in der BBodSchV mit Prüf- und Maßnahmenwerten für den Pfad Boden-Mensch geregelt bzw. entsprechend der am 01.08.2023 in Kraft tretenden BBodSchV zusätzlich zu regelnden Schadstoffen abgedeckt, sowie unterschiedliche Bodenarten mit unterschiedlichen Anteilen organischer Bodensubstanz herangezogen werden.

Die Vorgehensweise der Probenahme entsprach der aktuell gültigen BBodSchV und der am 01.08.2023 in Kraft tretenden BBodSchV für den Pfad Boden-Mensch. Von den Flächen wurden Mischproben aus dem vorgegebenen kontaminierten Horizont entnommen. Die Flächen waren

nicht größer als 500 m². Lagen keine Angaben zur Entnahmetiefe vor, wurden für eine Mischprobe 20 Einzelproben aus 0,00 - 10 cm und ggf. aus 10 – 30 cm entnommen. Die Proben wurde mit einem Probenstecher oder Handbohrer Typ Edelman gemäß DIN EN ISO 22475-1 und DIN ISO 10381-2 gewonnen. Das Mischen der Proben fand nach dem „Drei-Eimer-Prinzip“ durch Zerkleinern eventueller Bodenklumpen und mindestens 3-maliges Umschütten und gleichzeitiges Teilen des Probenmaterials statt. Die Proben wurden in zwei 500 ml Braungläser randvoll verdichtet gefüllt und gekennzeichnet. Bis zur schnellstmöglichen Übergabe an das Labor wurden die Proben dunkel und gekühlt transportiert. Die Bodenansprache erfolgte gemäß BBodSchV mit der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA5 / Arbeitshilfe für die Bodenansprache im vor- und nachsorgenden Bodenschutz - Auszug aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 [4]. Folgende Parameter wurden mindestens ermittelt: Tiefe [OG m bis UG m], Horizont, Farbe, Humus, Bodenfeuchte, Hydromorphie, Lagerungsdichte, Genese, Bodenart, Bodenartenhauptgruppe, Grobboden, Korngrößenzusammensetzung gemäß SEP, Kohlenstoff, Carbonat und Ausgangsgestein.

Es gab einzelne Abweichungen von dem Prinzip der Probengewinnung gemäß dem Wirkungspfad Boden-Mensch an den Probenahmestellen, die vorhergehend durch Bohrungen/Kleinbohrungen erkundet wurden. Hier wurde möglichst der Bereich der ehemaligen Bohrung aufgesucht und eine Probe aus dem vorgegebenen Teufenbereich mit einem Handbohrer drehend entnommen (DIN EN ISO 22475-1 und DIN ISO 10381-2).

Nach der Verlängerung des Endtermins der Anfrage an den Ständigen Ausschuss Altlasten (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) um 1 Monat bis zum 30.04.2019 gab es insgesamt 15 Rückmeldungen aus Rheinland-Pfalz, Bayern, Hessen, Hamburg, Baden-Württemberg, Sachsen-Anhalt, Nordrhein-Westfalen und Sachsen.

Aufgrund der oft unterschiedlichen Vorgehensweise bis hin zur Dokumentation kontaminierter Flächen, Altlasten usw. ist die Verwertbarkeit der Daten sehr unterschiedlich. Das erforderte einen größeren Aufwand bei der Probenahmeplanung, die mit zahlreichen Rückfragen verbunden war. Es wurden dazu Koordinationsgespräche mit den Betroffenen geführt.

Viele Datensätze verfügten weder über konkrete Lagekoordinaten noch über genauere Ortsangaben oder Lagepläne usw. Für mehrere unterschiedliche Probenahmestellen wurden teilweise dieselben Koordinaten angegeben (ggf. handelt es sich um die Liegenschaftskordinaten im Altlastenkataster).

Bereits im Anschreiben oder nach Rücksprachen wurde festgestellt, dass die Zugänglichkeit der Probenahmestellen in einigen Fällen nicht ohne weiteres möglich war.

Dies bedingte zusätzlich Recherche- und Planungsaufwendungen. Zuerst wurden die Probenahmestellen aufgesucht, bei denen der Aufwand und die Risiken (z. B. die Wiederholgenauigkeit der Probenahme und damit der Untersuchungsergebnisse) überschaubar waren. Zu beachten war, dass die ehemaligen Probenahmestellen so genau wie möglich wiedergefunden werden mussten, um möglichst die ursprünglich nachgewiesenen Gehalte zu reproduzieren. Fehlprobenahmen und daraus resultierende Ersatzbeprobungen an anderen Standorten aufgrund unzureichender Ausgangsdatenlagen oder Minderbefunden waren im Projekt nicht vorgesehen und somit nicht Gegenstand des Angebots.

Nach der Auswertung der vorgeschlagenen Standorte und deren standortspezifischen Kontaminationen handelt es sich um vorwiegend Arsen-, Blei-, Cadmium-, Nickel-, Quecksilber- und Benzo[a]pyren-Belastungen (siehe Tabelle 1). Weiterhin wurden drei Probenahmestellen für Polychlorierte Biphenyle angeboten.

Tabelle 1: Parameterbezogene ALA/Länder - gemeldete Probenahmestellen

Parameter	gemeldete Probenahmestellen ALA/Länder
Sb [mg/kg TM]	
As [mg/kg TM]	64
Pb [mg/kg TM]	38
Cd [mg/kg TM]	21
Cyanide [mg/kg TM]	
Cr ges [mg/kg TM]	8
Cr VI [mg/kg TM]	
Co [mg/kg TM]	
Ni [mg/kg TM]	19
Hg [mg/kg TM]	11
TI [mg/kg TM]	
Aldrin [mg/kg TM]	
2,4-Dinitrotoluol [mg/kg TM]	
2,6-Dinitrotoluol [mg/kg TM]	
DDT [mg/kg TM]	
Hexachlorbenzol [mg/kg TM]	
HCH [mg/kg TM]	
Hexyl [mg/kg TM]	
Hexogen [mg/kg TM]	
Nitropenta [mg/kg TM]	
PCP [mg/kg TM]	
B(a)P [mg/kg TM]	106
TNT [mg/kg TM]	
PCB [mg/kg TM]	3

Für 16 Parameter der BBodSchV fehlten Angebote geeigneter Probenahmestellen.

Zusammenfassend war festzustellen, dass neben dem bereits hohen Koordinationsaufwand ein weiterer Rechercheaufwand hinsichtlich Bodenproben für die fehlenden Parameter anfiel.

Diese Probleme wurden mit dem Projektsteuerer des Auftraggebers besprochen, um pragmatische Lösungen zu finden, ohne das Projektziel zu gefährden oder unnötig einzuschränken.

Dies begründete eine zweite, auf konkrete Untersuchungsparameter eingeschränkte, Anfrage, die u.a. wie folgt formuliert wurde:

„Es ist festzustellen, dass für 16 Parameter Angebote für Probenahmestellen fehlen... Alle Mitwirkenden werden gebeten, weitere Vorschläge für Probenahmestellen für die noch fehlenden Parameter zu melden.“

Bis auf eine Absage wurden keine weiteren Vorschläge eingereicht. Nach Rücksprachen mit Behördenvertretern, die bereits potentielle Probenahmestellen eingereicht hatten, war zu konstatieren, dass das vorwiegende Interesse bei den Parametern As, Pb und B(a)P bezüglich der Resorptionsverfügbarkeit besteht.

Die Probenahmen wurden am 06.03.2020 abgeschlossen. Die Probenahmeprotokolle befinden sich in der Anlage 1.

Von weiteren Probenahmen wurde abgesehen, da die Corona-Pandemie mit den Beschränkungsmaßnahmen begann. Die Proben reichen aus, um mehr als 100 Untersuchungen verschiedener Parameter auf Resorptionsverfügbarkeit durchführen zu können.

Die Probenahmen waren in den meisten Fällen mit dem bereits erwähnten zusätzlichen und nicht eingeplanten Koordinationsaufwand verbunden. Entgegen der ausdrücklichen Bitte „Diese Standorte sollten ohne Probleme zugänglich und zu beproben sein.“ wurde bei den Koordinationsgesprächen von den Behörden erschwerende Umstände gefordert. Dazu gehörten u.a.:

- ▶ die Anwesenheit eines Behördenvertreters bei der Probenahme,
- ▶ die Teilnahme von anderen Probenehmern, die parallel Proben nehmen wollen,
- ▶ zusätzliche Beprobungen tiefer liegender Horizonte, die für dieses Projekt keine Relevanz haben usw.

In einem Fall wurde im Nachhinein ein Betretungsverbot erteilt, weil zum gewünschten Zeitraum der Probenahme eine behördliche Begleitung nicht möglich war.

In Absprache mit dem Projektleiter vom UBA führten zusätzliche aufwanderhöhende Anforderungen zum Ausschluss des jeweiligen Probenahmestandortes, da dadurch der Aufwand für die Probenahme unverhältnismäßig gestiegen wäre. Alternativ dazu wurden u. a. Laboratorien (z. B. BAM) und Ingenieurbüros befragt, um geeignete Probenahmestandorte zu identifizieren und Probenmaterial zu gewinnen.

Weiterhin wurden von der BAM aus dem Forschungsprojekt: „Monitoringprogramm zur Verwertung von Bodenmaterial gemäß §§ 6-8 Novelle BBodSchV, FKZ 3716 74 203 0“ 30 Proben übernommen, die analytisch auf ihre Eignung für das Projekt zu prüfen waren.

Bei den Proben von der BAM und bei den Proben der Länder wurde festgestellt, dass meistens wesentlich niedrigere Gehalte in den aktuell entnommenen Proben nachweisbar waren. Ursache hierfür können der Beitrag der Probenahme an der gesamten Ergebnisunsicherheit und differierende Probenahmestrategien (Einzelproben statt Mischproben, wie in der BBodSchV gefordert) sein. Damit waren Proben deren Gehalte weit unter den Prüfwerten für den Wirkungspfad Boden-Mensch Kinderspielflächen lagen im Projekt nicht verwendungsfähig.

Es resultierte erhöhter Analysen- und Probenahme-Aufwand, der unverbindlich angemeldet wurde (s. 2. Zwischenbericht).

5 A2: Probenvorbereitung und –aufbereitung entsprechend DIN 19747 sowie analytische Untersuchungen der kontaminierten Böden zur Bestimmung der Resorptionsverfügbarkeit nach DIN 19738 für die ausgewählten anorganischen und organischen Schadstoffe

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollten ca. 100 Proben bezüglich der Resorptionsverfügbarkeit untersucht werden. Weiterhin sollten ca. 400 kommerzielle Proben, d.h. Proben aus dem laufenden analytischen Prozess während der Projektlaufzeit bzw. Archivproben analysiert werden und in die Auswertung einfließen. Da sich schon während der Probenahmen und der parallelen Analyse der Gesamtgehalte der verschiedenen Parameter abzeichnete, dass einige Proben aufgrund ihrer Gehalte nicht geeignet sein würden, wurden vorsorglich nicht nur 100 Proben zur Verfügung gestellt, sondern insgesamt 122. 5 weitere Proben wurden nicht untersucht, da kein ausreichender Feinanteil < 2 mm gewonnen werden konnte. Aus dem laufenden Laborbetrieb wurden wesentlich mehr als 400 Proben in die Datenbank eingepflegt.

5.1 Voruntersuchungen zu den Gesamtgehalten des Probenmaterials

Um die Eignung der Proben hinsichtlich der Resorptionsverfügbarkeits-Untersuchungen zu prüfen, mussten alle Proben an der Fraktion < 2 mm auf den Gesamtgehalt der jeweilig vorgegebenen bzw. vermuteten Parameter analysiert werden. Anhand der erhaltenen Ergebnisse wurden entsprechende Proben zur Analytik der Resorptionsverfügbarkeiten ausgewählt.

Dafür erfolgte die Bestimmung der Trockenmasse an einer Teilprobe sowie die Siebung der Proben und die Ermittlung der Anteile < 2 mm und > 2 mm. Zur Analytik der Gesamtgehalte wurde die Fraktion < 2 mm gemäß normiertem Verfahren herangezogen:

Tabelle 2: Analysenmethoden zur Bestimmung der Gesamtgehalte

Parametergruppe	Norm	Messprinzip
Metalle	DIN EN ISO 17294-2	ICP-MS
PAK	DIN ISO 18287	GC-MS
PCB	DIN EN 15308	GC-MS
OCP	DIN ISO 10382	GC-MS
STV	DIN ISO 11916-1	HPLC

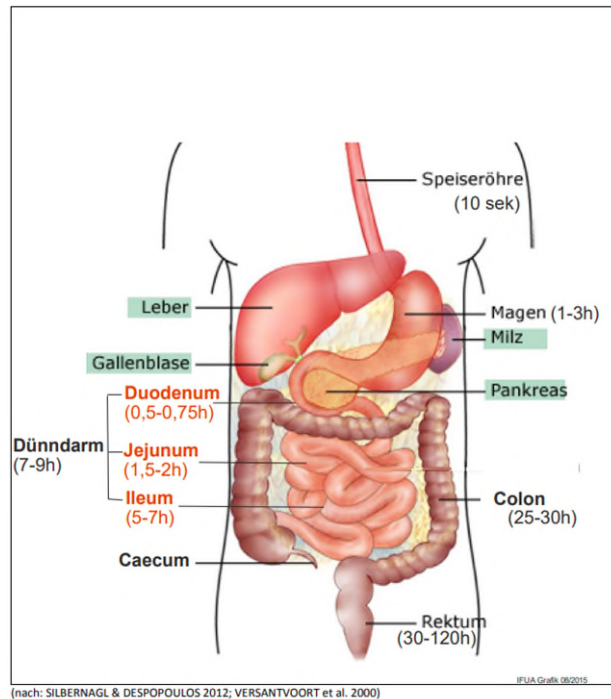
Die analysierten Gesamtgehalte, die resorptionsverfügbaren und nicht verfügbaren Anteile sowie die daraus berechneten Resorptionsverfügbarkeiten wurden in die Datenbank eingetragen. Da an einigen Proben mehrere Parameter untersucht wurden, beziehen sich im Folgenden die angegebenen Anzahlen nicht mehr auf die Probe, sondern auf die Anzahl der Datensätze.

5.2 Methodik der Resorptionsuntersuchungen

Die Resorptionsverfügbarkeit ist der unter Laborbedingungen prozentual ermittelte Anteil oral aufgenommener Schadstoffe (z. B. mit kontaminierten Bodenpartikeln oder Staub), die im Magen-Darmtrakt freigesetzt werden und vom Organismus über den Verdauungsprozess resorbiert werden können. Das Funktionsprinzip der Verdauung wird im Labor normiert nachgestellt.

Die Definition der Resorptionsverfügbarkeit gemäß DIN 19738: 2017-04 lautet: „...prozentualer Übergang eines chemischen Elements oder einer chemischen Verbindung von der festen Probe in die flüssige Phase (das Mobilisat) des nach dieser Norm festgelegten in vitro-Prüfsystems, wobei die Bezugsgröße der nach Aufschluss oder Extraktion analysierte konventionelle Gesamtgehalt der festen Probe ist“.

Abbildung 1: Physiologie der menschlichen Verdauung



Quelle: aus UBA Texte Robustheitsuntersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen in Böden (FKZ 37 14 71 217 0).

Die Analytik der anorganischen und organischen Schadstoffe erfolgt gemäß DIN 19738: 2017-04 als Simulation der menschlichen Verdauung. Für die Mobilisierung werden von einer Bodenprobe einer altlastenverdächtigen Fläche zwei getrennte Ansätze (Doppelbestimmung) untersucht. Es werden jeweils 2 g des kontaminierten Materials der Siebfraktion < 2 mm in 100 ml synthetischem Magensaft mit 10 g Vollmilchpulver suspendiert. Der pH-Wert der Suspension wird mit 10-%-iger Salzsäure auf pH 2,0 eingestellt und die resultierende Suspension wird 2 h bei 37 °C in einem thermostatierten Wasserbad gerührt. Steigt dabei der pH-Wert über 4,0 an, wird dieser mit 10-%-iger Salzsäure auf pH 2,5 zurückgeregelt.

Nach 2 h werden dem Verdauungsansatz 100 ml synthetischer Darmsaft zugegeben, und der pH-Wert des Ansatzes wird mittels NaHCO₃ (fest) im Verlauf von 60 bis 90 min auf pH 7,5 eingestellt. Die Mobilisierung der Schadstoffe mit dem synthetischen Darmsaft verläuft über 3 h. Nachfolgend wird der pH-Wert des Ansatzes überwacht und ggf. mittels Salzsäure auf pH 7,5 nachreguliert.

Beim Schütteln der Verdauungsansätze können sich Partikel des Probenmaterials und Komponenten des Verdauungssafts oberhalb der wässrigen Phase an der Wand des Behälters anlagern. Die anhaftenden Partikel müssen von Zeit zu Zeit von Hand wieder in die Suspension durch Schütteln integriert werden.

Die Trennung der flüssigen (Mobilisat) und festen Phase (Sediment) erfolgt durch Zentrifugation.

Die chemische Analyse der relevanten Parameter erfolgt nach den jeweiligen Normen unter Beachtung der dort angegebenen Anwendungsbereiche. Durch den Einsatz von Vollmilchpulver ist in der Regel eine aufwändigere, parameterspezifische Probenvorbehandlung bzw. -aufbereitung notwendig.

5.3 Ergebnisse der Resorptionsuntersuchungen

Insgesamt wurden 2887 Datensätze in der Datenbank erfasst. Davon sind 1428 aus dem laufenden Laborbetrieb und 1459 den im Rahmen des Projektes genommenen Proben zuzuordnen. Bei 1067 der 1459 Datensätze konnten nur Gesamtgehalte < 2 mm ermittelt werden. Gründe dafür waren z.B. zu geringe Gehalte der gesuchten Analyten (kleiner Bestimmungsgrenze oder weit unter den Prüfwerten der BBodSchV) oder sehr starke Streuungen durch Inhomogenitäten der Proben.

Bei 816 der 2887 Datensätze wurde die Resorptionsverfügbarkeit nach DIN 19738: 2004-07 und bei 2071 nach DIN 19738: 2017-06 ermittelt.

Die grundlegende Vorgehensweise zur Mobilisierung der Schadstoffe aus den Bodenproben (Magen-Darm-Modell) ist bei beiden Normausgaben vergleichbar. Alle Untersuchungen erfolgen in Doppelbestimmung. Folgende Änderungen wurden in der aktuell gültigen Norm aufgenommen:

- ▶ Verwendung von Milchpulver,
- ▶ Verkürzung der Mobilisierung der Darmstufe von 6 h auf 3 h,
- ▶ Vorgabe der pH-Wert- Kontrollintervalle von wenigstens 10 min,
- ▶ Analyse des nicht resorbierbaren Anteils (Sediment) ist für jede Probe notwendig, vorher nur alle 20 Proben,
- ▶ Aufnahme von umfangreicheren Qualitätssicherungsmaßnahmen unter den Normpunkten 10.2, 10.3 und 10.4 (z.B. Abweichung der Einzelwerte Mobilisat vom Mittelwert $\pm 10\%$, Bilanzabweichung < 20 %).

Im Labor wurde seit Beginn der Resorptionsanalytik immer unter Verwendung von Milchpulver gearbeitet, was die erhaltenen Ergebnisse vergleichbar macht. In jeder Versuchsserie wurde eine Referenzprobe mitgeführt.

Eine Aufschlüsselung der Datensätze nach den Parametergruppen der im Rahmen des Projektes genommenen Proben fasst die Tabelle 3 zusammen.

Tabelle 3: Tests nach Parametergruppe (Anzahl der Datensätze) der UBA-Proben

Parametergruppe	Gesamtgehalte (< 2 mm Fraktion)	Resorptionsverfügbarkeit
Metalle	126	77
PAK	680	296
STV	19	keine
PCB	84	keine
OCP	177	keine

In den folgenden Abschnitten werden die analytischen Erfahrungen und Herausforderungen sowie Ergebnisse getrennt nach Parametergruppen beschrieben.

5.3.1 Metalle

Es wurden die Metalle Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Cobalt, Nickel Quecksilber, Thallium und Antimon im Resorptionsversuch analysiert.

Bei der Untersuchung der Metalle nach DIN 19738 gab es keine analytischen Probleme. Die Methodik ist in der Norm gut beschrieben. Wenn Abweichungen von den QS-Kriterien nach DIN 19738: 2017-06, Abs. 10.2-10.4 auftreten, kann das auf die Inhomogenität der Proben zurückgeführt werden. Zur Kontrolle des Verfahrens wurde das Referenzmaterial „BGS Guidance Material 102“ der British Geological Survey verwendet. Die zertifizierten Werte der Resorptionsverfügbarkeit dienten hierbei zur Orientierung, da diese nicht nach DIN 19738 ermittelt wurden. Diese Werte für den verfügbaren Anteil betragen $5,4 \pm 2,4$ mg/kg für Arsen und 13 ± 6 mg/kg für Blei. Diese entsprechen einer Resorptionsverfügbarkeit von 5,2 % für Arsen und 16,4 % für Blei. Beachtlich ist jedoch die angegebene Messunsicherheit von 44 bzw. 46 % bei dem analysenfeinen homogenen Material. Weitere Elemente sind nicht zertifiziert.

Anhand der ermittelten Daten zu dem o.g. Referenzmaterial und den Angaben aus dem Validierungsringversuch 2016 [5] resultiert die erweiterte Messunsicherheit U (k-Faktor = 2) mit der Excel-Vorlage von Dr. M. Koch, Institut für Siedlungswasserbau der Universität Stuttgart. Diese betragen 21,1 % für Arsen, 54,3 % für Blei, 19,5 % für Cadmium und 17,3 % für Antimon.

Der erhöhte Wert für Blei spiegelt die Laborerfahrung wider, dass die Inhomogenität bei diesem Parameter am größten ist. Offensichtlich kommt es dabei auch zu Entmischungseffekten, was bei der Einwaage der relativ geringen Probemengen für den Resorptionsversuch, aber auch bei der Ermittlung der Gesamtgehalte eine besondere Herausforderung darstellt. Im Labor wird deshalb auch bei den Gesamtgehalten immer eine Doppelbestimmung durchgeführt. Bei unplausiblen RV-Werten hinsichtlich Blei ist es also auch zu empfehlen, die Gesamtgehalte in einer weiteren Doppelbestimmung zu prüfen, da oftmals dort der Fehler liegt. Die Berechnung der Resorptionsverfügbarkeit mit Gesamtgehalten aus einem anderen Labor (nicht das Labor, welches resorbiert hat) ist daher sehr kritisch zu betrachten.

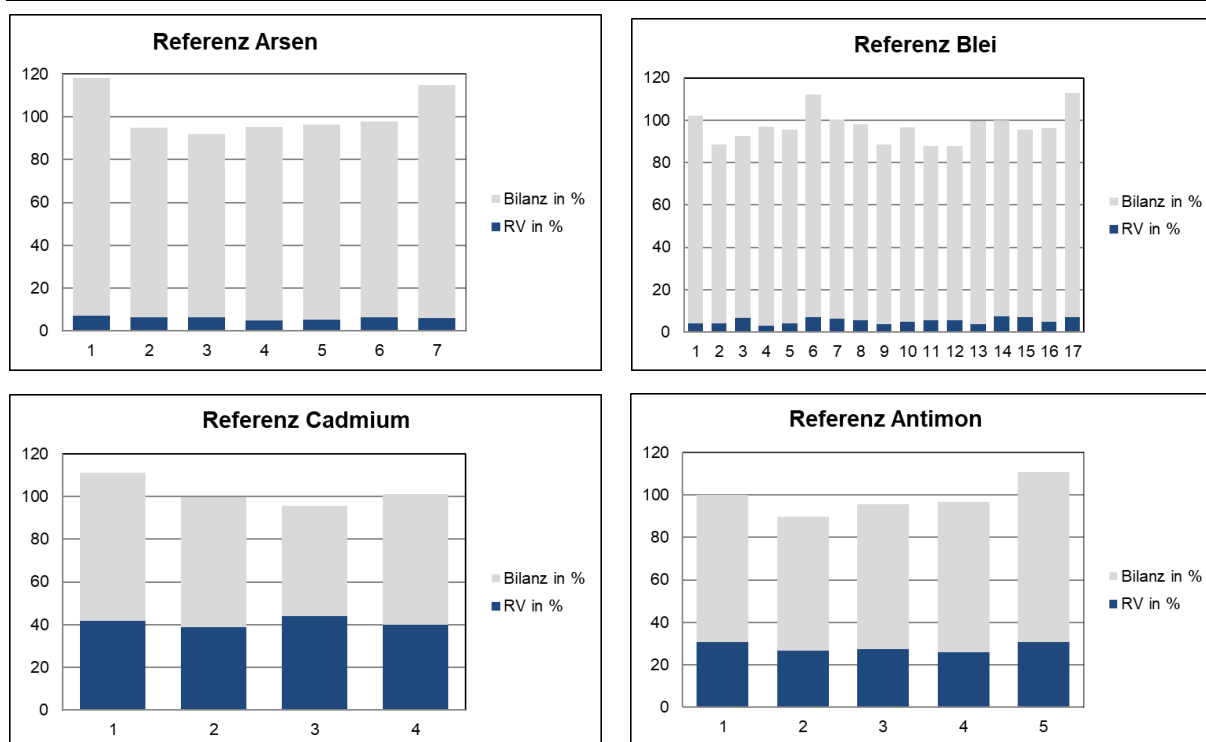
Die Gesamtgehalte des Referenzmaterials wurden für alle in Tabelle 4 der Anlage 2 der BBodSchV: 2021 aufgeführten Metalle bestimmt. (Tabelle 4)

Tabelle 4: Gesamtgehalte des Referenzmaterials (BGS Guidance Material 102)

Parameter	Gesamtgehalt [mg/kg]	RSD [%]
Antimon	1,15	3,2
Arsen	109,3	3,0
Blei	72,2	2,8
Cadmium	0,39	8,5
Chrom	154,7	3,
Cobalt	39,2	4,0
Nickel	74,2	4,4
Quecksilber	0,10	8,7
Thallium	< 0,2	-

Für die Metallparameter Chrom, Cobalt, Nickel, Quecksilber, Thallium gab es bisher keinen Ringversuch. Die Standardabweichungen der RV-Daten von Chrom, Cobalt, Nickel des Referenzmaterials (siehe Tabelle 5) sind mit denen von Cadmium, Antimon und Arsen vergleichbar, so dass man für diese Elemente eine erweiterte Messunsicherheit von 20 % abschätzen kann. Der Quecksilbergehalt des Referenzmaterials liegt nur geringfügig über der Bestimmungsgrenze der Gesamtgehalte und Thallium ist gar nicht enthalten, so dass hierfür keine Aussagen getroffen werden können. Die Plausibilität der Versuche konnte daher bei diesen Parametern nur über die Bilanzierung geprüft werden.

Abbildung 2: RV-Daten des Referenzmaterials für Parameter des Ringversuchs



Quelle: eigene Darstellung, Eurofins Umwelt Ost GmbH, Jena.

Tabelle 5: Resorptionsverfügbarkeit des Referenzmaterials (BGS Guidance Material 102)

Parameter	Mittlere RV [%]	RSD [%]
Antimon	28,3	7,8
Arsen	6,1	10,4
Blei	5,2	26,6
Cadmium	41,1	5,4
Chrom	5,5	7,9
Cobalt	26,5	1,6
Nickel	15,4	4,4

5.3.2 Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Zu Beginn des Projektes erfolgte die Bestimmung der Resorptionsverfügbarkeit der PAK ausschließlich für Benzo[a]pyren, da es nur für diese Verbindung der 16 EPA-PAK einen Prüfwert in der BBodSchV gibt. Während der laufenden Untersuchungen mehrten sich die Anfragen im operativen Geschäft zur Untersuchung der 8 schweren PAK (Benz[a]anthracen, Chrysen, Benzo[b]fluoranthren, Benzo[k]fluoranthren, Benzo[a]pyren, Indeno[1,2,3-cd]pyren, Dibenz[a,h]anthracen und Benzo[ghi]perylen), weshalb dazu übergegangen wurde, diese 8 Parameter zu untersuchen.

Die Untersuchung der PAK im Resorptionsversuch erfolgte nach der im Anhang D der DIN 19738: 2017-06 beschriebenen Methode. Für Benzo[a]pyren wurden dabei gute Ergebnisse erreicht, d. h., dass in der Regel die QS-Kriterien nach DIN 19738: 2017-06, Abs. 10.2-10.4 erfüllt sind. Wenn es hier zu Abweichungen kommt, kann das auf Inhomogenitäten der Ausgangsproben zurückgeführt werden. Gerade bei den partikulär gebundenen PAK zeigt sich das bei Mehrfachbestimmungen der Gesamtgehalte.

Für PAK gibt es kein zertifiziertes Referenzmaterial für die Resorptionsverfügbarkeit wie bei den Metallen. Daher wurde die Kontrolle der Versuche über die Bilanzen, d.h. die Summe des resorptionsverfügbaren Anteils (Mobilisat) und des Rückstandes des Resorptionsversuches (Sediment) eines Referenzmaterials für Gesamtgehalte durchgeführt. Es wurde auf das Referenzmaterial BAM-U013 zurückgegriffen. (Tabelle 6)

Tabelle 6: Referenzmaterial PAK (BAM-U013)

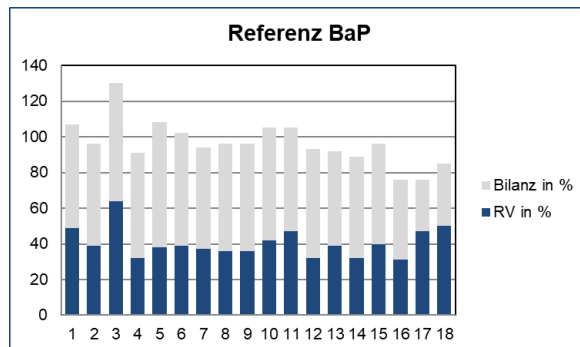
Parameter	Gesamtgehalt [mg/kg] Referenzwert	U, k=2, 95 % [mg/kg]	Abweichung vom Mittelwert [%]
Naphthalin	1,9	0,4	21,1
Acenaphthylen	-	-	-
Acenaphthen	0,69	0,14	20,3
Fluoren	0,98	0,09	9,2
Phenanthren	7,0	0,85	7,1
Anthracen	2,38	0,12	5,0
Fluoranthen	14,2	0,7	4,9
Pyren	9,7	0,6	6,2
Benzo[a]anthracen	9,6	0,6	6,3
Chrysen	10,6	0,6	5,7
Benzo[b]fluoranthren	11,3	1,2	10,6
Benzo[bk]fluoranthren	4,7	0,3	6,4
Benzo[a]pyren	8,1	0,8	9,9
Indeno[1,2,3,-cd]pyren	5,5	0,5	9,1
Dibenzo[a,h]anthracen	2,02	0,26	12,9
Benzo[ghi]perylen	5,5	0,4	7,3

Betrachtet man die Abweichungen vom Mittelwert bei diesem analysenfeinen Referenzmaterial im Vergleich zu den zugelassenen Abweichungen der DIN 19738 ($\pm 10\%$ vom Mittelwert, Bilanz $\pm 20\%$), wird deutlich, dass dieses Kriterium nicht einmal für alle Parameter der Referenz eingehalten wird und das nur für die „einfache“ Extraktionsanalyse der Gesamtgehalte. Daher ist zu erwarten, dass bei wesentlich mehr analytischen Schritten während des

Resorptionsversuches, der anschließenden Extraktion und Aufarbeitung größere Abweichungen auftreten.

Mit dem genannten Referenzmaterial ist die erweiterte Messunsicherheit U (k-Faktor = 2,95 %) mit der Excel-Vorlage von Dr. M. Koch, Institut für Siedlungswasserbau der Universität Stuttgart für Benzo[a]pyren berechnet. Diese beträgt 38,6 % für den resorptionsverfügbaren Anteil (RV). Die dazugehörige Bilanzen und die Referenzwerte für den resorptionsverfügbaren Anteil (RV) sind in Abbildung 3 und in Tabelle 7 dargestellt.

Abbildung 3: RV-Daten des Referenzmaterials BAM U013 C für BaP



Quelle: eigene Darstellung, Eurofins Umwelt Ost GmbH, Jena.

Tabelle 7: Referenzmaterial PAK - (RV) und Bilanz für Benzo[a]pyren

BAM U013C	RV [%]	Bilanz [%]
Ref 1	49	107
Ref 2	39	96
Ref 3	64	130
Ref 4	32	91
Ref 5	38	108
Ref 6	39	102
Ref 7	37	94
Ref 8	36	96
Ref 9	36	96
Ref 10	42	105
Ref 11	47	105
Ref 12	32	93
Ref 13	39	92
Ref 14	32	89
Ref 15	40	96

BAM U013C	RV [%]	Bilanz [%]
Ref 16	31	76
Ref 17	47	76
Ref 18	50	85
Mittelwert	41	97
SD	4,3	2,9
RSD	10,7	3,0

Im Projektverlauf wurde dazu übergegangen, nicht nur Benzo[a]pyren als Leitsubstanz, sondern die 8 PAK zu analysieren. Dazu gab es zuerst wiederum die Analyse des Referenzmaterials. Diese Ergebnisse sind beispielhaft in der folgenden Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Referenzmaterial PAK - Resorptionsverfügbarkeit (RV) und Bilanz für 8 PAK

Parameter	Benzo[a]-anthracen	Chrysen	Benzo[b]-fluoranthen	Benzo[k]-fluoranthen
mittlere RV [%]	52,8	48,8	45,8	70,3
SD [%]	5,03	5,8	4,2	7,0
RSD [%]	9,5	11,9	9,2	10,0
Mittelwert Bilanz [%]	96,7	89,3	92,6	149
SD [%]	5,09	6,3	8,1	10,0
RSD [%]	5,3	7,1	8,7	6,7
Parameter	Benzo[a]-pyren	Indeno[1,2,3,-cd]-pyren	Dibenzo[a,h]-anthracen	Benzo[ghi]-perylene
mittlere RV [%]	45,7	50,6	46,7	41,1
SD [%]	4,3	5,7	6,5	5,1
RSD [%]	9,4	11,3	13,9	12,4
Mittelwert Bilanz [%]	94,7	121	134	89,5
SD [%]	6,0	9,4	13,3	8,3
RSD [%]	6,3	7,8	9,9	9,3

Dabei zeigte sich, dass nicht alle Bilanzwerte zwischen den in der Norm geforderten 80 bis 120 % liegen. Dies ist auf die in Tabelle D.1 des Anhangs der DIN 19738: 2017-06 genannten Probleme zurückzuführen. Zum einen sind bei der Aufarbeitung der Proben nicht alle Matrixstörungen zu eliminieren, was bei Realproben noch höhere Schwankungen der Werte erwarten lässt. Weiterhin ist es abhängig von der verwendeten Säule, in wie weit die Trennung

der Benzo[*j*]fluoranthene erfolgt. Je nach Säulentyp werden die 3 Substanzen Benzo[*b*]fluoranthen, Benzo[*k*]fluoranthen und Benzo[*j*]fluoranthen getrennt oder der Peak von Benzo[*j*]fluoranthen ist überlagert mit dem Peak einer der beiden anderen Verbindungen. Zusätzlich treten in dem Bereich auch noch Matrixstörungen auf. Im hinteren Retentionsbereich des Chromatogramms, was die Parameter Indeno[1,2,3,-*cd*]-pyren, Dibenzo[*a,h*]-anthracen und Benzo[*ghi*]-perylen betrifft, ist der routinemäßig verwendete interne Standard Perylen-d12 nicht optimal geeignet, womit die Bilanzabweichungen begründbar sind.

Im Labor ist die Säule RXI-XLB 30m * 0,25 mm * 0,25 µm im Einsatz. Bei dieser liegt der Peak von Benzo[*j*]fluoranthen unter dem von Benzo[*b*]fluoranthen. Die die Peaks von Benzo[*b*]fluoranthen und Benzo[*k*]fluoranthen sind ausreichend gut getrennt. Um zu testen, ob ein Säulenwechsel eine signifikante Verbesserung hinsichtlich der Auswertbarkeit der Chromatogramme bringt, wurde die Säule RXI-17SiIMS 30m * 0,25 mm * 0,25 µm genutzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Referenzmaterial PAK - Resorptionsverfügbarkeit (RV) und Bilanz für 8 PAK (Säule RXI-17SiIMS)

Parameter	RV [%]	Bilanz [%]
Benzo[<i>a</i>]-anthracen	50,7	97,8
Chrysen	46,9	94,4
Benzo[<i>b</i>]-fluoranthen	48,0	97,0
Benzo[<i>k</i>]-fluoranthen	53,4	109,7
Benzo[<i>a</i>]-pyren	48,5	96,4
Indeno[1,2,3,- <i>cd</i>]-pyren	64,7	121,3
Dibenzo[<i>a,h</i>]-anthracen	52,1	108,0
Benzo[<i>ghi</i>]-perylen	63,6	118,9

Diese Ergebnisse basieren auf wenigen Messungen. Die Bilanz-Ergebnisse der Benzo[*j*]fluoranthene sind erwartungsgemäß besser, jedoch die Trennung der Störpeaks von den Peaks der Analyten und der matrixbedingte Untergrund der Chromatogramme konnten nicht signifikant verbessert werden. Außerdem sind die Anschaffungskosten dieser Säule um ein Vielfaches höher als die der routinemäßig verwendeten Säule. Dazu kommt noch die erheblich verlängerte Messzeit, die der Einsatz der Spezialsäule mit sich bringt. Daher wurde entschieden, diese Säule nicht für die Resorptionsanalytik einzusetzen.

Im Projektverlauf musste das GC-MS-Gerät, auf dem die Analytik der Resorptionsverfügbarkeit durchgeführt wurde, durch ein neues Gerät ersetzt werden. Dieses zeigte eine bessere Performance hinsichtlich der beschriebenen Probleme. Die mit dem neuen Gerät ermittelten Daten sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Referenzmaterial PAK - Resorptionsverfügbarkeit (RV) und Bilanz für 8 PAK (neues Gerät)

Parameter	Benzo[a]-anthracen	Chrysen	Benzo[b]-fluoranthen	Benzo[k]-fluoranthen
mittlere RV [%]	52,4	47,4	59,2	48,5
SD [%]	5,2	8,2	8,6	5,3
RSD [%]	9,9	17,4	14,5	10,8
Mittelwert Bilanz [%]	101,8	90,0	120,2	96,4
SD [%]	7,9	8,8	10,9	10,5
RSD [%]	7,8	9,8	9,0	10,8
Parameter	Benzo[a]-pyren	Indeno[1,2,3,-cd]-pyren	Dibenzo[a,h]-anthracen	Benzo[ghi]-perylene
mittlere RV [%]	45,7	48,4	38,9	43,4
SD [%]	5,4	8,5	7,2	6,5
RSD [%]	11,8	17,5	18,5	14,9
Mittelwert Bilanz [%]	93,4	118,4	104,9	99,1
SD [%]	6,5	12,8	15,3	11,9
RSD [%]	7,0	10,8	14,6	12,0

Bei der Analytik der Realproben wurden erwartungsgemäß deutlichere Matrixstörungen festgestellt und die Abweichungen der Werte der Doppelbestimmungen waren größer als beim Referenzmaterial. Dadurch kommt es bei den PAK häufig vor, dass bei einem oder mehreren Parametern die QS-Kriterien nach DIN 19738: 2017-06, Abs. 10.2-10.4 nicht eingehalten werden. Benzo[a]pyren als Leitsubstanz ist davon selten betroffen.

Während der Projektlaufzeit wurde der Trend bei Kundenanfragen im operativen Geschäft beobachtet, dass nicht der Prüfwert für Benzo[a]pyren von 2 mg/kg TS gemäß BBodSchV für Kinderspielflächen für den Abgleich mit den QS-Kriterien zugrunde gelegt werden soll, sondern der Prüfwert des zu dem Zeitpunkt der Untersuchungen bekannten Entwurfs der BBodSchV (Mantelverordnung) von 0,5 mg/kg TS. In der Vergangenheit wurde im Labor die Bestimmungsgrenze (BG) von Benzo[a]pyren im Mobilisat und Sediment mit 0,5 mg/kg TS angegeben. Dies war mit der Absenkung des Prüfwertes nicht mehr ausreichend. Die Prüfung der erreichbaren Bestimmungsgrenzen erfolgte mittel Auswertung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Diese Berechnungen ergaben für die 8 PAK Werte zwischen 0,13 und 0,19 mg/kg, weshalb einheitlich für alle 8 Komponenten eine BG von 0,2 mg/kg TS angegeben wird.

Bei PAK-Gesamtgehalten im Bereich des neuen Prüfwertes kann es häufiger vorkommen, dass die erhaltenen Werte im Mobilisat < BG sind. Damit ist es dann nicht möglich, die

Resorptionsverfügbarkeit und den Bilanzwert korrekt zu berechnen bzw. verfälscht die Bilanzsumme und damit die Aussage zu den QS-Kriterien der Norm.

5.3.3 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Für die PCB-Untersuchung lag kein geeignetes Probenmaterial vor. Auch im laufenden Laborbetrieb gab es keine Bodenproben mit relevanten Gehalten an PCB. Daraufhin wurde in Absprache mit Frau Dr. Biegel-Engler und Herrn Dr. Dippon-Deißler auf weitere Analysen auf PCB verzichtet.

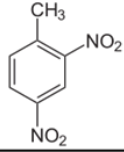
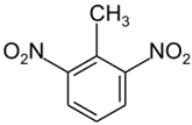
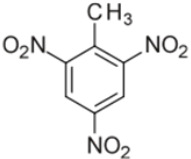
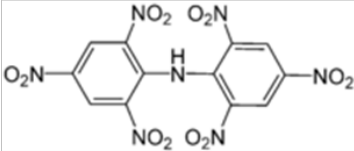
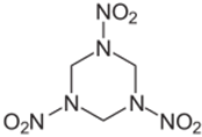
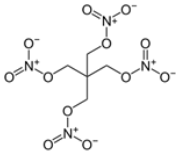
Außerdem wurde im Ringversuch gezeigt, dass die Resorptionsverfügbarkeit der PCB nahe 100 % liegt [5].

Es existiert eine Methode zur Durchführung der Resorptionsverfügbarkeit, die beim Ringversuch bei der Eurofins Umwelt West GmbH zum Einsatz kam. Die dabei verwendete Extraktreinigungsmethode ist im Freiburger Labor für andere Parameter etabliert und könnte im Bedarfsfall mit entsprechendem Validierungsaufwand eingearbeitet werden. Eine Methodenentwicklung war im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht vorgesehen.

5.3.4 Sprengstofftypischen Verbindungen (STV)

Die Gruppe der sprengstofftypischen Verbindungen umfasst Substanzen, die man aufgrund verschiedener Strukturmerkmale unterschiedlichen Stoffgruppen zuordnen kann. Die folgende Tabelle 11 gibt einen Überblick der Verbindungen der BBodSchV:2021. Die mit angegebene Bestimmungsgrenze (BG) stellt die Standardbestimmungsgrenze im Labor für Gesamtgehalte in Bodenproben dar. Matrixeinflüsse und notwendige Verdünnungsschritte können zur Erhöhung der Standardbestimmungsgrenze führen.

Tabelle 11: Übersicht STV

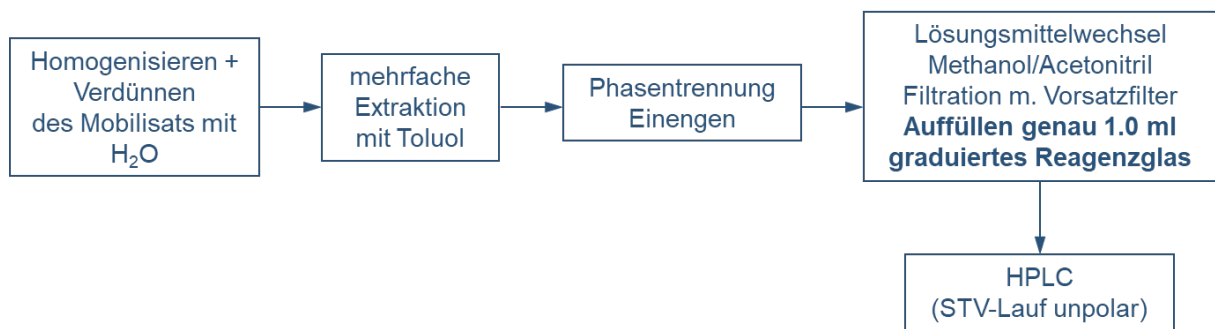
Parameter	Stoffgruppe	Struktur	CAS-Nr.	BG FS [mg/kg]
2,4-Dinitrotoluol	Toluole		121-14-2	0,1
2,6-Dinitrotoluol	Toluole		606-20-2	0,1
TNT (2,4,6-Trinitrotoluol)	Toluole		118-96-7	0,1
Hexyl (2,2',4,4',6,6'-Hexanitrodiphenylamin)	mehrkernige Aniline		131-73-7	0,2
Hexogen (RDX) (1,3,5-Trinitrohexahydro-1,3,5-triazin)	Triazine		121-82-4	0,1
Nitropenta (Pentaerythroltetra nitrat)	Glykole		78-11-5	0,5

Quelle: eigene Darstellung, Eurofins Umwelt Ost GmbH, Jena.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens war keine Methodenentwicklung zur Bestimmung der STV im Resorptionsversuch vorgesehen, weshalb die Vorgehensweise des Validierungsringversuchs zur DIN 19738: 2017-06 im Labor der Eurofins Umwelt West zur Anwendung gebracht wurde.

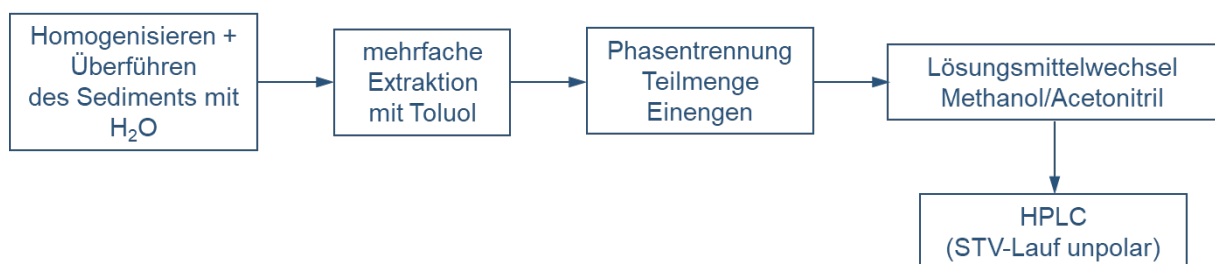
Der Ablauf der Analytik ist in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt. Im Validierungsringversuch wurde bei Boden nur 2,4,6-TNT in sehr hohen Konzentrationen untersucht. Es gab auch nur drei Teilnehmer, einer davon die Eurofins Umwelt West GmbH, wo standardmäßig die STV-Untersuchungen der Eurofins Umweltgruppe durchgeführt werden. Im Ringversuch wurde für 2,4,6-TNT eine Resorptionsverfügbarkeit von 83 % erhalten, wobei dieser Durchschnittswert nach unten gedrückt wurde durch den Wert der Eurofins Umwelt West GmbH (RV = 62,5 %). Es wird angenommen, dass das Ringversuchsmaterial nicht homogen war, so dass die Gesamtgehalte in der Eurofins Umwelt West GmbH nicht korrekt ermittelt wurden und die Resorptionsverfügbarkeit falsch berechnet wurde. Im Nachgang wurde hier der Gesamtgehalt an einer anderen Teilprobe analysiert und damit eine Resorptionsverfügbarkeit von 94 bzw. 97 % erhalten.

Abbildung 4: Extraktion von STV aus dem Mobilisat



Quelle: eigene Darstellung, Eurofins Umwelt Ost GmbH, Jena.

Abbildung 5: Extraktion von STV aus dem Sediment



Quelle: eigene Darstellung, Eurofins Umwelt Ost GmbH, Jena.

Für die Untersuchungen wurden Proben mit folgenden Kontaminanten genutzt: TNT, 2,4-Dinitrotoluol, Hexogen, Hexyl, Nitropenta und Tetryl, wobei immer nur ausgewählte Parameter in den einzelnen Proben nachgewiesen werden konnten. Zuerst wurden die Gesamtgehalte analysiert, um zu entscheiden, welche Parameter in welchen Proben im Resorptionsversuch untersucht werden können. Da die RV für TNT um die 100 % liegt lt. Ringversuch, sollte außerdem getestet werden, ob sich alle Verbindungen gleich verhalten, da diese erhebliche strukturelle Unterschiede aufweisen.

Zur Verfahrensvalidierung wurden Wiederfindungsversuche am Resorptionseluat durchgeführt. Dabei sollte geprüft werden, ob die Vorgehensweise aus dem Ringversuch auf alle Parameter anwendbar ist. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Wiederfindungsversuche zu STV am Mobilisat des Resorptionsversuchs

Parameter	WFR im Toluolextrakt [%]	Anmerkung
2,4-Dinitrotoluol	79	ausreichend
2,6-Dinitrotoluol	-	nicht untersucht
TNT	94	ausreichend
Hexyl	4	Reaktion der Stoffe untereinander möglich, sehr schlechte Löslichkeit in Wasser und Aceton
Hexogen (RDX)	20	zu prüfen
Nitropenta	73	ausreichend
Tetryl	60	Reaktion der Stoffe untereinander möglich, Abspaltung der Methylnitramingruppe durch Basen möglich

Weiterhin ist zu prüfen, ob alle STV die Magenstufe „überstehen“ oder was noch zu den Verlusten führen kann. Außerdem ergibt sich daraus die Frage nach möglichen Abbauprodukten und deren toxikologischer Wirkung. Die Untersuchung dieses Sachverhaltes ist jedoch nicht Teil des Projektes.

Schon die Ergebnisse der Gesamtgehaltbestimmung zeigen, dass die gesuchten Analyten trotz großer Bemühungen des Labors bei der Probenvorbereitung nicht homogen verteilt vorliegen. Das ist typisch für partikulär in Böden verteilte Schadstoffe. Ein Aufmahlen würde das Problem beheben, aber die Ergebnisse der RV erheblich verfälschen. Wenn also nur wie üblich eine Doppelbestimmung durchgeführt wird, ist es schwierig, den Gesamtgehalt korrekt zu bestimmen und damit den richtigen Bezugswert zur Berechnung der Resorptionsverfügbarkeit zu erhalten. Bei stark schwankenden Werten wurden deshalb mehr als 2 Werte für den Gesamtgehalt ermittelt. Die Berechnungen der Resorptionsverfügbarkeit (RV) und der Bilanzsumme erfolgte mit den Mittelwerten bzw. wenn möglich durch Ausschluss von offensichtlichen Ausreißern. In den folgenden Tabellen (Tabelle 13 bis Tabelle 17) sind ausgewählte Ergebnisse dargestellt, um den Sachverhalt zu verdeutlichen.

Tabelle 13: Ausgewählte Ergebnisse STV

	SB1			
Parameter	Gesamtgehalt [mg/kg]	Mobilisat [mg/kg]	RV [%]	Bilanz [%]
TNT	352 370 365 362	275 321 298	82	85
2,4-Dinitrotoluol	107 121 106 111	85 83 84	76	97

Tabelle 14: Ausgewählte Ergebnisse STV

	SB3			
Parameter	Gesamtgehalt [mg/kg]	Mobilisat [mg/kg]	RV [%]	Bilanz [%]
TNT	185 263 257 235	442 160 276 80 240	102	107
2,4-Dinitrotoluol	83 85 77 82	66 81 45 46 60	73	102

Im Fall der Probe SB3 zeigt sich gerade auch bei den Messwerten im Mobilisat, dass eine Doppelbestimmung nicht ausreicht. Selbst eine weitere Doppelbestimmung ermöglichte keine Eliminierung von Ausreißern. Das Kriterium der Norm hinsichtlich der Abweichung vom Mittelwert ist nicht erfüllt. Es wurde zur weiteren Berechnung der RV der Mittelwert genutzt.

Tabelle 15: Ausgewählte Ergebnisse STV

SB4				
Parameter	Gesamtgehalt [mg/kg]	Mobilisat [mg/kg]	RV [%]	Bilanz [%]
TNT	528 164 121 271	753 621 1970 >5000 1120	412 (unplausibel)	nicht bestimmt

Bei Probe SB4 ist auch die Nutzung des Mittelwertes nicht zielführend. Die Schwankungen der Messwerte sind zu groß, die Probe zu inhomogen. Aus diesem Grund wurde das Sediment nicht untersucht und es konnte keine Bilanz berechnet werden.

Tabelle 16: Ausgewählte Ergebnisse STV

SB6				
Parameter	Gesamtgehalt [mg/kg]	Mobilisat [mg/kg]	RV [%]	Bilanz [%]
TNT	377 358 332 356	1090 359 404 382	107	108
2,4-Dinitrotoluol	130 130 118 126	189 91 74 83	65	68
Nitropenta	210 205 184 200	99 86 93	46	49

Bei Probe SB6 wurden für die Berechnungen Ausreißer eliminiert.

Tabelle 17: Ausgewählte Ergebnisse STV

Parameter	SB7			
	Gesamtgehalt [mg/kg]	Mobilisat [mg/kg]	RV [%]	Bilanz [%]
Nitropenta	619 550 524 564	346 304 325	58	nicht bestimmt

Generell wurden im Rahmen des Projektes stark mit STV kontaminierte Materialien untersucht, d.h. die Gesamtgehalte lagen deutlich über den Prüfwerten der BBodSchV. Das Untersuchungsverfahren basiert auf Matrixabtrennung durch Verdünnung. Dadurch ist diese Vorgehensweise bei geringeren Gehalten durch die Bestimmungsgrenzen der einzelnen Parameter limitiert und nur beschränkt einsetzbar. Die Wiederfindungsraten für einige Parameter sind ungenügend bzw. müssten geprüft bzw. statistisch abgesichert werden. Anhand der relativ geringen Anzahl an Messwerten ist nicht sicher festzustellen, für welche Parameter das Verfahren ungeeignet ist. Die erhaltenen Ergebnisse geben Hinweise dafür, dass die angewandte Methode für Hexogen und Hexyl nicht anwendbar ist.

Für diese und weitere Fragestellungen ist eine umfangreiche Methodenentwicklung nötig, die nicht Teil des Forschungsvorhabens war.

Es sollte auch diskutiert werden, ob dieser Aufwand gerechtfertigt ist, da die resorptionsverfügbaren Anteile im Vergleich mit denen der Metalle oder PAK recht hoch sind und ein Trend erkennbar ist, dass einige Analyten nahezu vollständig resorptionsverfügbar sind.

5.3.5 Organochlorpestizide (OCP)

Bei der Untersuchung der OCP musste festgestellt werden, dass die Analyten extrem inhomogen im zur Verfügung stehenden Probenmaterial verteilt vorliegen, so dass keine korrekten Gehalte der < 2 mm-Fraktion erhalten werden konnten. Da diese Proben nur mit HCH belastet sind, wurde sich auf diese Verbindungen beschränkt. Auch eine weitere Zerkleinerung auf < 1 mm brachte keine Verbesserung. Es gab also keine Realproben, um weitere Untersuchungen durchzuführen. Voruntersuchungen sollten mit Referenzmaterial und durch Aufstockungsversuche erfolgen.

Die OCP waren kein Untersuchungsgegenstand des Resorptionsringversuchs. Es existiert bisher keine Methode zur analytischen Untersuchung dieser Stoffgruppe im Resorptionsmobilisat und -sediment.

In einem ersten Schritt wurden Blindwertlösungen des Resorptionsversuchs mit einem Mischstandard (HCH-Mix5, 15280-CY5 der Fa. Neochema) dotiert, so dass die Zielkonzentrationen 250 µg/kg bzw. 500 µg/kg eingestellt wurden. Die Extraktion und Aufarbeitung der Lösungen erfolgte analog der standardisierten Methoden für die Bodenanalytik zur Analyse von Organochlorpestiziden (DIN ISO 10382: 2003-05). Die dotierten Lösungen wurden einer Hexan-Aceton-Extraktion und einer anschließenden Florisil®-Aufreinigung unterzogen. Die erhaltenen Extrakte wurden anschließend eingeeignet und

gemessen. Die gerundeten Soll- und Ist-Werte sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 gegenübergestellt.

Tabelle 18: Wiederfindungsversuche im Resorptionsblindwert (Mobilisat)

Parameter	Sollwert [$\mu\text{g}/\text{kg}$]	Istwert [$\mu\text{g}/\text{kg}$]	Wiederfindung [%]
alpha HCH	250	262	105
gamma HCH	250	287	115
beta HCH	250	231	92
delta HCH	250	283	113
epsilon HCH	250	266	106
alpha HCH	500	486	97
gamma HCH	500	371	74
beta HCH	500	511	102
delta HCH	500	476	95
epsilon HCH	500	492	98

Tabelle 19: Wiederfindungsversuche im Resorptionsblindwert (Sediment)

Parameter	Sollwert [$\mu\text{g}/\text{kg}$]	Istwert [$\mu\text{g}/\text{kg}$]	Wiederfindung [%]
alpha HCH	250	262	105
gamma HCH	250	241	96
beta HCH	250	255	102
delta HCH	250	250	100
epsilon HCH	250	257	103
alpha HCH	500	494	99
gamma HCH	500	505	101
beta HCH	500	504	101
delta HCH	500	500	100
epsilon HCH	500	506	101

Mit Ausnahme der Wiederfindungsrate von gamma-HCH der hohen Konzentration im Mobilisat, welcher als Ausreißer angesehen werden kann, sind die Wiederfindungen sehr gut. Das zeigt, dass der Extraktionsschritt wie beschrieben funktioniert und die chemische Matrix des Resorptionsversuches, die in den Blindwertlösungen enthalten ist, die Aufarbeitung bzw. die Messung der HCH nicht negativ beeinflusst.

Im zweiten Schritt wurde das im Labor vorhandene Referenzmaterial (r-concept, Ringversuch PAH-1919, Probenserie A), welches für andere Parameter im Labor genutzt wird, aber einen zertifizierten Wert (0,13 mg/kg) für Lindan hat, im Resorptionsversuch eingesetzt. Leider liegt der zertifizierte Gehalt nicht im Bereich der Prüfwerte der BBodSchV (HCH-Gemisch 5 mg/kg für Kinderspielflächen) und auch nur wenig höher als die Standard-Bestimmungsgrenze des Parameters im Boden von 0,1 mg/kg TS (In matrixunbelasteten Bodenmaterial kann eine Bestimmungsgrenze von 0,01 mg/kg TS erreicht werden). Da zum Zeitpunkt der Versuche kein anderes Material zur Verfügung stand, wurde trotz der niedrigen Gehalte ein Resorptionsversuch durchgeführt. Leider konnte sowohl im gewonnenen Mobilisat als auch im Sediment kein HCH nachgewiesen werden. Das kann daran liegen, dass die Bestimmungsgrenze durch die Matrix entsprechend hoch ist, so dass der ohnehin geringe Gehalt nicht gefunden werden konnte oder dass der Analyt die Bedingungen der Magen-Darm-Stufe nicht übersteht. Dazu wären weitere umfangreiche Tests und ggf. eine Methodenentwicklung notwendig.

In der Verlängerungsphase des Projektes wurde neues Referenzmaterial für Boden (BAM ERM®-CC007a) beschafft, welches höhere Gehalte an Organochlorpestiziden aufweist (Tabelle 20). Mit diesem Material wurden weitere Tests durchgeführt.

Tabelle 20: Auszug Zertifikat (Referenzmaterial OCP BAM ERM®-CC007a)

Parameter	Mass Fraction (µg/kg)
α-HCH	219 ± 23
β- HCH	1570 ± 210
γ- HCH	21,4 ± 2,6
o,p'-DDT	340 ± 50
p,p'-DDT	960 ± 140

Da für dieses Material ein größerer Parameterumfang zertifiziert ist, wurden noch einmal Wiederfindungsversuche mit Blindwertlösung des Resorptionsversuches durchgeführt, um zu prüfen, ob die Analyse der DDT vergleichbare Ergebnisse liefern (Tabelle 21).

Tabelle 21: Wiederfindungsversuche im Resorptionsblindwert (Mobilisat)

Parameter	Sollwert [µg/kg]	Istwert [µg/kg]	Wiederfindung [%]
o,p'-DDT	250	249	99,6
p,p'-DDT	250	214	85,6
o,p'-DDT	500	557	111,4
p,p'-DDT	500	528	105,6

Die Wiederfindungsraten liegen alle im Bereich der QS-Kriterien der Resorptionsnorm. Daher wurden Testuntersuchungen mit dem Referenzmaterial im Resorptionsversuch unternommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 22 zusammengefasst.

Tabelle 22: Resorptionsverfügbarkeit Referenzmaterial ausgewählter OCP

Parameter	α -HCH	β -HCH	γ -HCH	o,p'-DDT	p,p'-DDT
mittlere RV [%]	58,6	51,0	62,9	94,5	79,5
SD [%]	21,4	19,4	23,3	36,0	34,2
RSD [%]	36,5	38,0	37,0	38,1	43,0
Mittelwert Bilanz [%]	79,1	112,0	88,6	154,4	130,8
SD [%]	18,0	21,7	18,7	33,3	30,2
RSD [%]	22,8	19,4	21,1	21,6	23,1

Diese Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede beim resorptionsverfügbaren Anteil bei den HCHs und den DDTs. Allerdings sind bei allen Messungen die Schwankungen sehr groß. Es konnte dafür kein schlüssiger Grund gefunden werden. Allerdings beruhen diese Werte auf nur vier Versuchen und stellen daher erste Tests dar und sind nicht statistisch abgesichert. Um belastbare Daten zu erhalten, sind weitere Untersuchungen und eine ausführliche Methodenentwicklung notwendig, welche nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens war.

6 A3: Verarbeitung und Bewertung der gewonnenen Daten

Dieses Arbeitspaket baut auf dem vorhergehenden auf. Nach Abschluss der Laboranalytik wurde die Verarbeitung und Bewertung der im Projekt gemessenen und kommerziell ermittelten Daten durchgeführt.

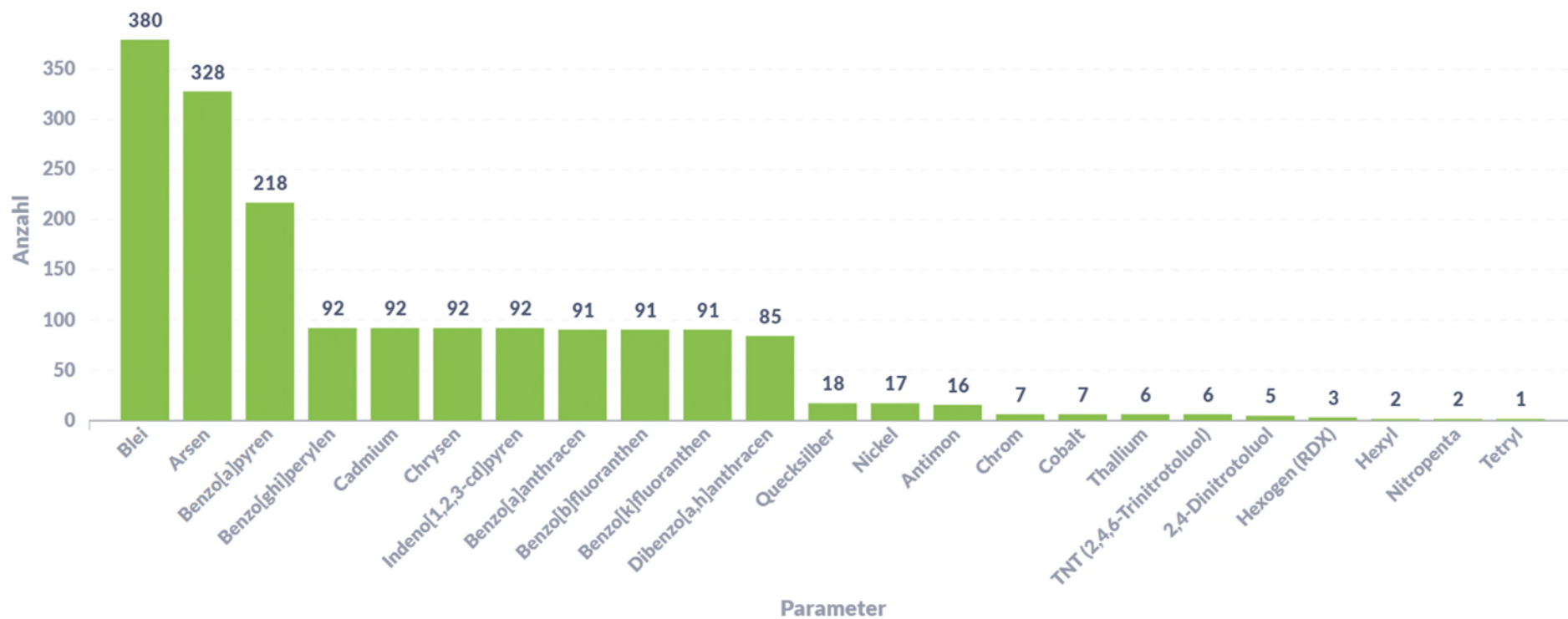
Es wurden auch analytische Daten aus den früheren und aktuellen Aufträgen zusammengestellt und, soweit es Rückstellproben gab, bodenkundliche Ansprachen diesen Proben durchgeführt.

Insgesamt wurden 1742 Untersuchungsergebnisse zur Resorptionsverfügbarkeit in eine Datenbank eingepflegt. Es kamen ständig weitere aktuelle Untersuchungsergebnisse hinzu. Es wurden die selbst entnommenen und Rückstell-Proben bodenkundlich angesprochen. Mit diesen Daten werden die Untersuchungsergebnisse in der Datenbank ergänzt. Hierbei handelt es sich um 735 Untersuchungsergebnisse mit eigens erhobenen bodenkundlichen Daten.

Folgende chemische Parameter nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 des Bundes-Bodenschutzgesetzes für die direkte Aufnahme von Schadstoffen auf Kinderspielflächen, in Wohngebieten, Park- und Freizeitanlagen und Industrie- und Gewerbegrundstücken sind bei den 1742

Untersuchungsergebnisse bereits vertreten (siehe Abbildung 6) Ihnen ist die Anzahl der Untersuchungsergebnisse zugeordnet. Es liegen noch weitere Parameter, wie z.B. PAK mit Einzelkomponenten vor, die jedoch in der BBodSchV und deren Entwurf nicht geregelt sind, aber trotzdem im Projekt berücksichtigt werden können.

Abbildung 6: In der Datenbank aktuell erfasste Parameter und die Anzahl der Untersuchungsergebnisse



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Nach der Zusammenfassung der Daten mit Gegenüberstellung der in der Datenbank bisher erfasster Untersuchungsergebnisse und den Probenvorschlägen des ALA und der LABO (s. Tabelle 1) war festzustellen, dass von 24 möglichen Parametern nur für acht Parameter Vorschläge zu Probenahmestellen vorlagen.

Davon waren bereits vier Parameter mit Ergebnissen zur Resorptionsverfügbarkeit in der Datenbank abgedeckt. Es handelt sich um As, Pb, Cd, B(a)P. Darüber hinaus war davon auszugehen, dass weitere Proben aus dem laufenden kommerziellen Untersuchungsumfang des Laboratoriums dieses Spektrum abdecken. Demzufolge bräuchten diese Parameter bei den Probenahmen und Laboruntersuchungen in diesem Projekt nicht weiter beachtet werden.

Es fehlten Daten und Vorschläge für 16 Parameter. Diese Parameter wurden primär beachtet und entsprechende Probenahmestellen gesucht. Die Vorschläge wurden im Einzelnen näher geprüft. Es wurden nachträglich Probenahmen geplant und durchgeführt.

Die Grundlage für die Entscheidung zur weiteren Untersuchung der Resorptionsverfügbarkeit bildenden die Konzentrationsbereiche der Prüfwerte für Kinderspielflächen und Wohngebiete bis maximal zu Park- und Freizeitanlagen bis zu deren 3fachen Überschreitung.

Die Untersuchungen sind sehr aufwändig und dadurch ist der Probendurchsatz im Labor nicht so hoch, wie bei Routine-Parametern. Deshalb mussten die Probenahmen, auch in Abhängigkeit der Stabilität der Parameter, zeitlich gestaffelt organisiert werden. Die Informationen, ob und wann welche Probenahmestellen genutzt werden, erfolgten dementsprechend. Die Rückmeldungen der Untersuchungsergebnisse passten sich diesem Rhythmus an. Die Ergebnisse wurden, je nach Wunsch formlos oder als Prüfbericht an die Eigentümer der beprobten Flächen weitergegeben.

Tabelle 23: Gegenüberstellung der Datenbank erfasster Untersuchungsergebnisse und den Probenvorschlägen des Ständigen Ausschusses Altlasten (ALA) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO)

Parameter	ALA/Länder	Datenbankergebnisse
Sb [mg/kg TM]		16
As [mg/kg TM]	64	328
Pb [mg/kg TM]	38	380
Cd [mg/kg TM]	21	92
Cyanide [mg/kg TM]		
Cr ges [mg/kg TM]	8	7
Cr VI [mg/kg TM]		
Co [mg/kg TM]		7
Ni [mg/kg TM]	19	17
Hg [mg/kg TM]	11	18
Tl [mg/kg TM]		6
Aldrin [mg/kg TM]		
2,4-Dinitrotoluol [mg/kg TM]		5
2,6-Dinitrotoluol [mg/kg TM]		
DDT [mg/kg TM]		
Hexachlorbenzol [mg/kg TM]		
HCH [mg/kg TM]		
Hexyl [mg/kg TM]		2
Tetryl [mg/kg TM]		1
Hexogen [mg/kg TM]		3
Nitropenta [mg/kg TM]		2
PCP [mg/kg TM]		
B(a)P [mg/kg TM]	106	218
TNT [mg/kg TM]		6
PCB [mg/kg TM]	3	

7 A4: Verallgemeinerung der Daten und Ableitung typischer Resorptionsverfügbarkeiten für die untersuchten anorganischen und organischen Schadstoffe unter Beachtung unterschiedlicher Bodenarten und Anteile organischer Bodensubstanz

7.1 Methodik

Nachdem das Arbeitspaket A3: „Verarbeitung und Bewertung der gewonnenen Daten“ abgeschlossen war, konnte mit dem Arbeitspaket A4 begonnen werden. In der Projektarbeitsgruppe hat man bereits Konzepte der Auswertung der Daten entwickelt, die auf mathematisch statistischen Methoden beruhen.

Für die Auswertung wurde die Datentabelle aus Excel in eine MySQL-Datenbank überführt. MySQL ist ein relationales Datenbankverwaltungssystem. Um alle Spalten mit Zahlen zum Datentyp DECIMAL zu überführen, mussten in der Datentabelle enthaltene Sonderzeichen und Text wie -, <, und n.b. der Bedeutung gerecht in Zahlen oder leere Felder umgewandelt werden. War ein Wert mit < gekennzeichnet und lag somit unter der Bestimmungsgrenze, so wurde er halbiert berücksichtigt [9]. Bindestriche wurden in leere Felder umgewandelt und nicht bestimmbare Werte als 0 interpretiert. Bodenarten wurden zur besseren Übersicht zusätzlich der Spalte Bodenartenhauptgruppe zugeordnet. Bei Humus und Carbonat wurde zusätzlich der mittlere [Masse-%]-Wert beigefügt.

Um die Datensätze zu anonymisieren und eindeutig zuordnen zu können, wurden diese neu benannt. Die Benennung erfolgte durch fortlaufende Nummerierung, z. B. D1, D2, D3 usw. Die Rückverfolgbarkeit auf die Probennummern ist in der ursprünglichen Datenbank beim Umweltbundesamt möglich.

Die Datenauswertung erfolgte anschließend mit der Business-Intelligence-Software Metabase. In Metabase wurde der Query builder genutzt, um mit Schaltflächen und Dropdowns Antworten in Form von Visualisierungen auf Fragen zu erhalten. Individuell wurden Filter, Metriken sowie Gruppierungen für Fragen festgelegt. Um für jeden einzelnen Parameter mehrere standardisierte Analysen durchführen zu können, wurden diese einem Dashboard untergeordnet. Dashboards fassen Fragen zusammen und stellen sie auf einer einzigen Seite dar. Ein Filter-Widget ermöglichte die Daten über mehrere Fragen hinweg identisch nach Parameter zu filtern. Schlussendlich waren komplexe Daten in aussagekräftige Visualisierungen umzuwandeln.

Weiterhin wurde bei allen Diagrammen mit linearer Regression, Hampel-Filter sowie bei allen Boxplots die Python Diagramm Bibliothek Matplotlib genutzt. Die Regressionsanalyse ist vor allem für Trendaussagen von Bedeutung und wurde folgendermaßen durchgeführt:

- ▶ Importieren aller dem ausgewählten Parameter zugehörigen und verwertbaren Datensätze mit $RV > 1$ aus der MySQL-Datenbank mit SQLAlchemy
- ▶ Logarithmieren von RV [%] und ges. [mg/kg] mit der NumPy Funktion \log_{10}
- ▶ Darstellung der Datensätze als Streudiagramm (Punktwolke) mit Matplotlib

- ▶ Anwendung der linearen Regressionsfunktion (Ordinary Least Squares) aus dem Statsmodels Python-Paket
- ▶ Erweiterung der Darstellung um eine lineare Regressionsgerade mit Matplotlib
- ▶ Darstellung vom 95% Konfidenzintervall des Mittelwertes mit Matplotlib
- ▶ Angabe der Datensatzanzahl n und vom Determinationskoeffizient R^2

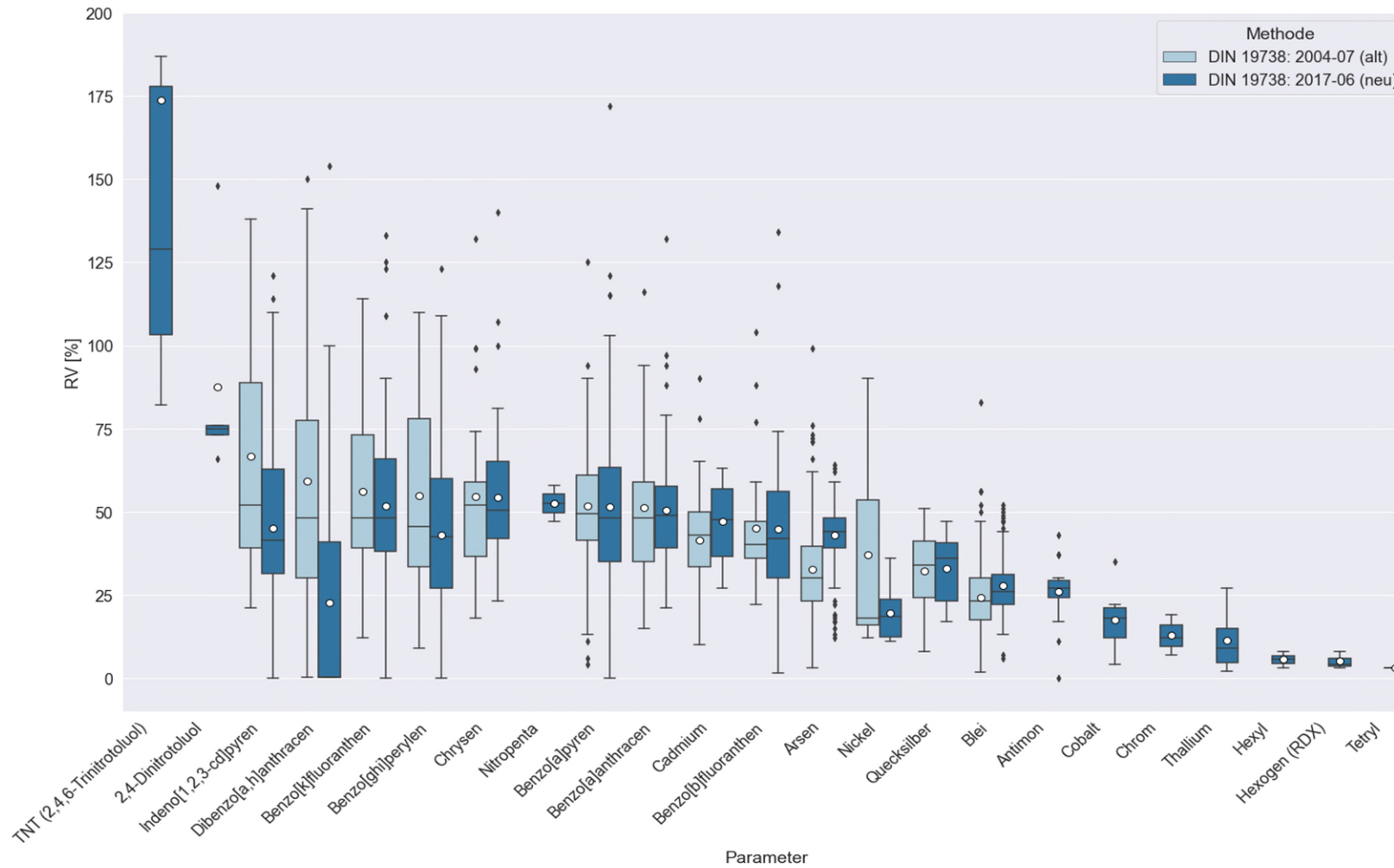
Die Verteilung der Daten ist für die Auswertung von hoher Bedeutung. Daher wurden Boxplots mit der Python-Datenvisualisierungsbibliothek Seaborn erstellt. Jede Box ist durch das untere 25%- Quartil ($Q1$) und obere 75%- Quartil ($Q3$) begrenzt. Der Median wurde als durchgehender Strich in die Boxen eingefügt. Die Antennen (auch Whisker) reichen bis zum niedrigsten oder höchsten Datenpunkt, der noch innerhalb $1,5 \times$ Abstand zwischen $Q1$ und $Q3$ des unteren oder oberen Quartils liegt. Außerhalb sind die Ausreißer gekennzeichnet. Zusätzlich wurde das arithmetische Mittel als weißer Punkt dargestellt.

Um das Verhältnis zwischen arithmetischem Mittel und Median und den Einfluss von Ausreißern darzustellen, ist der Hampel-Filter zum Einsatz gekommen. Auch hier wurden alle einem Parameter zugehörigen Werte mit SQLAlchemy aus der MySQL-Datenbank geladen. Angewendet wurde anschließend die Python-Implementierung des Hampel-Filters mit der Version 0.0.5 aus dem Python Package Index (PyPI) mit einer Fenstergröße von 10 und einem n von 2. Durch Imputation wurden dabei Ausreißer durch plausible Werte ersetzt. Der Median nach Anwendung des Hampel-Filters war so für jeden Parameter bestimmbar.

7.2 Parameterübergreifende vergleichende Auswertung

Die Auswertung der Datenbank ergab die folgenden Ergebnisse der Resorptionsverfügbarkeiten der Parameter, für die Untersuchungsdaten vom Projekt vorlagen (siehe Abbildung 7). In der Tabelle 25 sind für die arithmetischen Mittelwerte als Zahl dargestellt. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die angegebenen Werte ausschließlich zur Orientierung verwendet werden können. Es ist bei vielen Parametern die Datenbasis zu gering (vergleiche Abbildung 6) oder das Verfahren noch nicht sicher validiert (u. a. fehlende oder zu wenige Ringversuche).

Abbildung 7: Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o) der Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN-Methoden, Sortierung RV absteigend



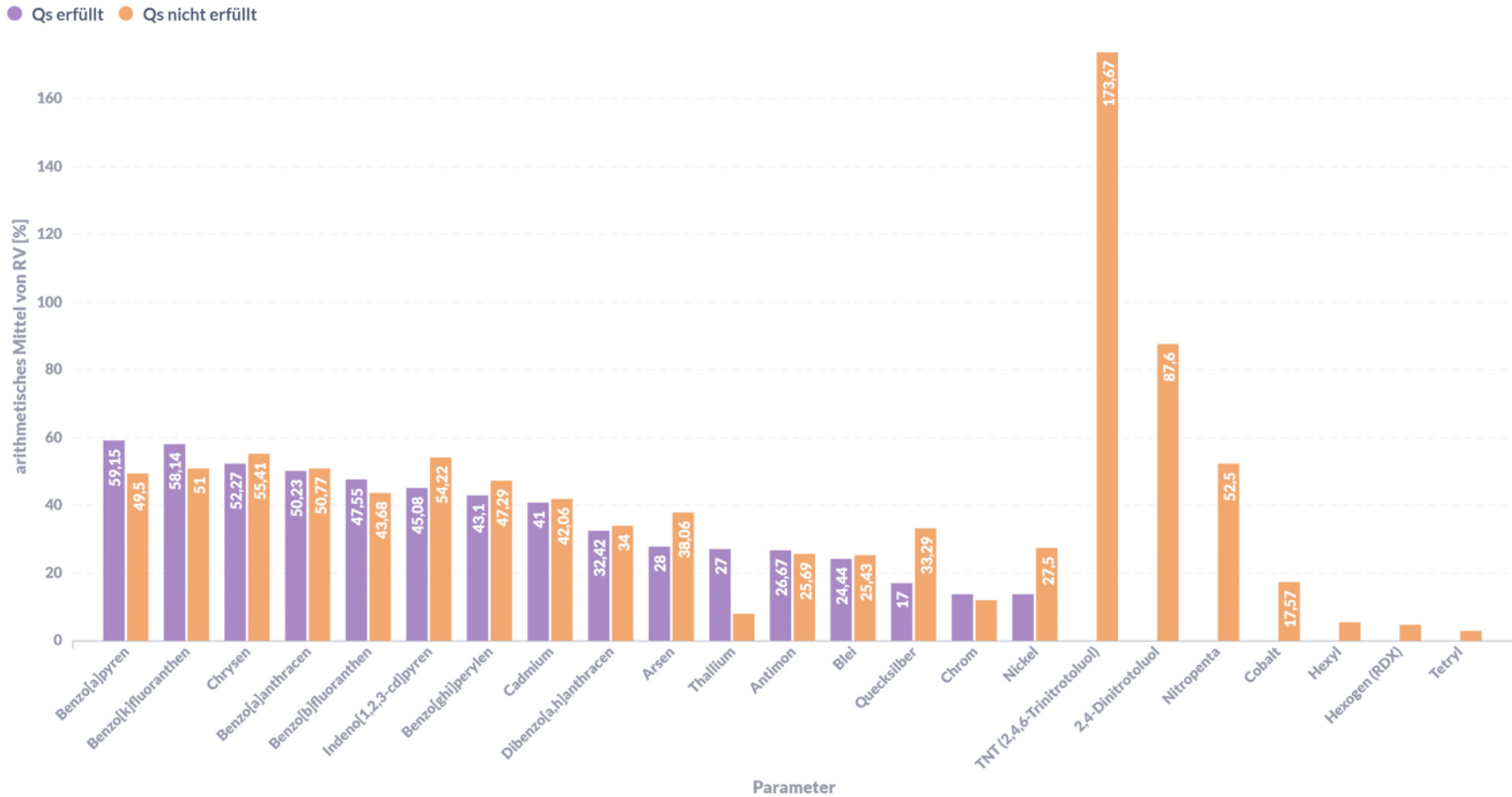
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult .

Mit dieser graphischen Auswertung wird deutlich, dass das arithmetische Mittel und der Median aus allen zur Verfügung stehenden Daten ermittelten Resorptionsverfügbarkeiten sich parameterweise kaum zwischen der alten und der neuen DIN Methode unterscheiden. Aufgrund der höheren Aufwände bei der Qualitätssicherung haben die Ergebnisse, die mit der neuen Norm ermittelt worden sind eine höhere Beweiskraft. In einigen Fällen liegen die Ergebnisse der neuen Norm auch niedriger. Große Spannweiten (Unteres / oberes Quartil) und viele Ausreißer-Werte verdeutlichen die zum Teil extrem hohe Ergebnisunsicherheit. Diese liegt nicht nur am analytischen Verfahren, sondern auch an der Heterogenität der Schadstoffe in den Böden, an der Probenahme, an geogenen Faktoren usw. Teile davon, wie z. B. bodenkundliche Parameter, werden in den folgenden Abschnitten genauer betrachtet.

Anhand der Abbildung 7 kann man erkennen, für welche Parameter überhaupt Ergebnisse für die Resorptionsverfügbarkeit auswertbar vorliegen. Fehlen in der Abbildung Parameter, so liegen für den Parameter und die betreffende Norm keine Untersuchungen vor.

In der folgenden Abbildung 8 wurden die arithmetischen Mittelwerte der Resorptionsverfügbarkeiten getrennt nach Werten mit erfüllten und nicht erfüllten Qualitätskriterien nach DIN 19738:2017 dargestellt.

Abbildung 8: Parameterweiser arithmetischer Mittelwert der Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Qualitätskriterien erfüllt und nicht erfüllt nach DIN 19738:2017, Sortierung RV absteigend

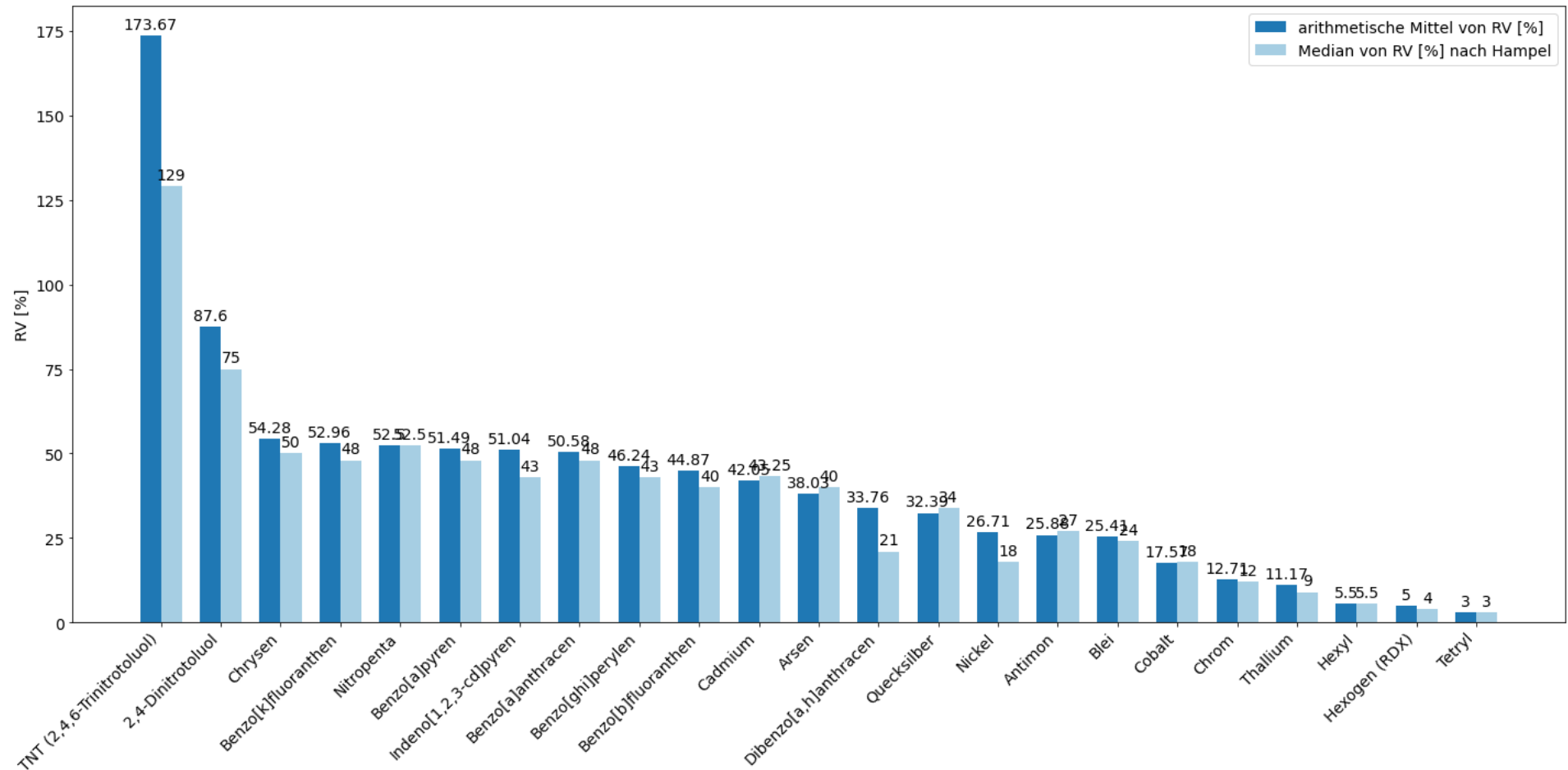


Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Aus der Abbildung 8 wird deutlich, wie wichtig es ist, die Einhaltung der Qualitätskriterien gemäß DIN 19738:2017 bei der Beurteilung der schädlichen Bodenverunreinigung zu beachten. In den meisten Fällen liegen die Werte der erfüllten und nicht erfüllten Qualitätskriterien relativ dicht beieinander. Nur bei Thallium und Nickel liegen die Spannen zwischen den Werten mit erfüllten und nicht erfüllten Qualitätskriterien mehr als 10 bis 20 % auseinander. Die Angaben der Resorptionsverfügbarkeiten bei Cobalt und den sprengstofftypischen Verbindungen sind aufgrund völlig fehlender Werte mit erfüllten Qualitätskriterien im Folgenden nur als grobe Orientierung zu betrachten (insbesondere bei TNT, wo die Resorptionsverfügbarkeit über 100 % liegt).

In der folgenden Abbildung 9 sind parameterweise der arithmetische Mittelwert und der Median der Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach Anwendung des Hampel-Filters dargestellt. Es ist festzustellen, dass der arithmetische Mittelwert und der Median sehr dicht beieinander liegen. Die Ausnahmen sind TNT und 2,4-Dinitrotoluol, die die analytischen Qualitätskriterien nicht erfüllen. Im Weiteren wird aufgrund der relativen Nähe vom arithmetischen Mittelwert und Median bei den Beurteilungen mit dem arithmetischen Mittelwert gearbeitet.

Abbildung 9: Parameterweiser arithmetischer Mittelwert und Median der Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach Anwendung des Hampel-Filters



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Im Rahmen der Validierung der wurden Robustheitsuntersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen in Böden [5] durchgeführt. Gemäß der DIN 19738:2017 Bodenbeschaffenheit – Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial [3] wurde im Rahmen dieses Projektes ein Validierungsringversuch mit folgenden Ergebnissen durchgeführt (Auszug aus [5]):

Tabelle 24: Resorptionsverfügbare Anteil, Vergleich Altdaten mit Daten des Ringversuchs

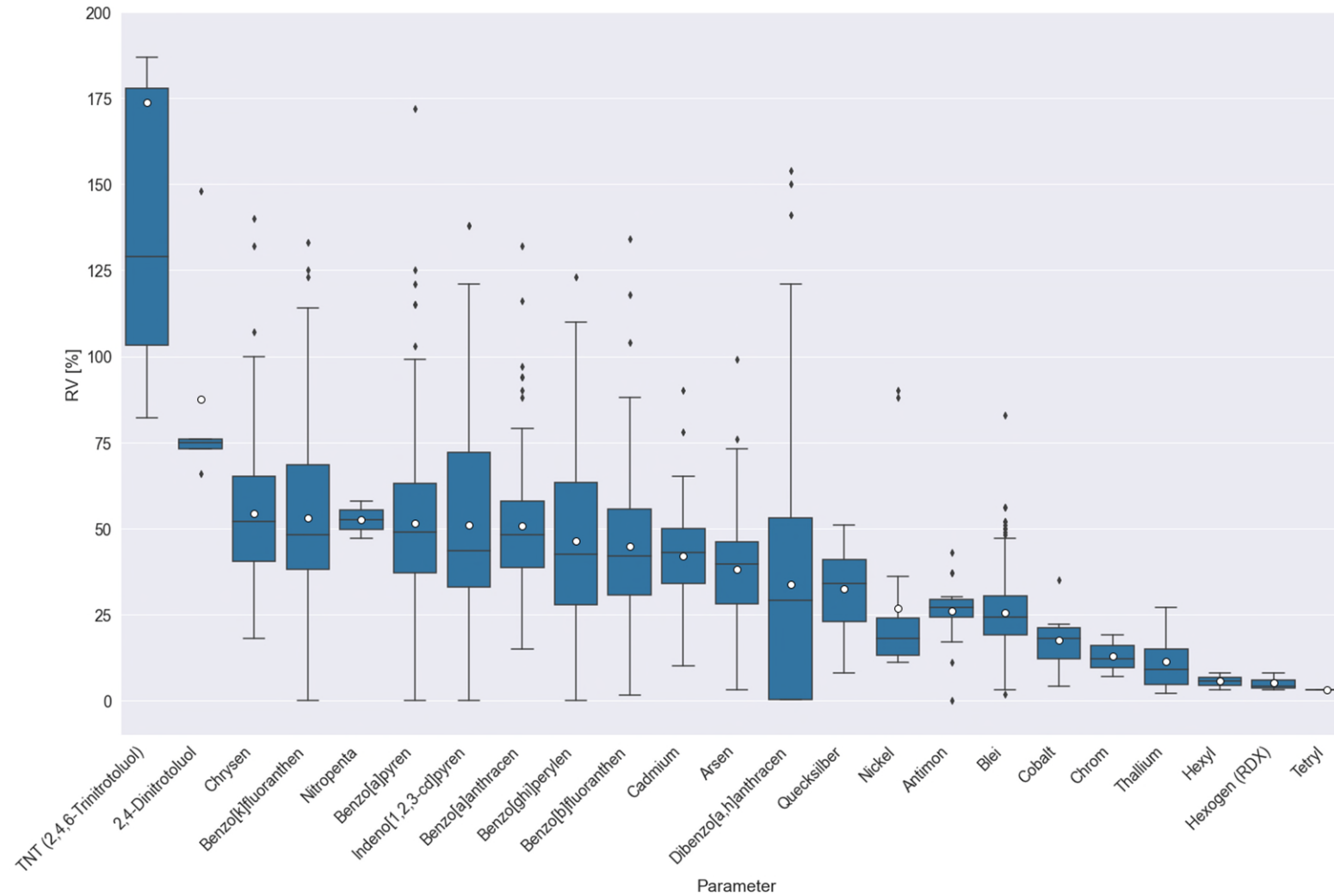
Parameter	Datenauswertung FKZ 36013 018			Validierungsringversuch			Tendenz
	Anzahl	Mittelwert	Median	Anzahl	Mittelwert	Median	
Antimon	37	17%	13%	48	34%	28%	↗
Arsen	1.311	26%	25%	48	40%	38%	↗
Blei	1.655	30%	27%	48	13%	12%	↘
Cadmium	781	44%	44%	48	39%	40%	→
PCB6	-	k.A.	k.A.	30	205%	93%	-
TNT	-	k.A.	k.A.	30	78%	81%	-
BaP	217	25%	20%	42	60%	60%	↗

Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult, Daten aus [5].

Bei der Auswertung des Validierungsringversuchs wurde besonders auf analytische Schwierigkeiten bei der Untersuchung von PCB und TNT auf Resorptionsverfügbarkeit hingewiesen. Das Problem zeigte sich auch bei den aktuellen Untersuchungen von TNT. Leider gab es im Projekt kein geeignetes Probenmaterial mit relevanten PCB-Gehalten.

In der folgenden Abbildung 10 sind zusammenfassend die Ergebnisse der zurückgezogenen, alten DIN-Methode und der aktuellen DIN 19738:2017 dargestellt. Durch absteigende Sortierung nach dem arithmetischen Mittel der Resorptionsverfügbarkeit erhält man eine parameterweise Reihenfolge der Resorbierbarkeit. Man erkennt an den Spannen vom unteren zum oberen Quartil, dass die Resorptionsverfügbarkeit erheblich schwankt. Deshalb können der Median und das arithmetische Mittel der Resorptionsverfügbarkeit, obwohl diese sehr gut beieinander liegen, nicht ohne Weiteres parameterweise verallgemeinert werden. Diese können nur zur Orientierung herangezogen werden (für Zahlenwerte siehe Tabelle 2). Bei einigen sprengstofftypischen Verbindungen ist die Spanne sehr gering. Das liegt an zu wenigen Proben, die von einer Kontaminationsquelle stammten.

Abbildung 10: Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o) der Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung RV absteigend



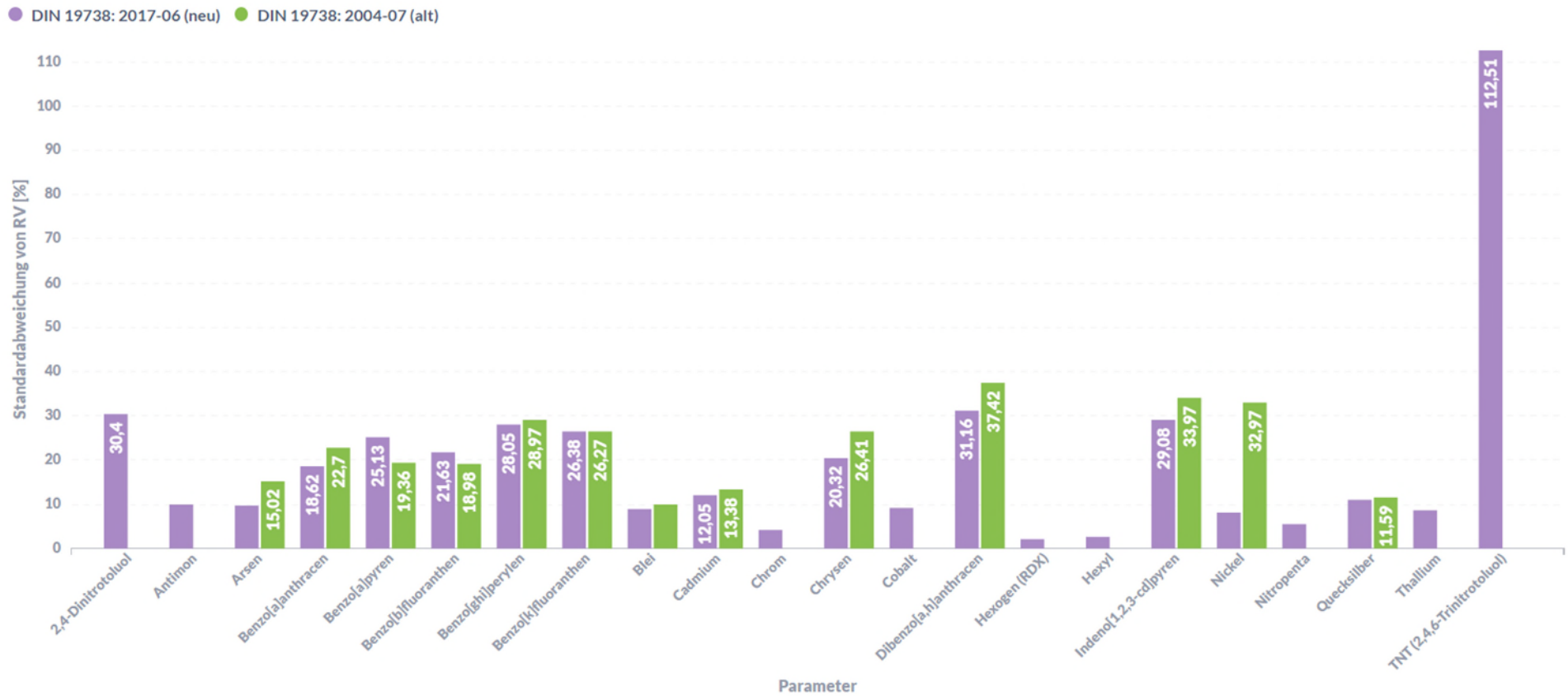
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Wo die maximalen Resorptionsverfügbarkeiten über 100 % liegen, ist es zu Ausreißern gekommen, was zum Verwerfen dieser einzelnen Ergebnisse führen muss. Liegen arithmetische Mittelwerte der Resorptionsverfügbarkeit über 100 % ist das ein Zeichen für erhebliche Probleme bei der Validität des Verfahrens, wie hier bei TNT. Bei dem UBA Forschungsprojekt Robustheitsuntersuchungen zur Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen in Böden [5] wurde auch TNT als problematischer Parameter erkannt. Nach Entfernung der Ausreißer lag hier der arithmetische Mittelwert der Resorptionsverfügbarkeit bei 79 % (siehe Tabelle 24 und Tabelle 25).

Bei dieser Abbildung ist auch zu beachten, dass bei einigen Parametern die Datenbasis sehr gering ist, so dass keine abgesicherten Schlussfolgerungen zulässig sind.

In der Abbildung 11 ist die Parameterspezifische Standardabweichung der Resorptionsverfügbarkeit RV [%] dargestellt worden, um die Qualitäten der alten und der gültigen Analysenmethode der DIN 19738 zu vergleichen. Da wo Daten vorliegen, kann von einer recht guten Übereinstimmung gesprochen werden.

Abbildung 11: Parameterspezifische Standardabweichung der Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



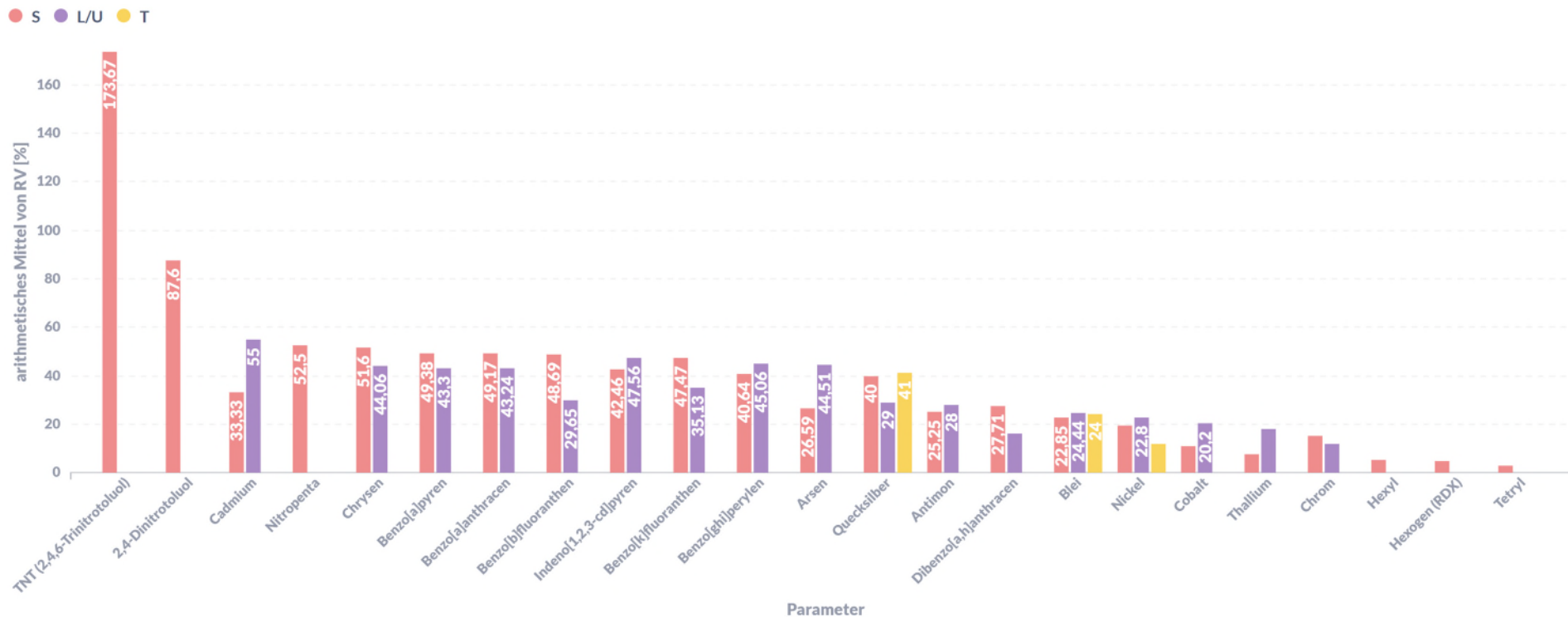
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Problematik der verallgemeinerten Aussagekraft der arithmetischen Mittelwerte der Resorptionsverfügbarkeit wird auch mit der Abbildung 11 deutlich. Umso höher die Standardabweichung, umso mehr streuen die Ergebnisse parameterspezifisch. Die Ursachen hierfür sind, wie schon beschrieben vielfältig (geogene Verhältnisse, Kontaminationssituation, Probenahme, Analytik usw.). Bei dem Parameter TNT handelt es sich z.B. um Validierungsprobleme. Die geringen Standardabweichungen bei RDX, Hexyl und Nitropenta resultieren hingegen aus nur wenigen Untersuchungsergebnissen, die dicht beieinander liegen.

7.3 Parameterbezogener arithmetischer Mittelwert der Resorptionsverfügbarkeit bezüglich der Bodenartenhauptgruppen, Humus- und Carbonatgehalte

Gemäß der Bodenkundliche Kartieranleitung KA 5 [4] und der Arbeitshilfe für die Bodenansprache im vor- und nachsorgenden Bodenschutz - Auszug aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 [6] differenziert der Bodenkundler Bodenartenhauptgruppen, Bodenartengruppen und Bodenarten. Diese unterscheiden sich anhand ihrer Bestandteile Ton, Schluff und Sand sowie ihrer mechanischen Eigenschaften wie Bindigkeit und Formbarkeit im feuchten Zustand. Gemäß der Arbeitshilfe für die Bodenansprache im vor- und nachsorgenden Bodenschutz - Auszug aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5 [6] werden im Gelände Bodenansprachen bis maximal Bodenartengruppe empfohlen. Ringversuche, wie der Schurf-Probenahme-Ringversuch des Bayerischen Landesamtes für Umwelt 2021 [7] belegen, dass mit mehr oder weniger zufriedenstellender Sicherheit bei der Bodenansprache im Rahmen des Vollzugs der BBodSchV nur die Bodenartenhauptgruppen (Sand - S, Lehm - L, Schluff - U und Ton - T) qualifiziert angesprochen wurden. Die Daten der Resorptionsverfügbarkeit sind daher in der folgenden Abbildung den Bodenartenhauptgruppen (S, L/U, T) gegenübergestellt. Für eine repräsentative Auswertung in Bezug auf die Bodenartengruppen lagen für die meisten Untersuchungsparameter zu wenige Daten vor. Selbst bei den Bodenartenhauptgruppen gab es für Ton nahezu keine Daten. Ton steht in der Regel auch nicht unverwittert und ohne Bodenbildung in dem Horizont an, an dem die Bewertung für den Wirkungspfad Boden-Mensch erfolgt.

Abbildung 12: Parameterweiser arithmetischer Mittelwert von RV [%] nach Bodenartenhauptgruppe und Parameter

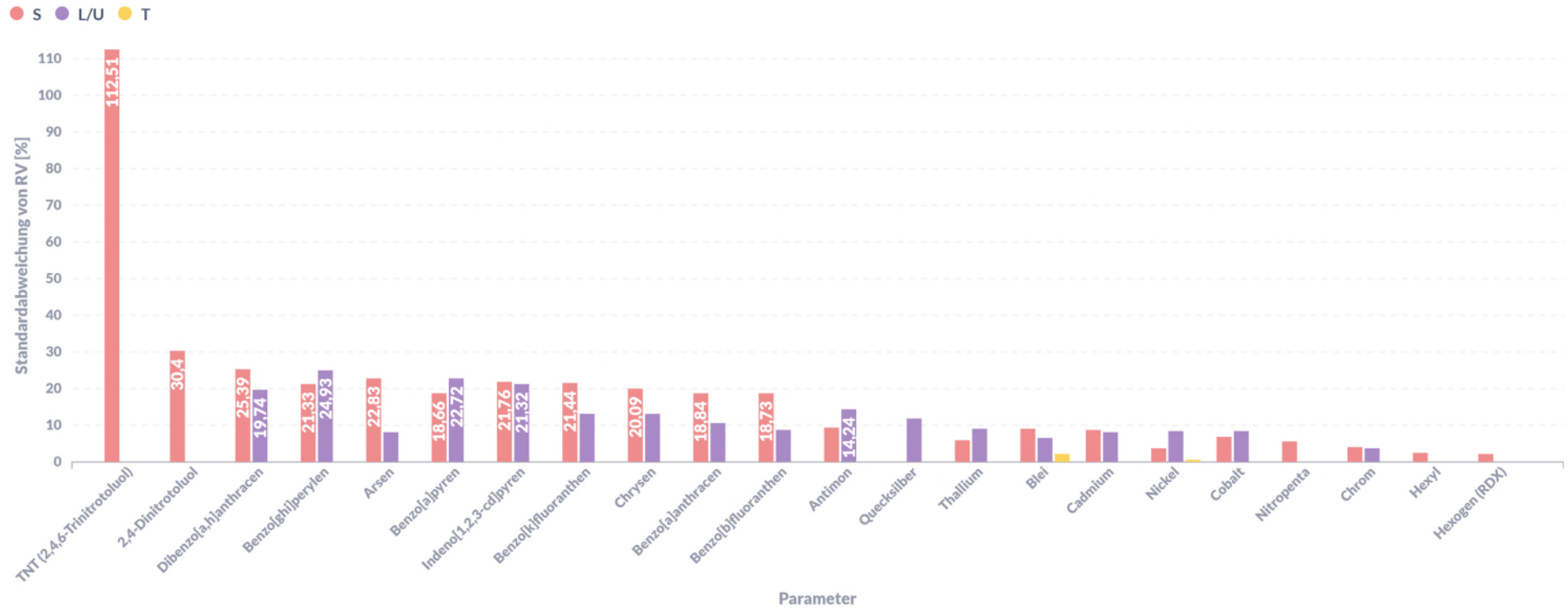


Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Anhand der Abbildung 12 kann man bereits erkennen, für welche Parameter die Bodenartenhauptgruppen mit RV-Daten abgedeckt sind. Im Vorfeld der Datenauswertung bestand die Annahme, dass die Resorptionsverfügbarkeit mit abnehmender Korngröße von Sand zu Lehm/Schluff und Ton generell abnehmen müsste. Dem ist aber nicht so. Bei den meisten organischen Parametern besteht ein Trend der Abnahme der Resorptionsverfügbarkeit in Richtung Feinstkorn. Bei einigen Metallen und Halbmetallen (As) steigt die Resorptionsverfügbarkeit mit der Abnahme der Korngröße.

Auch diese Betrachtungen sind aufgrund der zu geringen Datenbasis noch unsicher. Sie können jedoch bei der Beurteilung des verwertbaren Anteils von Böden Bedeutung haben, was es im Einzelfall konkret zu untersuchen gilt.

Abbildung 13: Standardabweichung von RV [%] nach Bodenartenhauptgruppe und Parameter



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

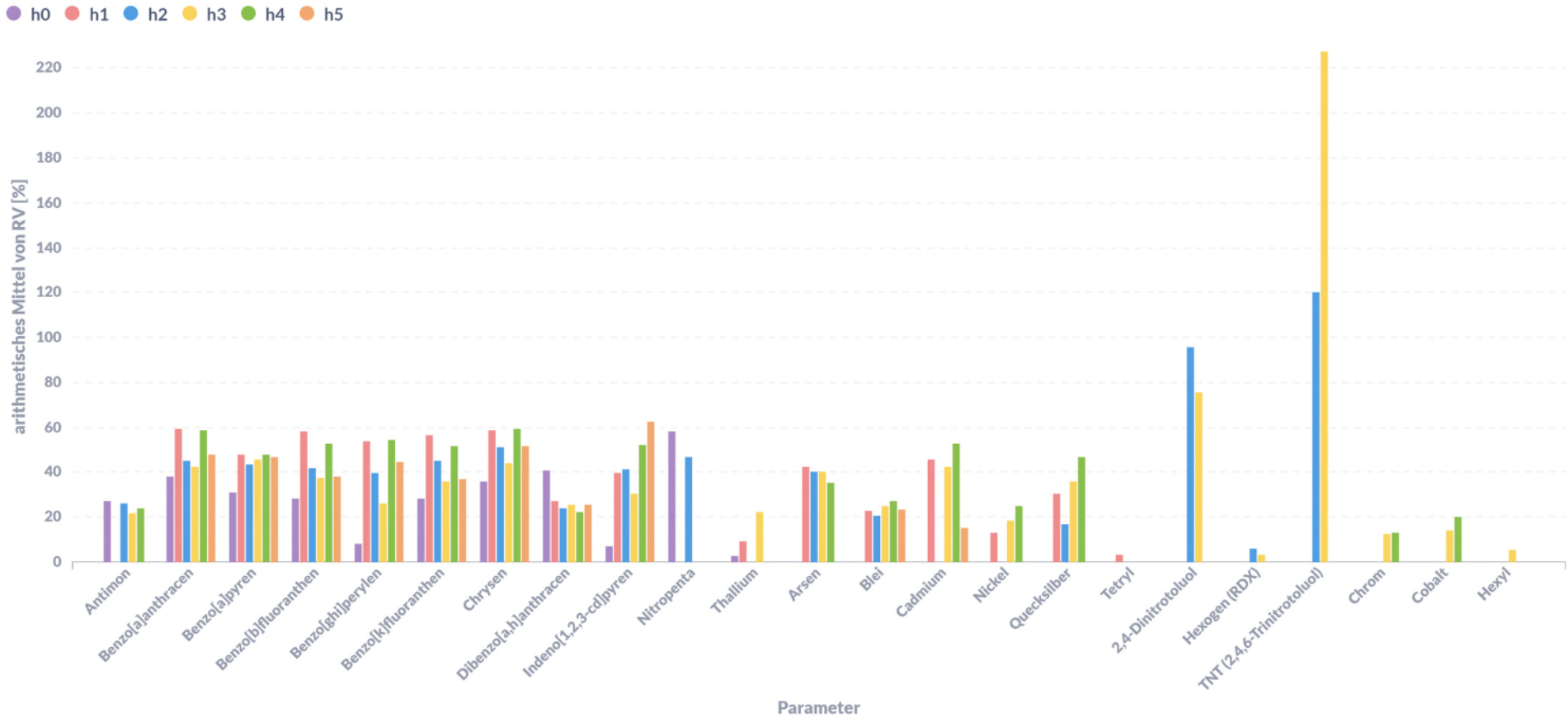
Was die Ergebnisunsicherheit der parameterweisen Datenbasen betrifft, gibt die Standardabweichung in der Abbildung 13 nur Anhaltspunkte. Bei Benzo[a]pyren nimmt in Richtung Feinstkorn die Resorptionsverfügbarkeit zwar ab (siehe oben), die Standardabweichung hingegen zu. Also wird die Aussagekraft dieses Trends geschwächt. Anders verhält es sich bei Arsen. Hier nimmt die Resorptionsverfügbarkeit zum Feinkorn hin zu und die Standardabweichung ab. Diese bestätigt die Richtigkeit des Trends. Blei ist für die Erhärtung des Trends ebenfalls nutzbar. Bei Blei, so wie bei B[a]P und As sind zahlreiche Datensätze vorhanden. Hier zeichnet sich ab, dass die Bodenart relativ wenig Einfluss auf die Resorptionsverfügbarkeit zu haben scheint.

In der folgenden Abbildung sind parameterweise die Resorptionsverfügbarkeiten bezogen auf die Humusstufen dargestellt. Die Humusstufen ergeben sich aus den Humusgehalten gemäß KA 5 [4, 6]. Dabei bedeuten h0 humusfrei 0 Masse % bis H7 organisch, Torf \geq 30 Masse %.

Humus ist die organische Substanz, die sich aus Ausscheidungen von Bodenorganismen und Zersetzungsprozesse im Boden anreichert, aber in einem ständigen Wandel durch Nutzung als u. a. Nährstoffbasis für Pflanzen und durch Erosionen ist.

Der Bodenkundler bestimmt den Humusgehalt anhand des optischen Eindrucks relativ genau mit der „MUNSELL-Farbtabelle“ und der KA 5 [4, 6]. Es kann besonders bei Stadtböden zu Fehlbestimmungen kommen, in denen sich Kohle und anthropogene Kohlenstoffverbindungen angereichert haben. Diese gehören nicht zum Humus, können jedoch auch großen Einfluss auf die Resorptionsverfügbarkeit haben.

Abbildung 14: Parameterbezogener arithmetischer Mittelwert von RV [%] der Humusstufen

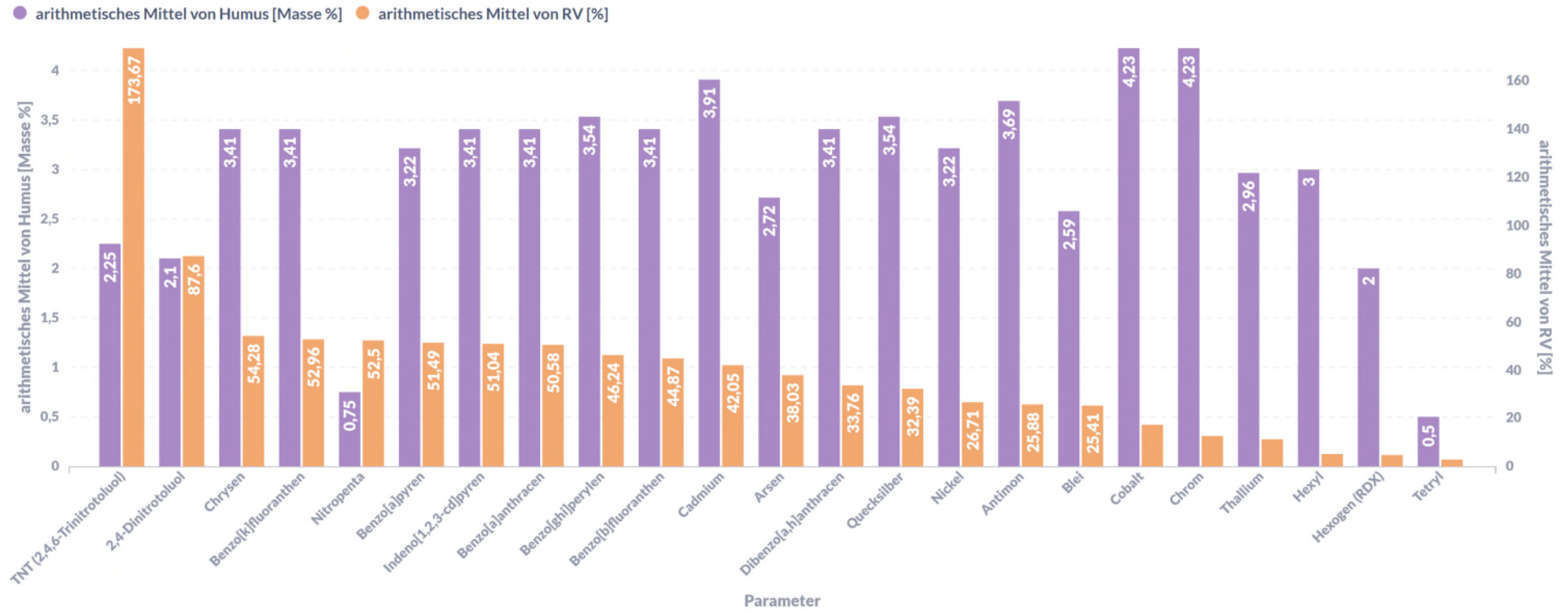


Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei den PAK zeichnet sich ein gleichbleibender und zunehmender Trend der Resorptionsverfügbarkeit bis auf eine Ausnahme ab. Deshalb müssen auch alle Parameter, selbst wenn sie zu einer Stoffgruppe gehören, einzeln beurteilt werden. Ähnlich sieht es bei den Metallen aus. Bei den sprengstofftypischen Verbindungen (STV) können aufgrund fehlender Daten und analytischen Problemen keine Aussagen getroffen werden.

In der folgenden Abbildung sind absteigend die parameterbezogenen arithmetischen Mittelwerte der Resorptionsverfügbarkeiten den arithmetischen Mittelwerten der Humusgehalte der entsprechenden Proben zur Orientierung gegenübergestellt.

Abbildung 15: Parameterbezogener arithmetischer Mittelwert von RV [%] bezogen auf den arithmetischen Mittelwert von Humus [Masse-%]



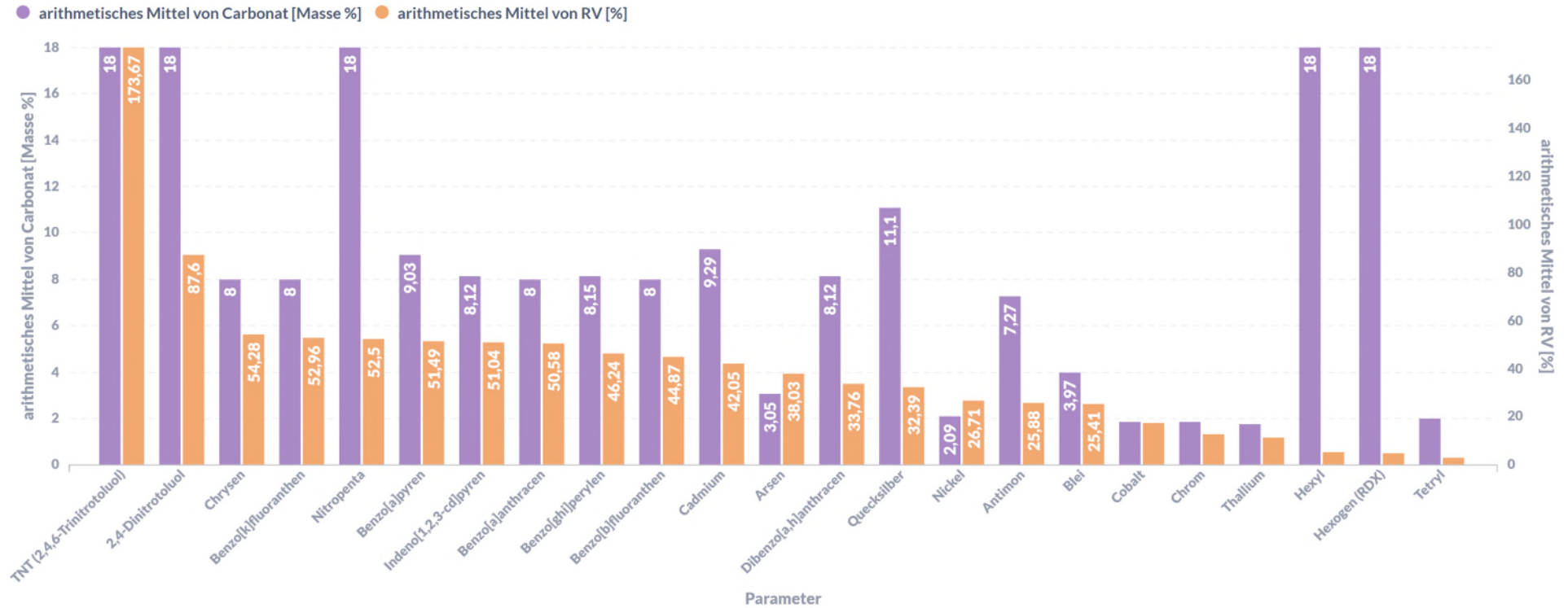
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

In Abbildung 15 kann man parameterweise den arithmetischen Mittelwert von Humus und den parameterweisen arithmetischen Mittelwert betrachten. Schlussfolgerungen auf das parameterweise Verhalten der Resorptionsverfügbarkeiten könne erst bei den folgenden weiteren Betrachtungen gezogen werden.

Der Carbonatgehalt in Böden wirkt der Versauerung entgegen. Diese Versauerung hängt hauptsächlich mit anthropogenen Einflüssen zusammen, z. B. dem sauren Regen und Auslaugung sowie Überdüngung durch unökologische landwirtschaftliche Nutzung. Die Versauerungsprozesse in Böden bedingen die Mobilisierungen von Schadstoffen, was zur Erhöhung der Resorptionsverfügbarkeit führen kann.

Carbonat bestimmt der Bodenkundler im Boden mit dem HCl-Test (10 %ige HCl auf eine Bodenprobe und Beobachtung der Bläschenbildung) gemäß der KA 5 [4, 6]. So können Calcit und Dolomit in Masse-% in Böden relativ einfach feldmäßig bestimmt werden. In der folgenden Abbildung 16 sind parameterweise der arithmetische Mittelwert der Resorptionsverfügbarkeiten absteigend dem arithmetischen Mittelwert vom Carbonatgehalt der entsprechenden Proben gegenübergestellt.

Abbildung 16: Parameterbezogener arithmetischer Mittelwert von RV [%] bezogen auf den arithmetischen Mittelwert von Carbonat



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Abbildung 15 und die Abbildung 16 sind nur orientierend und im Zusammenhang mit den folgenden parameterweisen vergleichenden Auswertung zu betrachten. Das parameterweise arithmetische Mittel von Humus und Carbonat gilt nur für die untersuchten Proben und kann nicht verallgemeinert werden.

7.4 Parameterweise vergleichende Auswertung

In den folgenden Abbildungen sind parameterweise die Daten folgendermaßen dargestellt:

1. Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte
2. Bodenartenhauptgruppe S (Sand), Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte
3. Bodenartenhauptgruppe L/U (Lehn/Schluff), Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte
4. Bodenartenhauptgruppe T (Ton), Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte
5. Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend
6. Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend

Zu 1)

Durch die absteigende Sortierung des Feststoffgehaltes [mg/kg] des Parameters kann bei ausreichender Anzahl von Proben erkannt werden, ob die Resorptionsverfügbarkeit mit dem Feststoffgehalt im Zusammenhang steht.

Zu 2, 3, 4)

Für die Bodenartenhauptgruppen S (Sand), L/U (Lehn/Schluff) und T (Ton) wurden die Feststoffgehalte absteigend den Resorptionsverfügbarkeiten gegenübergestellt. Daraus lassen sich ggf. Zusammenhänge und Trends erkennen. Es sind zum Teil für einige Bodenartenhauptgruppen bei diversen Parametern keine Untersuchungsergebnisse vorhanden; hier fehlen die Abbildungen.

Zu 5)

Der Carbonatgehalt [Masse-%] wurde den Untersuchungsergebnissen für die Resorptionsverfügbarkeit RV [%] parameterweise absteigend gegenübergestellt. Es wird damit der Einfluss vom Carbonatgehalt auf die Resorptionsverfügbarkeit parameterspezifisch untersucht.

Zu 6)

Wie beim Carbonatgehalt wurde mit den Untersuchungsergebnissen für den Humusgehalt verfahren, um auch hier eventuelle Trends zu erkennen. Diese Abbildung ist auch im Zusammenhang mit der Abbildung 10: Parameterbezogener arithmetischer Mittelwert von RV [%] der Humusstufen zu betrachten.

Die Ergebnisse der Befundungen wurden in der Tabelle 25: Übersicht der Ergebnisse des Screenings der Resorptionsverfügbarkeitsdatensätze zusammengestellt. Hier sind parameterweise folgende Daten und Trends dargestellt:

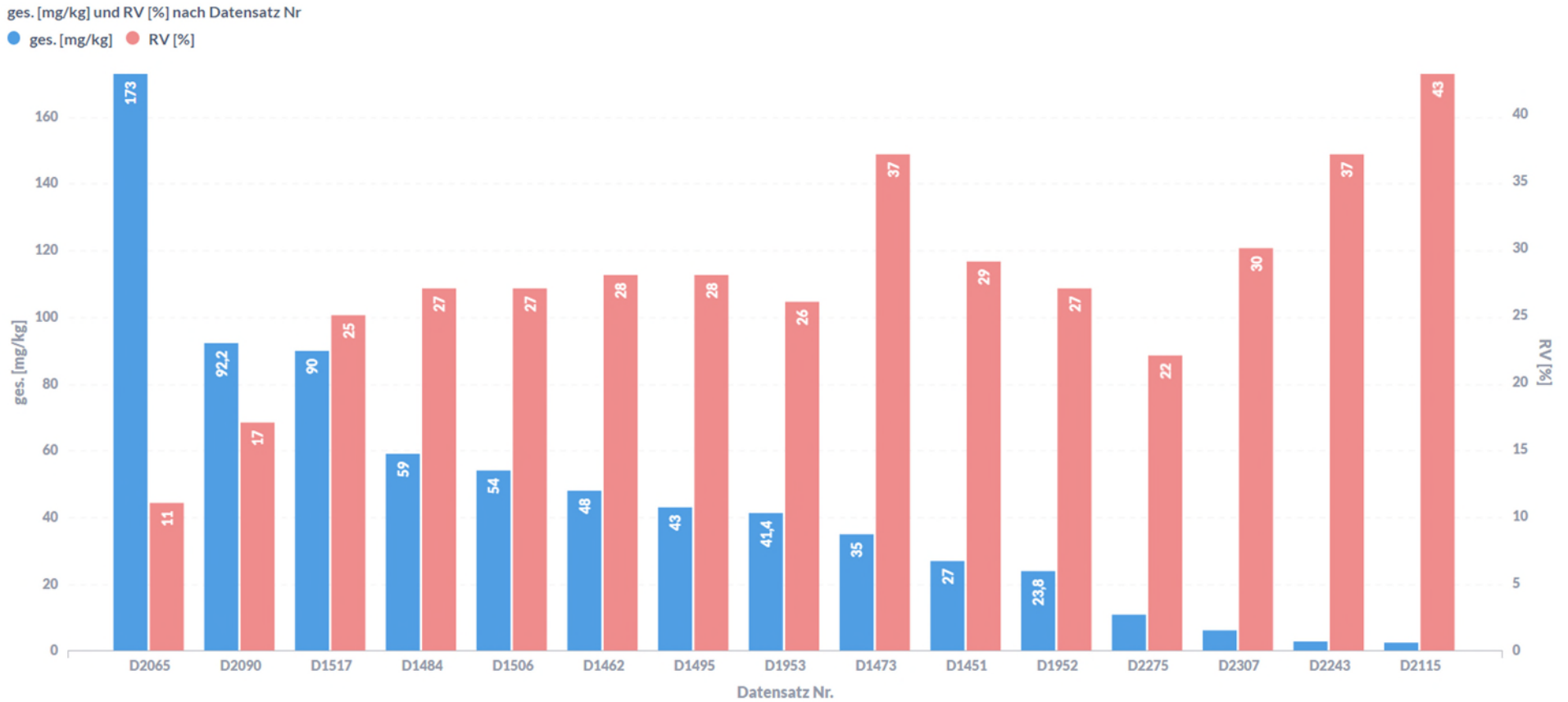
Anzahl der Daten mit RV, arithmetischer Mittelwert von RV [%], arithmetischer Mittelwert von RV [%] mit erfüllten Qualitätskriterien, Standardabweichung von RV [%],

Robustheitsuntersuchung zur Resorptionsverfügbarkeit [5] RV [%], Empfohlene RV [%], RV mit absteigendem Feststoffgehalt, arithmetischer Mittelwert RV der Humusstufen aufsteigend, RV in Richtung S - L/U – T, RV mit absteigendem Feststoffgehalt bei Sand, RV mit absteigendem Feststoffgehalt bei Lehm/Schluff, RV mit absteigendem Feststoffgehalt bei Ton, RV Verhalten mit absteigendem Carbonatgehalt, RV Verhalten mit absteigendem Humusgehalt.

7.4.1 Antimon

Die Feststoffgehalte decken die Prüfwerte Boden-Mensch der BBodSchV weitreichend ab.

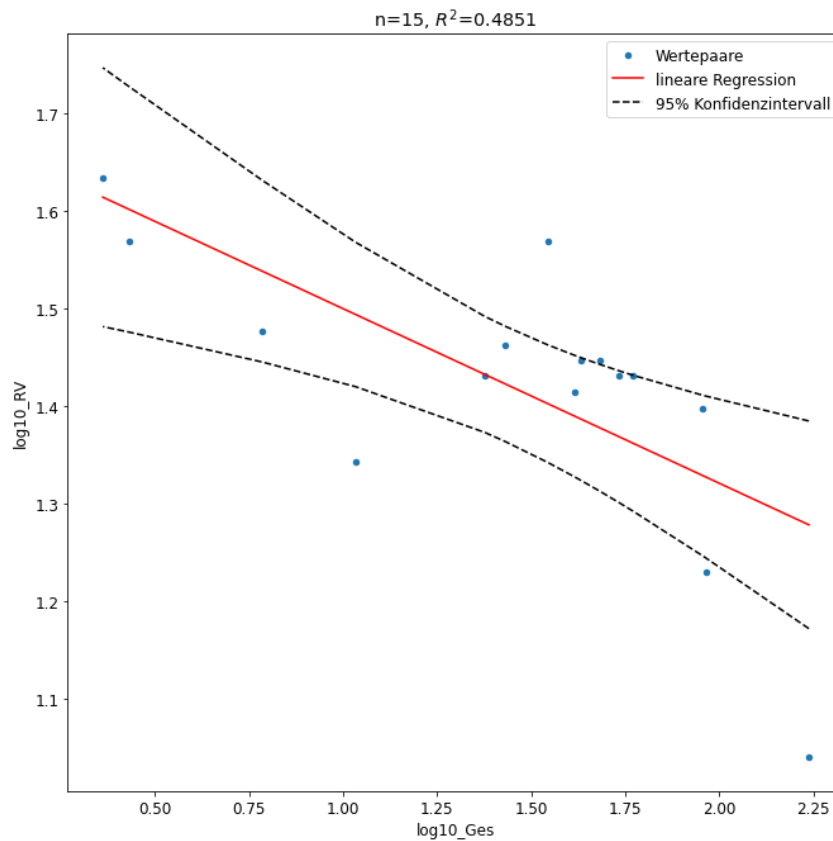
Abbildung 17: Antimon – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit scheint bei Antimon mit sinkender Feststoffkonzentration zu steigen. Das wird mit der folgenden Graphik bestätigt. Hier ist die lineare Regression wie unter 8.1 beschrieben dargestellt. Auch bei den folgenden Abbildungen zur Regression wurde die Anzahl der für den Trend beteiligten Untersuchungsergebnisse, das 95 % Konfidenzintervall als Geltungsbereich und R^2 für die Richtigkeit mit dargestellt.

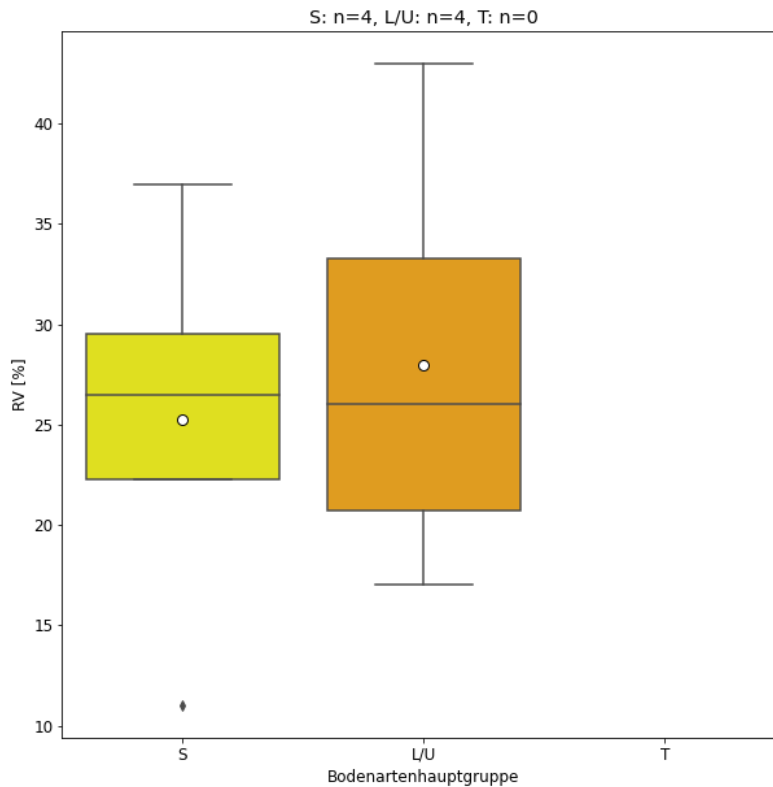
Abbildung 18: Antimon – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die lineare Regression bestätigt, dass bei Antimon mit sinkendem Feststoffgehalt die Resorptionsverfügbarkeit zunimmt.

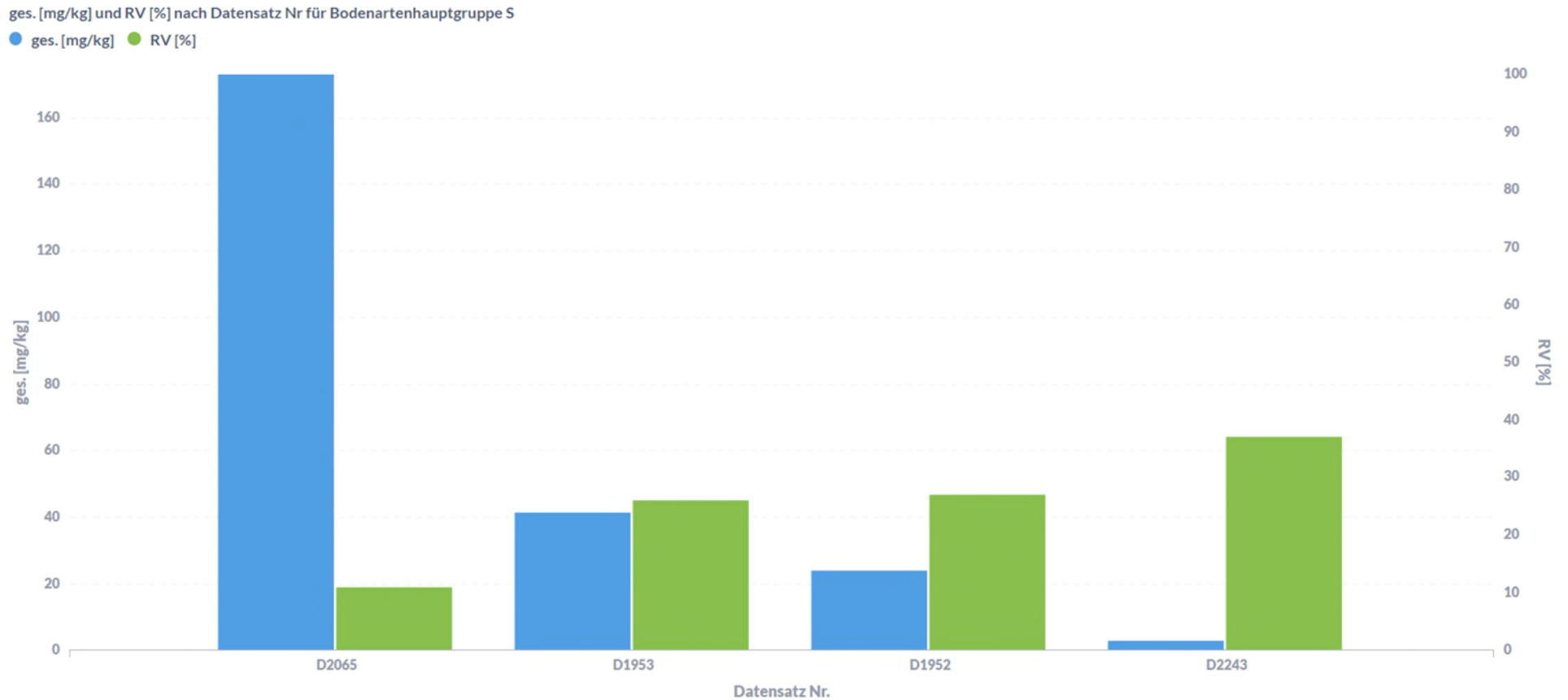
Abbildung 19: Antimon – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der gemeinsamen Auswertung der Bodenartenhauptgruppen der Antimon-Proben mit dem Boxplott-Diagramm Abbildung 19 ist in Richtung Feinstkorn eine Zunahme der Streuung der RV-Ergebnisse zu verzeichnen. Der Median ist dabei gleich, aber der arithmetische Mittelwert steigt mit abnehmender Korngröße.

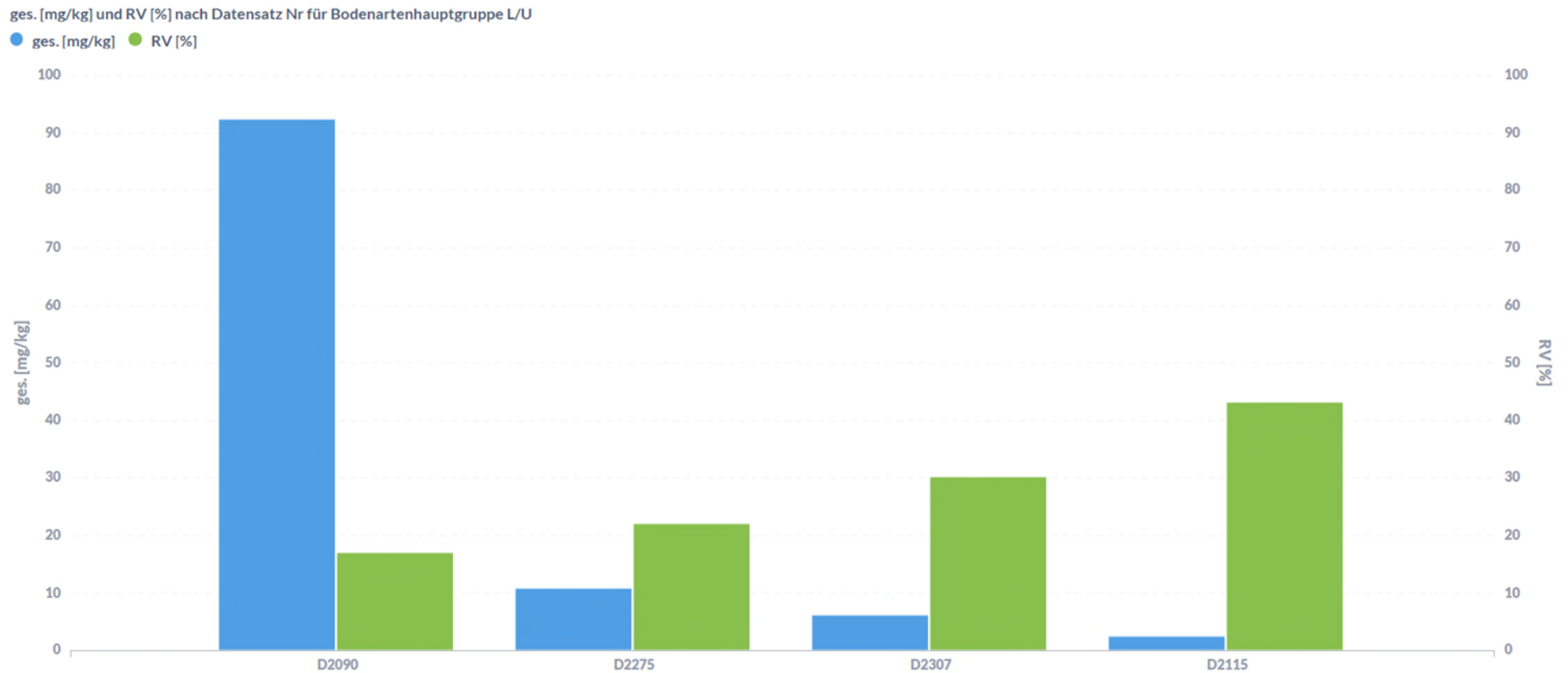
Abbildung 20: Antimon – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Sand ist ein leichter Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit mit sinkender Feststoffkonzentration festzustellen. Zur Auswertung lagen jedoch nur wenige Proben vor.

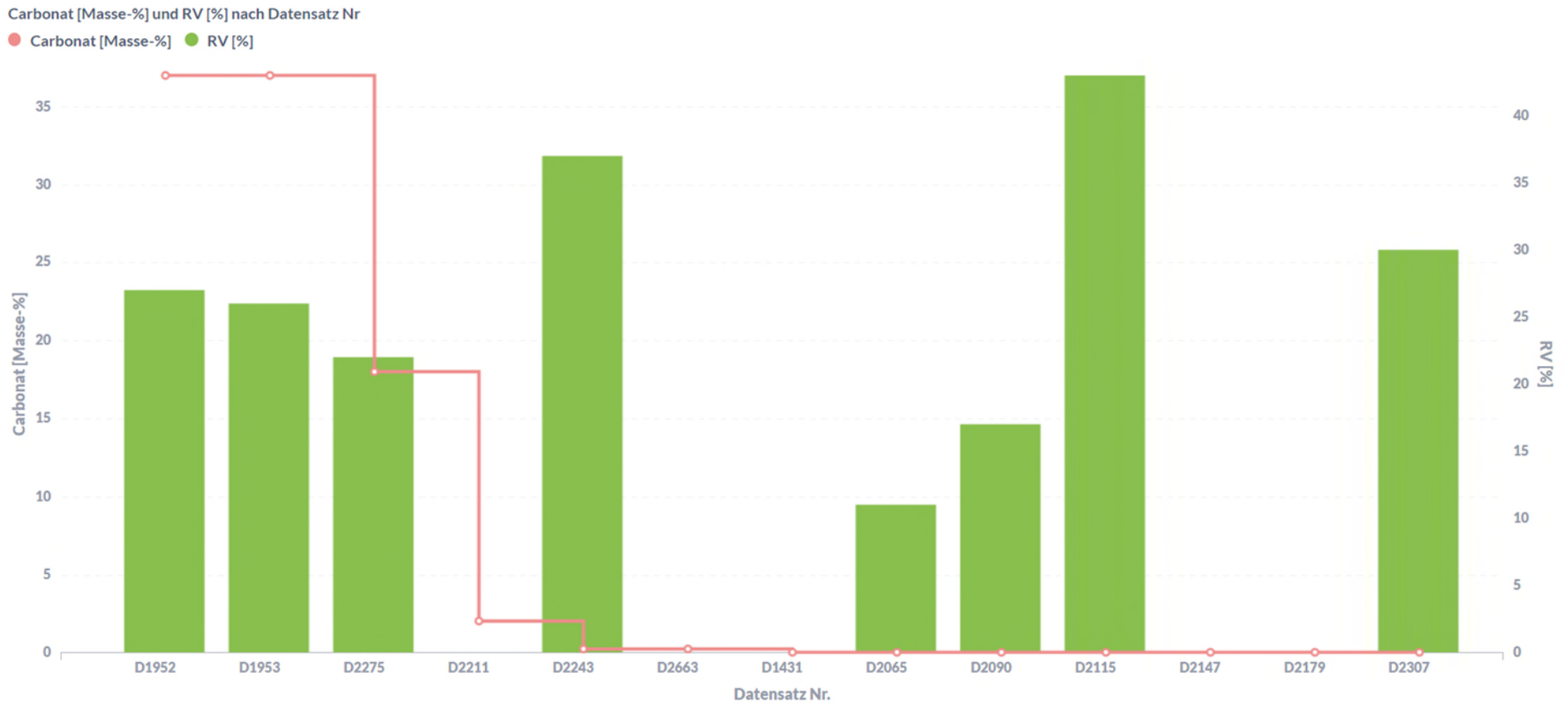
Abbildung 21: Antimon – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei den Lehm/Schluff ist ebenfalls einen leichter Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit mit absteigenden Feststoffgehalt erkennbar.

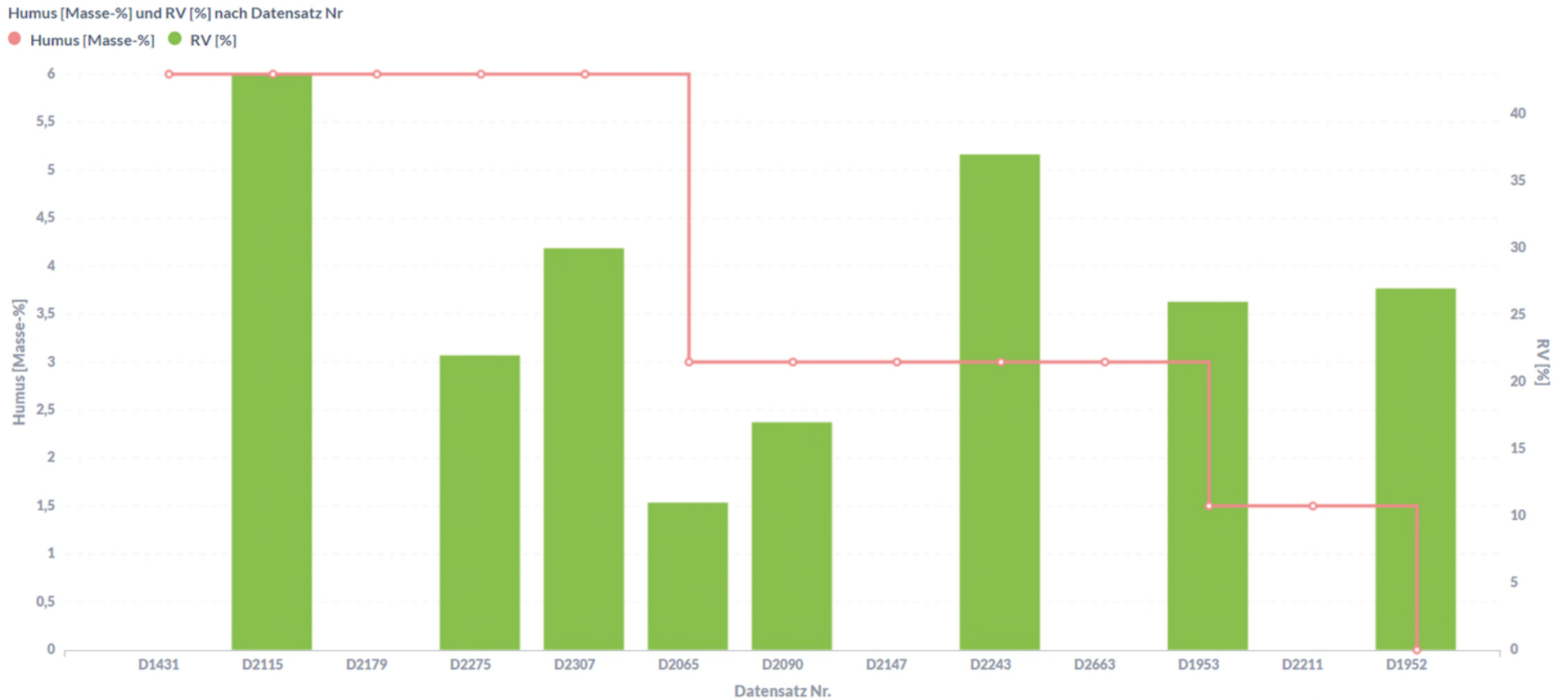
Abbildung 22: Antimon – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei mehreren Proben war keine Resorptionsverfügbarkeit laboranalytisch bestimmbar (als Datensatz mit „0“ definiert). Es ist kein Trend erkennbar.

Abbildung 23: Antimon – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



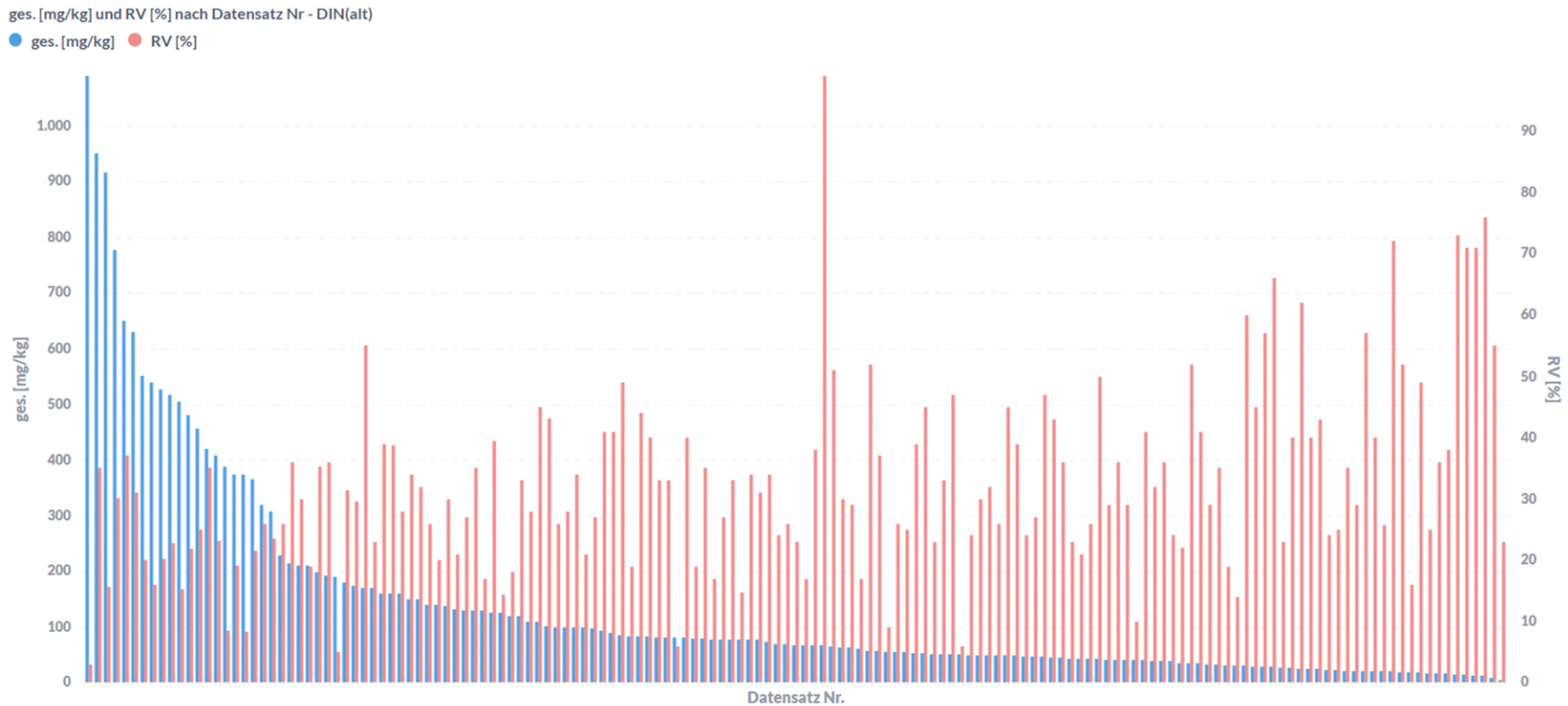
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Betrachtung der Einzelwerte ist kein Trend ableitbar.

7.4.2 Arsen

Die Prüfwerte des Wirkungspfades Boden-Mensch der BBodSchV werden von den vorhandenen Daten weitgehend abgedeckt. Allerdings sind auch sehr hohe Feststoffgehalte von über 140 bis über 2000 mg/kg in die Auswertung eingeflossen.

Abbildung 24: Arsen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



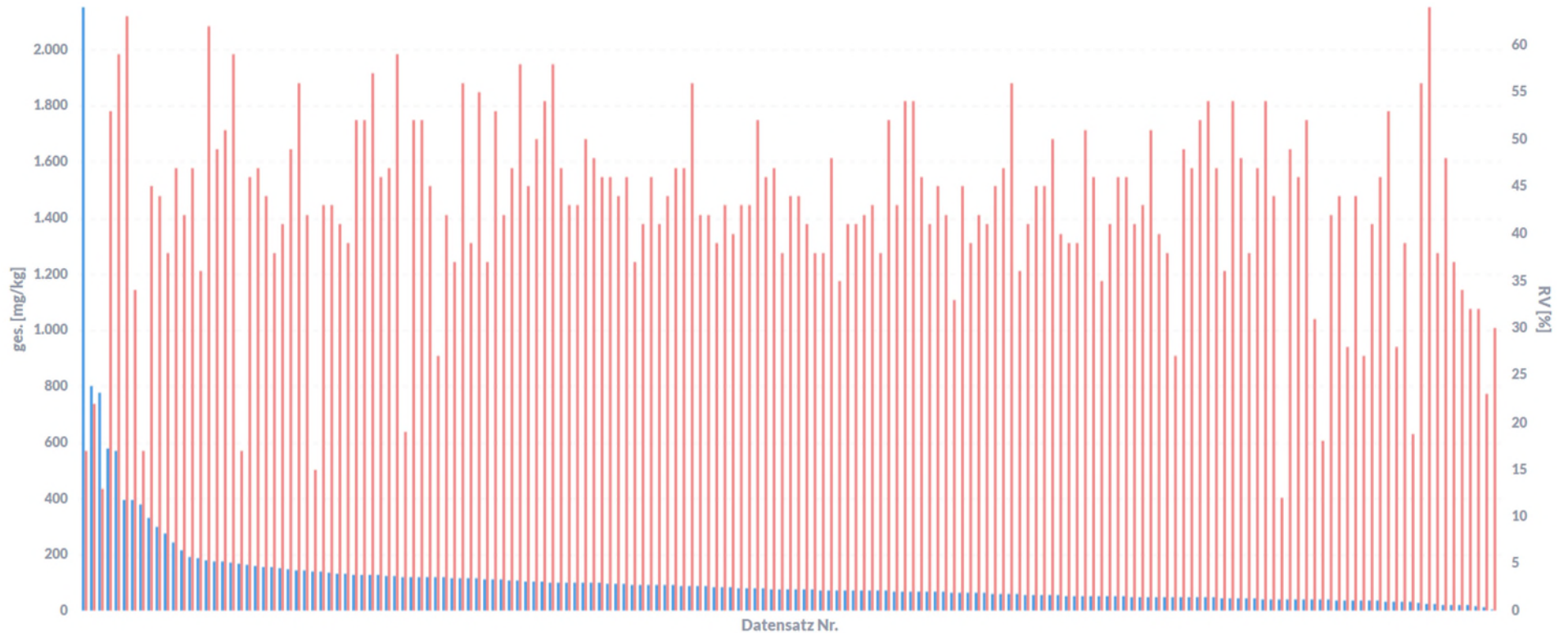
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit bei Arsen in Bezug auf den Feststoffgehalt zeigt einen schwachen Anstieg bei niedrigen Feststoffgehalten, sowie eine große Schwankungsbreite bei den Untersuchungen nach der alten Norm.

Abbildung 25: Arsen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte

ges. [mg/kg] und RV [%] nach Datensatz Nr - DIN(neu)

● ges. [mg/kg] ● RV [%]



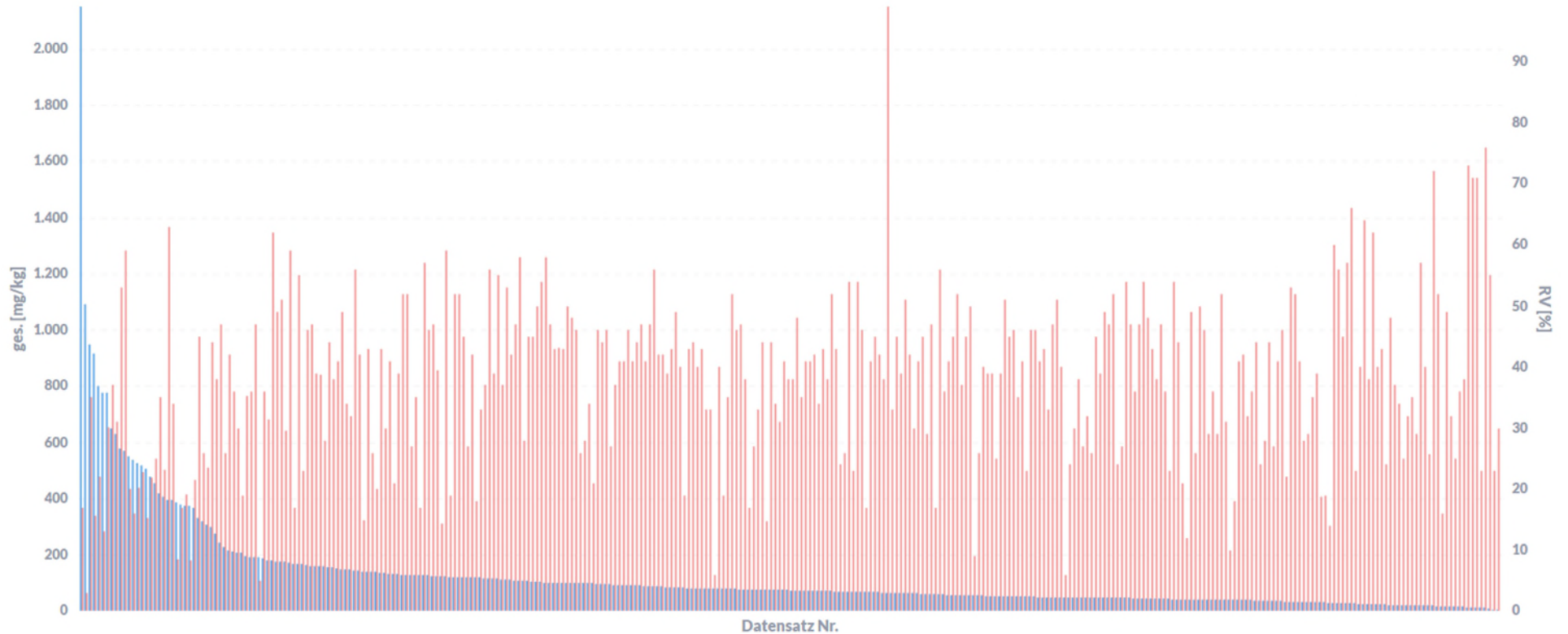
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei den Untersuchungen gemäß neuen Norm, ist kein Trend ableitbar.

Abbildung 26: Arsen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte

ges. [mg/kg] und RV [%] nach Datensatz Nr

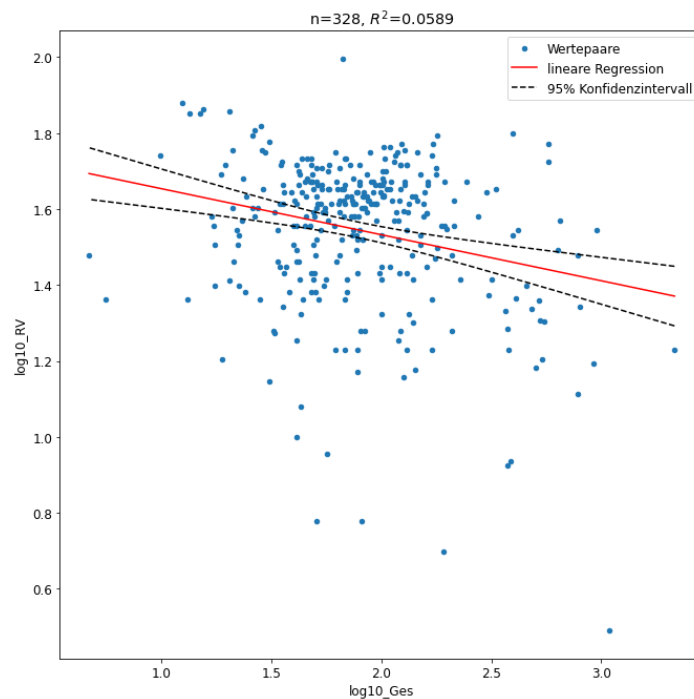
● ges. [mg/kg] ● RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der Zusammenfassung der alten und der neuen Norm ist nur über die lineare Regression eine leichte Abnahme der Resorptionsverfügbarkeit mit steigendem Feststoffgehalt anhand der folgenden Abbildung zu prognostizieren. Das ist jedoch unter Berücksichtigung der Messunsicherheit kein klarer Trend.

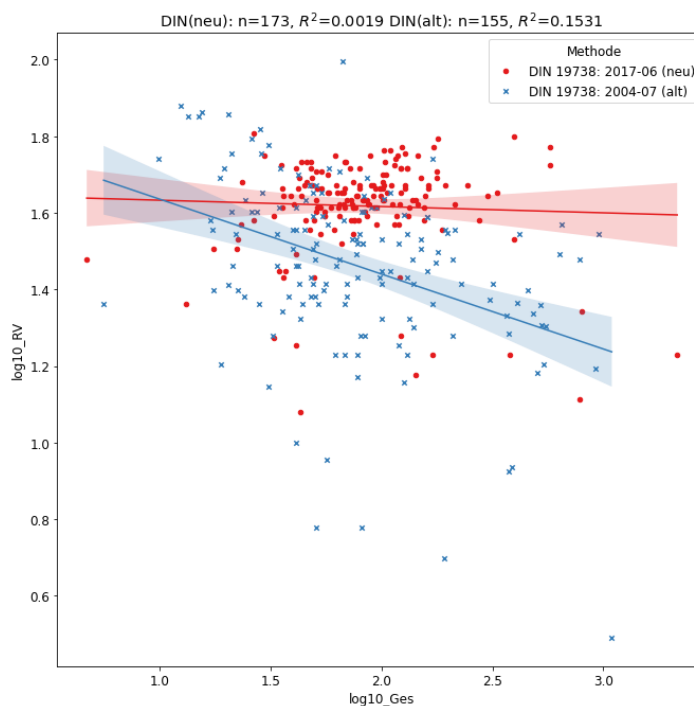
Abbildung 27: Arsen – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Mit absteigenden Feststoffgehalt nimmt gemäß der Abbildung 27 die Resorptionsverfügbarkeit leicht zu.

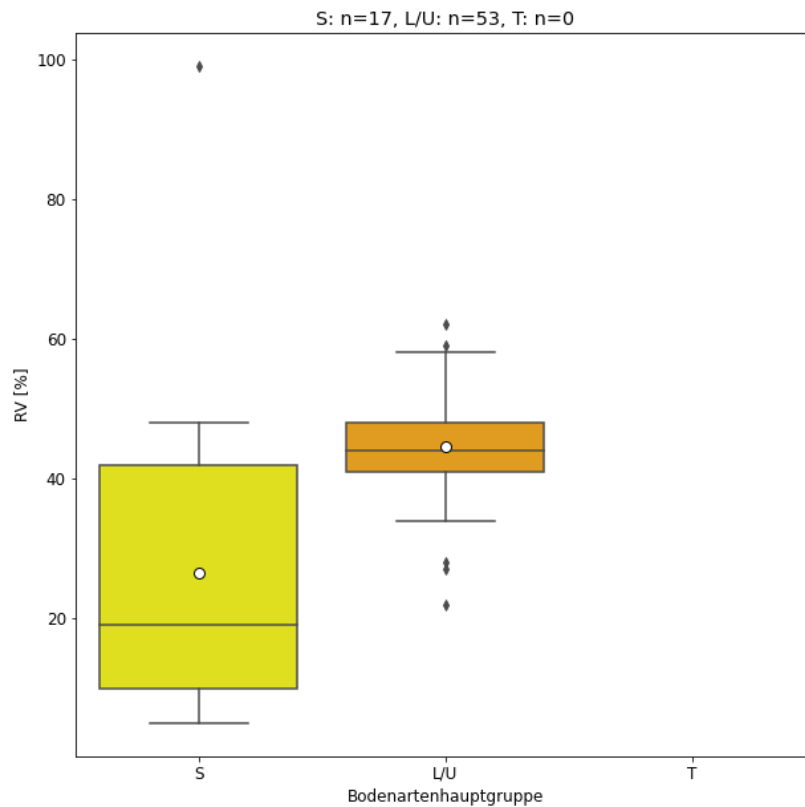
Abbildung 28: Arsen – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der getrennten Betrachtung der Regressionsgeraden der alten und der aktuell gültigen DIN 19739 ist festzustellen, dass die Resorptionsverfügbarkeit mit der Abnahme des Feststoffgehaltes deutlich zunimmt. Das ist ein weiterer Hinweis dafür, dass nur noch nach der aktuellen Norm wegen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu arbeiten ist. Es ist festzustellen, dass wenn nach der aktuellen Norm gearbeitet wird, die Resorptionsverfügbarkeit vom Feststoffgehalt unabhängig ist, also weitestgehend gleich bleibt.

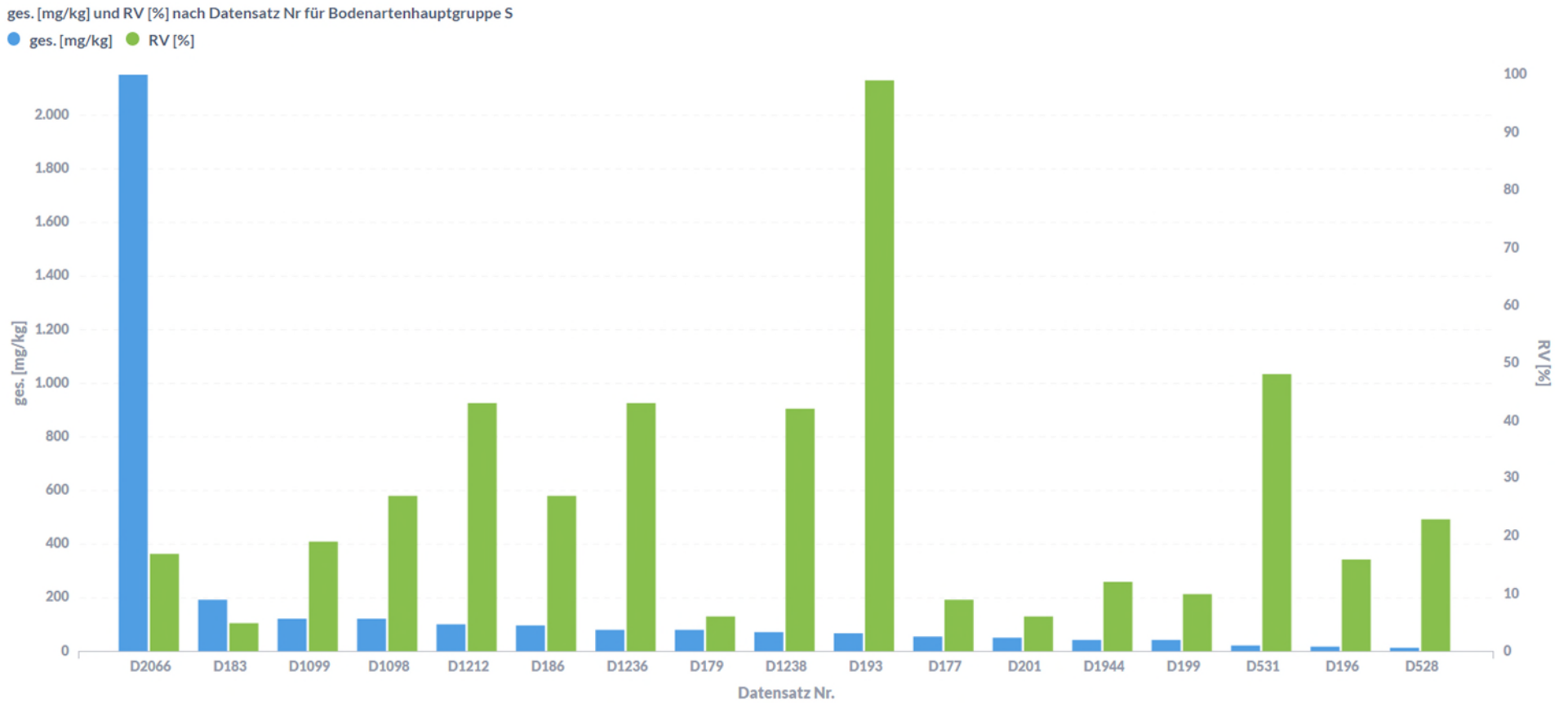
Abbildung 29: Arsen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Feststellung im Säulendiagramm (Abbildung 12) wird durch den Boxplott bestätigt.

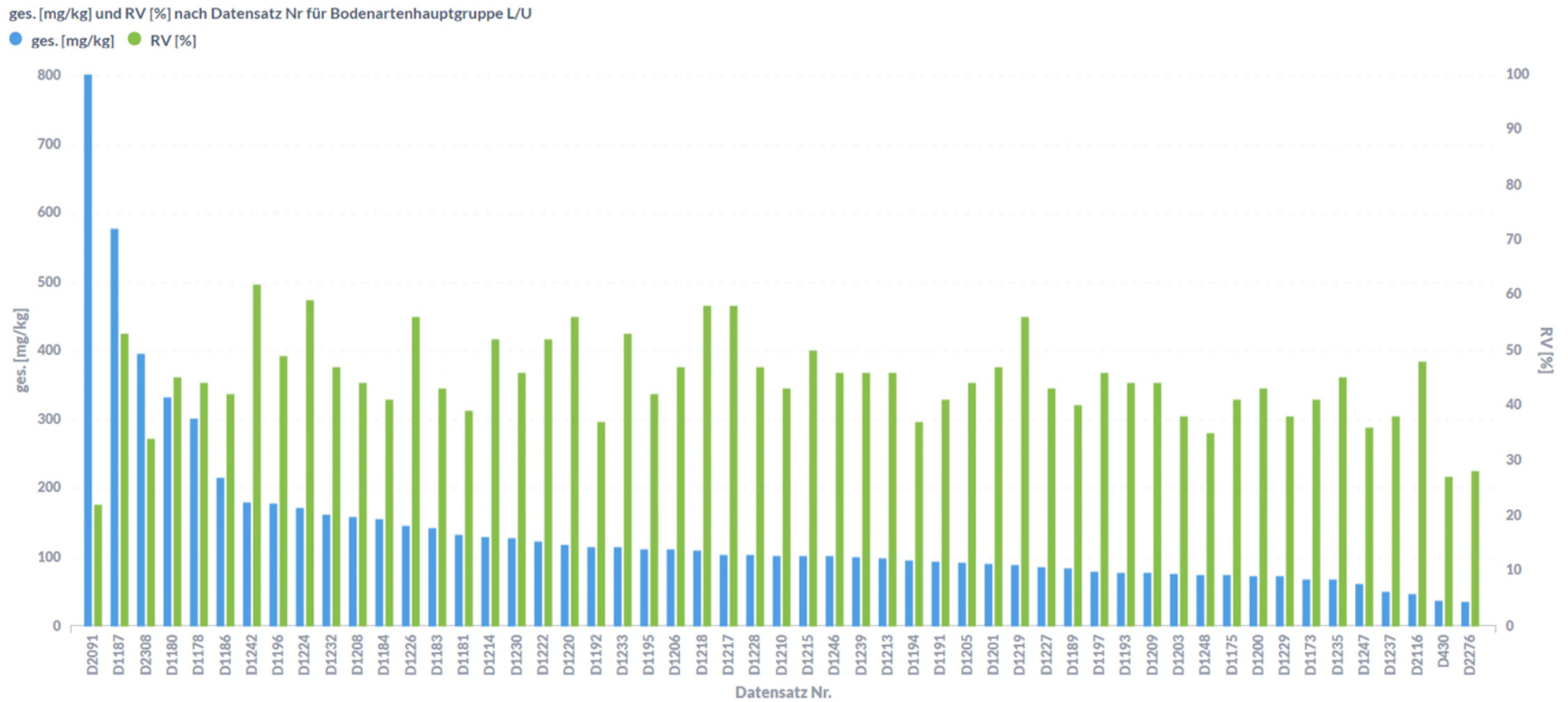
Abbildung 30: Arsen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Sand schwankt die Resorptionsverfügbarkeit zusammenhangslos mit dem absteigenden Feststoffgehalt.

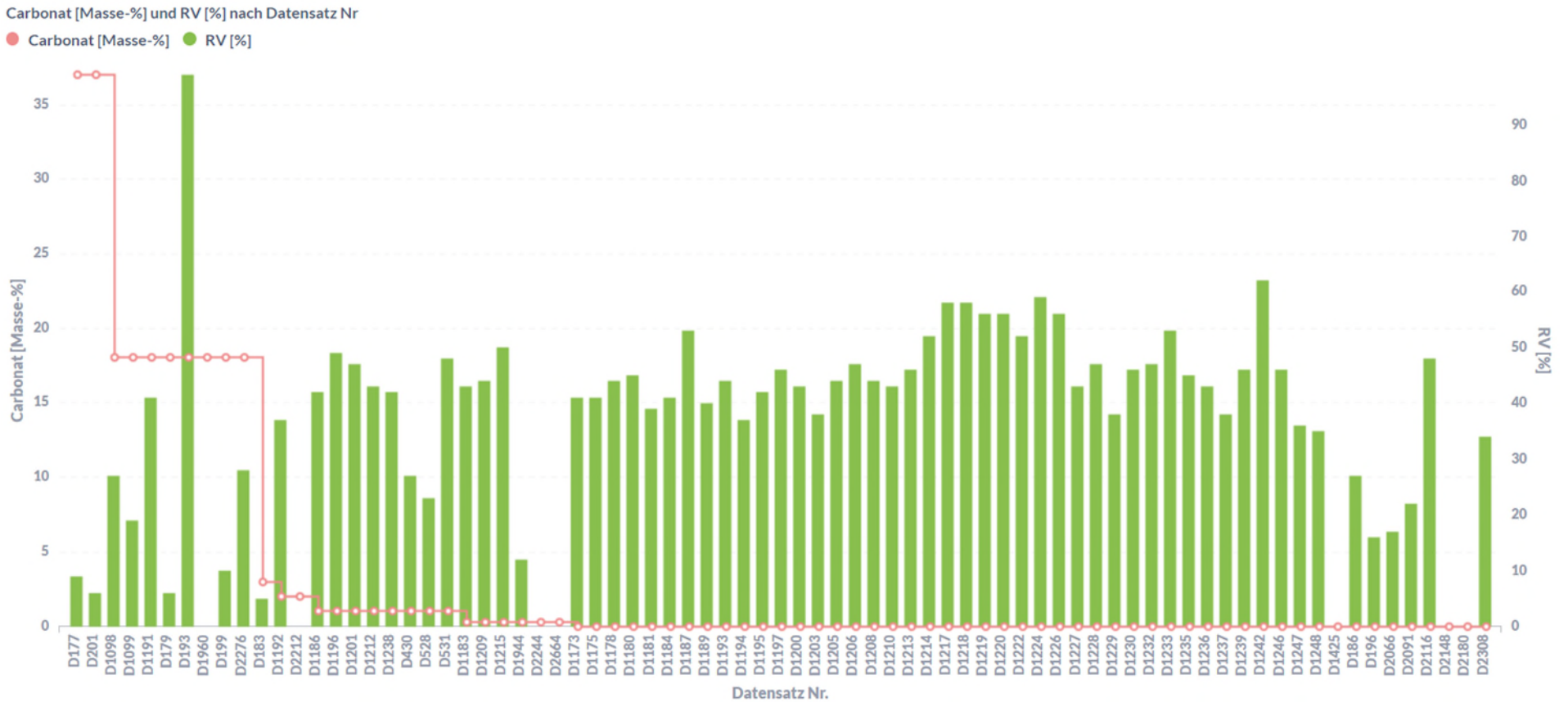
Abbildung 31: Arsen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Lehm und Schluff gilt dasselbe wie bei Sand. Die Resorptionsverfügbarkeit schwankt ohne Trend.

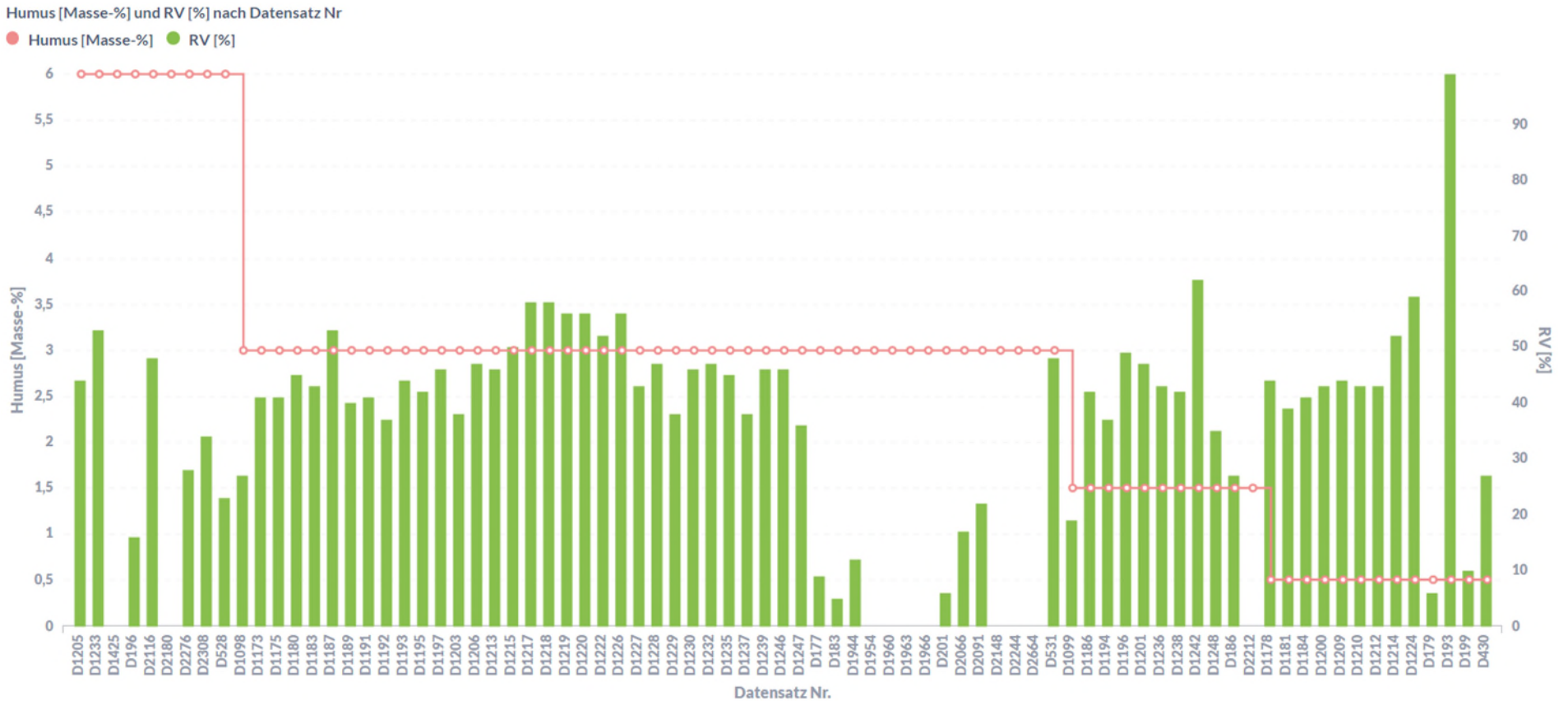
Abbildung 32: Arsen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Beim Carbonatgehalt ist bei der Resorptionsverfügbarkeit ebenfalls kein Trend zu erkennen.

Abbildung 33: Arsen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



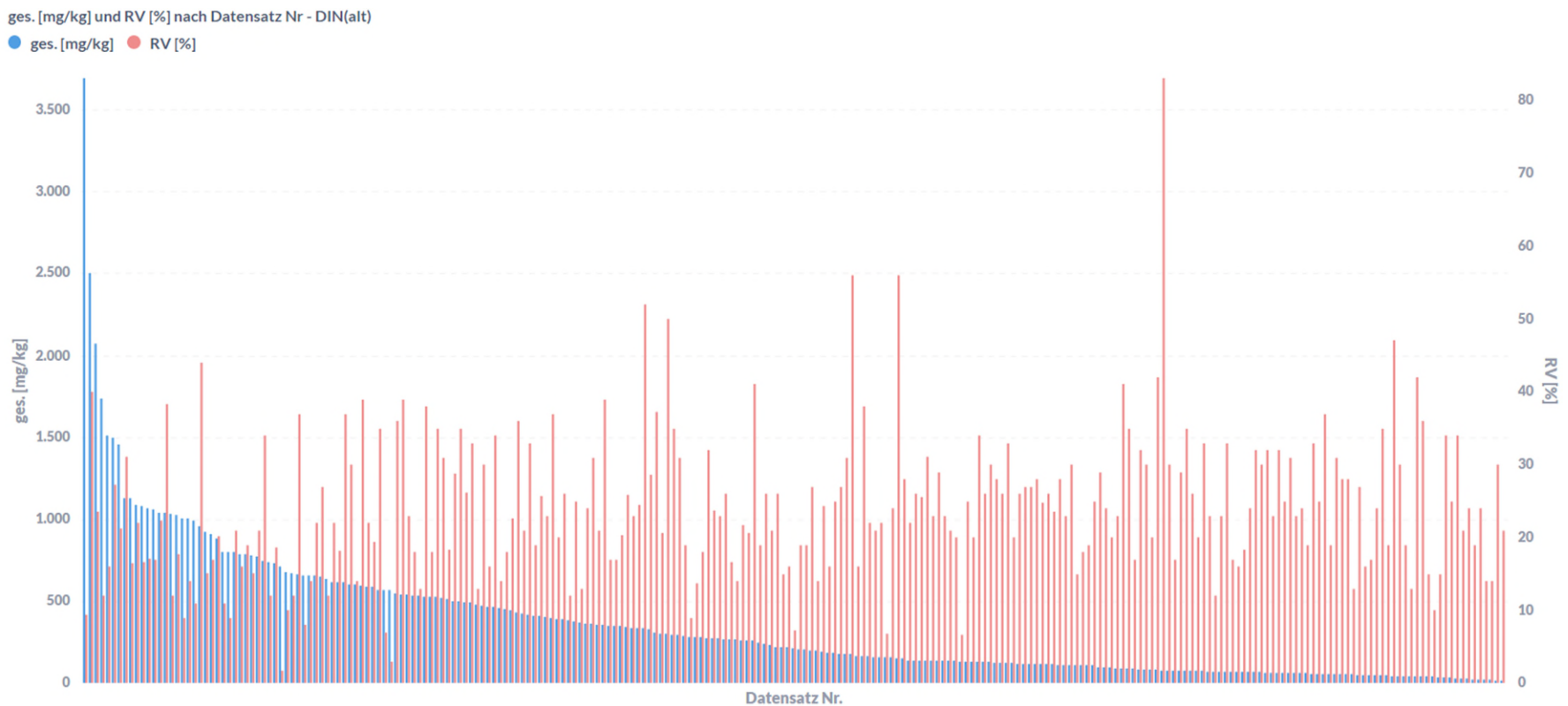
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei näherer Betrachtung erkennt man auch bei Humus keinen klaren Trend bei den Einzelwerten. Der arithmetische Mittelwert der Humusstufen zeigte aber ein leichtes Abfallen mit der Abnahme vom Humusgehalt.

7.4.3 Blei

Die Proben decken die Prüfwerte Boden-Mensch der BBodSchV ab. Es sind allerdings auch sehr hohe Konzentrationen vorhanden, die die Trendaussagen jedoch nicht beeinflussen.

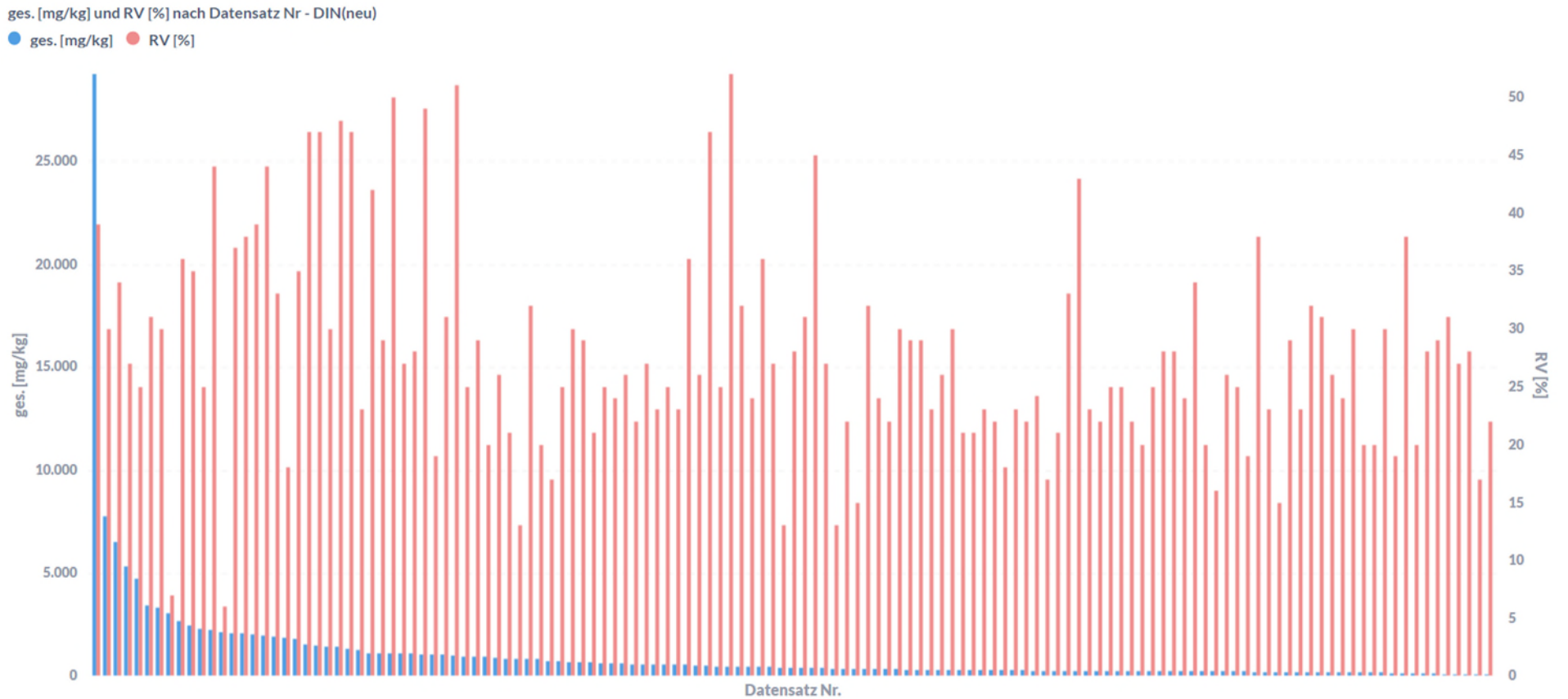
Abbildung 34: Blei – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Zwischen der Feststoffkonzentration von Blei und der Resorptionsverfügbarkeit ist kein Zusammenhang erkennbar. Es sind hohe Schwankungen, auch im selben Feststoffkonzentrationsniveau mit auftretenden Ausreißern nach oben und unten festzustellen.

Abbildung 35: Blei – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



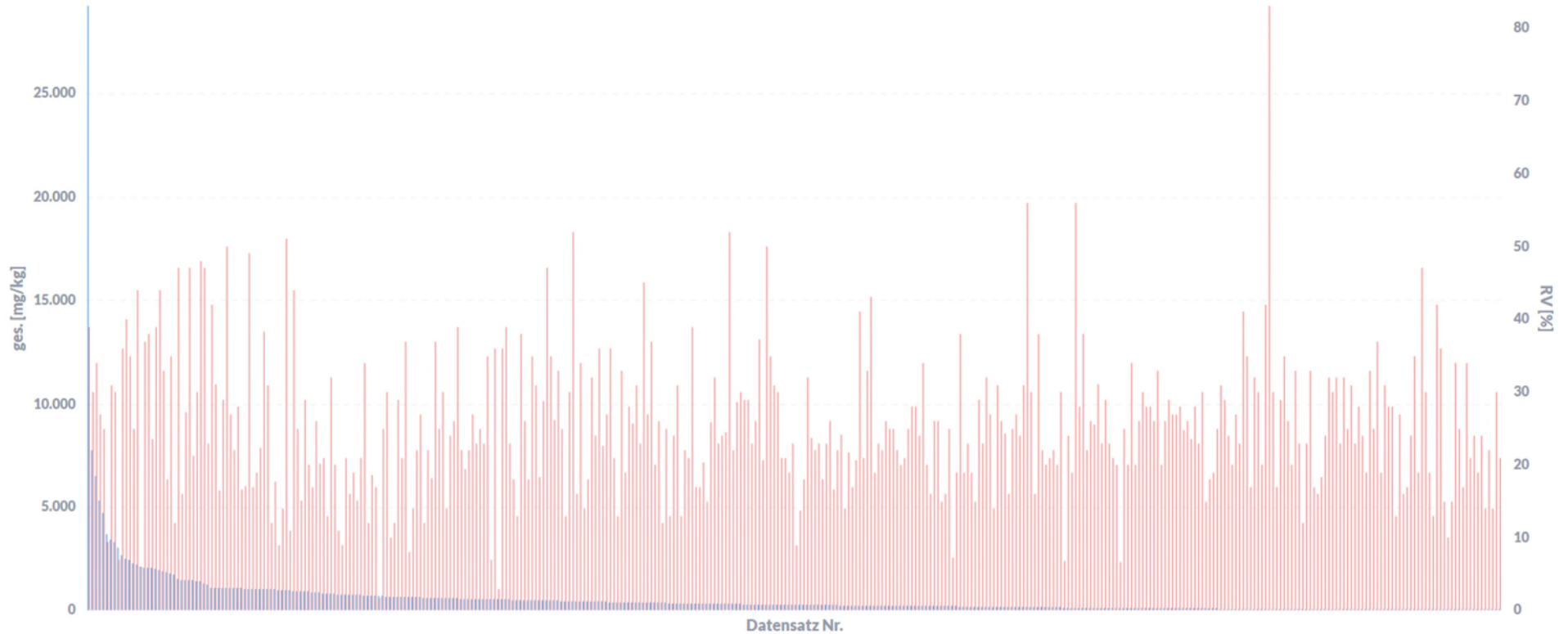
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit verhält sich auch bei der neuen Norm identisch zur alten Normmethode. Die analytischen Ausreißer sind bei der neuen Normmethode weniger vorhanden und geringer.

Abbildung 36: Blei – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte

ges. [mg/kg] und RV [%] nach Datensatz Nr

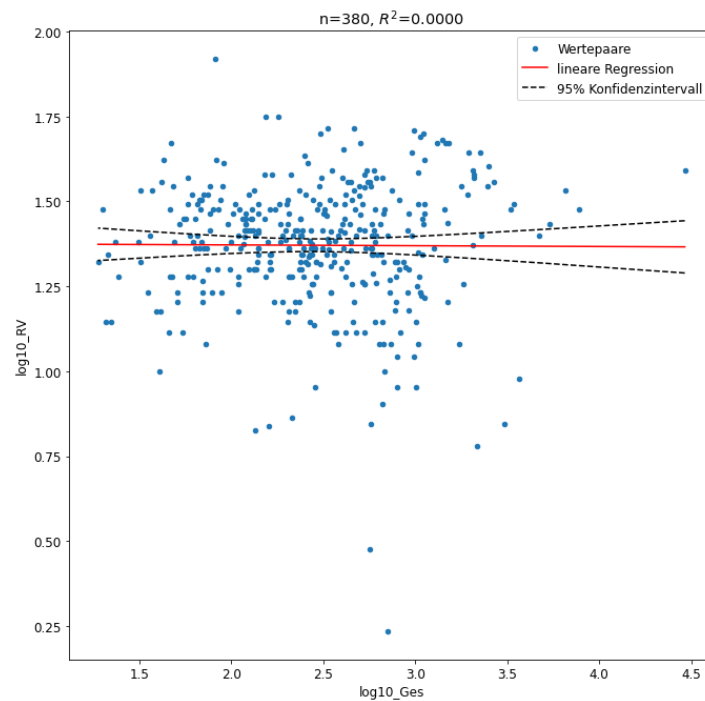
● ges. [mg/kg] ● RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Das Gesamtbild altes und neues Normverfahren ergibt keine weiteren Erkenntnisse. Das wird auch mittels linearer Regression bestätigt (vgl. nachfolgend).

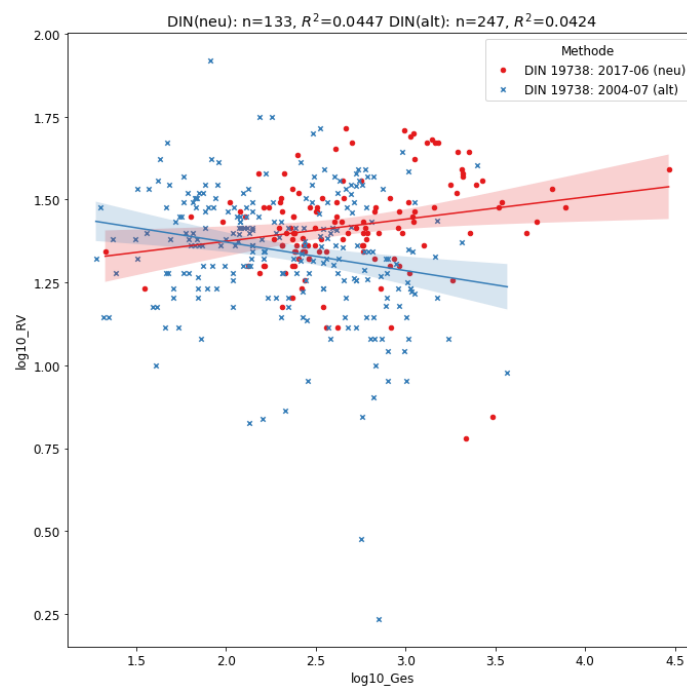
Abbildung 37: Blei – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Feststellungen aus den Balkendiagrammen werden durch die Auswertung der linearen Regression bestätigt.

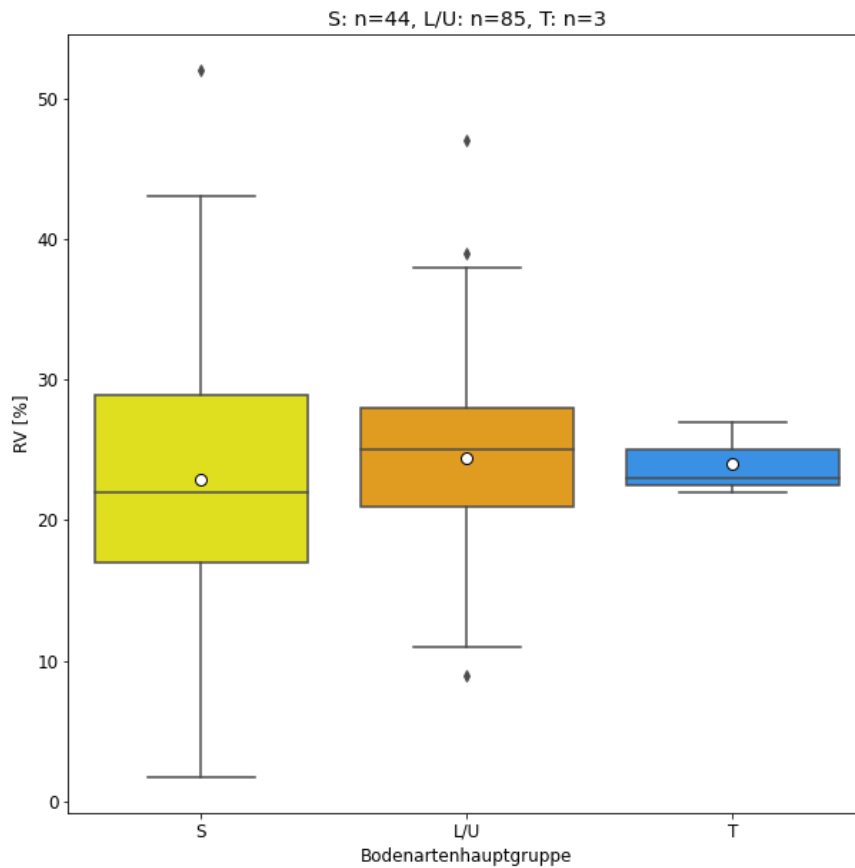
Abbildung 38: Blei – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Auch bei Blei tritt ein Unterschied in der linearen Regression der alten und der aktuellen Norm auf. Die Daten die mit der neuen Norm ermittelt wurden zeigen einen leichten Aufwärtstrend im Gegensatz zu den alten Daten, was das Gesamtergebnis relativiert.

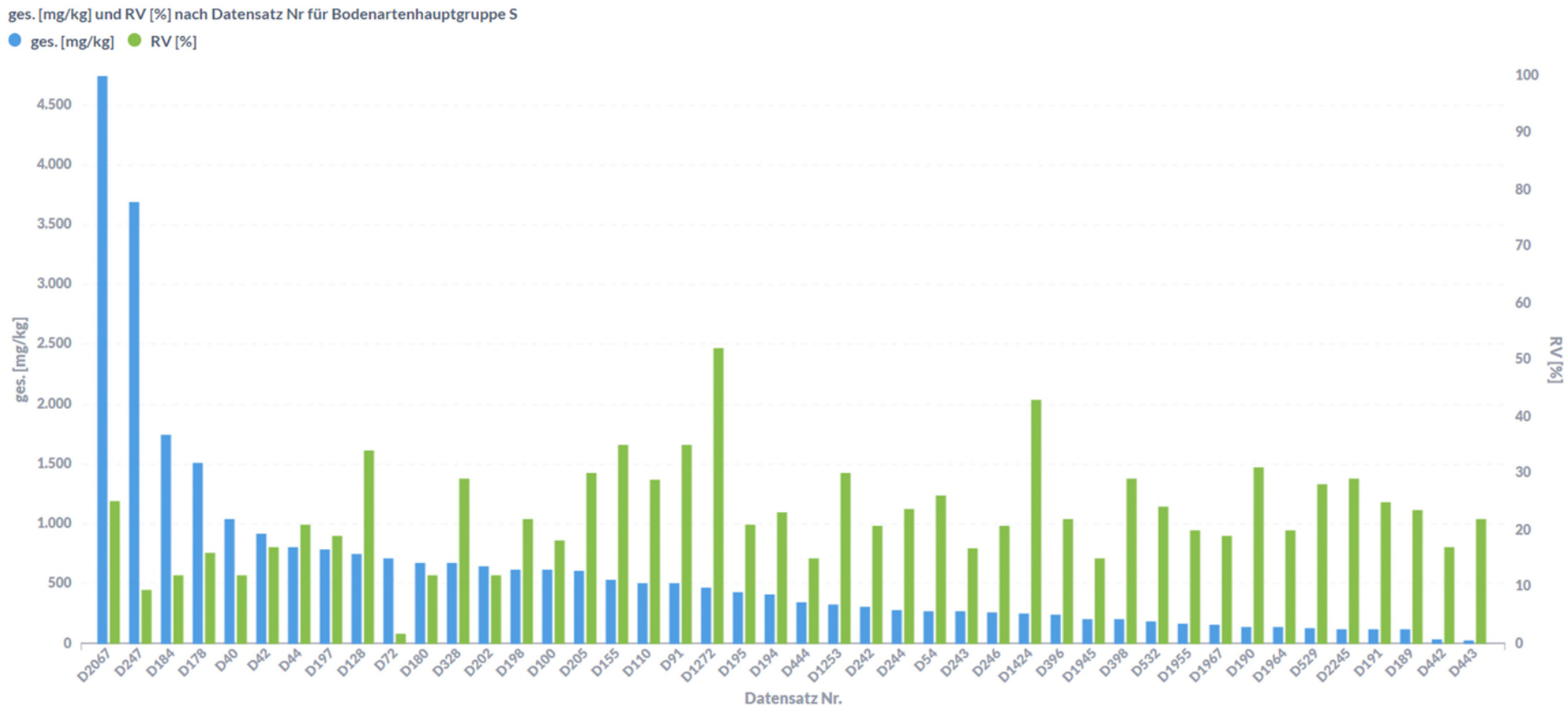
Abbildung 39: Blei – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Auch der Boxplot zum Verhalten der Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Hauptbodenarten zeigt keinen Trend.

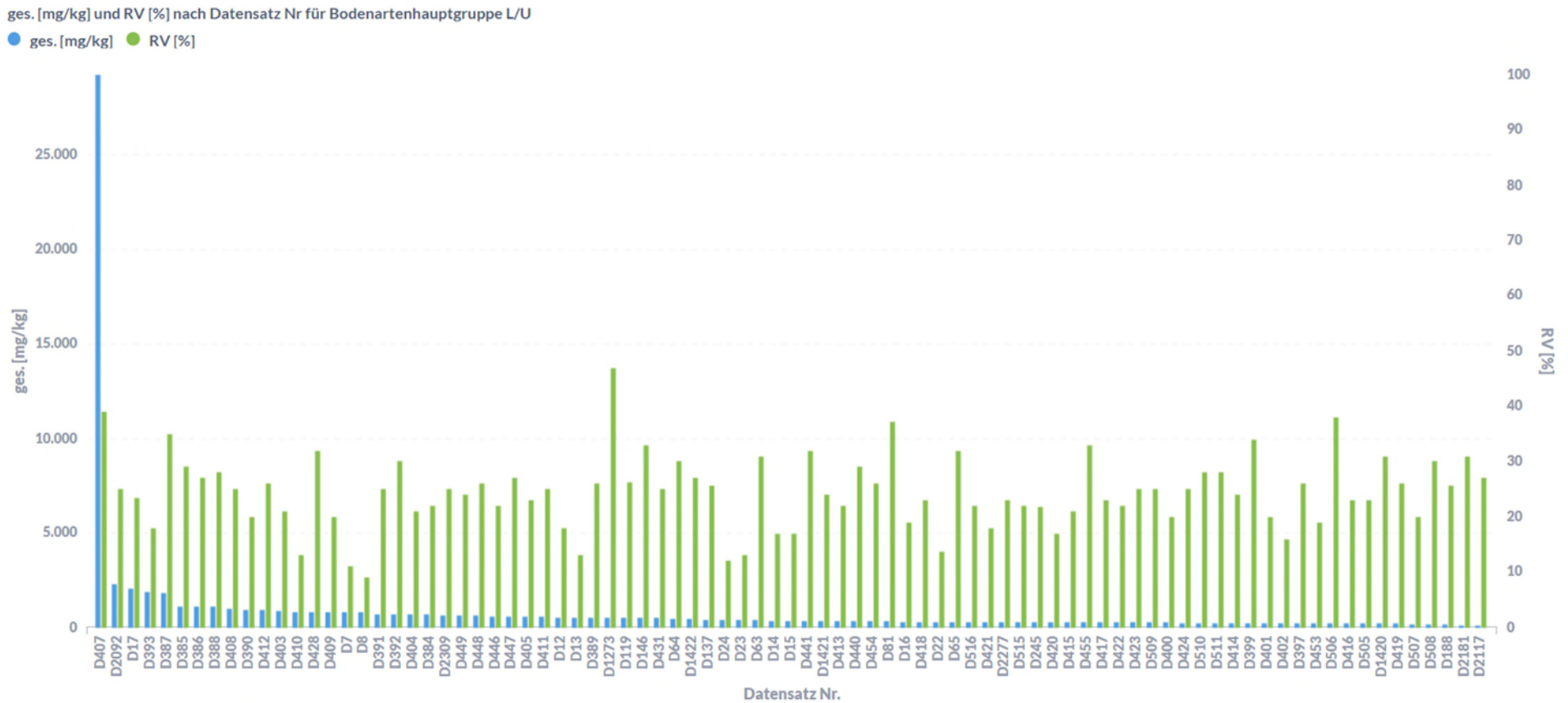
Abbildung 40: Blei – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit von Blei im Sand zeigt mit absteigender Bleikonzentration keine auffälligen Trends. Im höheren Konzentrationsbereich ist die Resorptionsverfügbarkeit etwas niedriger.

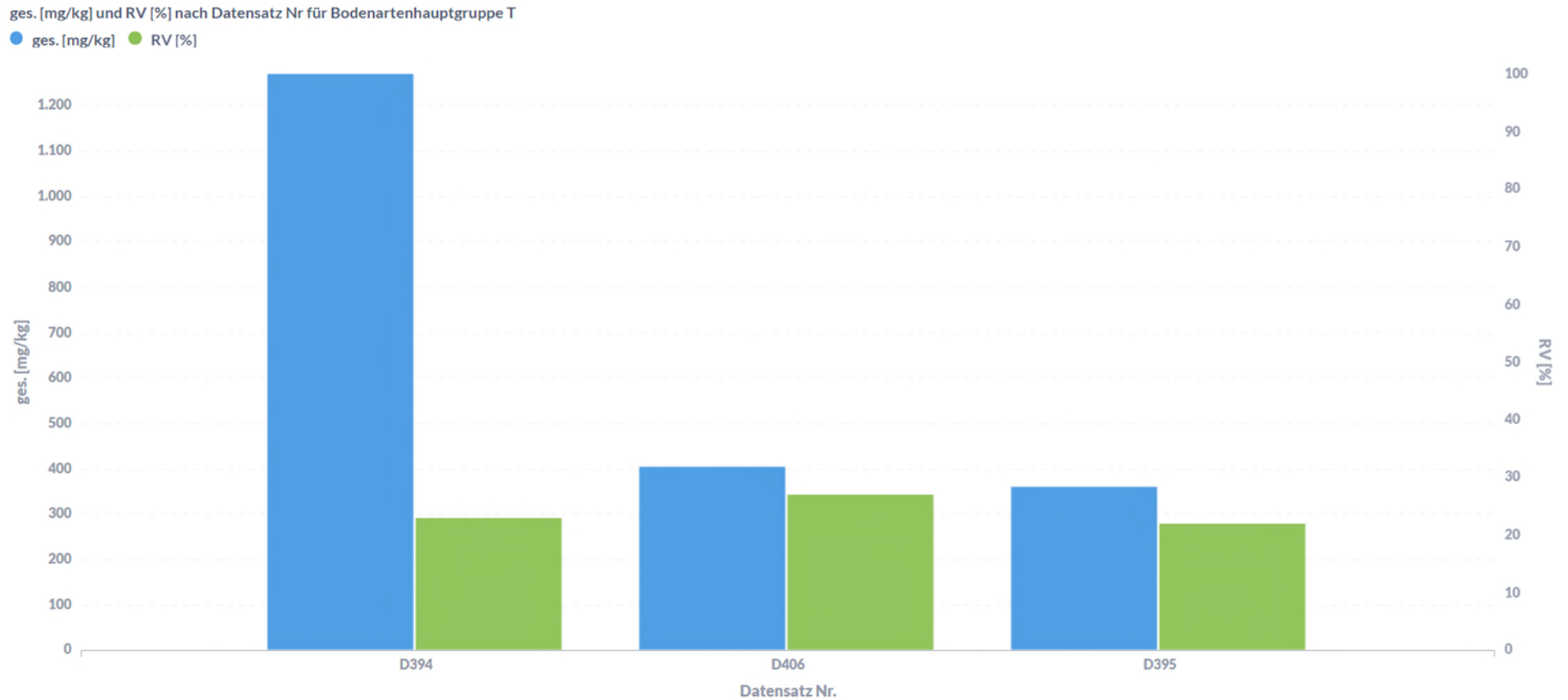
Abbildung 41: Blei – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Auch bei Lehm und Schluff zeigt die Resorptionsverfügbarkeit keine Konzentrationsabhängigkeit.

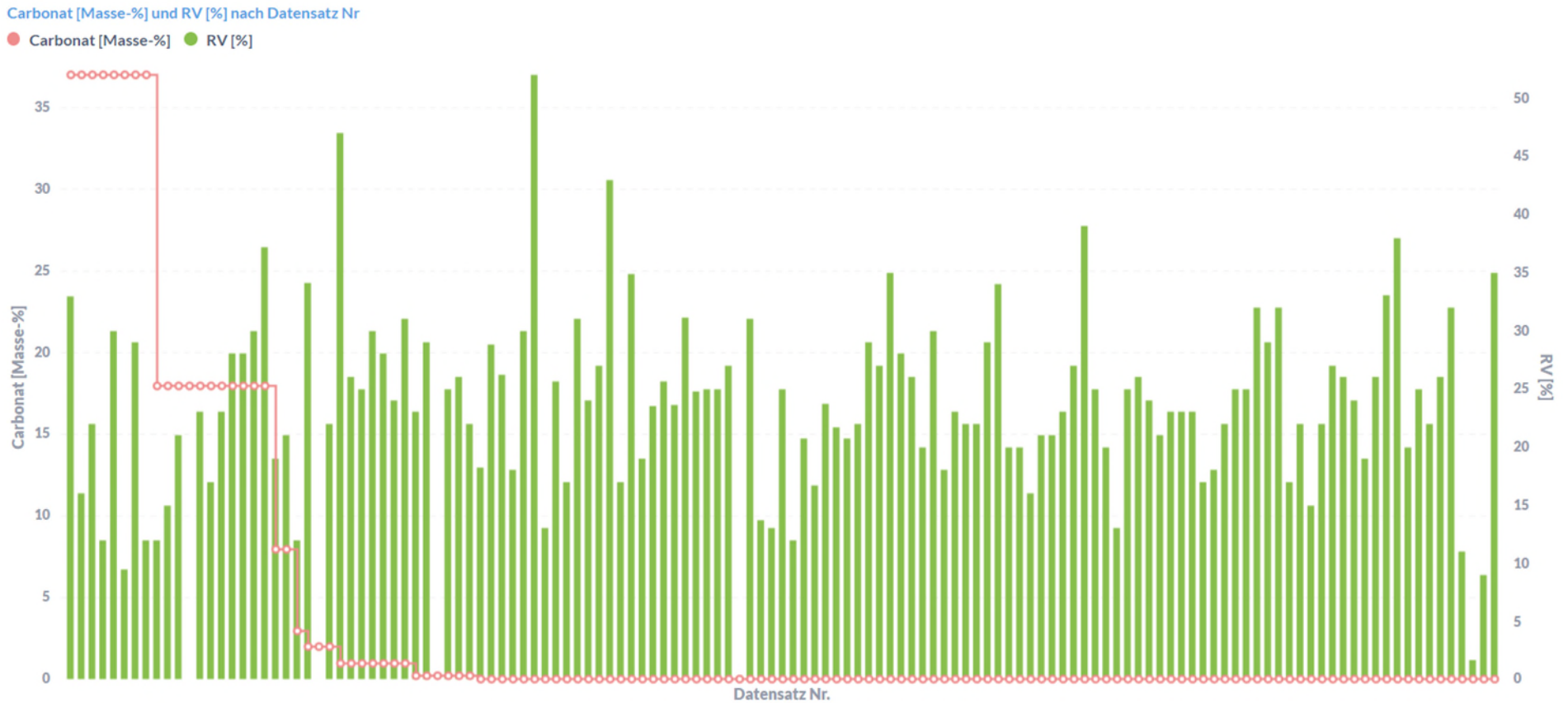
Abbildung 42: Blei – Bodenartenhauptgruppe T, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Für Ton liegen nur drei Untersuchungen vor. Auch hier schwankt die Resorptionsverfügbarkeit feststoffkonzentrationsunabhängig.

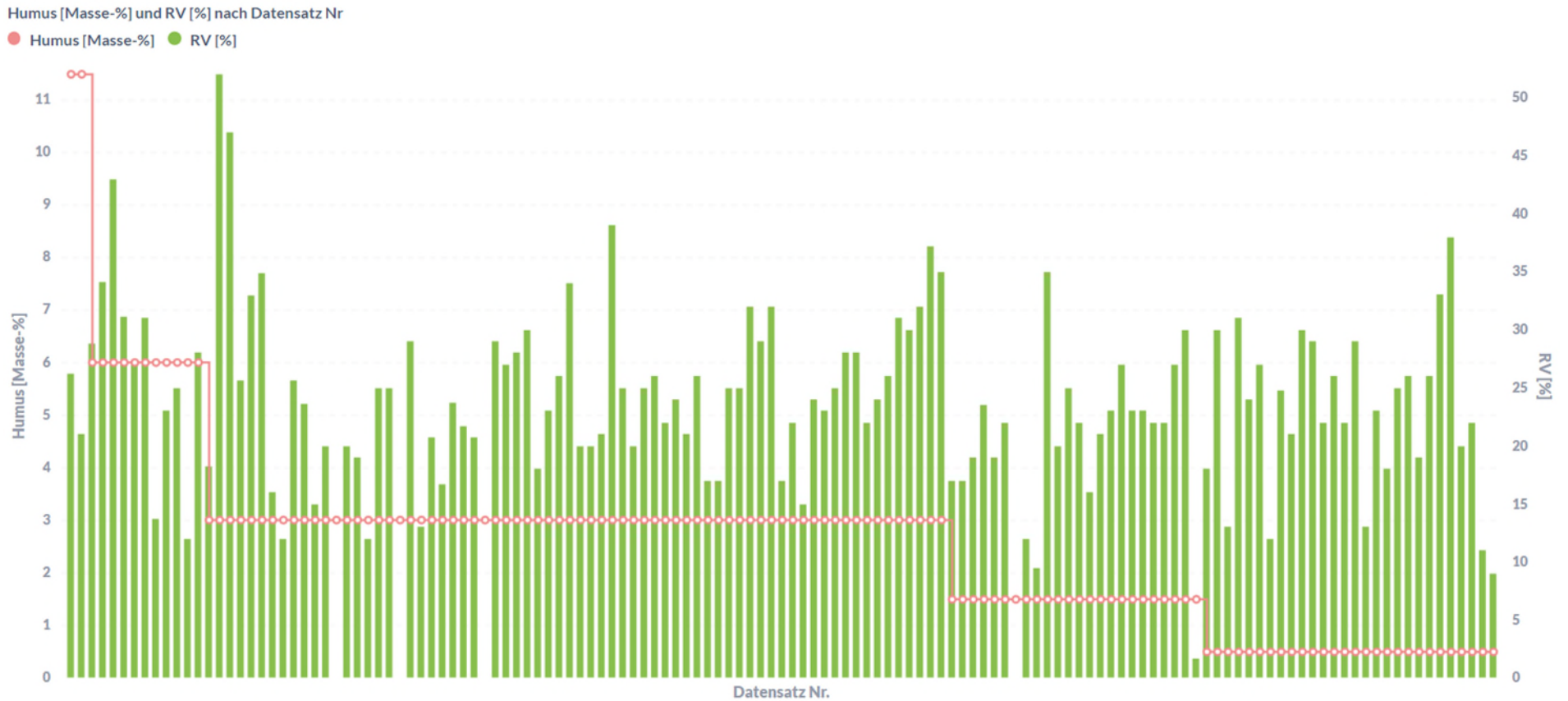
Abbildung 43: Blei – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Carbonatgehalt hat ebenfalls keinen Einfluss auf die Resorptionsverfügbarkeit von Blei. Die Resorptionsverfügbarkeit schwankt allerdings wie bei den anderen Auswertungen.

Abbildung 44: Blei – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



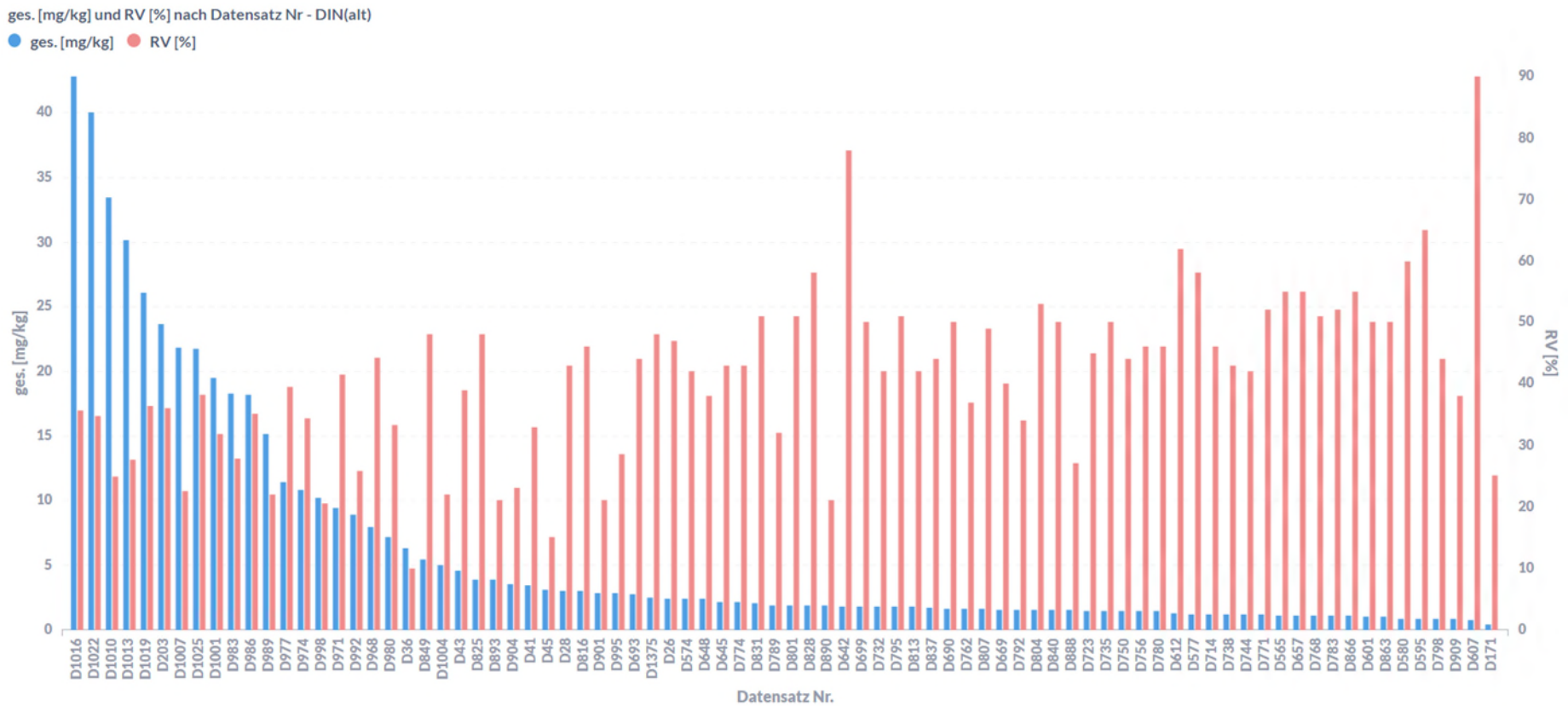
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Humusgehalt hat gemäß dieser Auswertung auch keinen Einfluss auf die schwankende Resorptionsverfügbarkeit von Blei.

7.4.4 Cadmium

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse für Cadmium decken ebenfalls die Prüfwerte Boden-Mensch der BBodSchV ab.

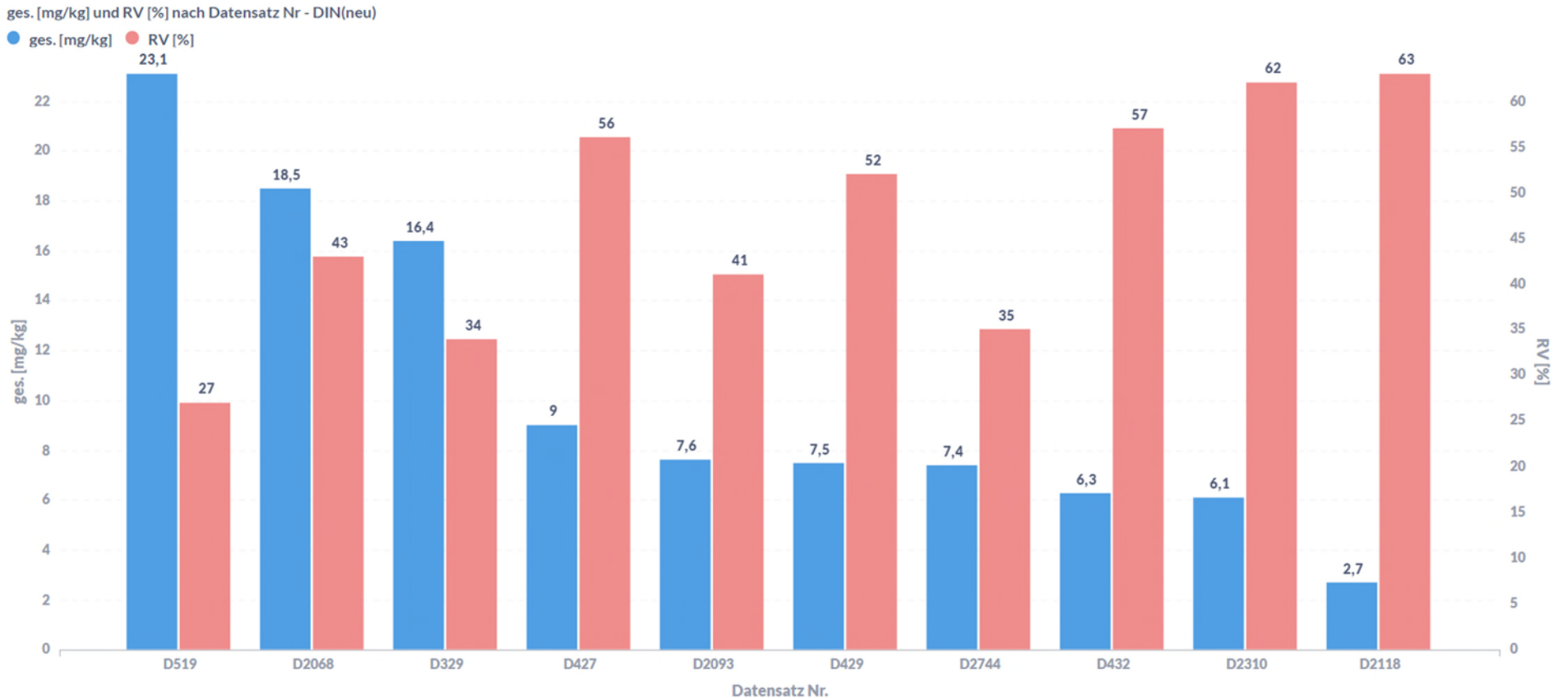
Abbildung 45: Cadmium – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Cadmium ist bei den Daten zur Resorptionsverfügbarkeit mit absteigendem Feststoffgehalt ein leichter, aber aufgrund der starken Schwankungen, unbedeutender, Aufwärtstrend erkennbar.

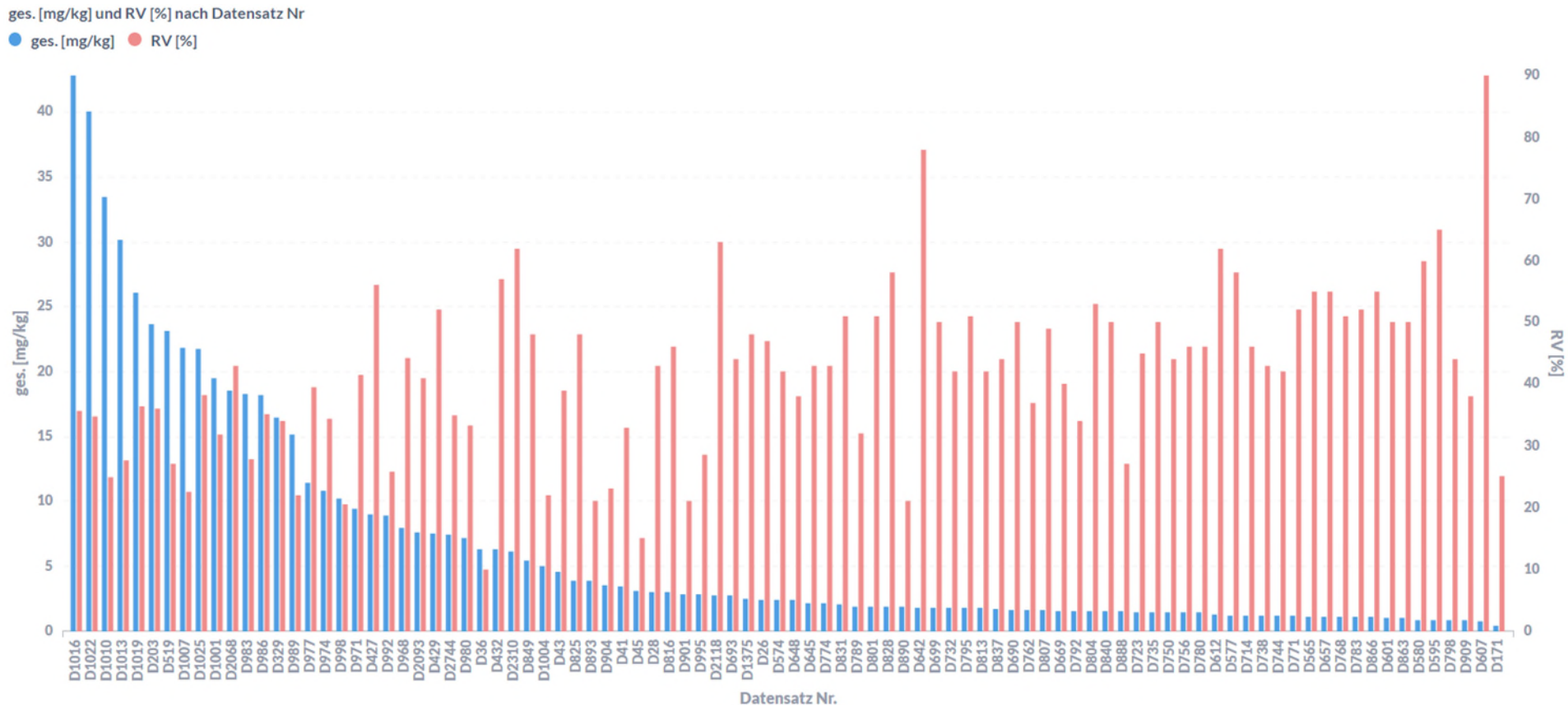
Abbildung 46: Cadmium – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Nach der neuen Norm ist dieser leichte Aufwärtstrend der Resorptionsverfügbarkeit mit geringer werdendem Feststoffgehalt ebenfalls identifizierbar.

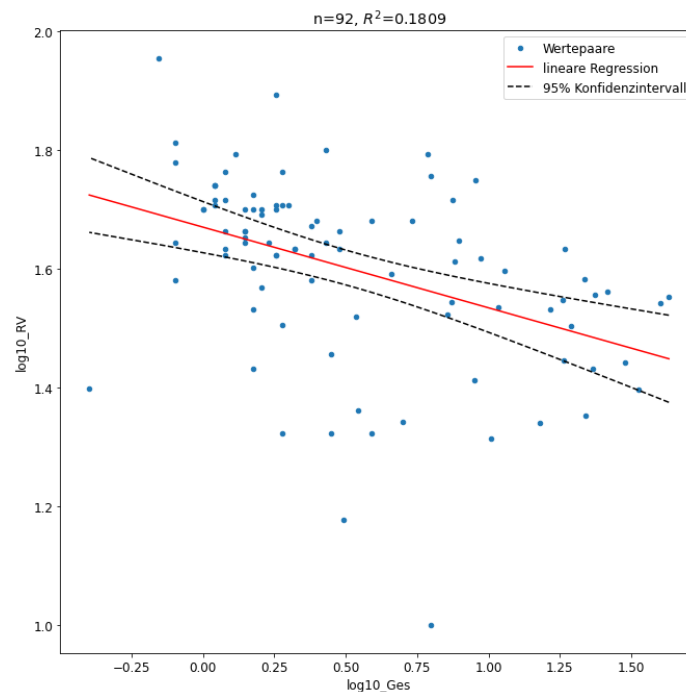
Abbildung 47: Cadmium – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der Zusammenführung aller Daten zur Resorptionsverfügbarkeit von Cadmium ist der Trend ebenfalls zu erkennen. Es liegen zahlreiche Ausreißer vor.

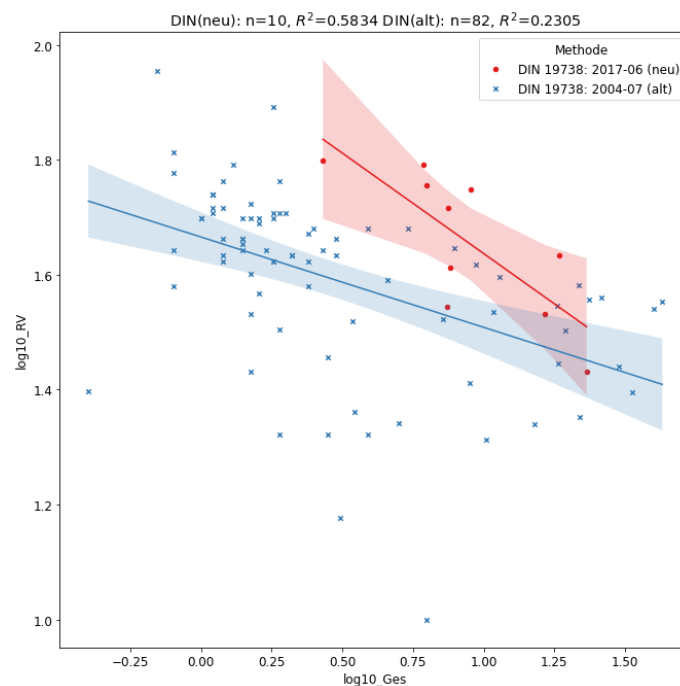
Abbildung 48: Cadmium – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Auswertung mit der linearen Regression bestätigt den Trend des Anstiegs der Resorptionsverfügbarkeit mit abnehmendem Feststoffgehalt.

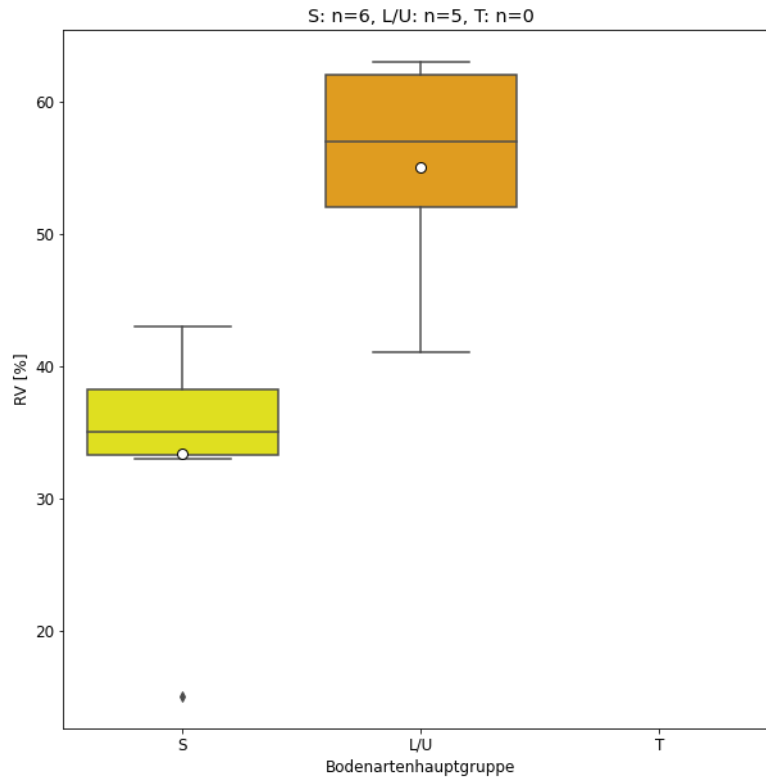
Abbildung 49: Cadmium – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Cadmium zeigt die Auswertung mittels linearer Regression ähnliche Trends. Nach der aktuellen Norm ist der Anstieg steiler, basiert aber auf weniger Daten.

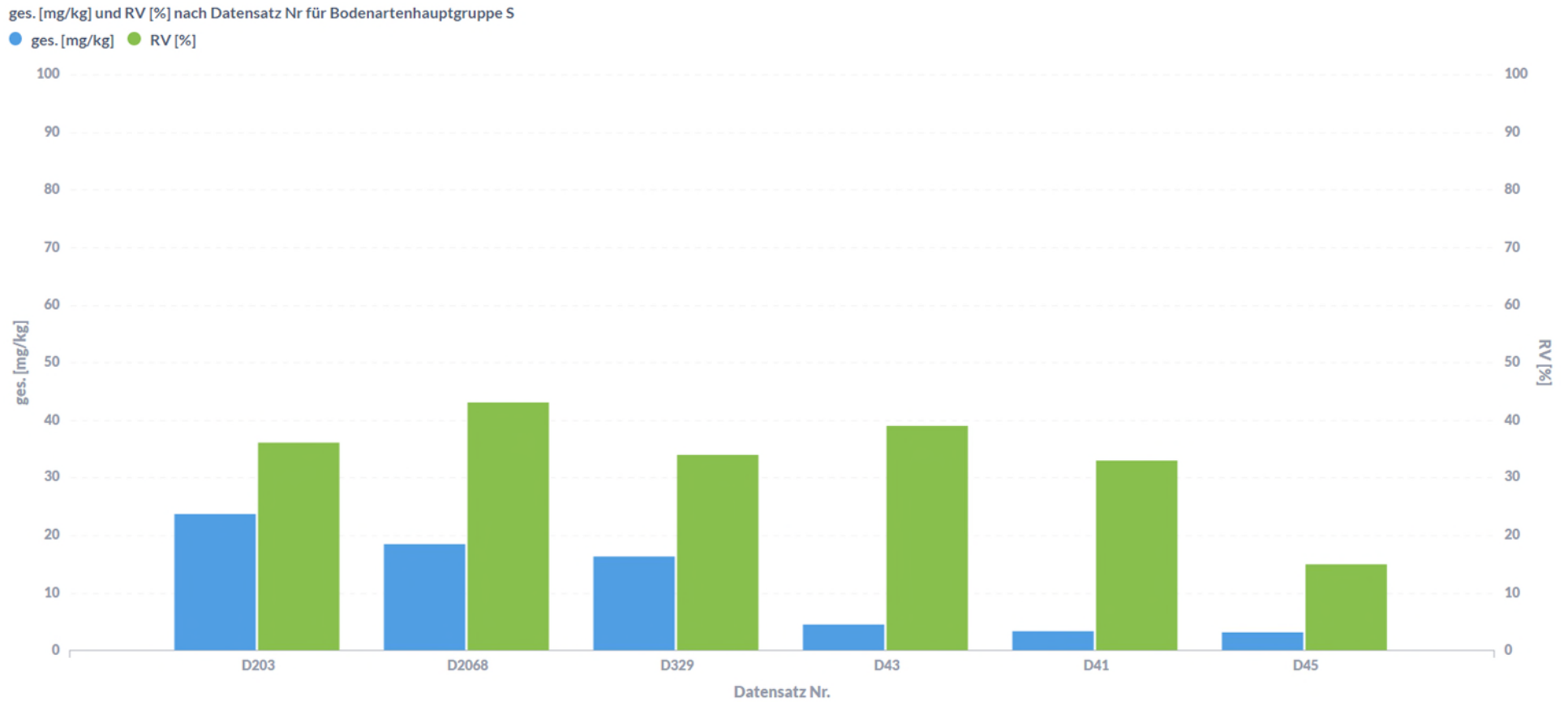
Abbildung 50: Cadmium – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Im Boxplott wird der Abstieg der Resorptionsverfügbarkeit mit abnehmender Korngröße bestätigt.

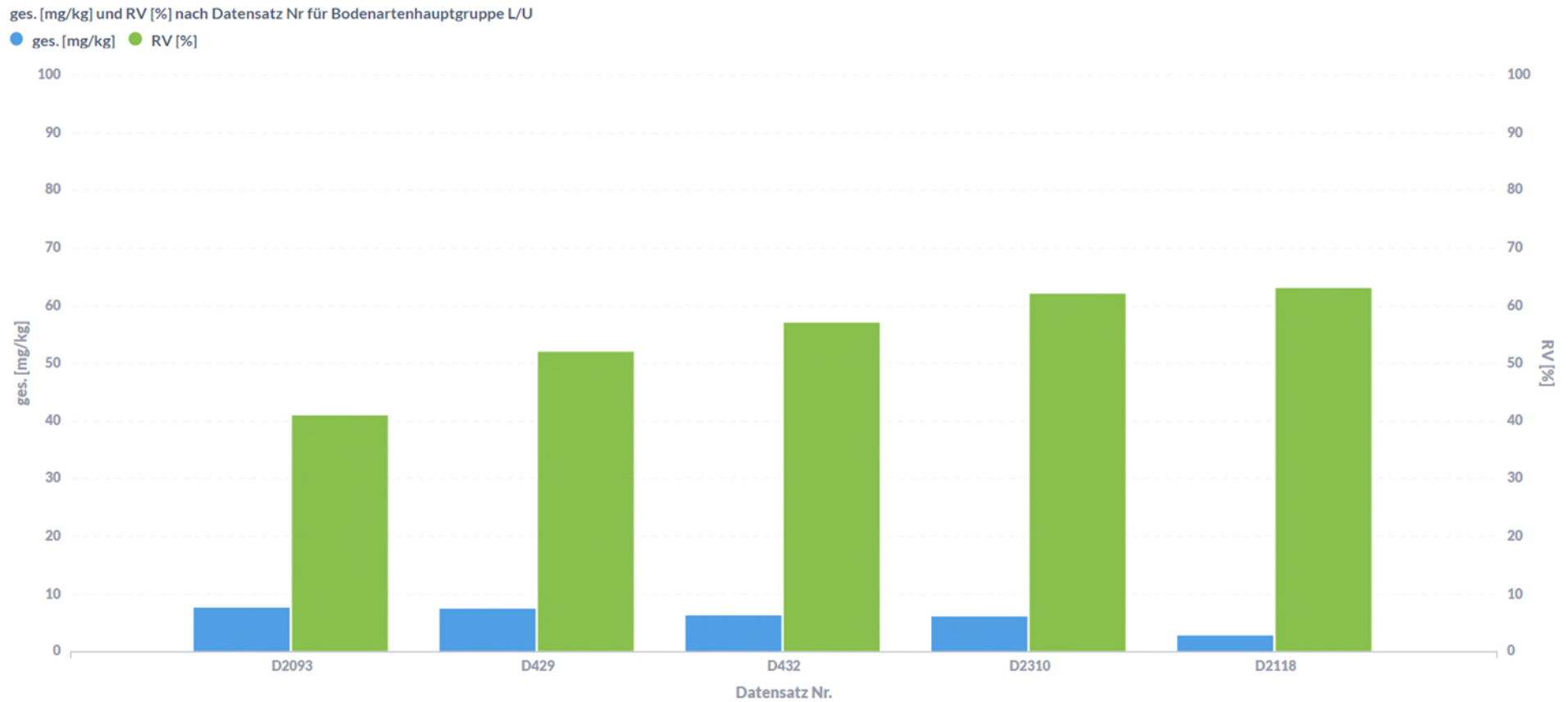
Abbildung 51: Cadmium – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Sand ist mit abfallendem Feststoffgehalt kein Trend bei der Resorptionsverfügbarkeit erkennbar.

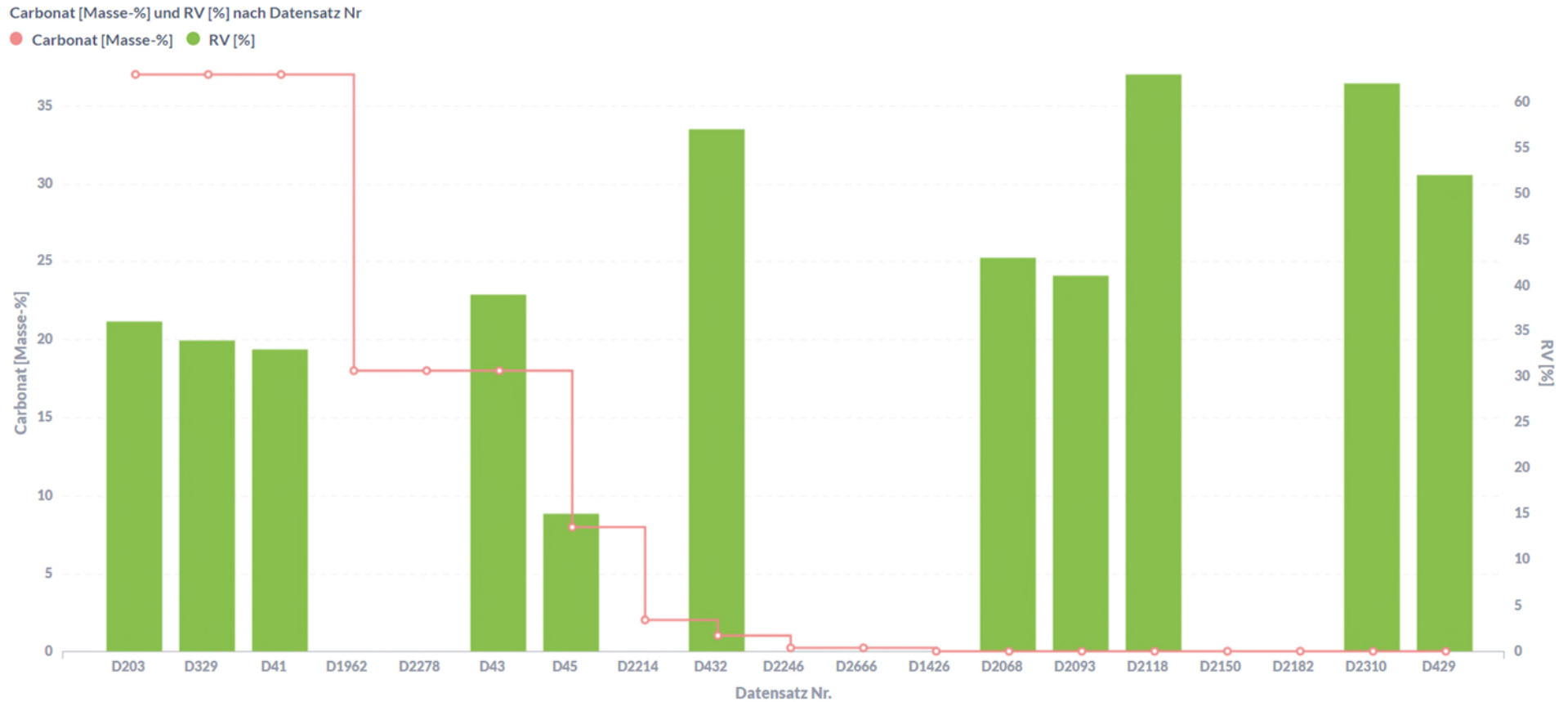
Abbildung 52: Cadmium – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei den Bodenartenhauptgruppen Lehm und Schluff ist der Aufwärtstrend der Resorptionsverfügbarkeit mit absteigendem Feststoffgehalt erkennbar.

Abbildung 53: Cadmium – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Trotz mehrerer analytischer Fehlbefunde wirkt sich ein hoher Carbonatgehalt auf die Resorptionsverfügbarkeit von Cadmium vermindern aus. Die Resorptionsverfügbarkeit steigt demnach mit dem sinkenden Carbonatgehalt.

Abbildung 54: Cadmium – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



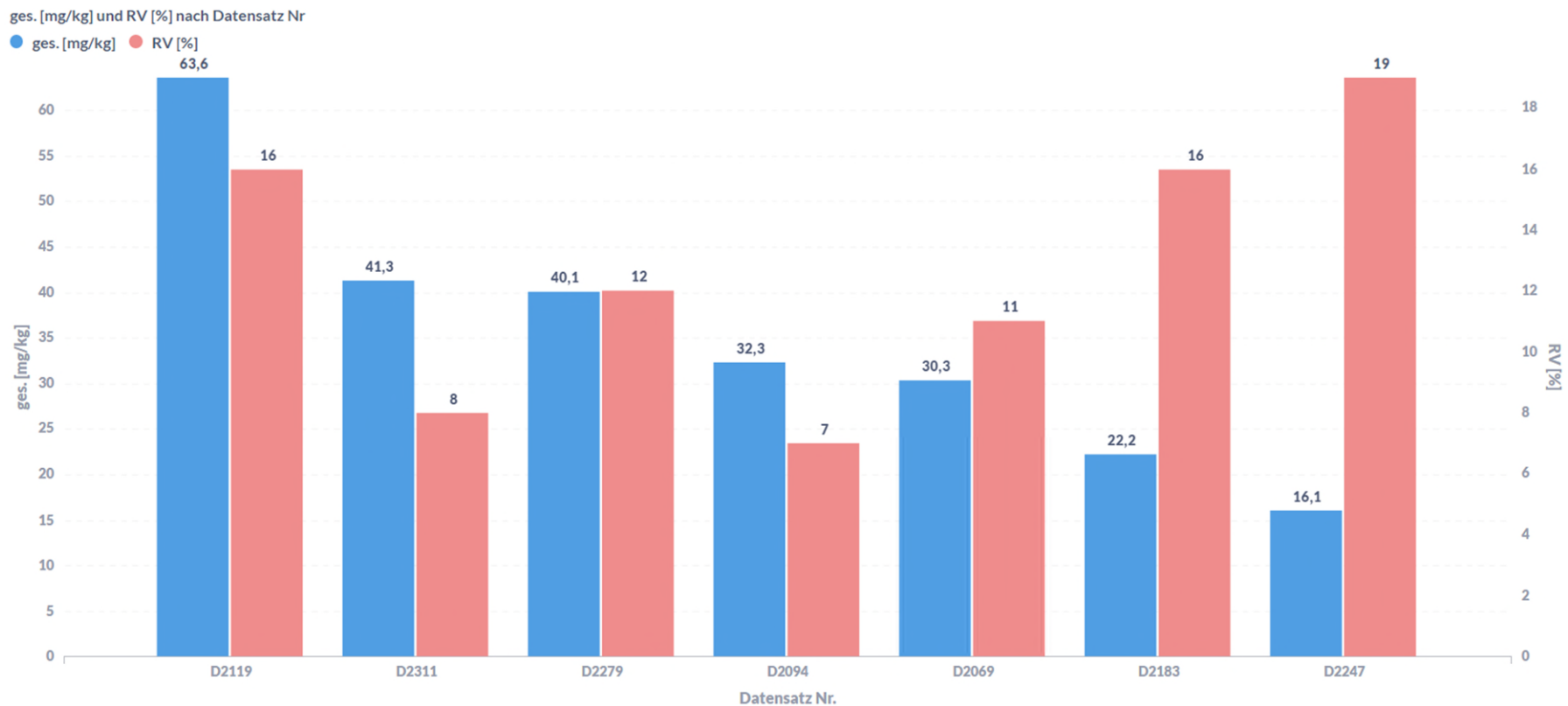
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der Betrachtung der Einzelwerte der Resorptionsverfügbarkeit mit Absteigendem Humusgehalt ist aufgrund der Schwankungen kein eindeutiger Trend erkennbar. Trotzdem kann man Indizien des Anstiegs der Resorptionsverfügbarkeit mit fallendem Humusgehalt annehmen.

7.4.5 Chrom

Bezüglich der Prüfwerte der BBodSchV für den Wirkungspfad Boden-Mensch sind die Feststoffgehalte der vorliegenden Untersuchungsergebnisse bei Chrom der Höhe nach nicht relevant. Deshalb sind Trendaussagen nur unter Vorbehalt möglich.

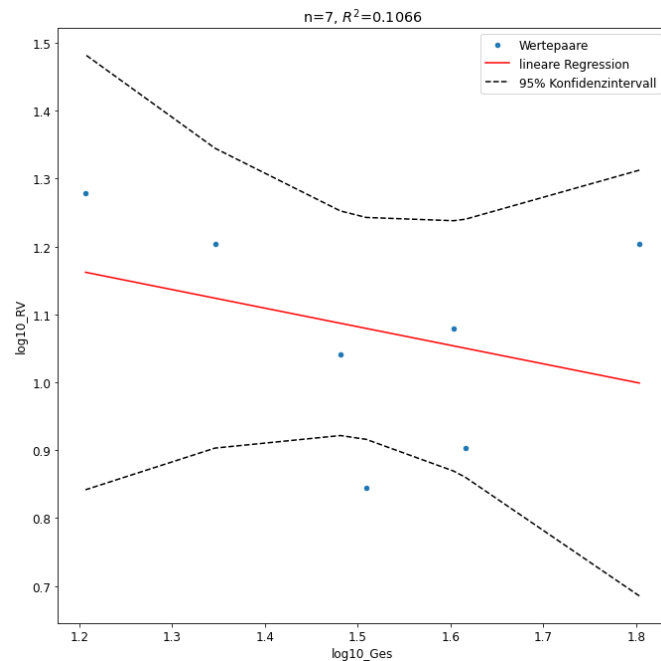
Abbildung 55: Chrom – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit schwankt um die 13 %. Es kann kein eindeutiger Trend erkannt werden. Die Anwendung der linearen Regressionsanalyse ist aufgrund zu weniger Daten nicht sinnvoll.

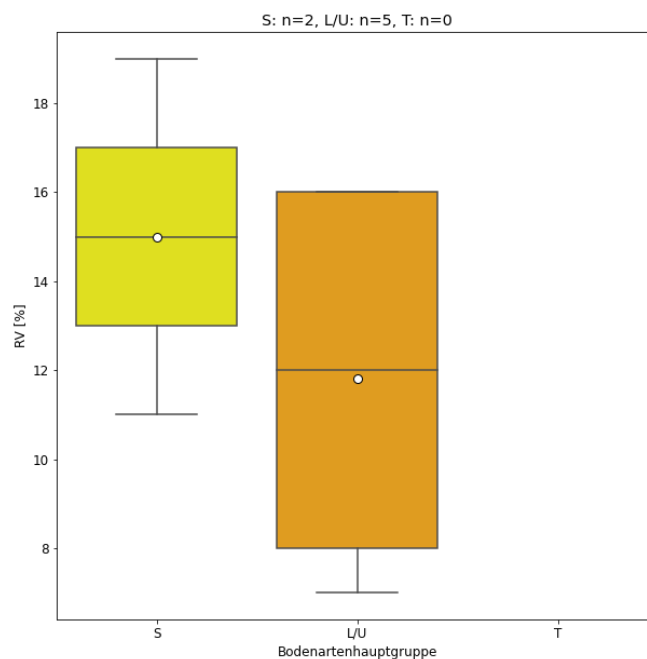
Abbildung 56: Chrom – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Mit absteigenden Feststoffgehalt steigt die Resorptionsverfügbarkeit nach dieser linearen Regressionsrechnung, die allerdings nur eine geringe Repräsentanz hat.

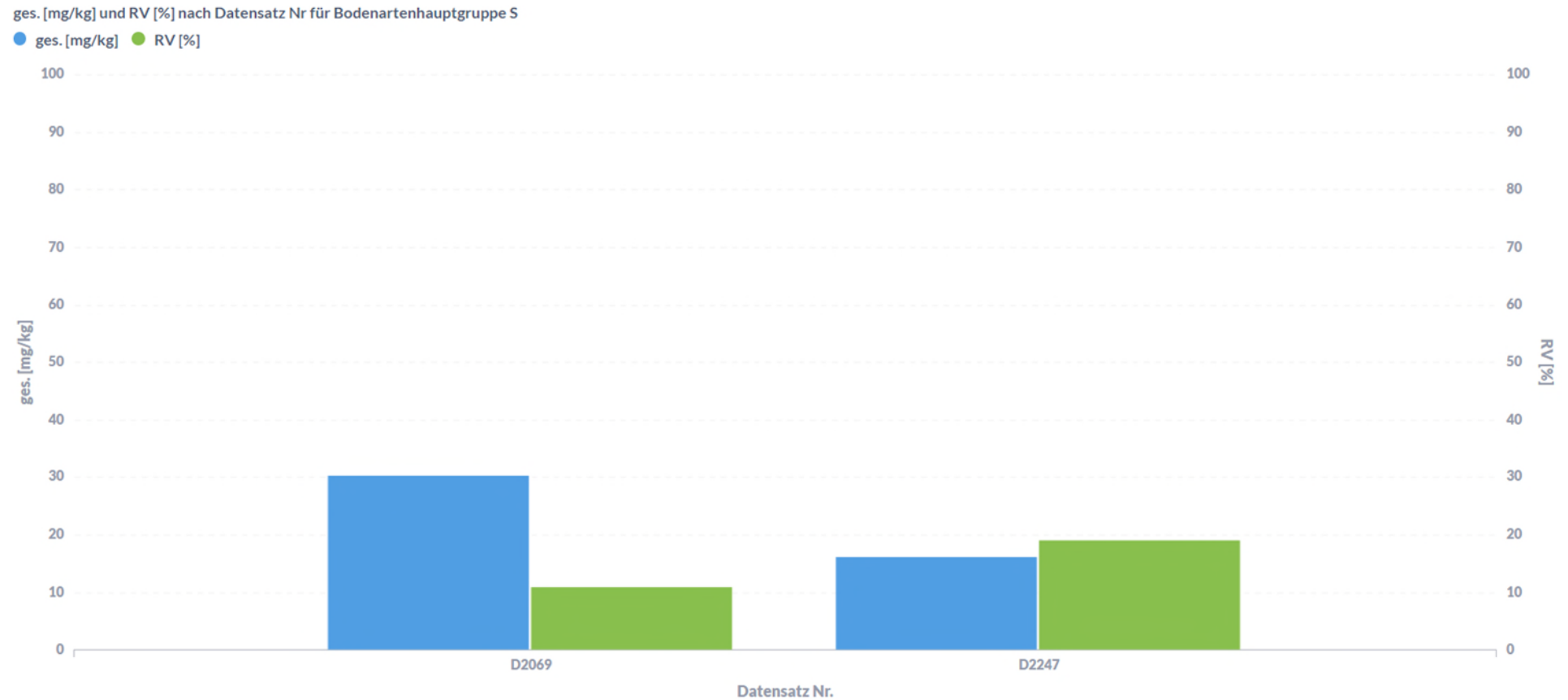
Abbildung 57: Chrom – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Chrom nimmt die Resorptionsverfügbarkeit, wie dieser Boxplot zeigt, mit abnehmender Korngröße ab.

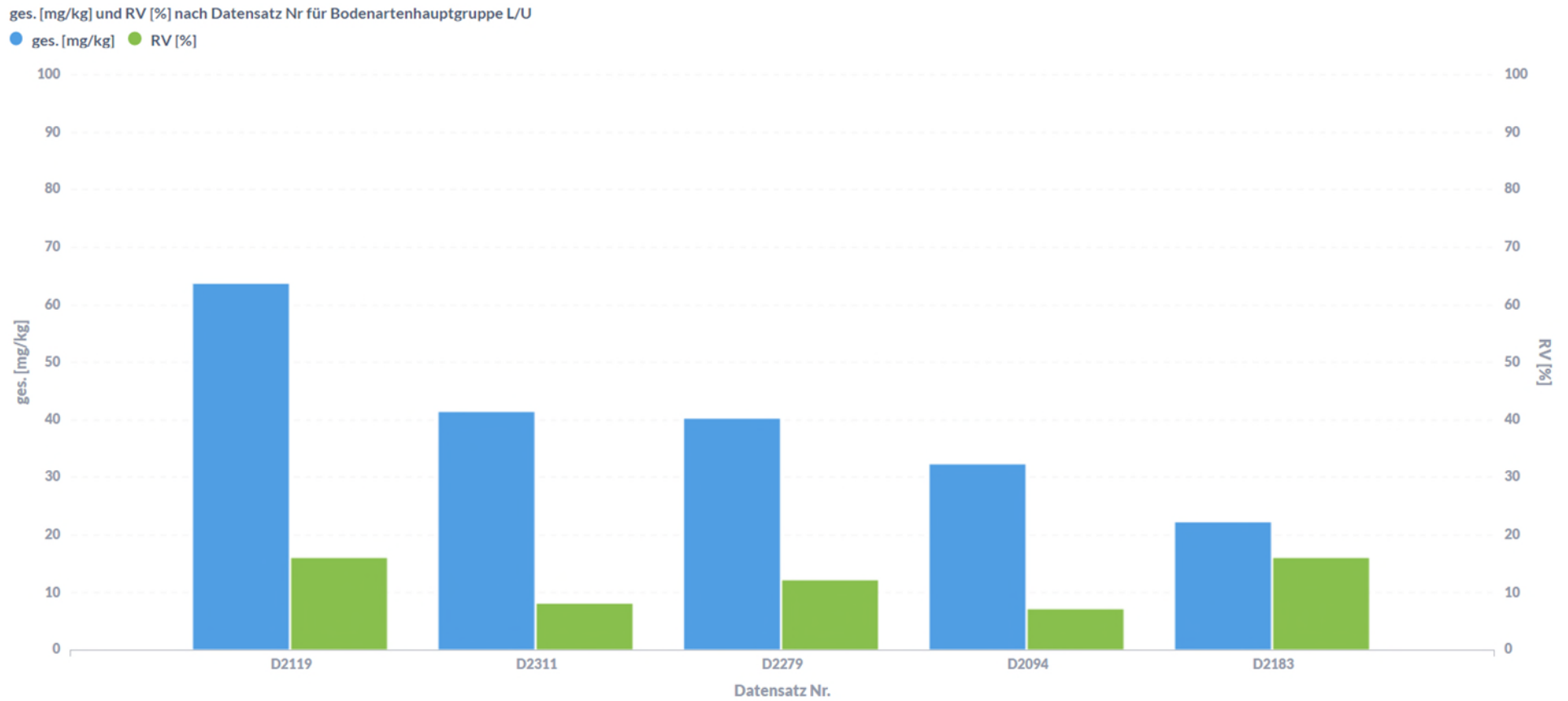
Abbildung 58: Chrom – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei nur zwei Ergebnissen sind Trendaussagen nicht möglich.

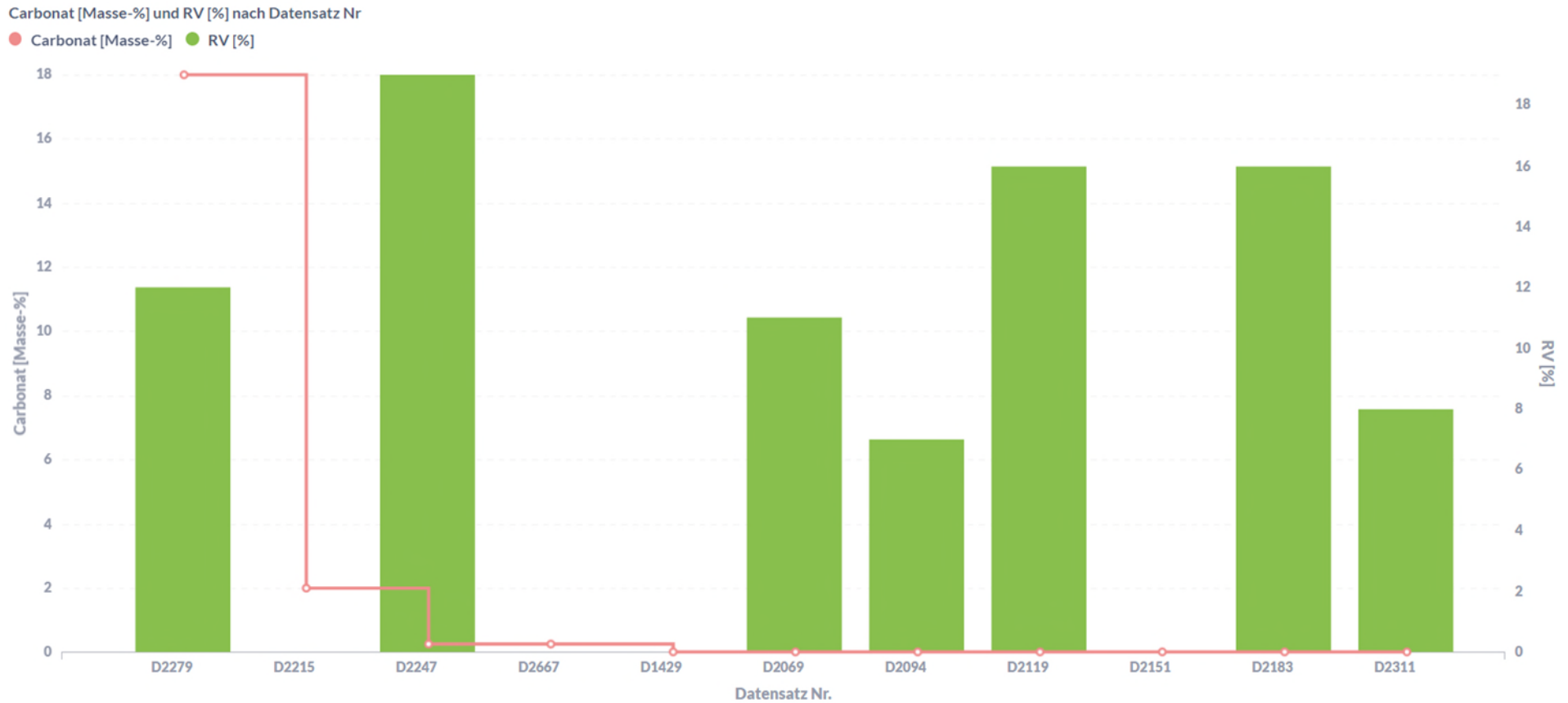
Abbildung 59: Chrom – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei den Bodenartenhauptgruppen Lehm und Schluff ist kein konzentrationsabhängiger Trend der Resorptionsverfügbarkeit erkennbar.

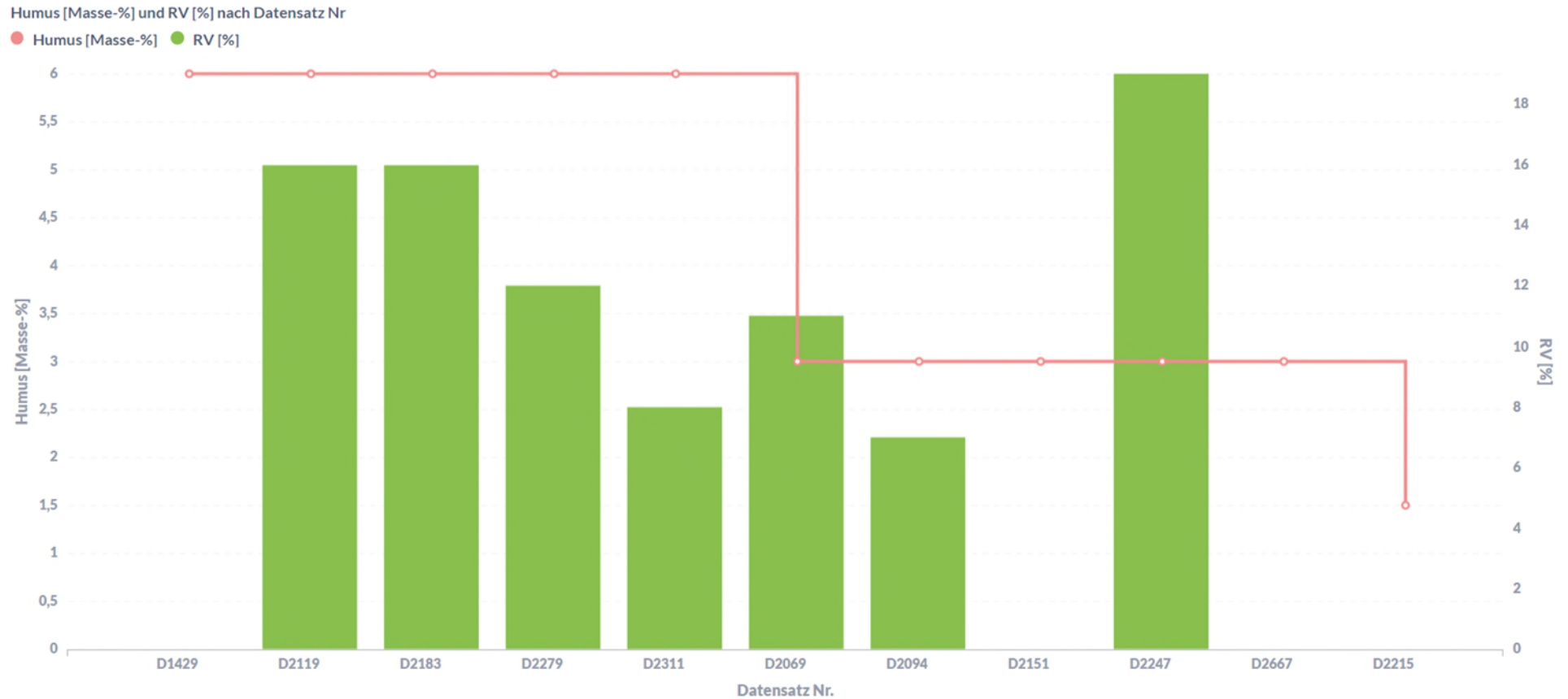
Abbildung 60: Chrom – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Carbonatgehalt hat auf die Resorptionsverfügbarkeit von Chrom scheinbar keinen Einfluss.

Abbildung 61: Chrom – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



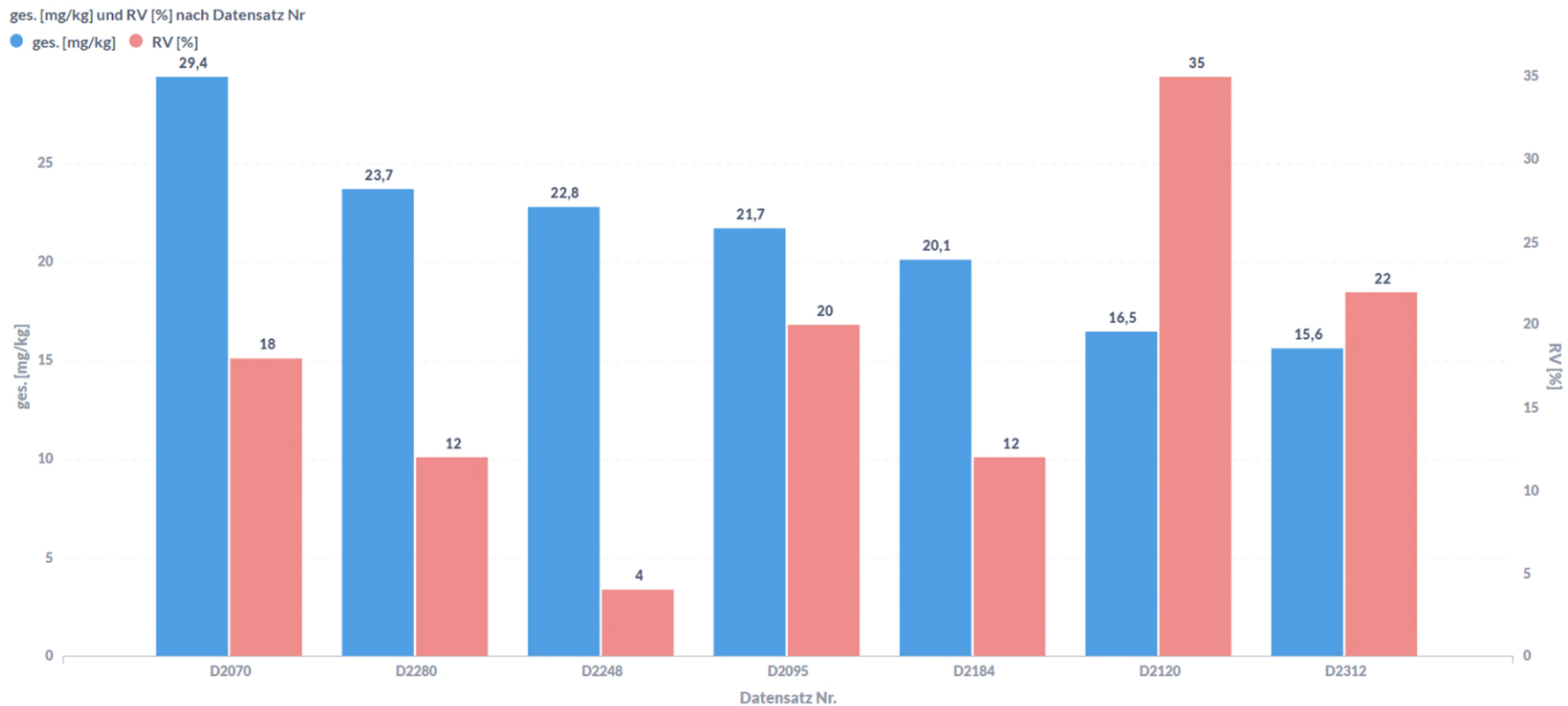
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Auch der Humusgehalt im Boden hat auf die Resorptionsverfügbarkeit von Chrom, so wie die verfügbaren Daten erkennen lassen, keinen Einfluss.

7.4.6 Cobalt

Die zur Verfügung stehenden Cobaltgehalte im Feststoff unterschreiten den Prüfwert für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV zehnfach. Daher sind die Untersuchungsergebnisse der Resorptionsverfügbarkeit ausschließlich als erste Anhaltspunkte zu betrachten.

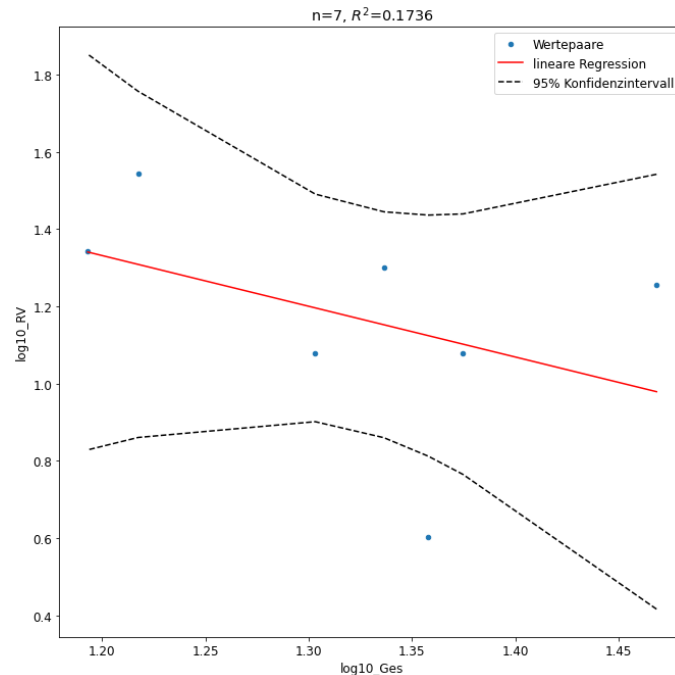
Abbildung 62: Cobalt – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit von Cobalt schwankt ungleichmäßig unabhängig vom Feststoffgehalt. Auch hier ist aufgrund zu weniger Daten eine lineare Regressionsanalyse nicht sinnvoll.

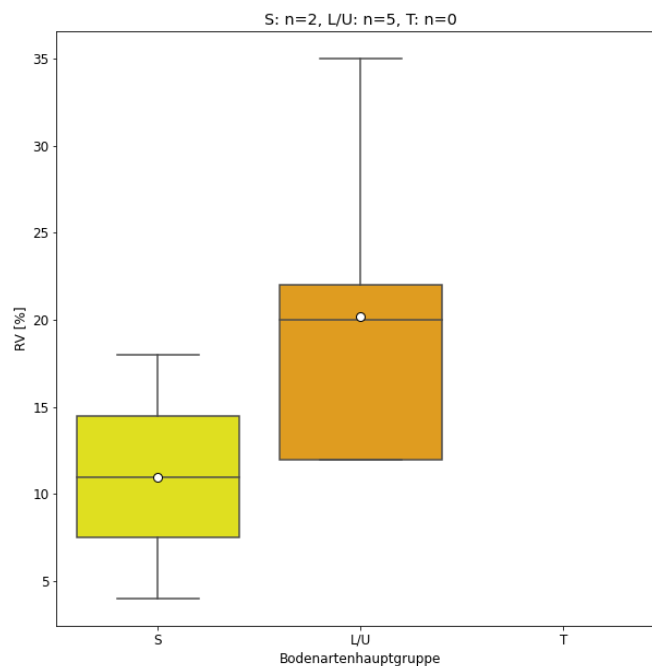
Abbildung 63: Cobalt – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die lineare Regression fällt in Richtung steigender Feststoffkonzentration. Da die Gehalte außerhalb des zu betrachtenden Bereichs liegen und zu wenig für gesicherte Aussagen sind, ist diese Feststellung nur eine erste Orientierung.

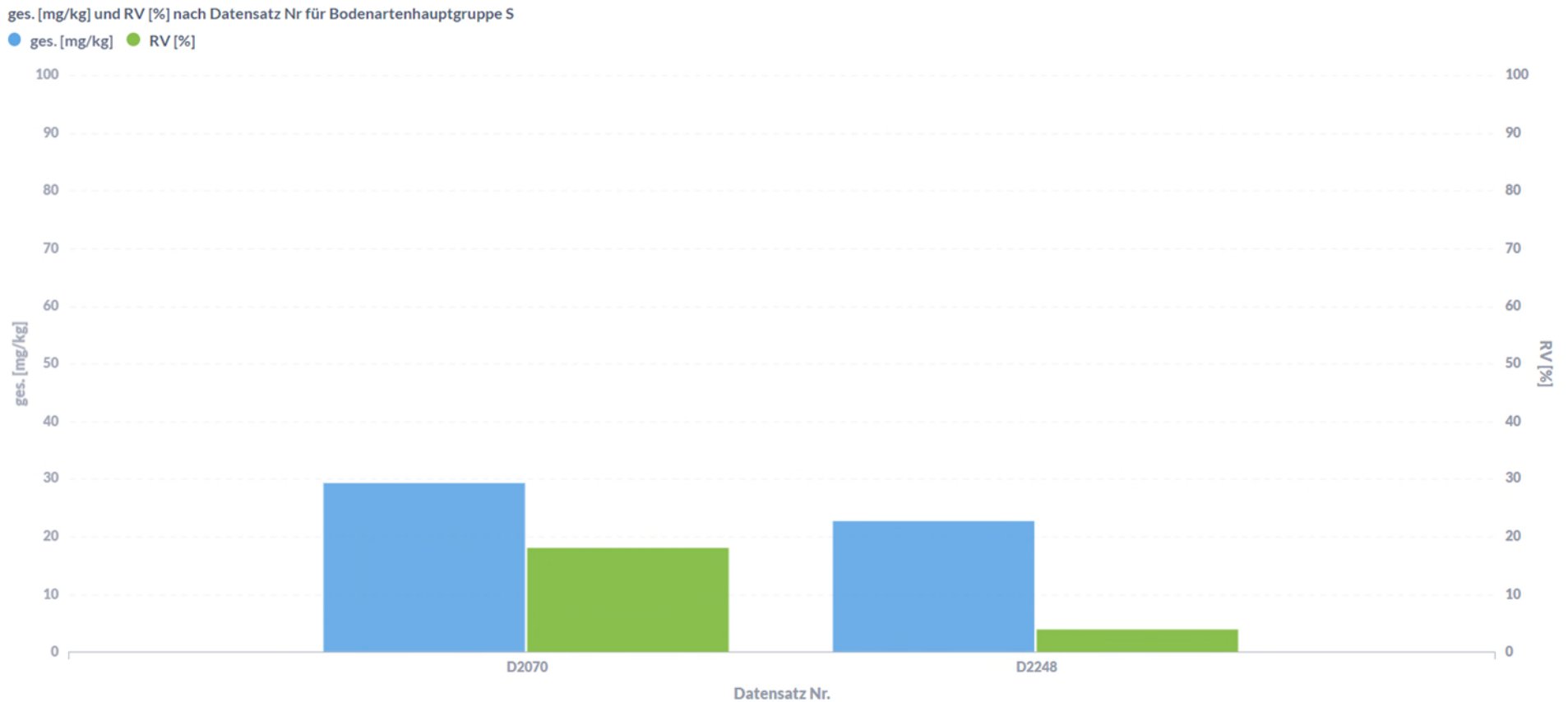
Abbildung 64: Cobalt – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Mit diesem Boxplott kann von einem Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit in Richtung Feinstkorn ausgegangen werden. Wie vorher schon erläutert reicht die Datenbasis aber nicht für eine gesicherte Aussage.

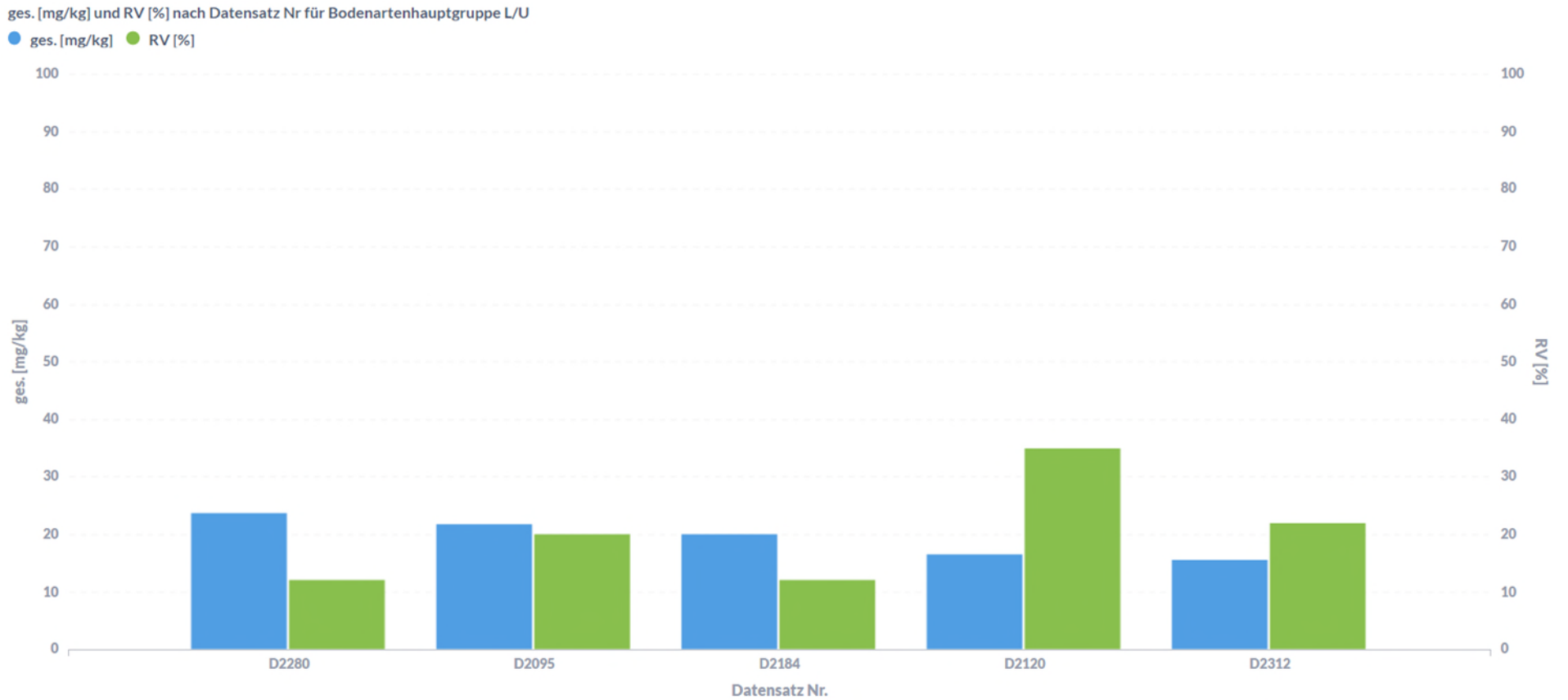
Abbildung 65: Cobalt – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Für Sand lassen sich aufgrund von nur zwei Werten keine Trendaussagen ableiten.

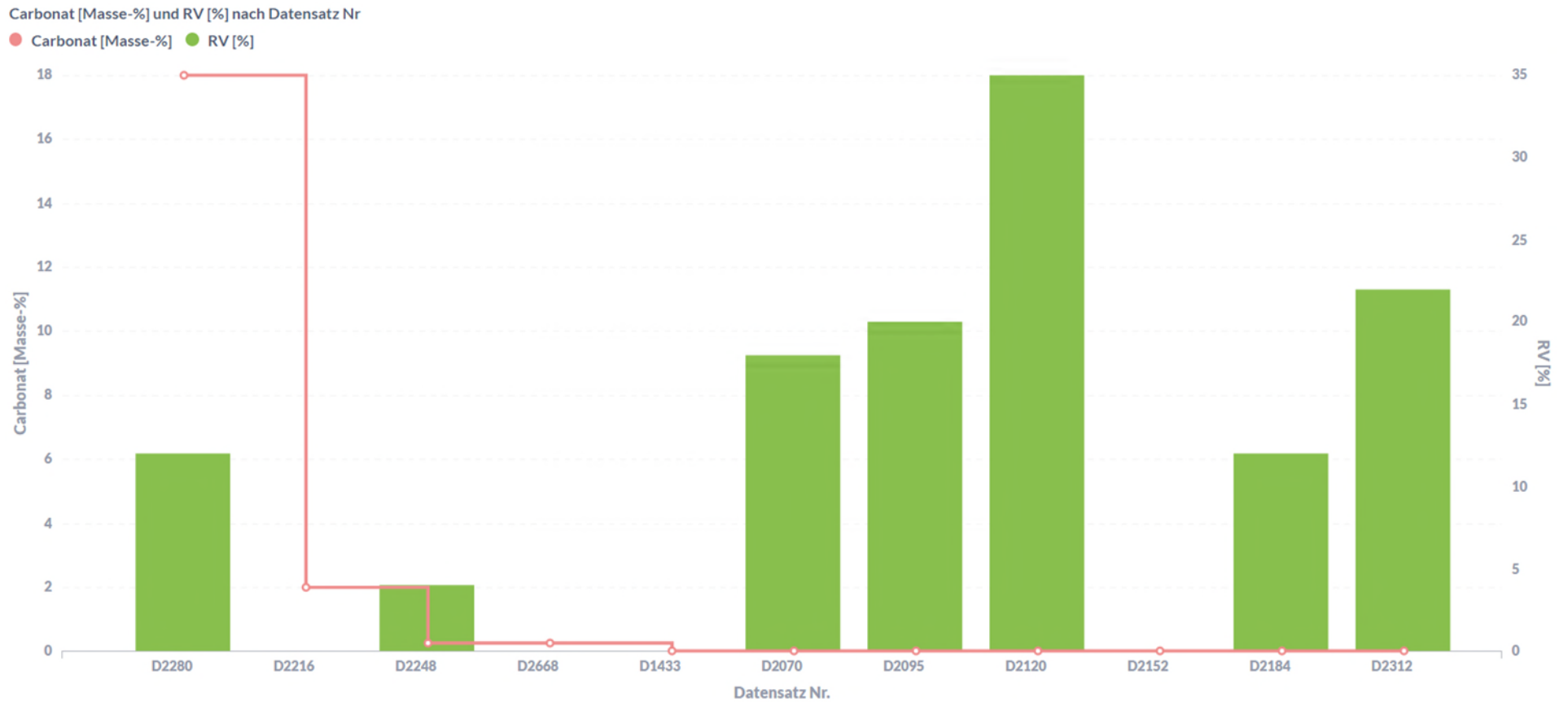
Abbildung 66: Cobalt – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Lehm und Schluff sind keine Trendaussagen möglich.

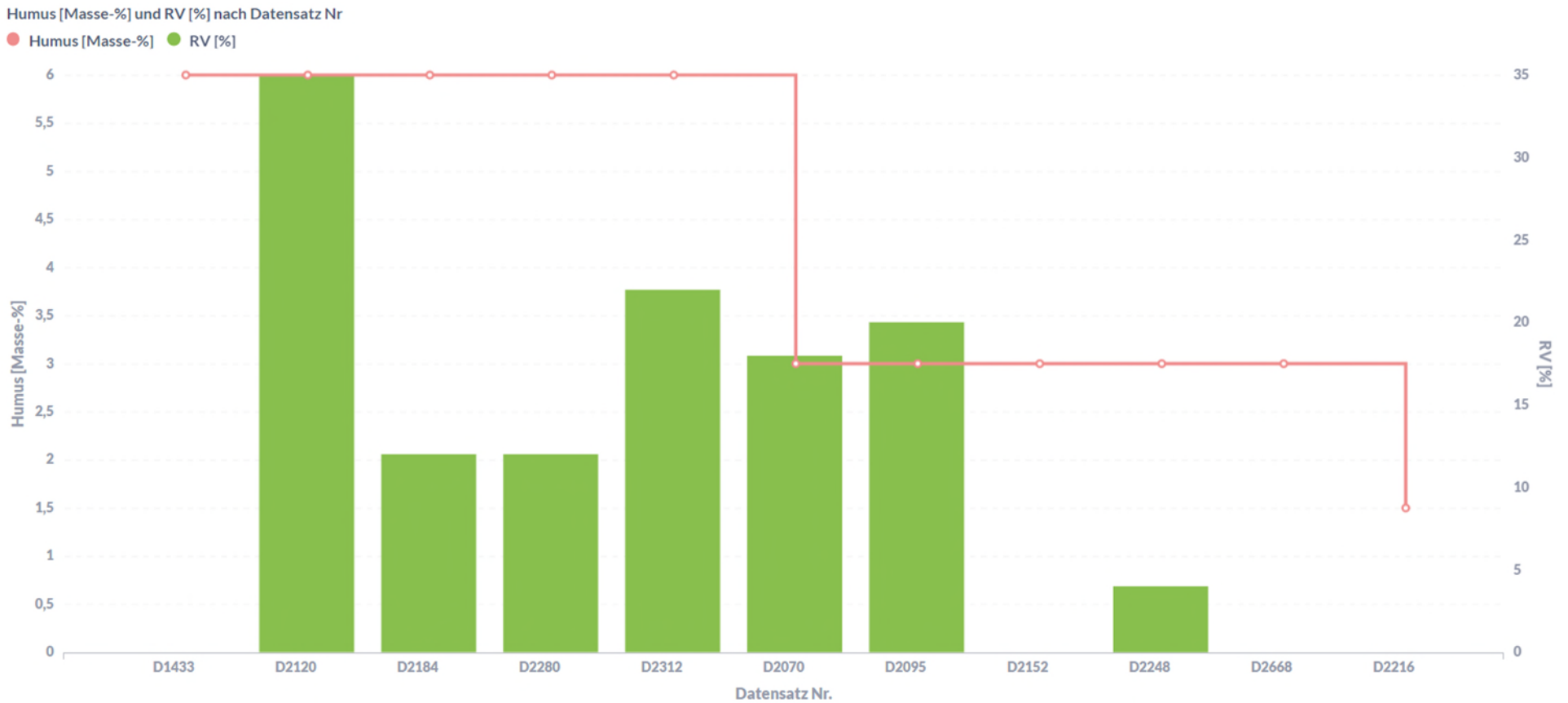
Abbildung 67: Cobalt – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Cobalt scheint durch den Carbonatgehalt bezüglich seiner Resorptionsverfügbarkeit beeinflusst zu sein. Abgesehen von den Fehlbefunden ist mit einer Abnahme der Resorptionsverfügbarkeit mit zunehmendem Carbonatgehalt und damit dem Pufferungsvermögen im Boden auszugehen.

Abbildung 68: Cobalt – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



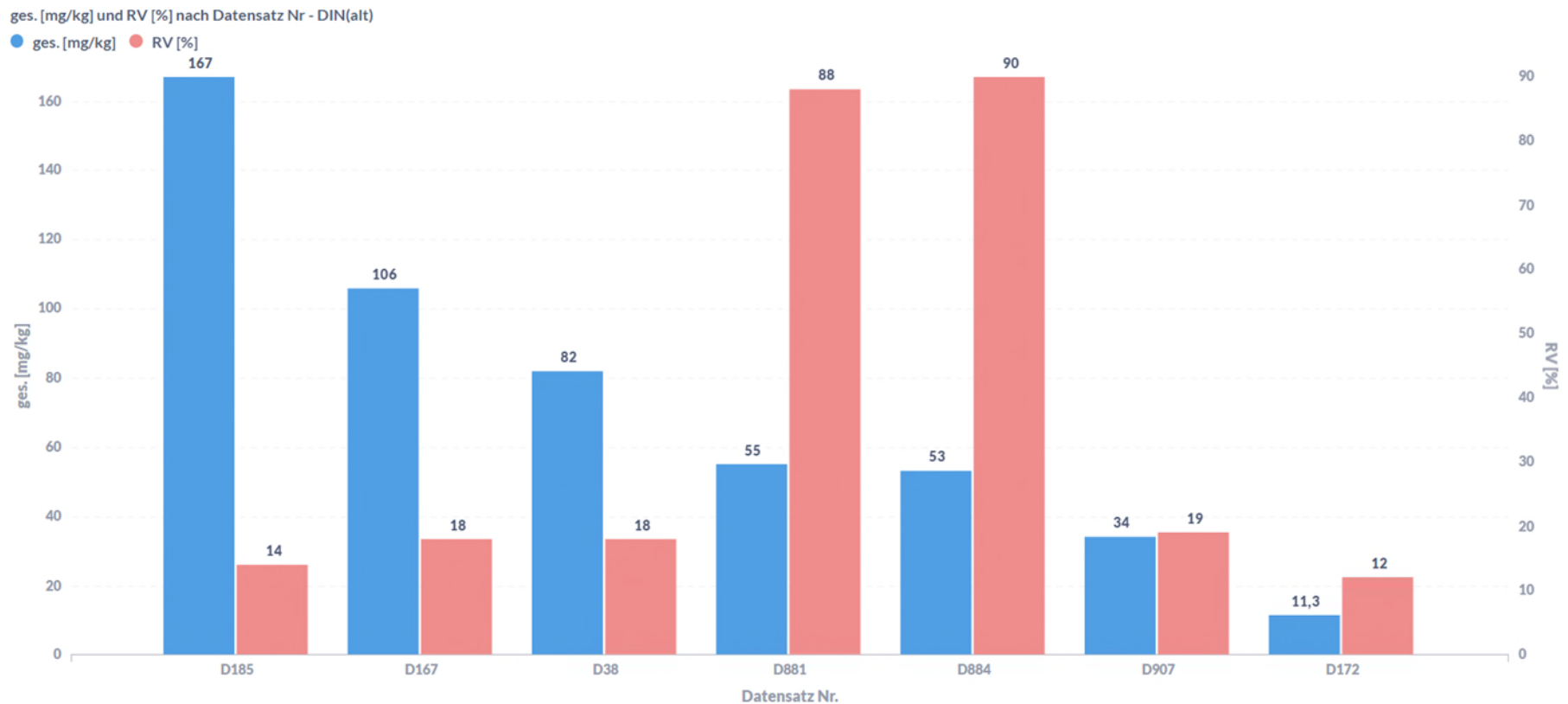
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Für den Einfluss des Humusgehaltes kann keine klare Trenderaussage gemacht werden.

7.4.7 Nickel

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse von Nickel decken die Prüfwerte Boden-Mensch der BBodSchV nur im Bereich der sensiblen Nutzung (Kinderspielplätze, Wohngebiete) ab. Diese Nutzungsszenarien entsprechen den primären Anwendungsbereichen hinsichtlich der Ermittlung der Resorptionsverfügbarkeit.

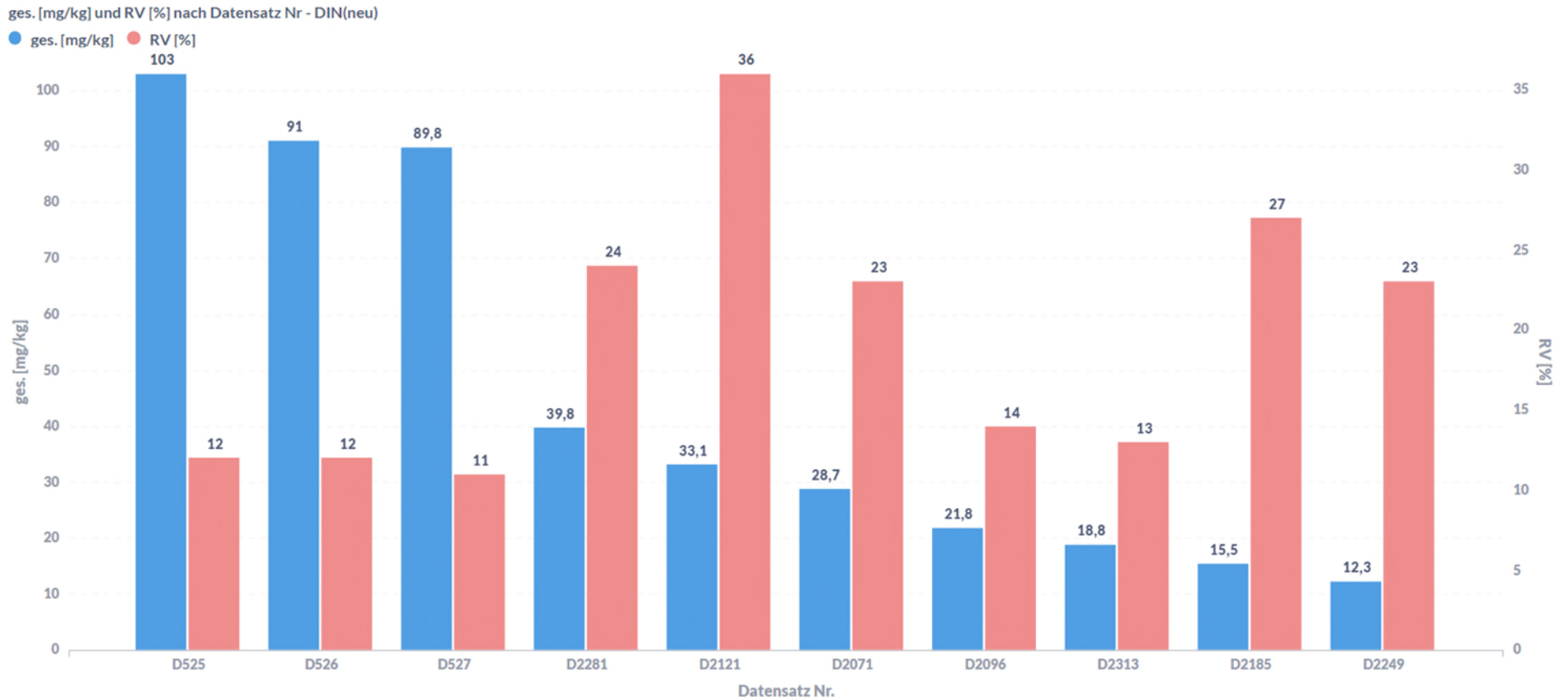
Abbildung 69: Nickel – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Nickel ist nach den Daten gemäß alter Norm kein Trend bezogen auf die Feststoffkonzentration erkennbar.

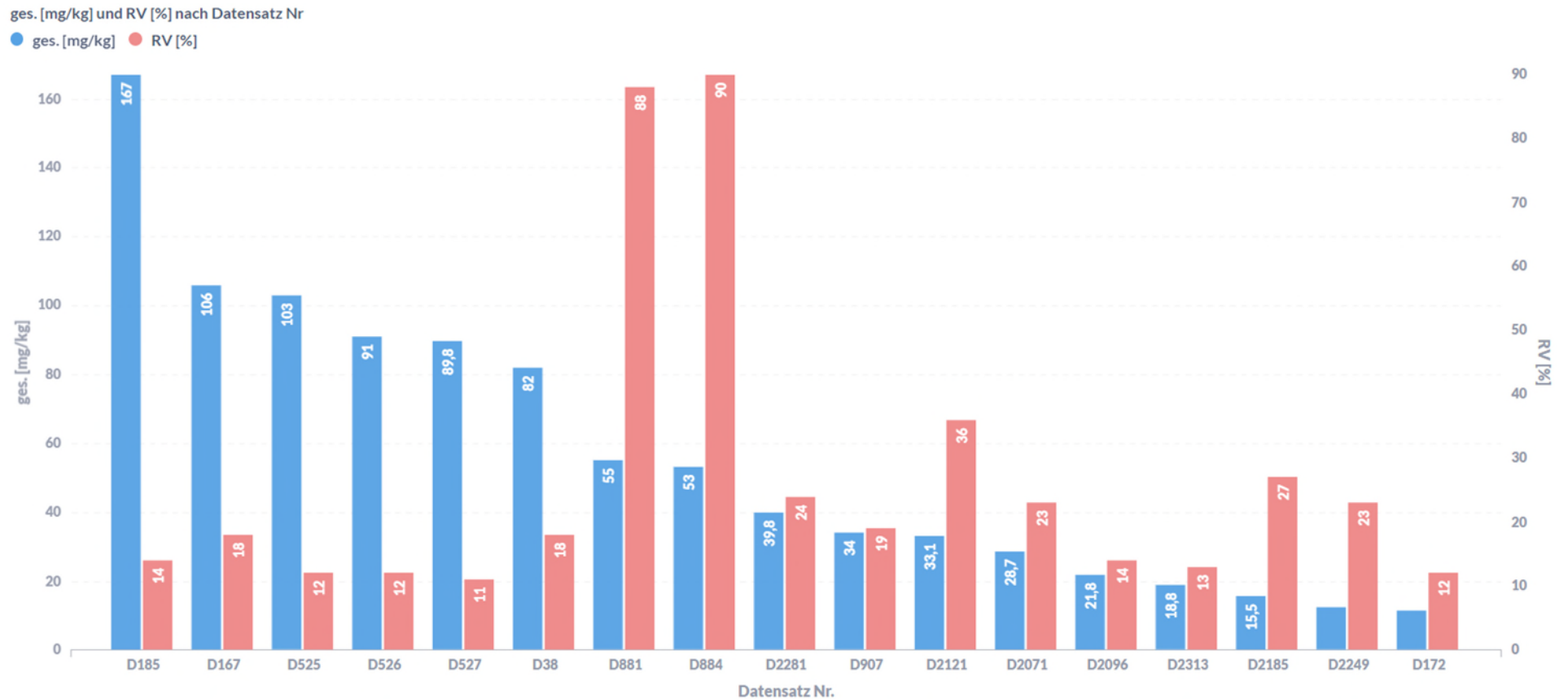
Abbildung 70: Nickel – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Das Gleiche ist bei den Daten, die nach der neuen Norm gemessen worden erkennbar. Hier treten allerdings keine extremen Ausreißer, wie bei der alten Normmethode auf.

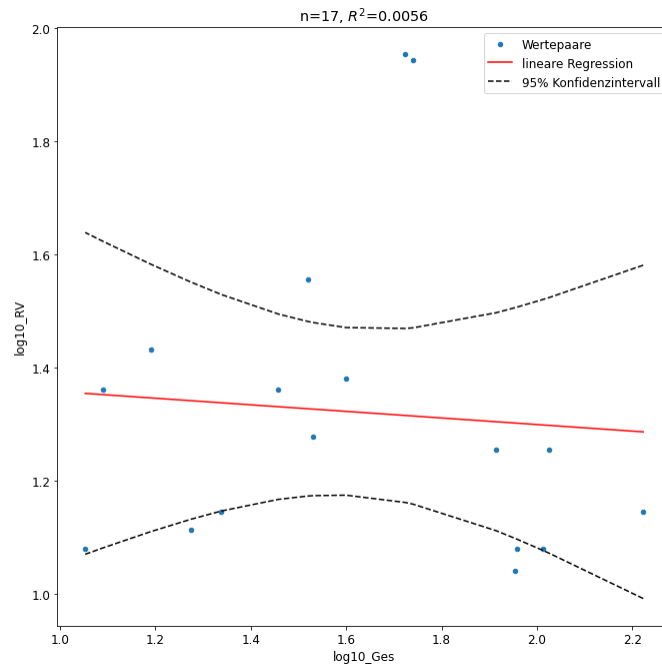
Abbildung 71: Nickel – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der Zusammenstellung der Daten beider Normen sind ebenfalls keine Trends der Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Feststoffkonzentration erkennbar.

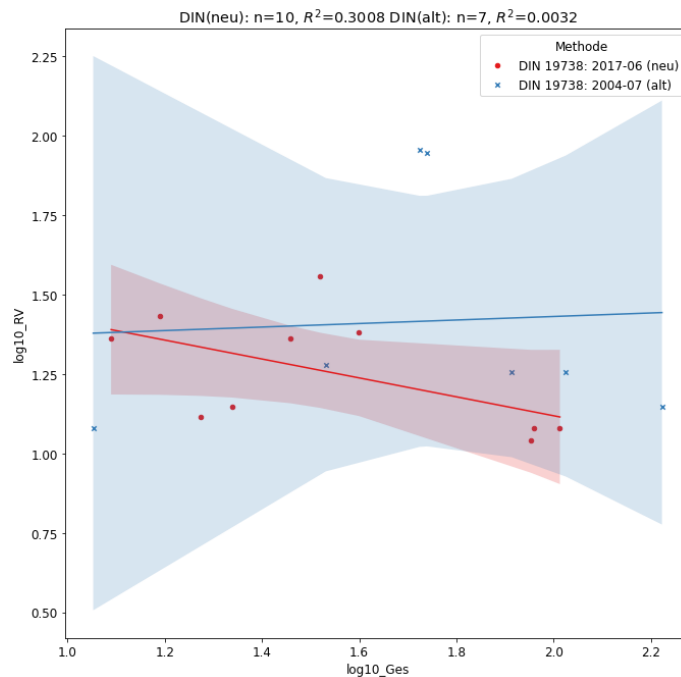
Abbildung 72: Nickel – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %], Sortierung aufsteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Dasselbe gilt für die lineare Regression. Es ist kein klarer Trend des Verhaltens der Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf den Feststoffgehalt abzuleiten.

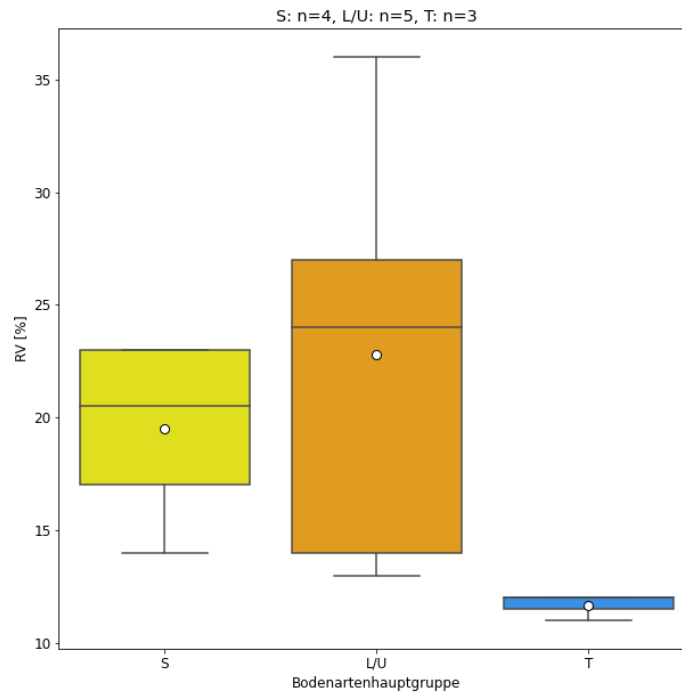
Abbildung 73: Nickel – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der getrennten Betrachtung der linearen Regression nach alter und aktueller Norm ist feststellbar, dass die Resorptionsverfügbarkeit mit zunehmendem Feststoffgehalt abnimmt.

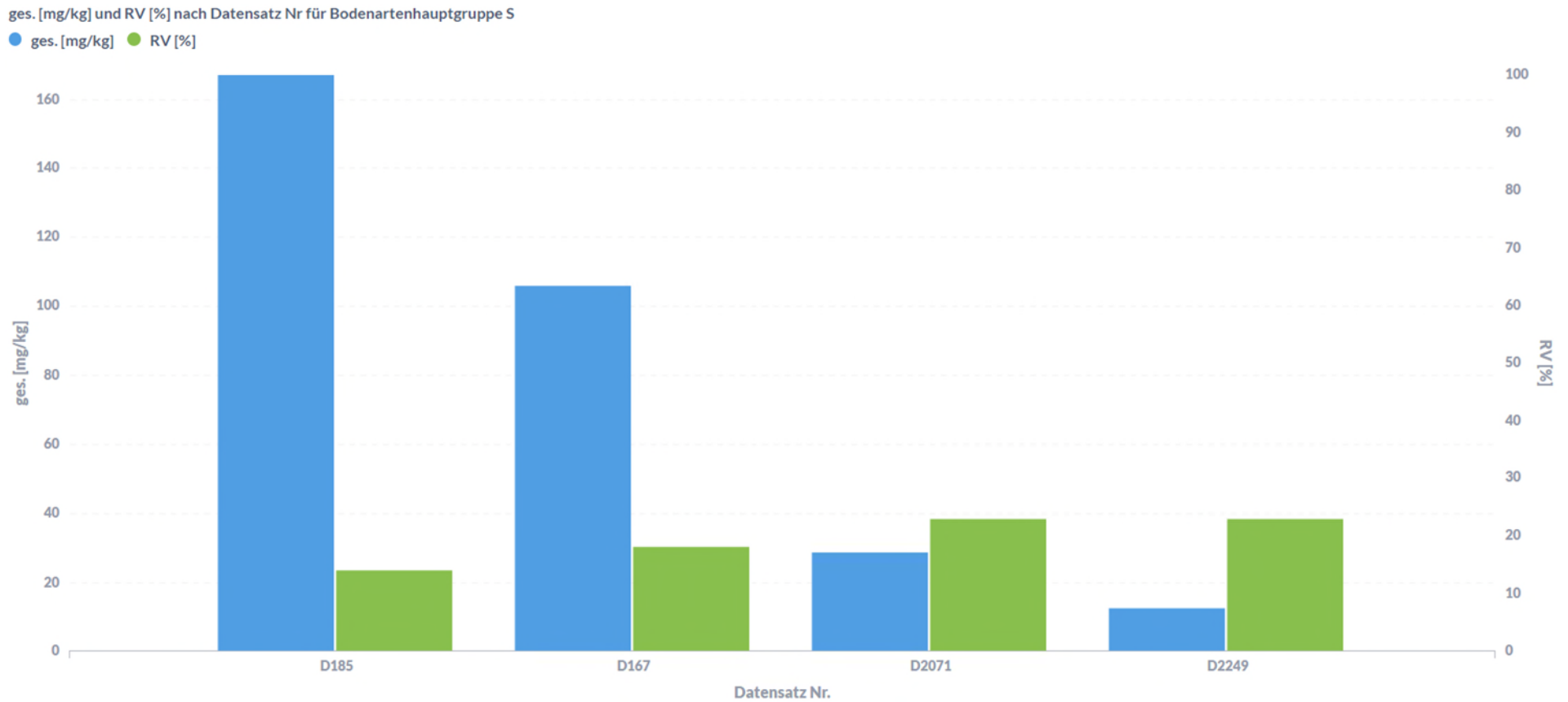
Abbildung 74: Nickel – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Mit der Auswertung mittel Boxplott steigt zuerst die Resorptionsverfügbarkeit mit abnehmender Korngröße, fällt aber mit dem Ton stark ab. Deshalb kann insgesamt von keinem einheitlichen Trend gesprochen werden.

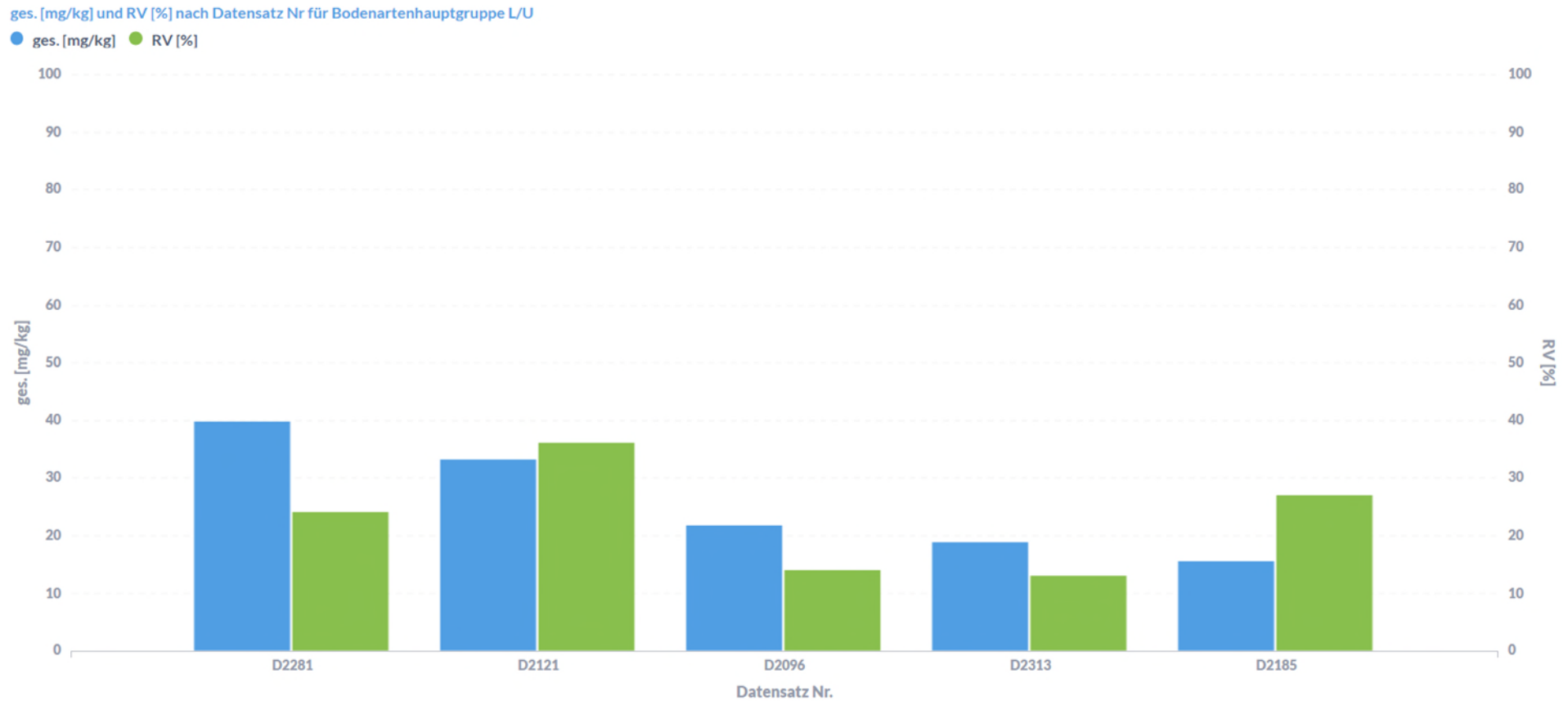
Abbildung 75: Nickel – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Sand ist bezogen auf den Feststoffgehalt kein Trend der Resorptionsverfügbarkeit nachzuweisen.

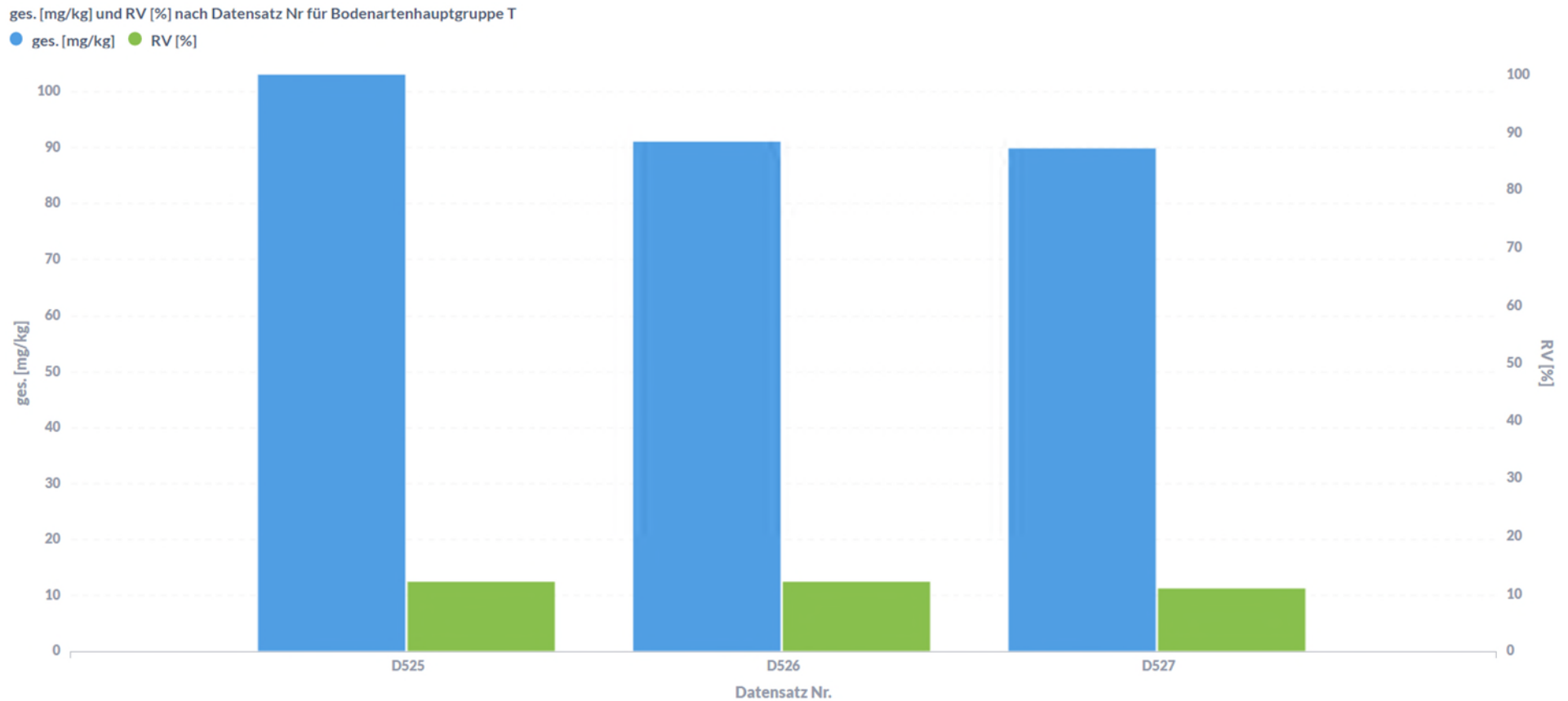
Abbildung 76: Nickel – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Wie bei Sand schwankt die Resorptionsverfügbarkeit ohne Trend bezogen auf den Feststoffgehalt um 20 – 30 %.

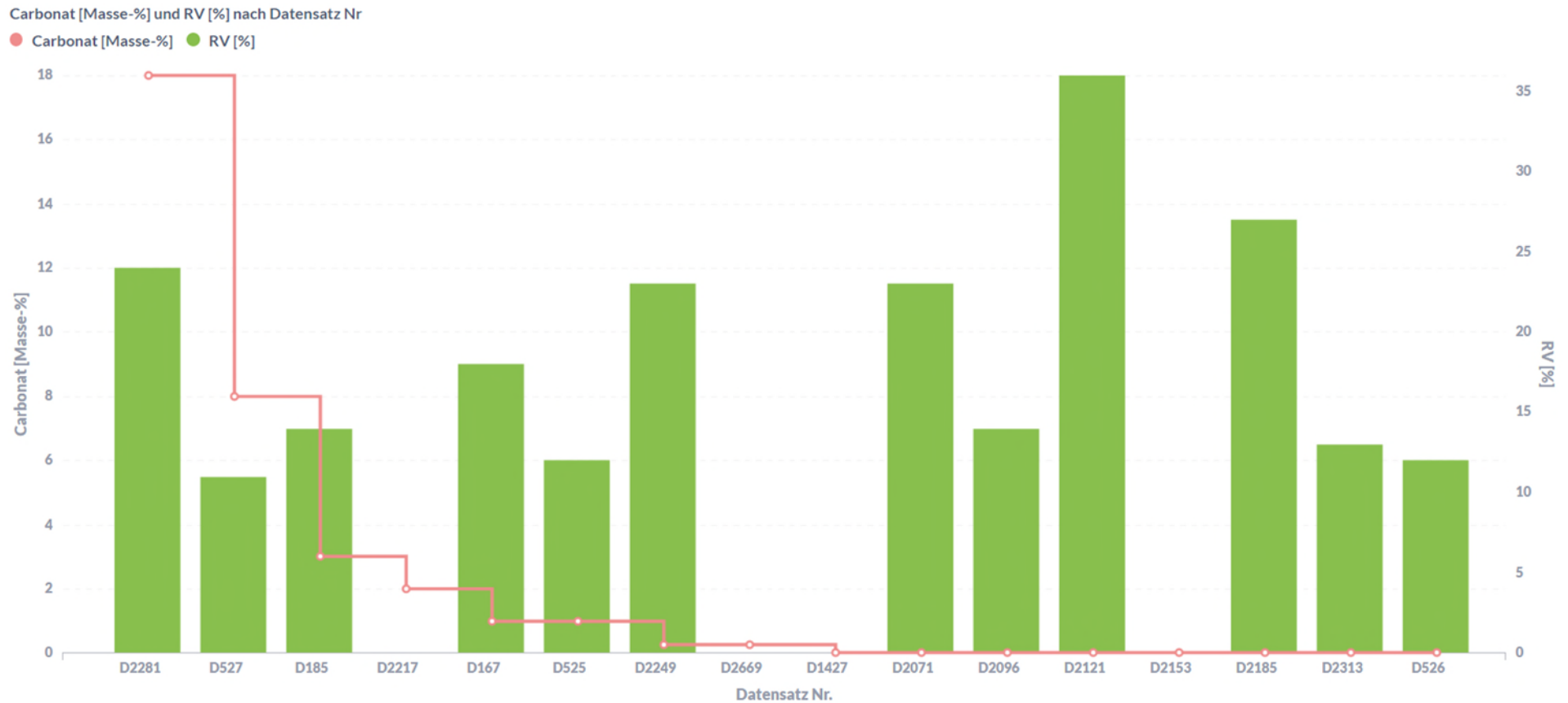
Abbildung 77: Nickel – Bodenartenhauptgruppe T, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei den drei Proben der Hauptbodenart Ton liegt die Resorptionsverfügbarkeit unter der von Sand, Lehm und Schluff. Hieraus lässt sich vorläufig ableiten, dass die Resorptionsverfügbarkeit von Nickel in Richtung Feinstkorn von ca. 25 % auf ca. 10 % abnimmt.

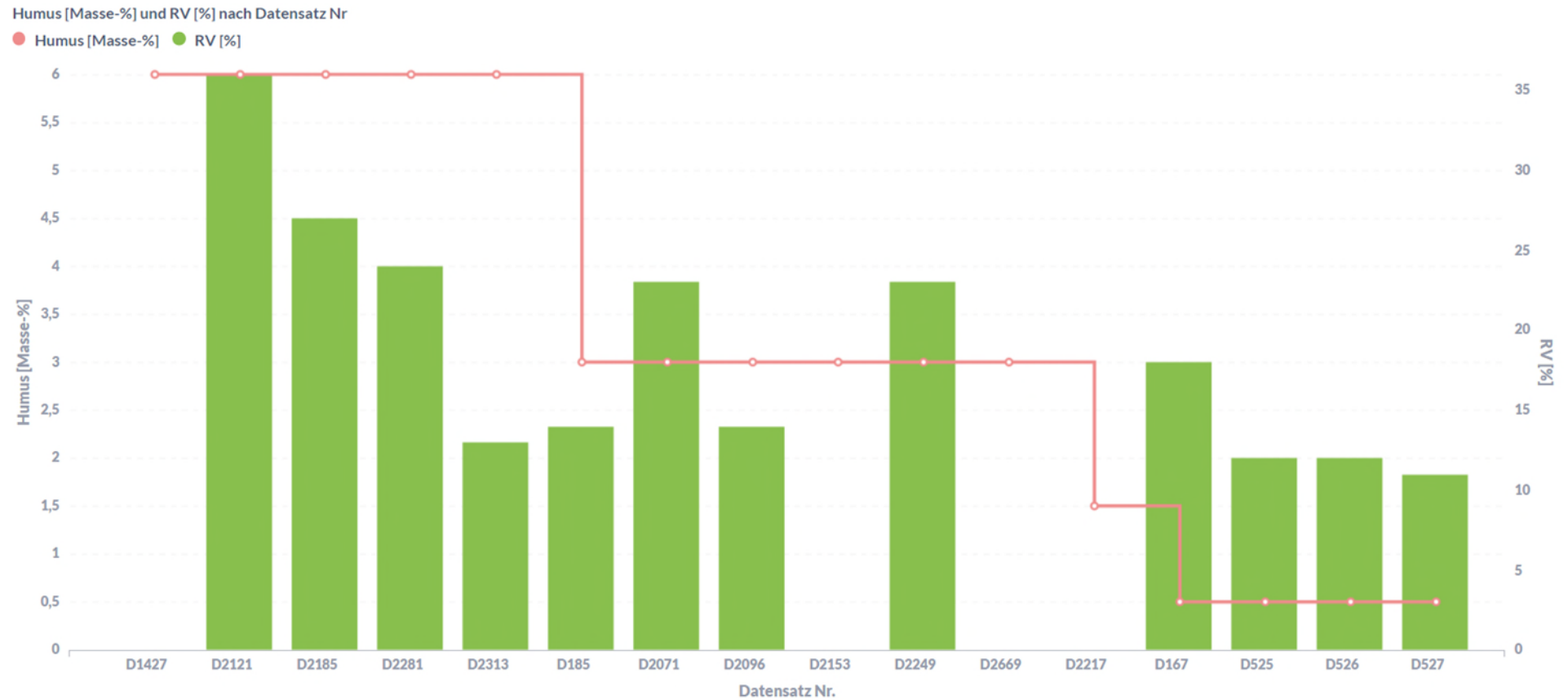
Abbildung 78: Nickel – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Carbonatgehalt im Boden hat auf die Resorptionsverfügbarkeit von Nickel offenbar keinen Einfluss.

Abbildung 79: Nickel – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



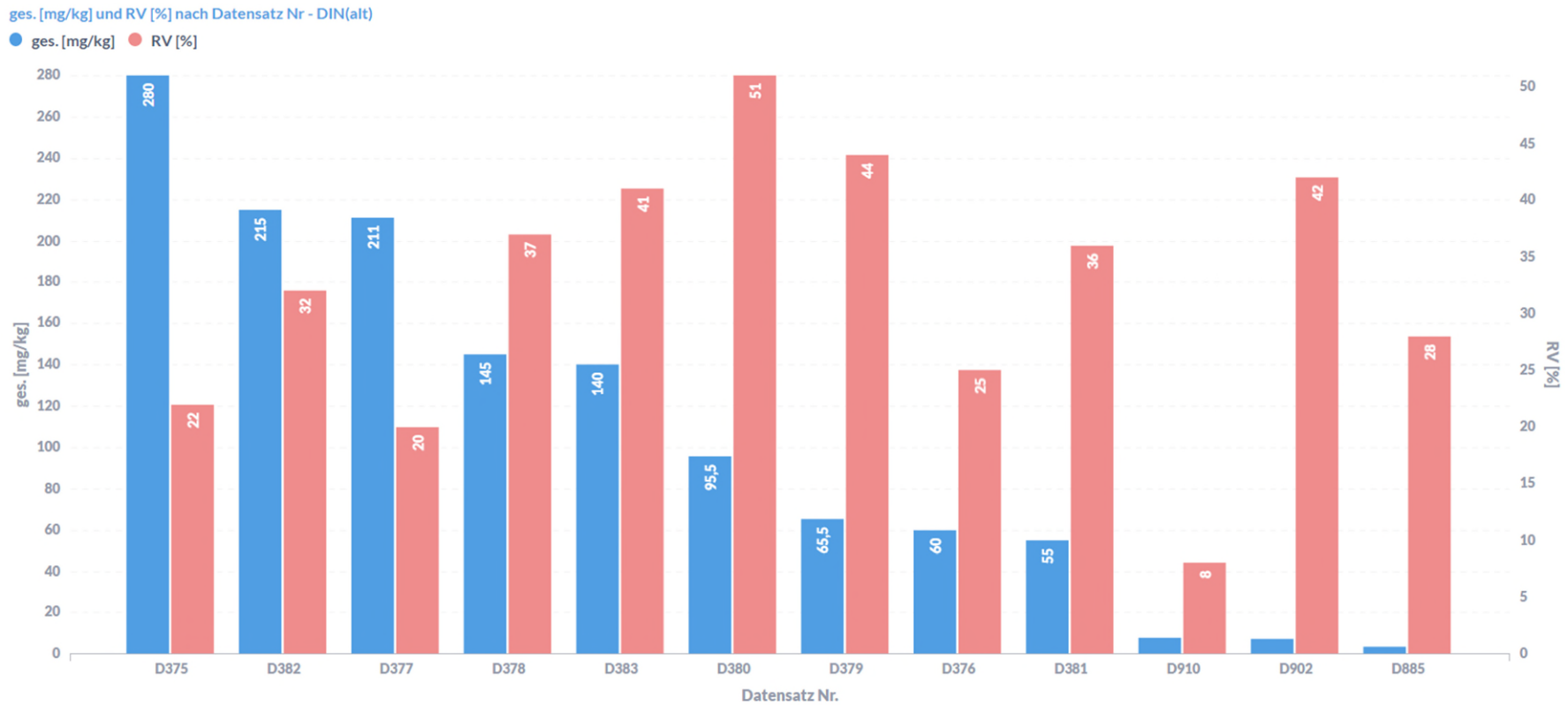
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Dem Trend der vorhandenen Daten zufolge sinkt die Resorptionsverfügbarkeit von Nickel mit abnehmendem Humusgehalt.

7.4.8 Quecksilber

Die Quecksilbergehalte der vorhandenen Daten decken die Prüfwerte Boden-Mensch der BBodSchV ab. Bei den Altdaten sind Konzentrationen von über 200 mg/kg vertreten.

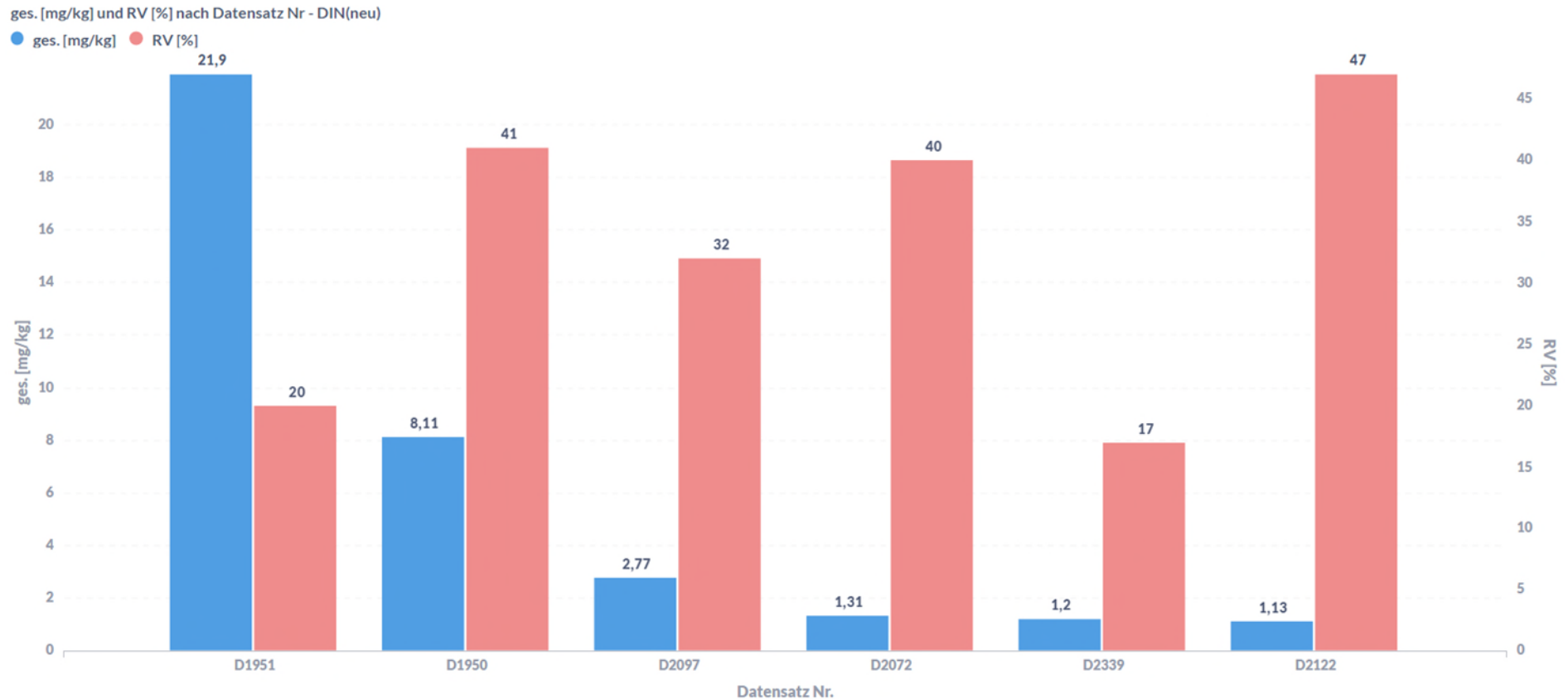
Abbildung 80: Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit von Quecksilber bezogen auf die Konzentration bei den Daten aus der alten Norm hat keinen Trend. Sie schwankt von 8 bis 51 %.

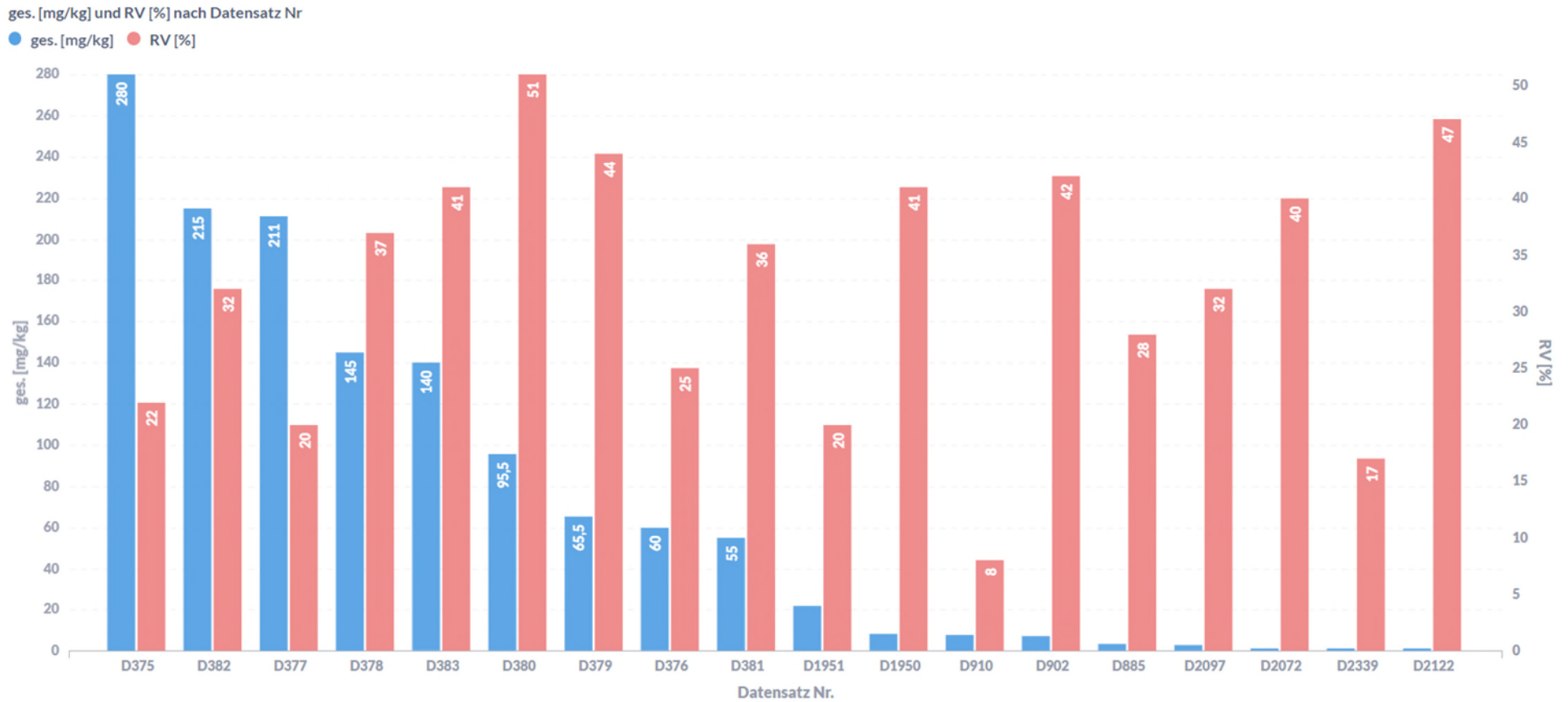
Abbildung 81: Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Auch bei der neuen DIN-Methode ist kein Trend bezogen auf den Feststoffgehalt erkennbar. Die Schwankungen sind geringer als bei der alten Norm.

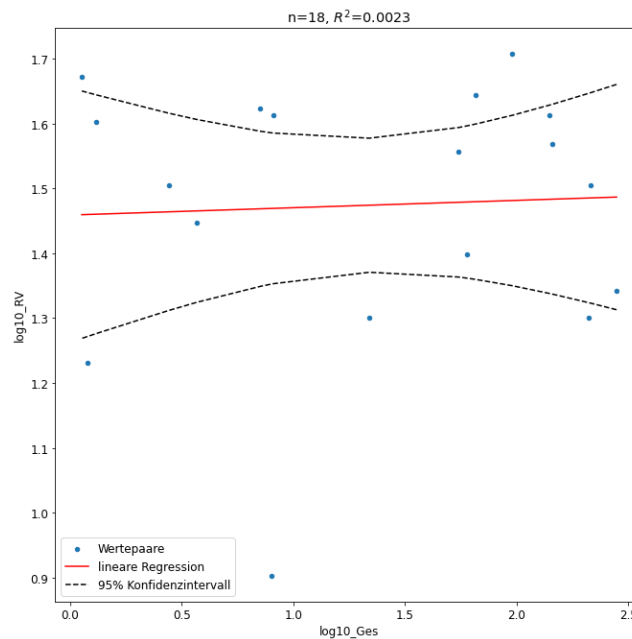
Abbildung 82: Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse beider DIN-Methoden werden die vorherigen Feststellungen bestätigt. Auch Quecksilberwerte über 200 mg/kg schwanken um 25 % Resorptionsverfügbarkeit. Das lässt allerdings nicht den Schluss zu, dass die Resorptionsverfügbarkeit mit niedrigerer Konzentration ansteigt.

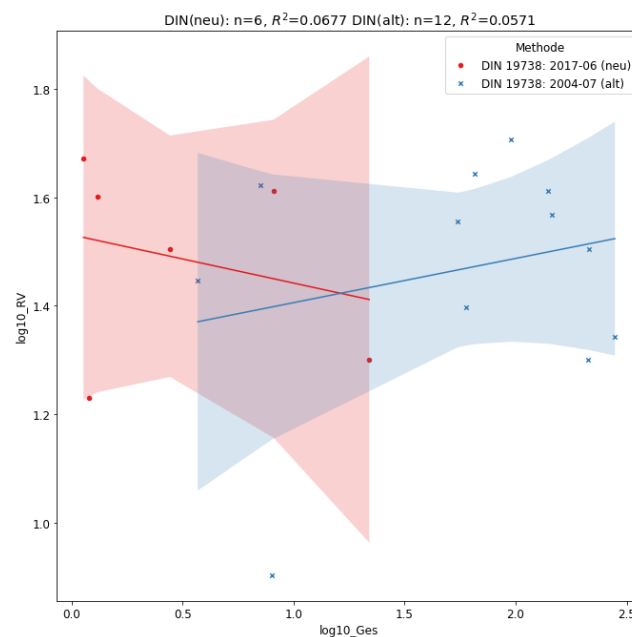
Abbildung 83: Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

In der Darstellung aller Quecksilberdaten ist auch kein deutlicher Trend durch lineare Regression festzustellen.

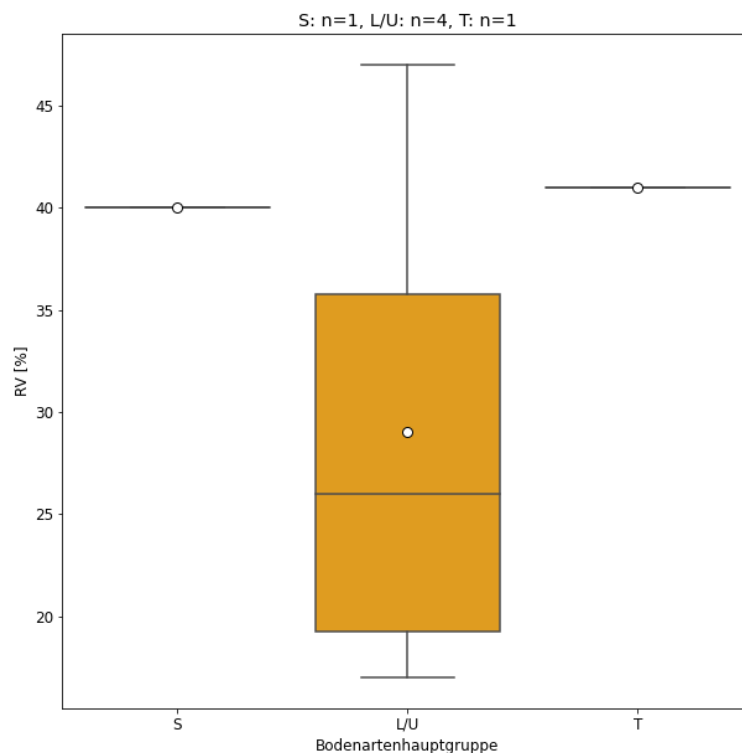
Abbildung 84: Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Ergebnisse der alten und neuen, aktuellen Norm laufen hier konträr und relativieren dadurch das Gesamtbild. Demnach steigt die Resorptionsverfügbarkeit bei der aktuellen DIN-Methode mit abnehmendem Feststoffgehalt.

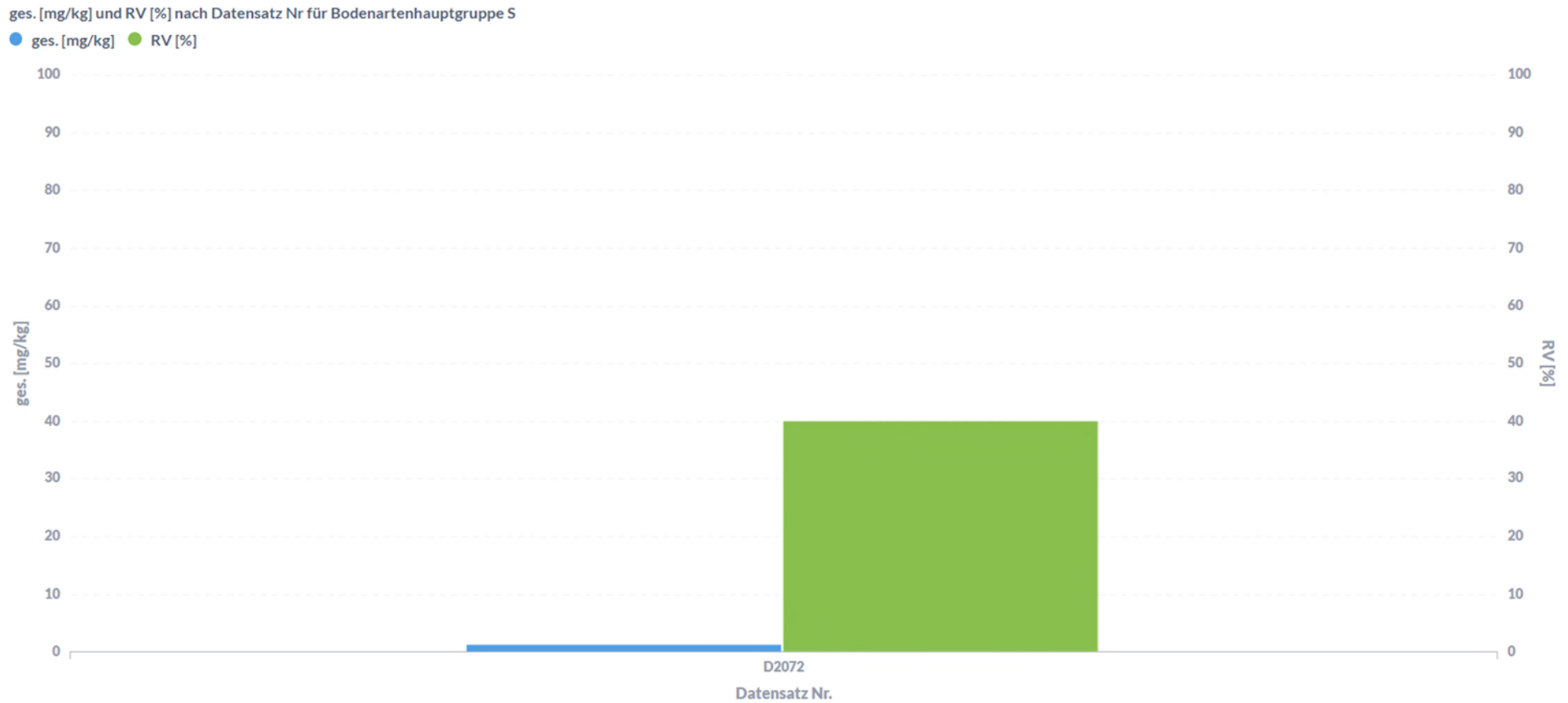
Abbildung 85: Quecksilber – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Gemäß Boxplott wird bestätigt, dass kein Trend der Resorptionsverfügbarkeit bei den Bodenarten ableitbar ist. Dazu stehen auch noch zu wenige Daten zur Verfügung.

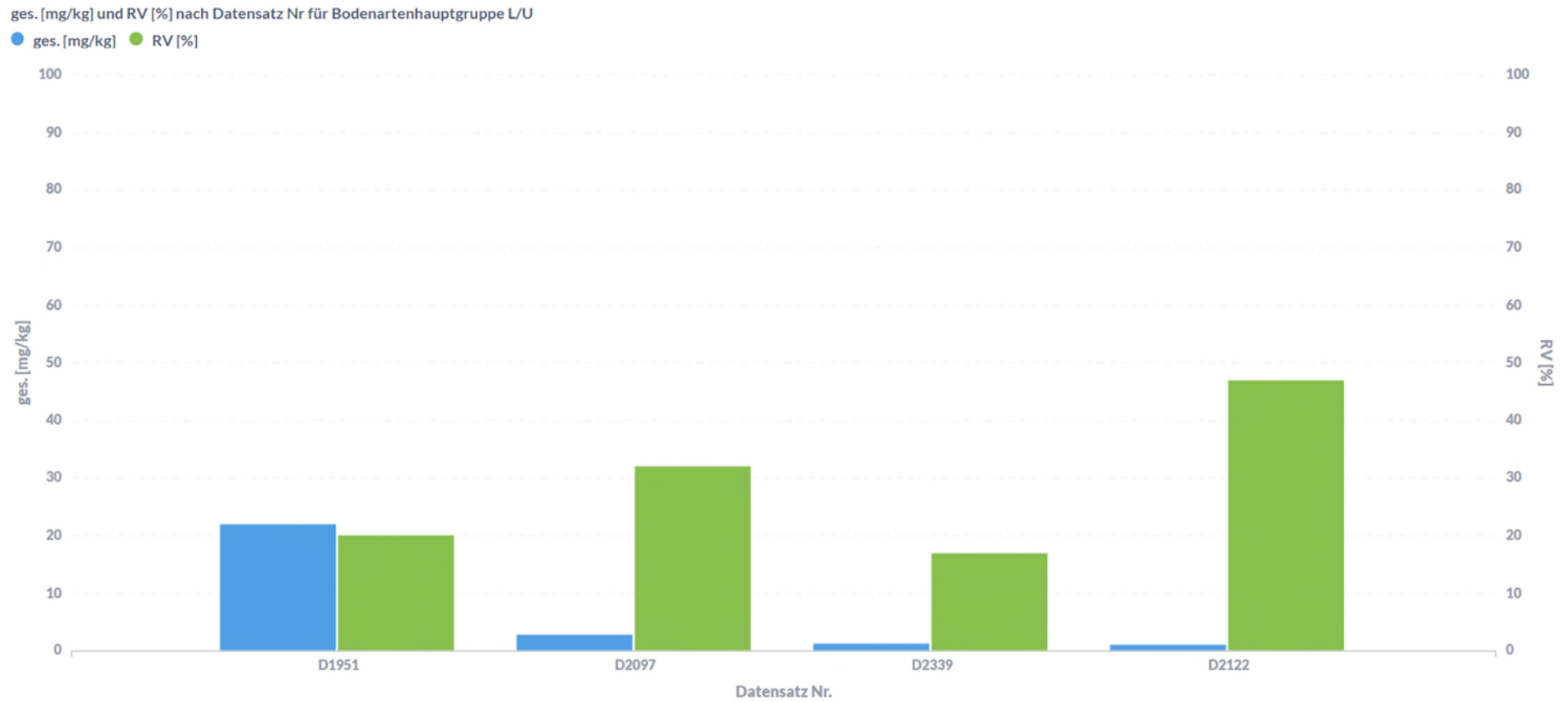
Abbildung 86: Quecksilber – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

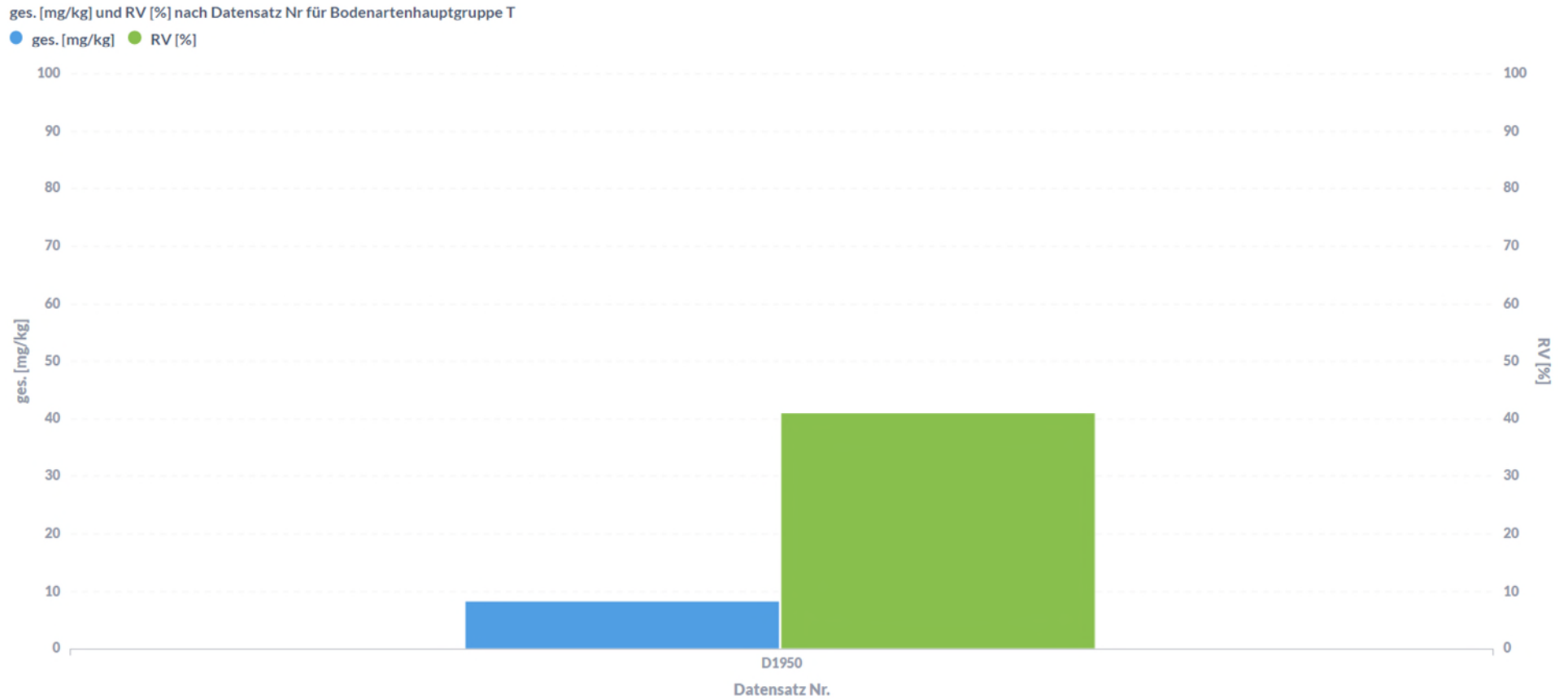
Die Resorptionsverfügbarkeit hat über die Bodenartenhauptgruppen und innerhalb dieser keine Trends. Es liegen allerdings auch nur wenige Daten vor.

Abbildung 87: Quecksilber – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



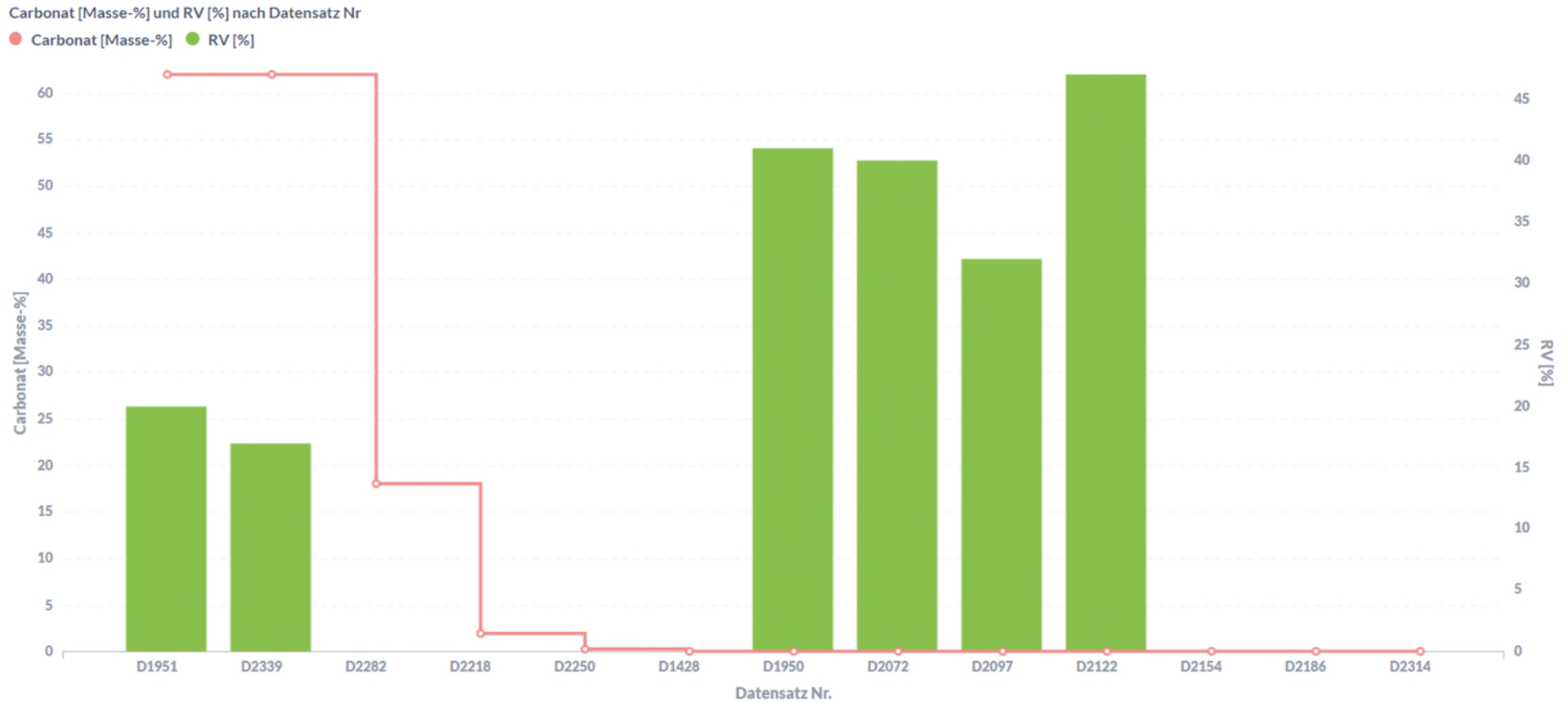
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 88: Quecksilber – Bodenartenhauptgruppe T, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

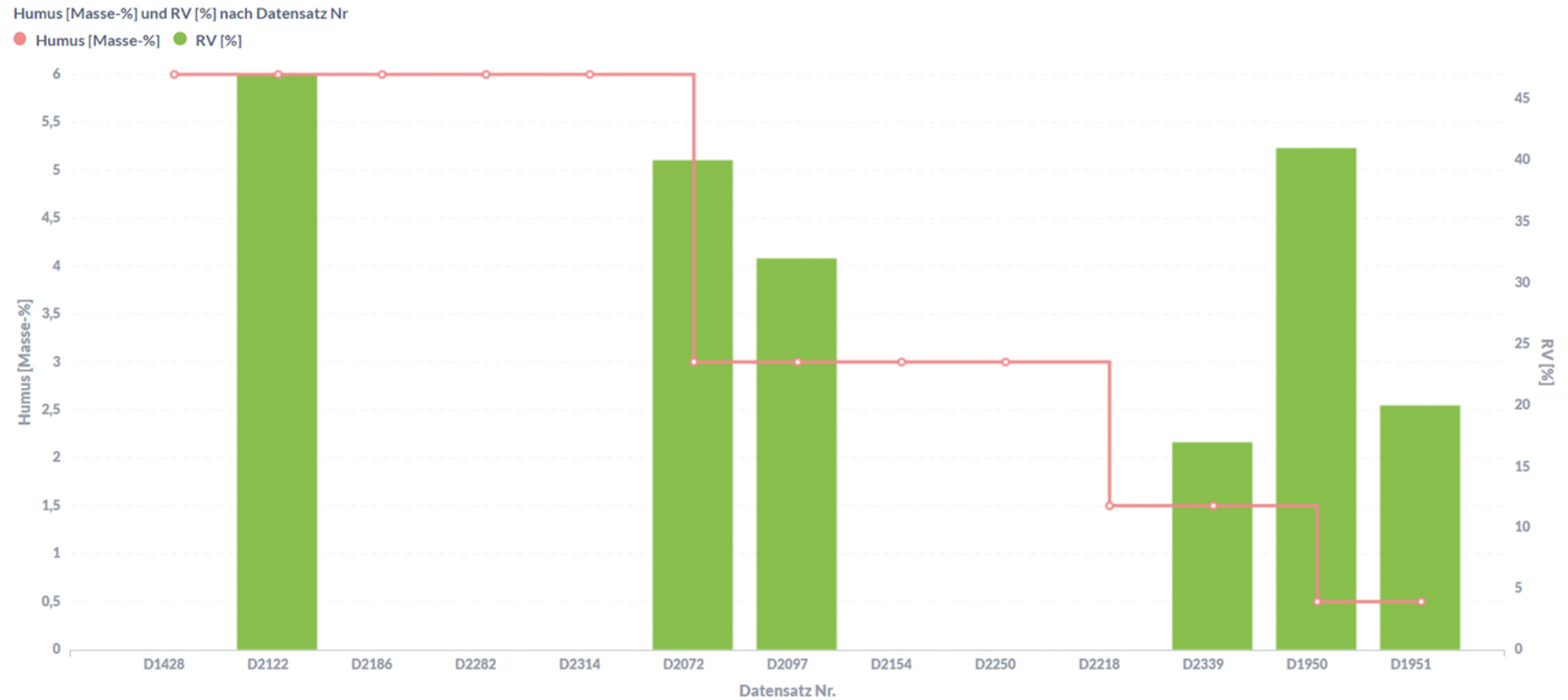
Abbildung 89: Quecksilber – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Quecksilber scheint anhand der wenigen vorliegenden Daten bei hohen Carbonatgehalten im Boden weniger resorptionsverfügbar zu sein.

Abbildung 90: Quecksilber – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



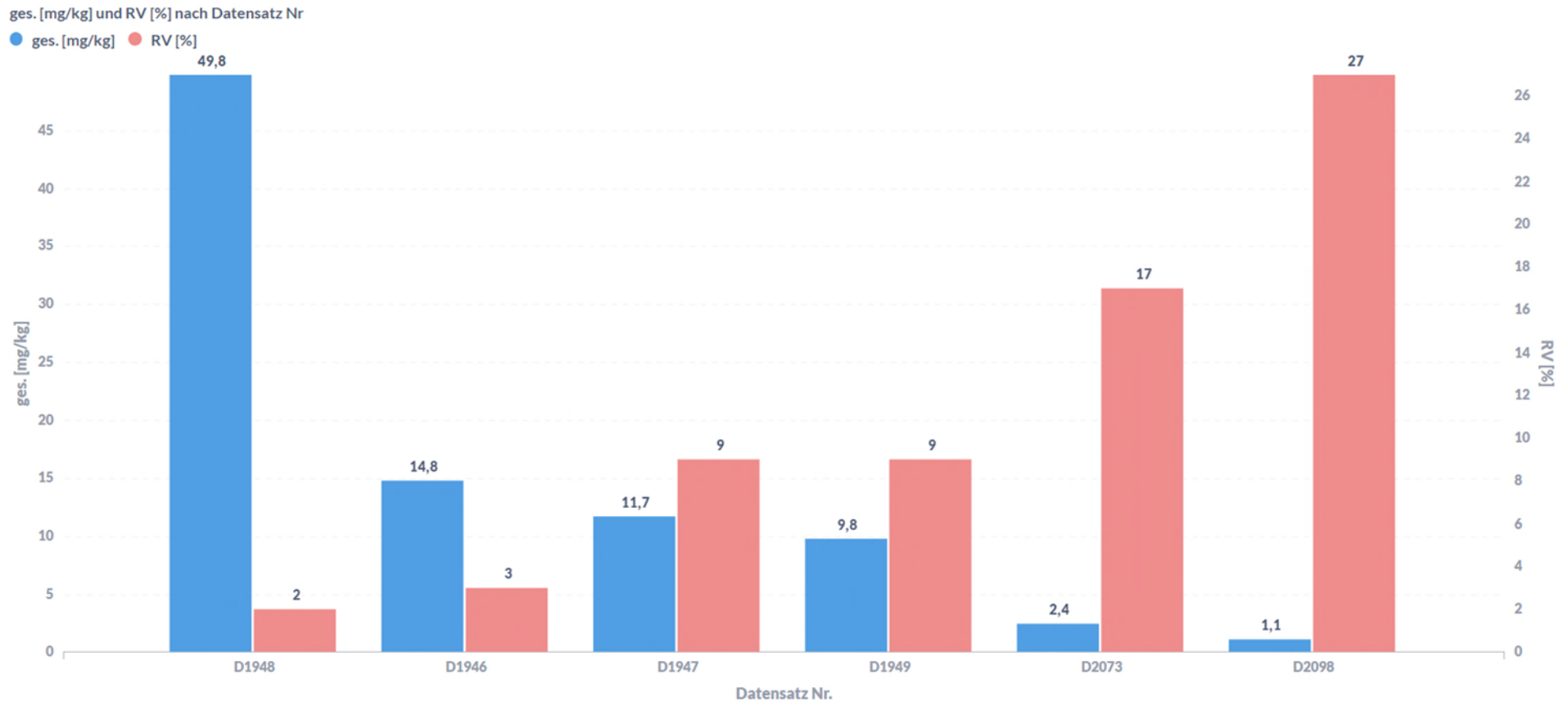
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Es ist kein klarer Trend erkennbar. Tendenziell kann jedoch eine Abnahme der Resorptionsverfügbarkeit mit abnehmendem Humusgehalt impliziert werden.

7.4.9 Thallium

Für Thallium liegen nur wenige Werte vor. Diese decken die Bandbreite der Prüfwerte Boden-Mensch der BBodSchV ab.

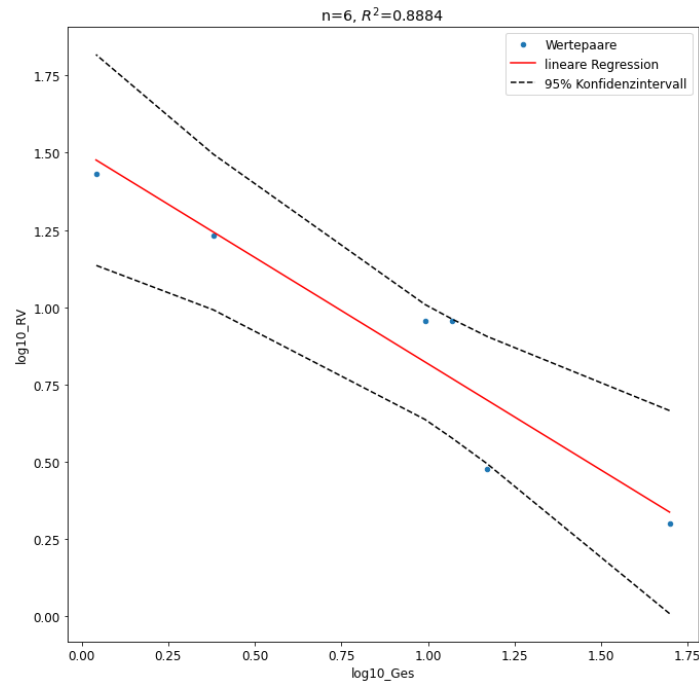
Abbildung 91: Thallium – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Mit abnehmendem Feststoffgehalt steigt die Resorptionsverfügbarkeit von Thallium deutlich an.

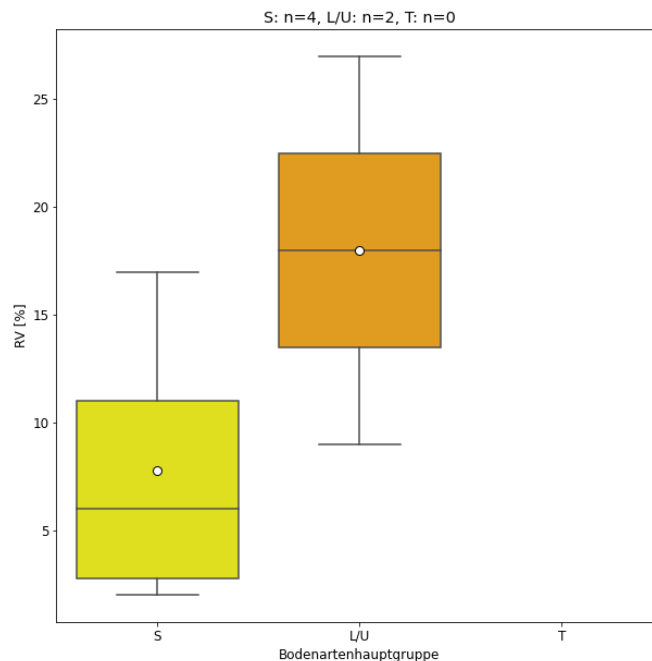
Abbildung 92: Quecksilber – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Aufgrund zu weniger Daten sind Trendanalysen durch lineare Regression unsicher. Dafür liegen die wenigen Werte sehr plausibel. Demnach steigt die Resorptionsverfügbarkeit mit sinkendem Feststoffgehalt.

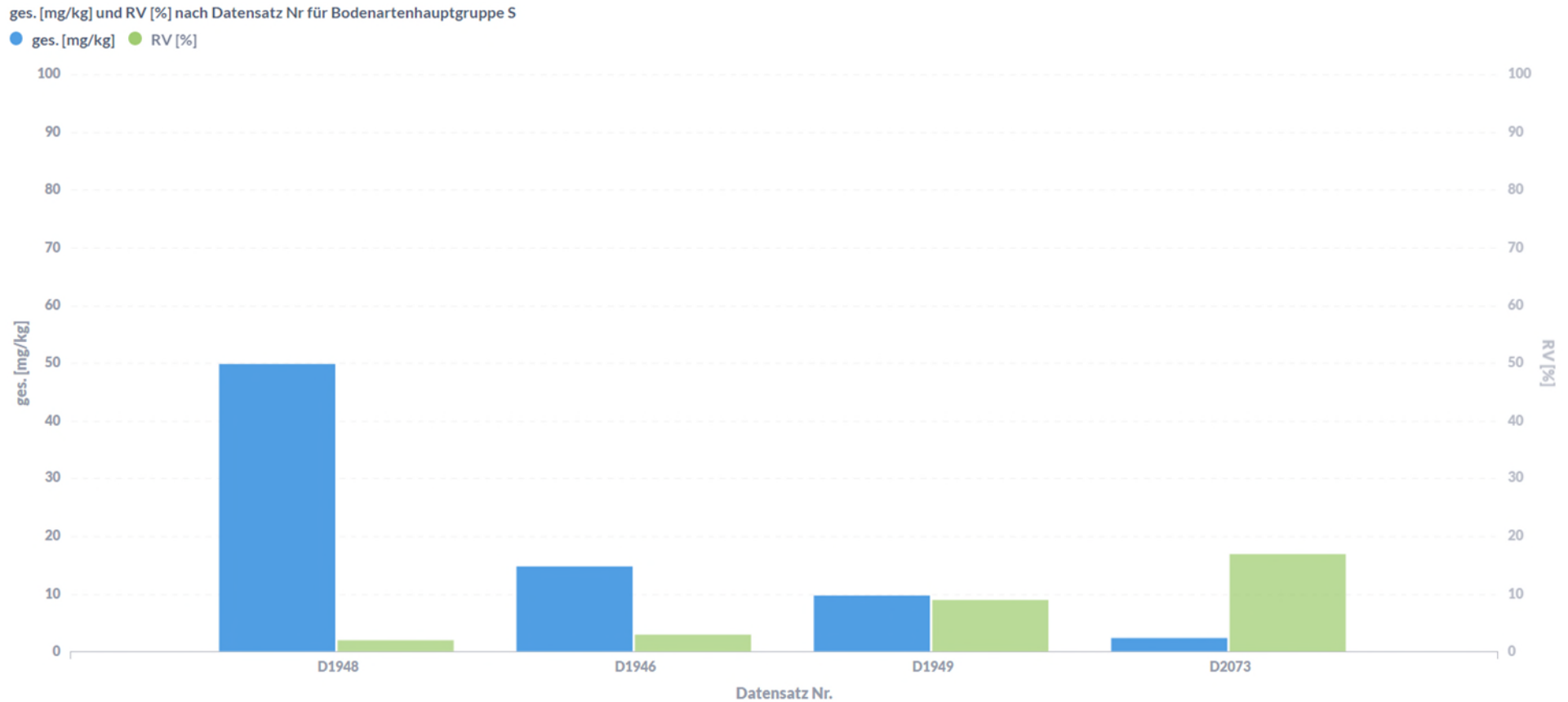
Abbildung 93: Thallium – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Mit abnehmender Korngröße steigt die Resorptionsverfügbarkeit, was dieses Boxplott-Diagramm bestätigt.

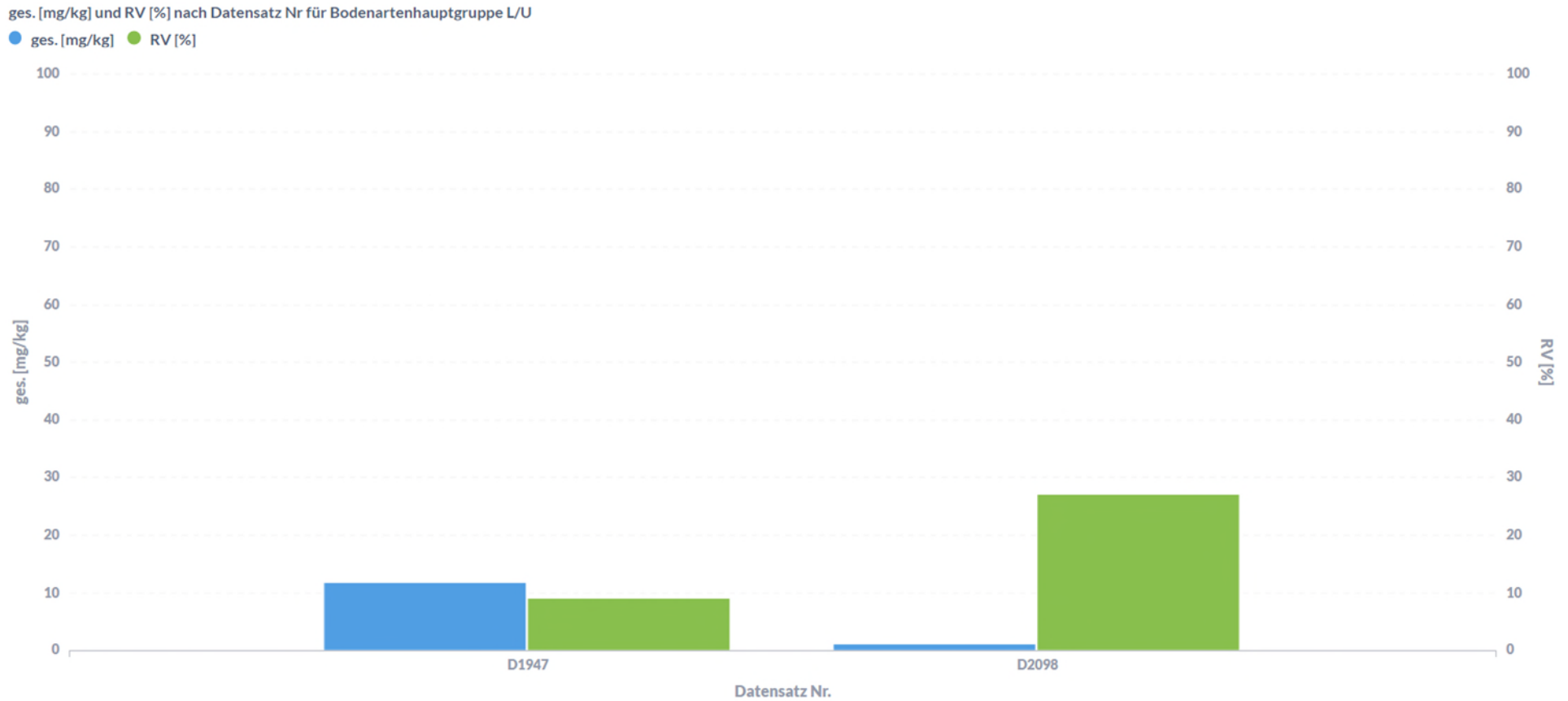
Abbildung 94: Thallium – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der Hauptbodenart Sand ist dieser Effekt des Anstieges der Resorptionsverfügbarkeit mit absteigenden Feststoffgehalt ebenfalls deutlich erkennbar.

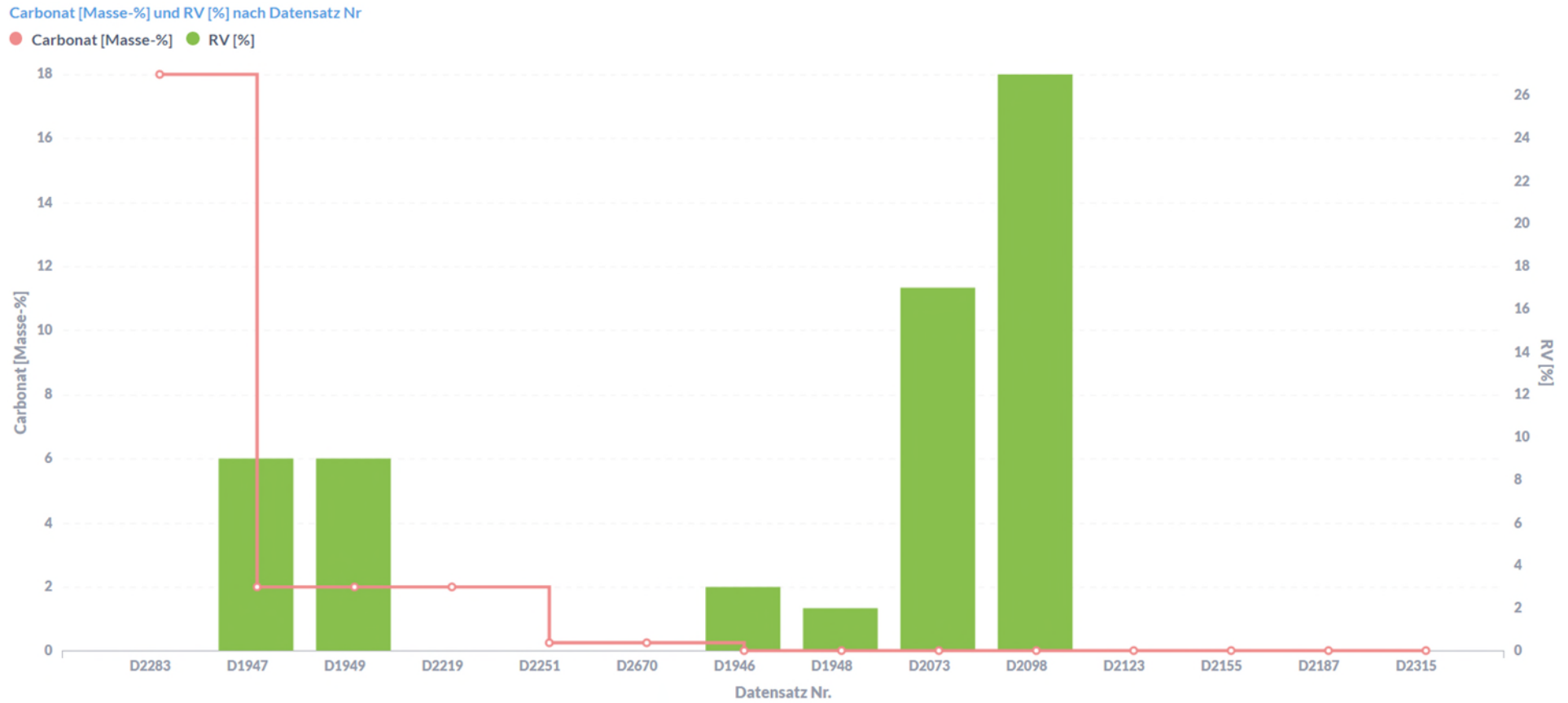
Abbildung 95: Thallium – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die zwei Werte von Lehm/Schluff verhalten sich wie bei den anderen Hauptbodenarten. Die Anzahl auswertbarer Daten ist jedoch hinsichtlich abschließender Interpretationen zu gering.

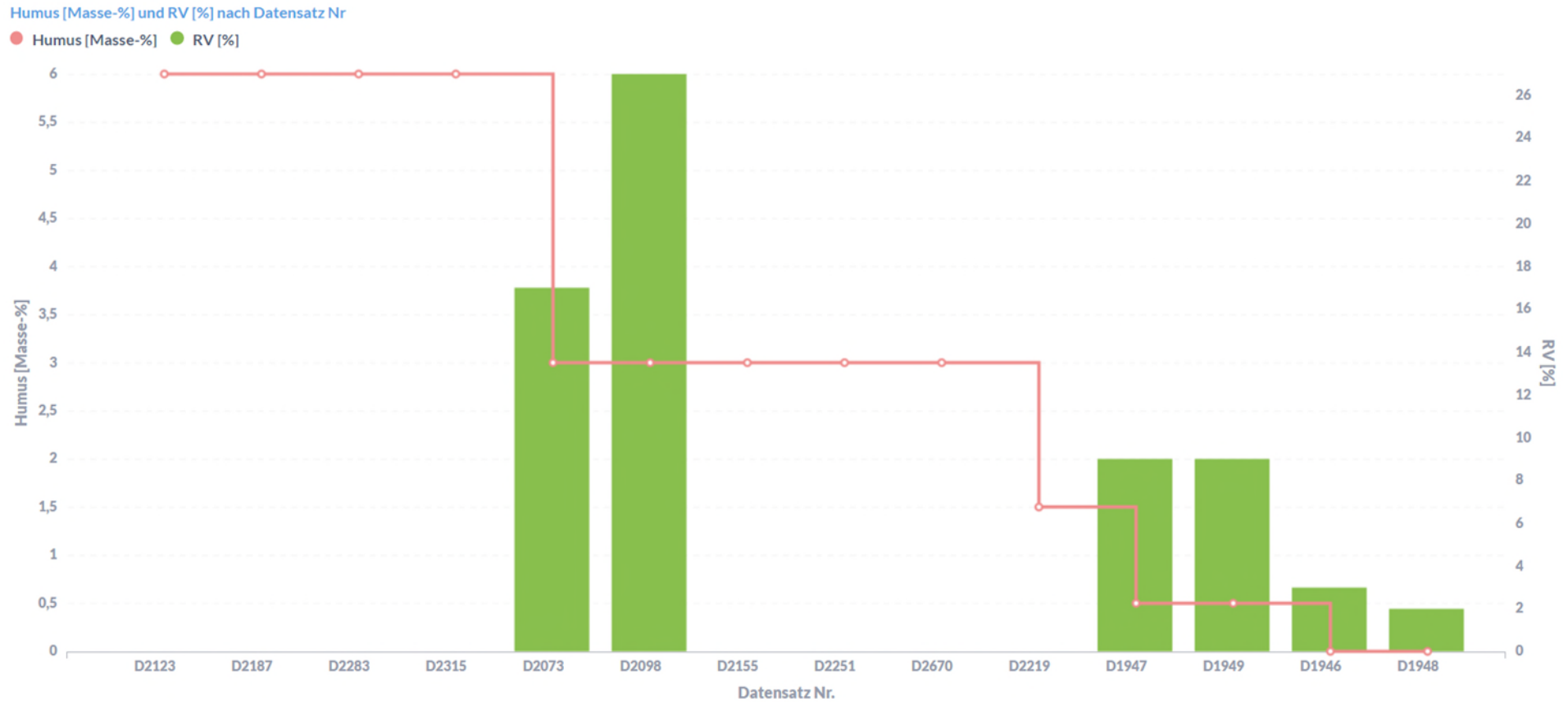
Abbildung 96: Thallium – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Thallium wird mit sinkendem Carbonatgehalt entsprechend der wenigen Werte resorptionsverfügbarer.

Abbildung 97: Thallium – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

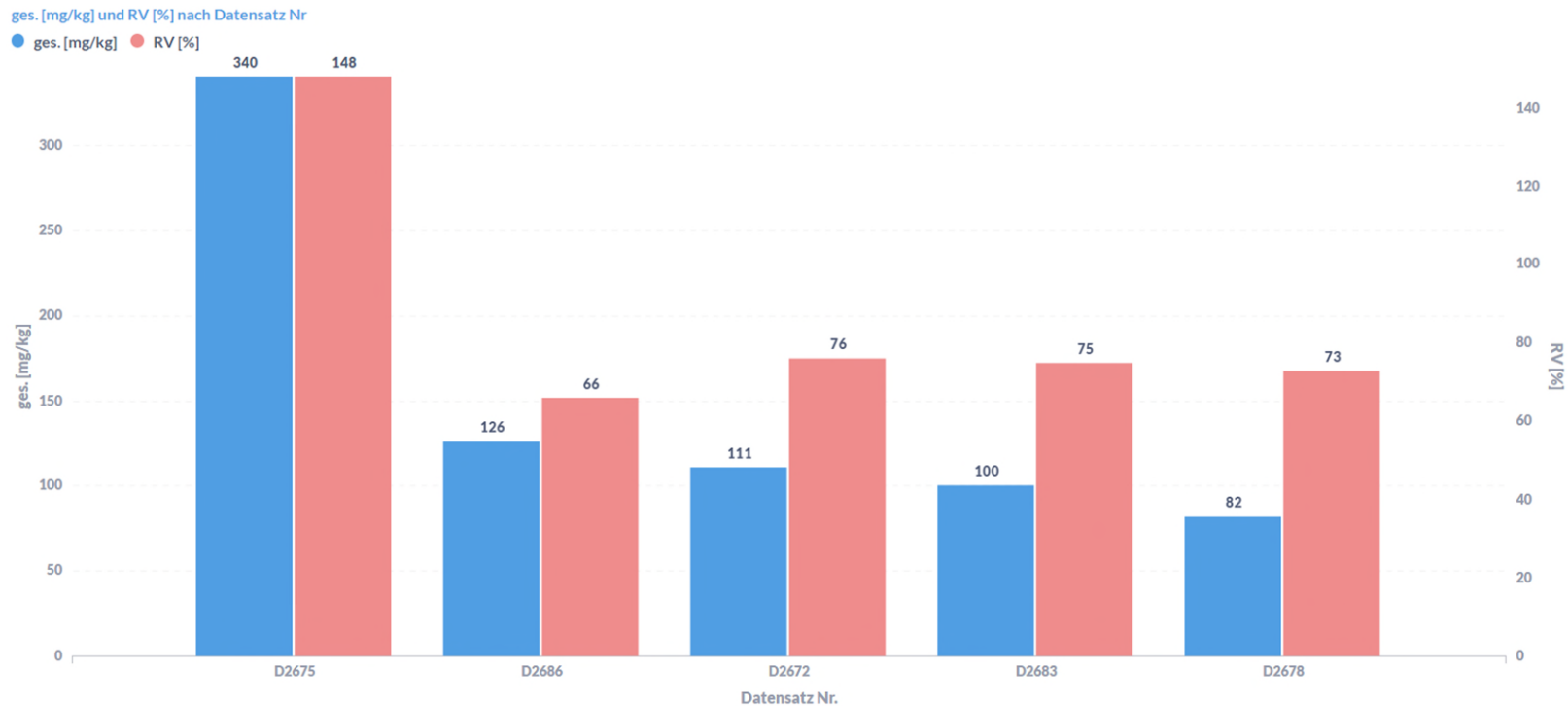
Beim Humusgehalt ist der Trend umgekehrt gegenüber Carbonat. Mit sinkendem Humusgehalt sinkt auch die Resorptionsverfügbarkeit.

7.4.10 2,4-Dinitrotoluol

Für die folgenden Ausführungen im Zusammenhang mit den sprengstofftypischen Verbindungen bzw. Sprengstoffen in Bezug auf Resorptionsverfügbarkeit ist zu beachten, dass die Ergebnisse die Qualitätskriterien der neuen Norm durchweg nicht erfüllen. Trotzdem können die folgenden Feststellungen als erste Orientierung genutzt werden. Die Trendanalyse durch lineare Regression war bei diesen Verbindungen aufgrund der geringen Datendichte und gegebener Unsicherheiten spekulativ.

Die 2,4-Dinitrotoluol Konzentrationen im Feststoff der Proben liegen weit über den Prüfwerten Boden-Mensch der BBodSchV. Sie werden trotzdem zur Orientierung herangezogen.

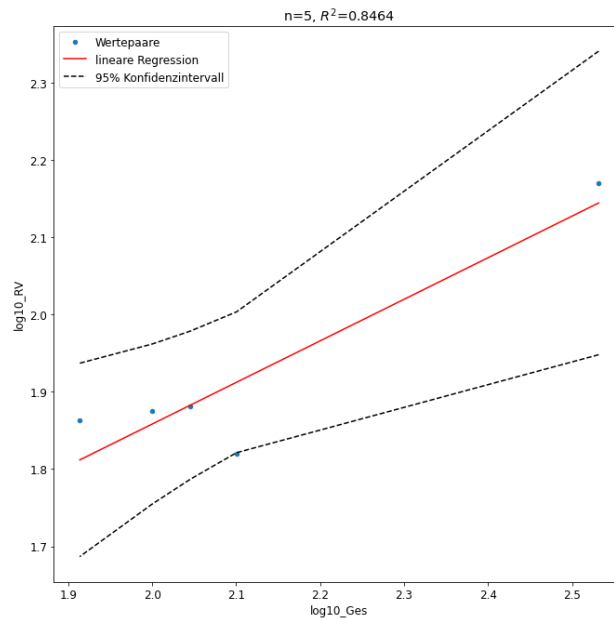
Abbildung 98: 2,4-Dinitrotoluol – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Ergebnisse der Resorptionsverfügbarkeit zeigen auch aufgrund der wenigen Datensätze keinen Trend bezogen auf die Feststoffgehalte. Resorptionsverfügbarkeiten von über 100 % sind ohnehin unrealistisch. Die Resorptionsverfügbarkeit schwankt um ca. 70 %.

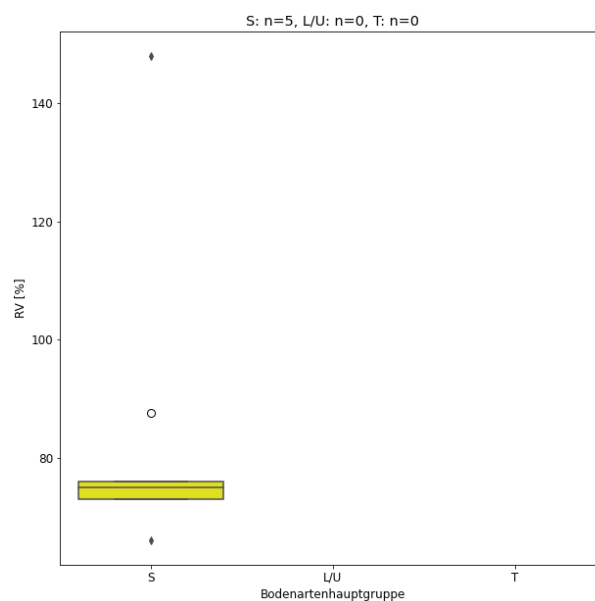
Abbildung 99: 2,4-Dinitrotoluol – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Durch einen Wert wird der mit dem Feststoffgehalt steigende Trend für die Resorptionsverfügbarkeit verursacht. Es wird eher angenommen, dass sich die Resorptionsverfügbarkeit ohne Ausreißer um 70 % bewegen wird.

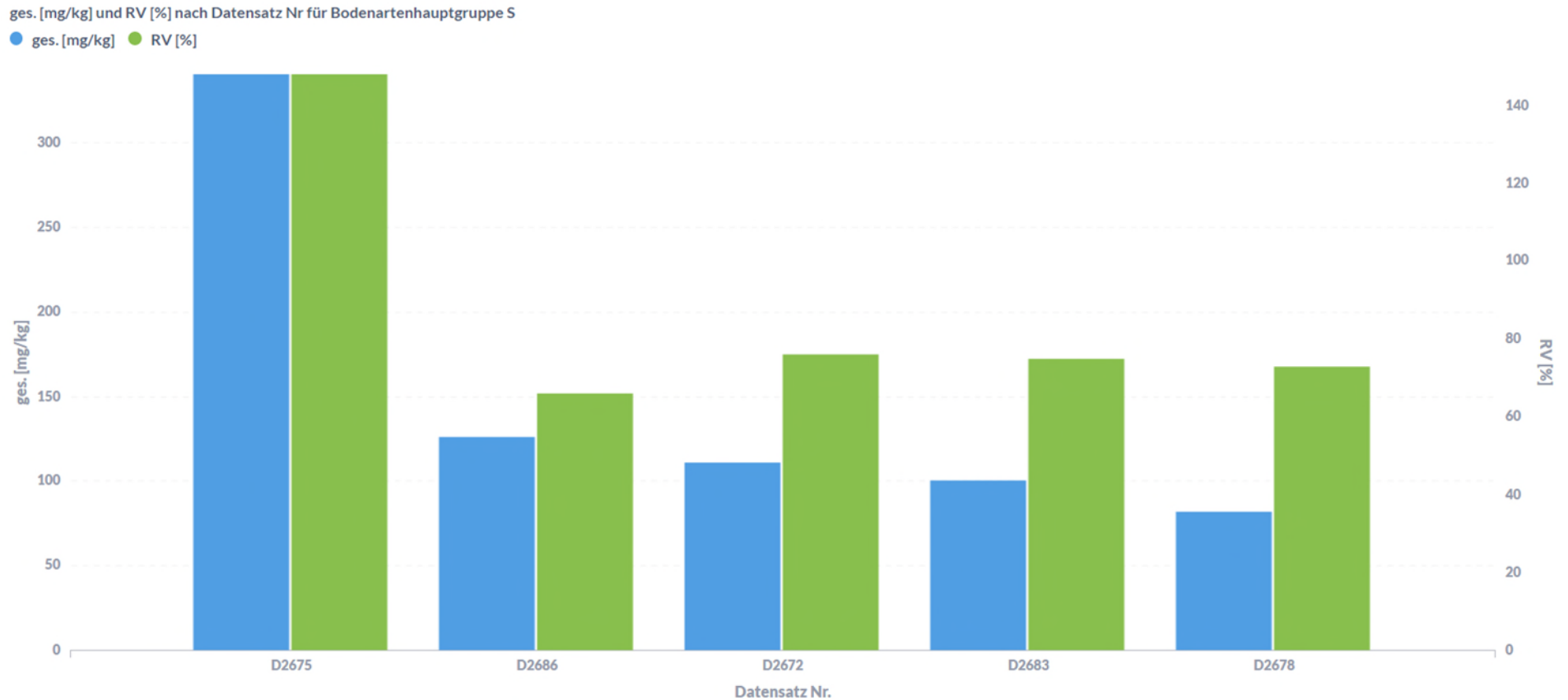
Abbildung 100: 2,4-Dinitrotoluol – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Es liegen nur für Sand Daten vor, so dass keine Aussagen zu Trends zwischen den Hauptbodenarten getroffen werden können.

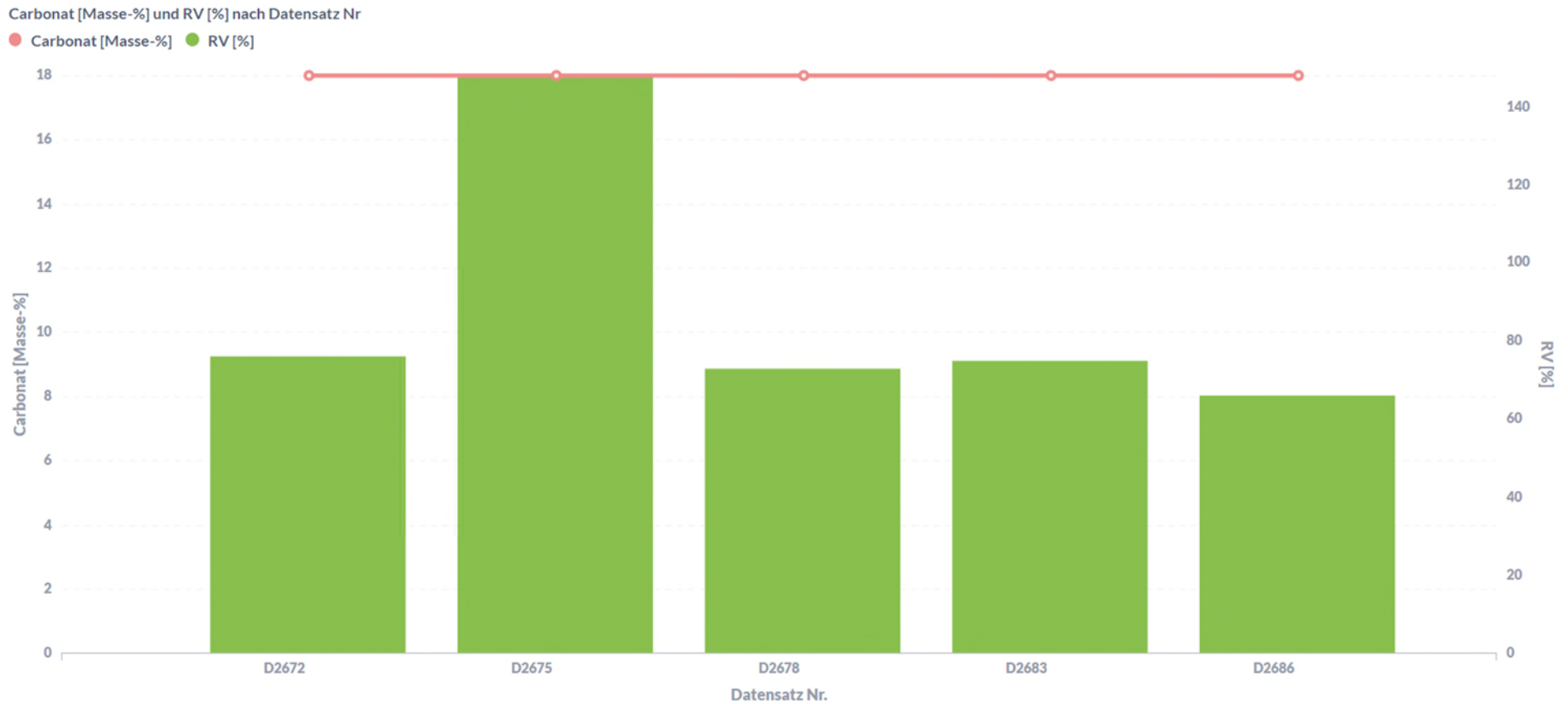
Abbildung 101: 2,4-Dinitrotoluol – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Für die Hauptbodenart Sand lässt sich kein Trend bezogen auf die Feststoffgehalte ableiten.

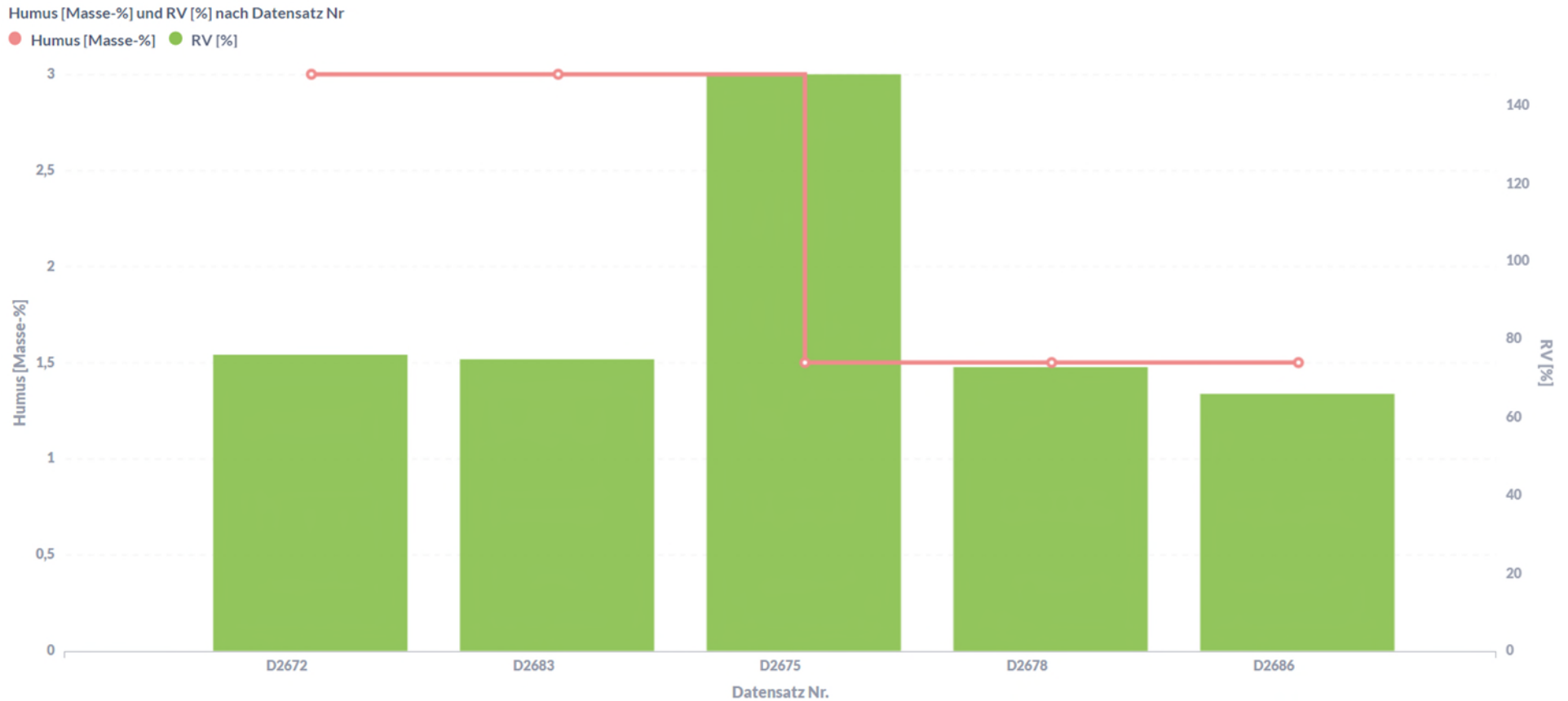
Abbildung 102: 2,4-Dinitrotoluol – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Für den Carbonatgehalt gibt es nur ein Niveau. Deshalb können grundsätzlich keine Trendaussagen getroffen werden.

Abbildung 103: 2,4-Dinitrotoluol – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



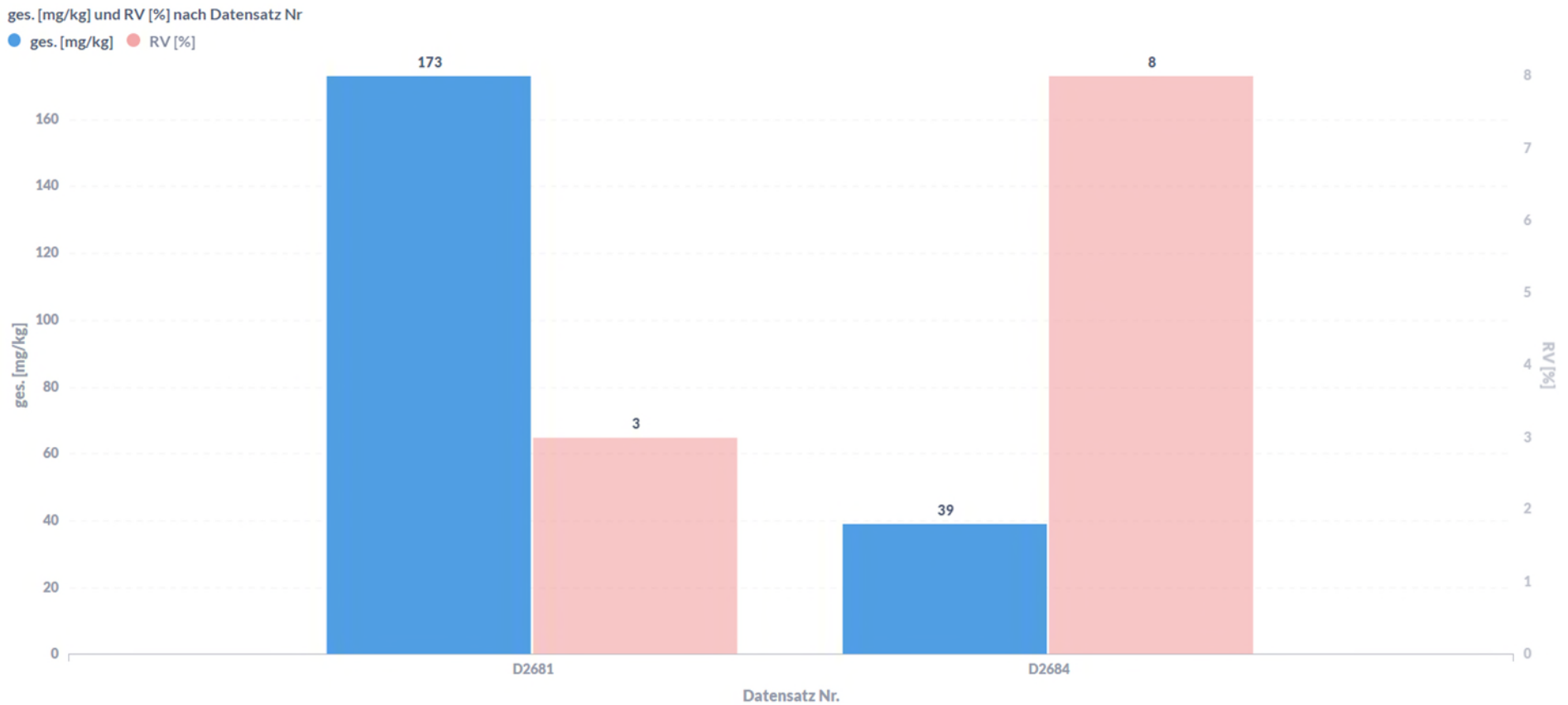
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit wird nur dem arithmetischen Mittelwert nach mit abnehmendem Humusgehalt niedriger. Vier von fünf Werte sind allerdings auf ähnlich hohem Niveau.

7.4.11 Hexyl

Von Hexyl sind nur zwei Analysen verfügbar. Von diesen überschreitet nur ein Wert den Prüfwerte Boden-Mensch der BBodSchV für Kinderspielflächen. Trendaussagen sind nicht möglich.

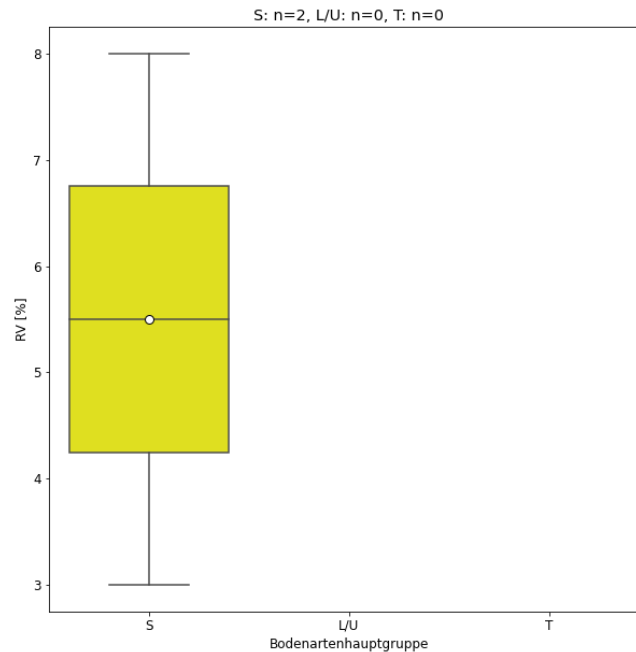
Abbildung 104: Hexyl – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der niedrigeren Feststoffkonzentration ist die Resorptionsverfügbarkeit von Hexyl etwas höher. Grundsätzlich scheint die Resorptionsverfügbarkeit von Hexyl sehr niedrig zu sein.

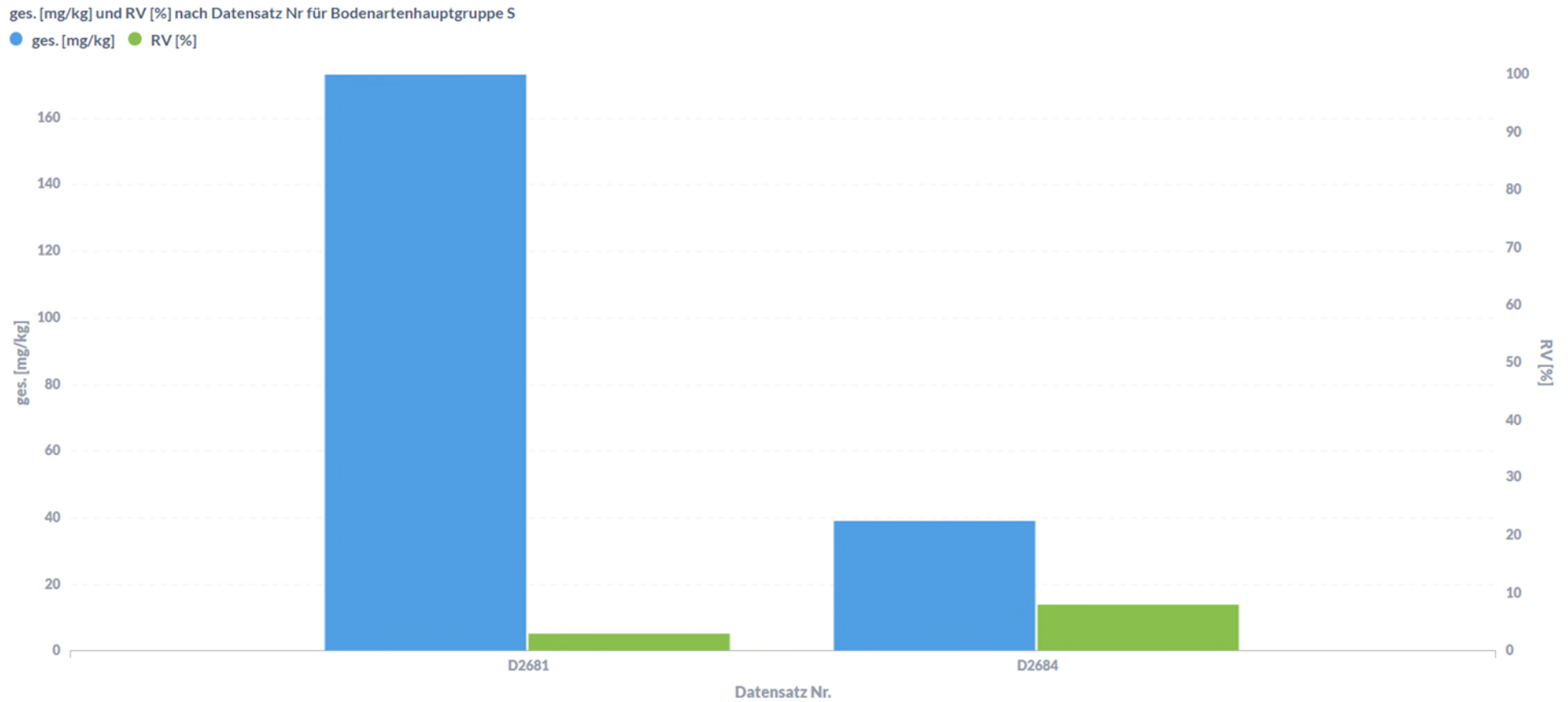
Abbildung 105: Hexyl – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Daten stammen nur von Sand, so dass sich keine Trendanalysen zwischen den Hauptbodenarten ableiten lassen.

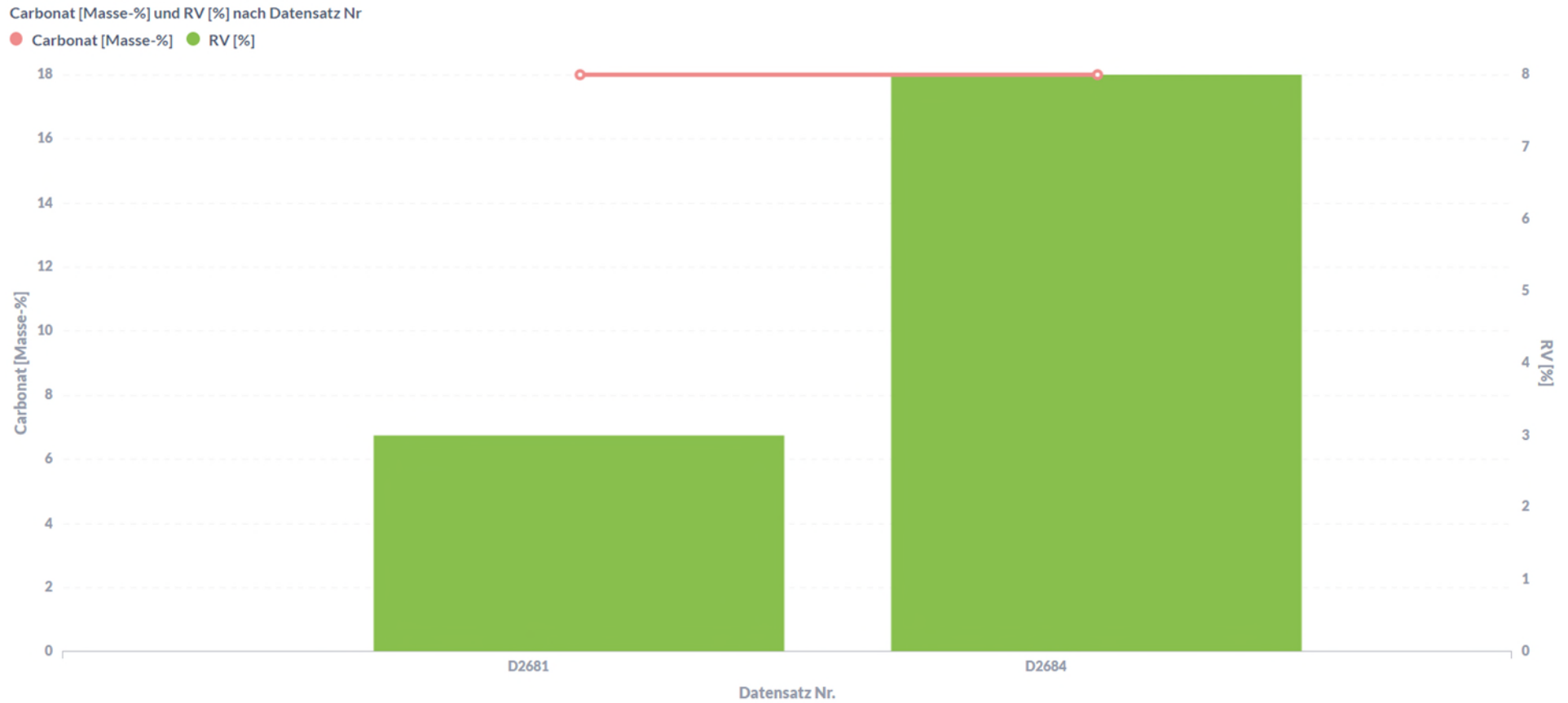
Abbildung 106: Hexyl – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Hauptbodenart der beiden Untersuchungen war Sand. Hier gilt dasselbe wie bei dem Feststoffgehalt allgemein.

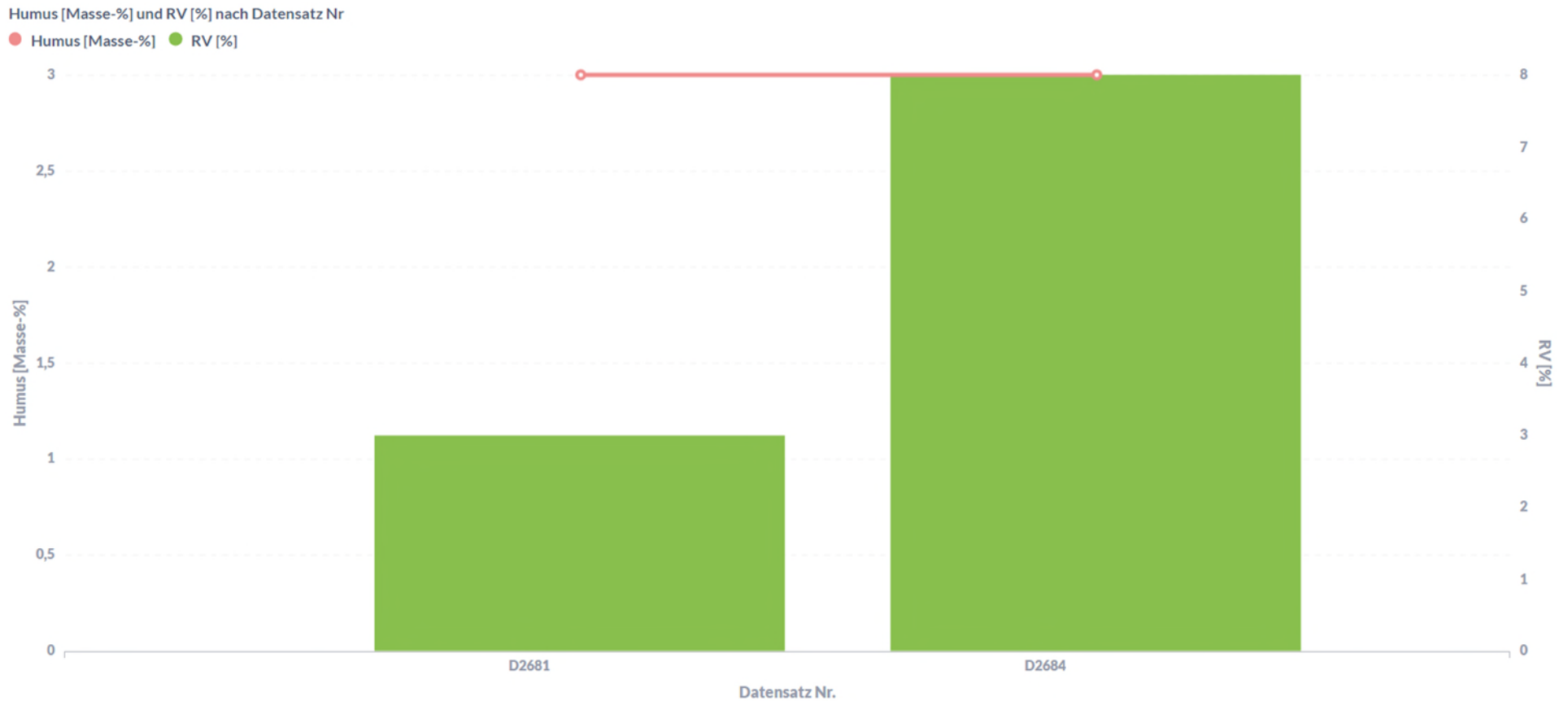
Abbildung 107: Hexyl – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei beiden Proben war auch der Carbonatgehalt gleich. Damit sind auch keine Aussagen zum Verhalten der Resorptionsverfügbarkeit von Hexyl möglich.

Abbildung 108: Hexyl – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



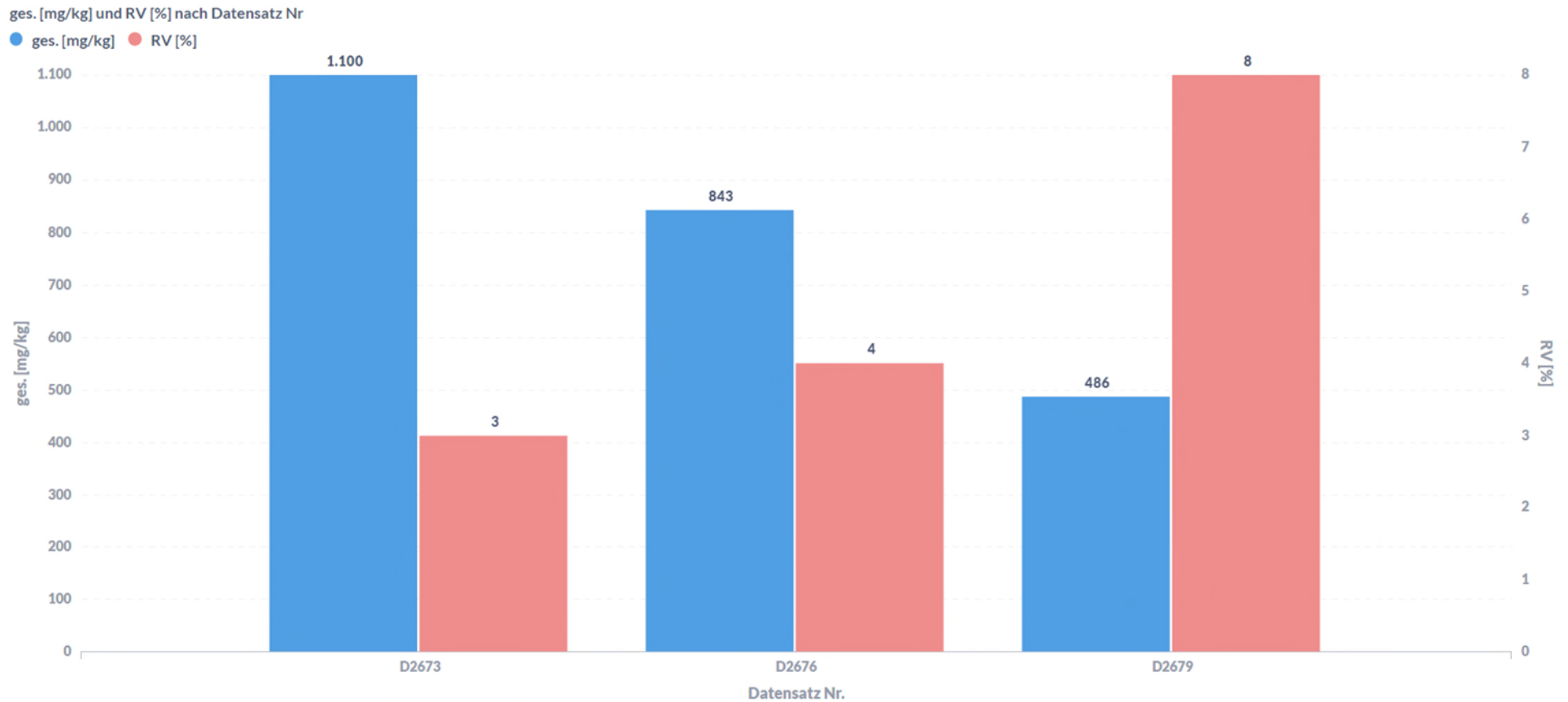
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Humusgehalt beider Proben unterscheidet sich auch nicht. Daher sind keine Aussagen zum Trendverhalten im Zusammenhang mit Humus möglich.

7.4.12 Hexogen

Die drei Untersuchungsergebnisse für Hexogen decken den oberen Bereich der Prüfwerte Boden-Mensch der BBodSchV ab.

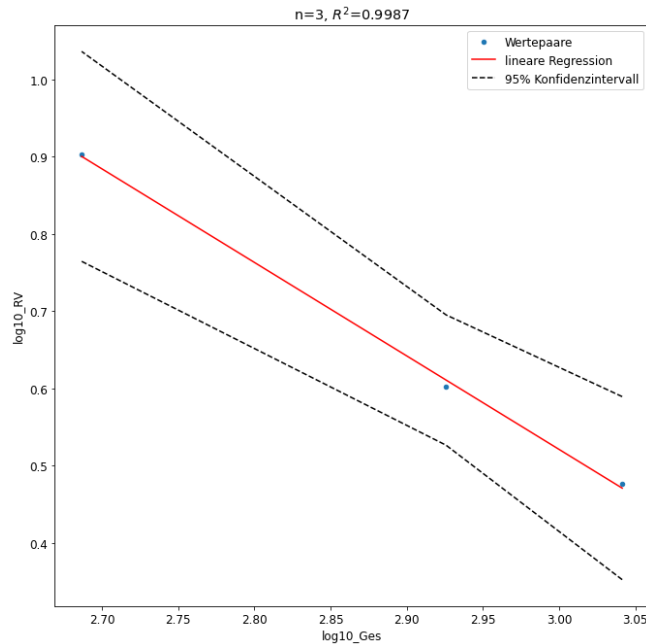
Abbildung 109: Hexogen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Ein Zusammenhang der Resorptionsverfügbarkeit von Hexogen mit dem Feststoffgehalt ist durchaus möglich. Mit sinkender Konzentration könnte die Resorptionsverfügbarkeit tendenziell zunehmen.

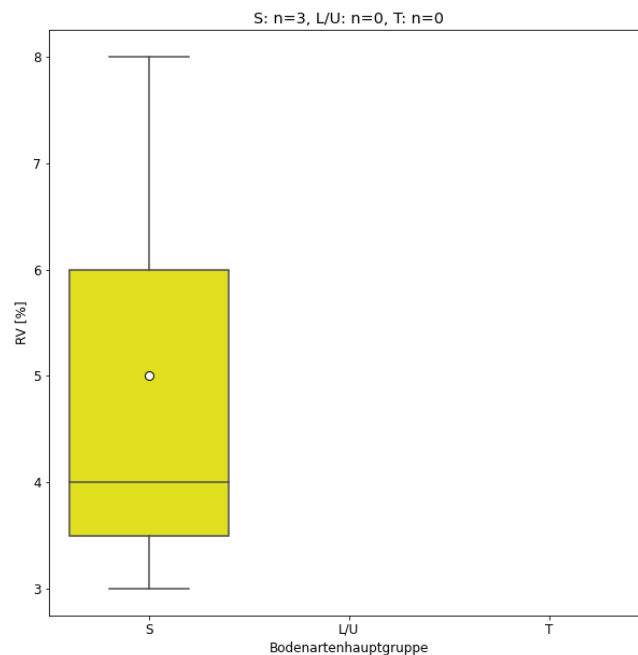
Abbildung 110: Hexogen – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die lineare Regression belegt zumindest den Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit mit einer sinkenden Feststoffkonzentration. Die drei Abnalsendaten liegen gut auf der Regressionsgeraden.

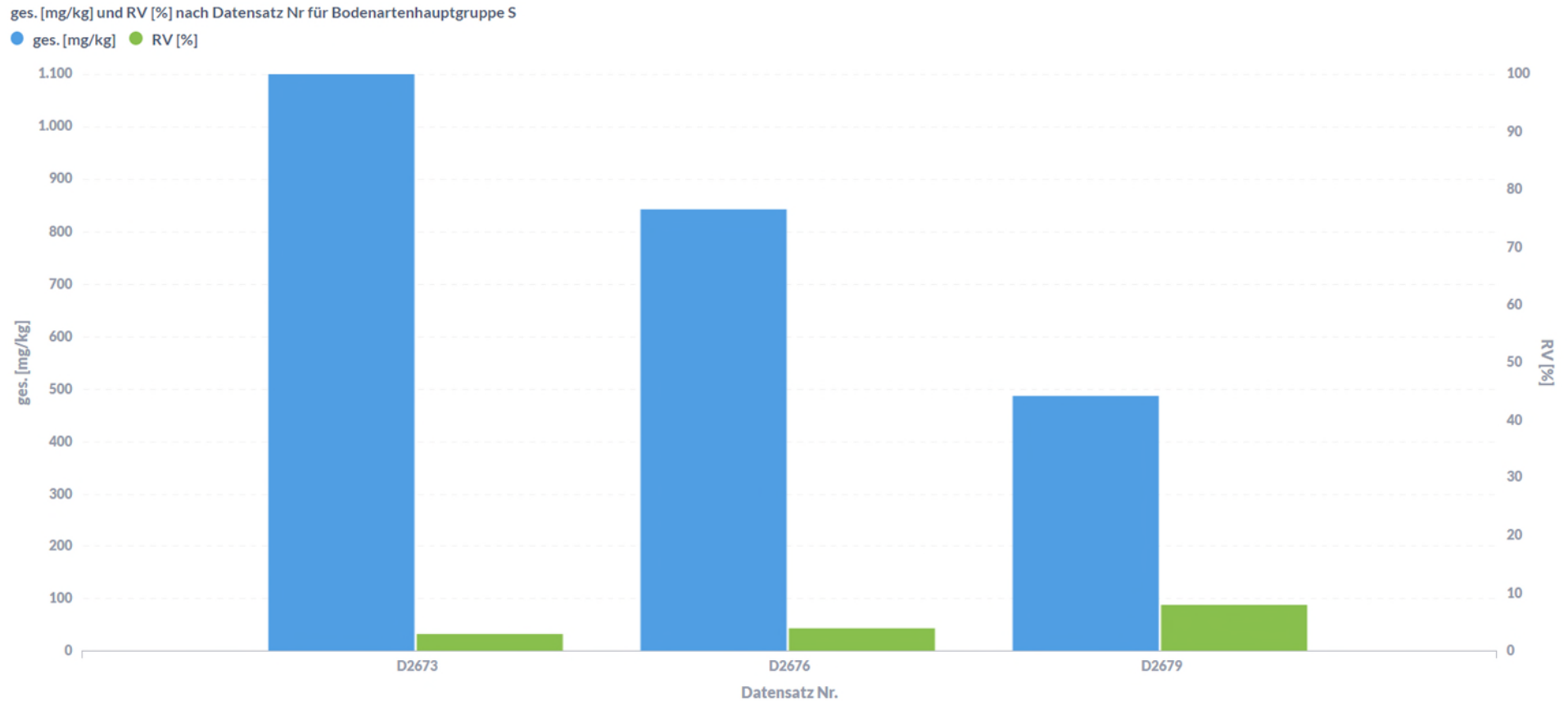
Abbildung 111: Hexogen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Es liegen nur Daten für Sand vor, so dass sich für die Bodenartenhauptgruppen keine Trends der Resorptionsverfügbarkeit ableiten lassen.

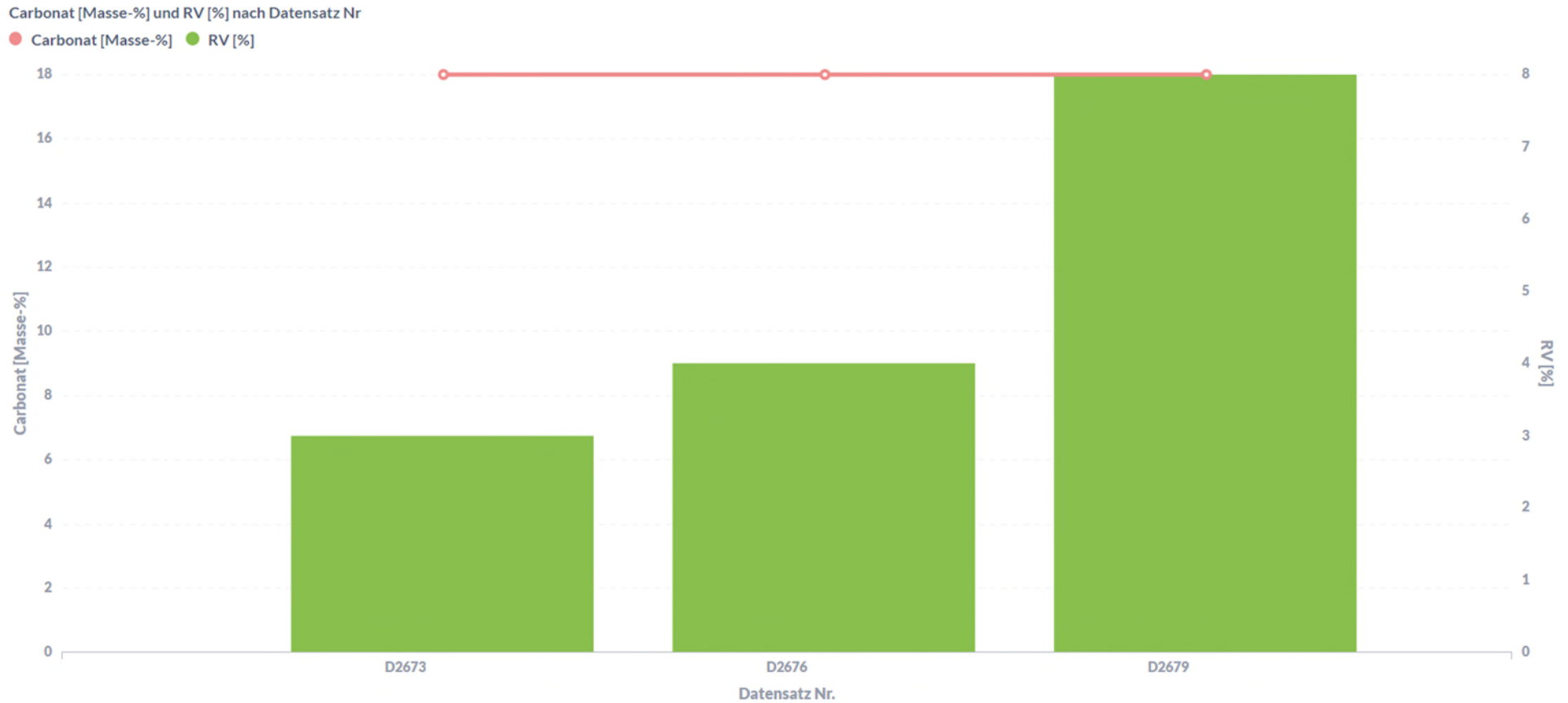
Abbildung 112: Hexogen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse stammen allein von der Hauptbodenart Sand. Hier ist für die Resorptionsverfügbarkeit eine Zunahme mit der Abnahme der Feststoffkonzentration von Hexogen feststellbar.

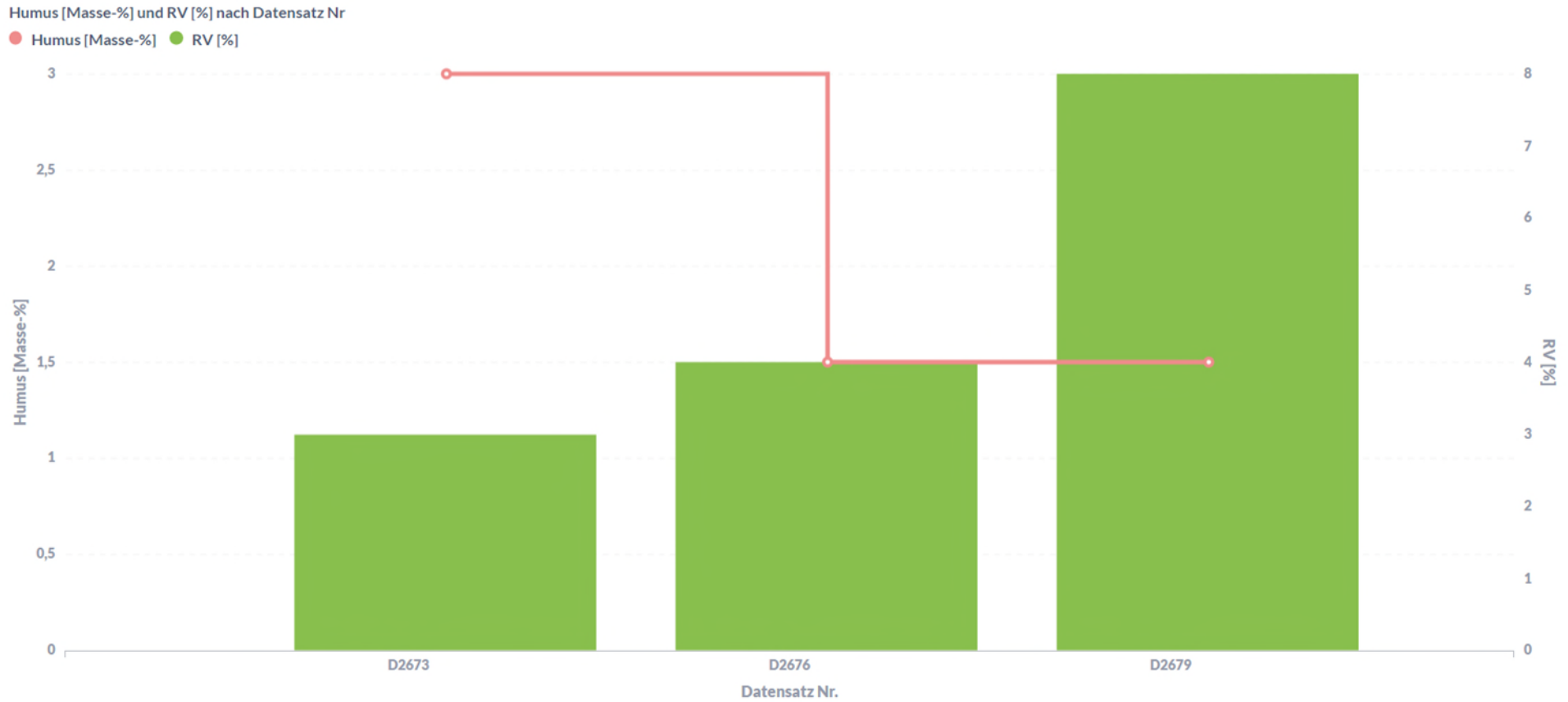
Abbildung 113: Hexogen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Beim Carbonatgehalt im Boden liegt für alle drei Proben nur ein Niveau vor. Somit sind keine Trends abschätzbar.

Abbildung 114: Hexogen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



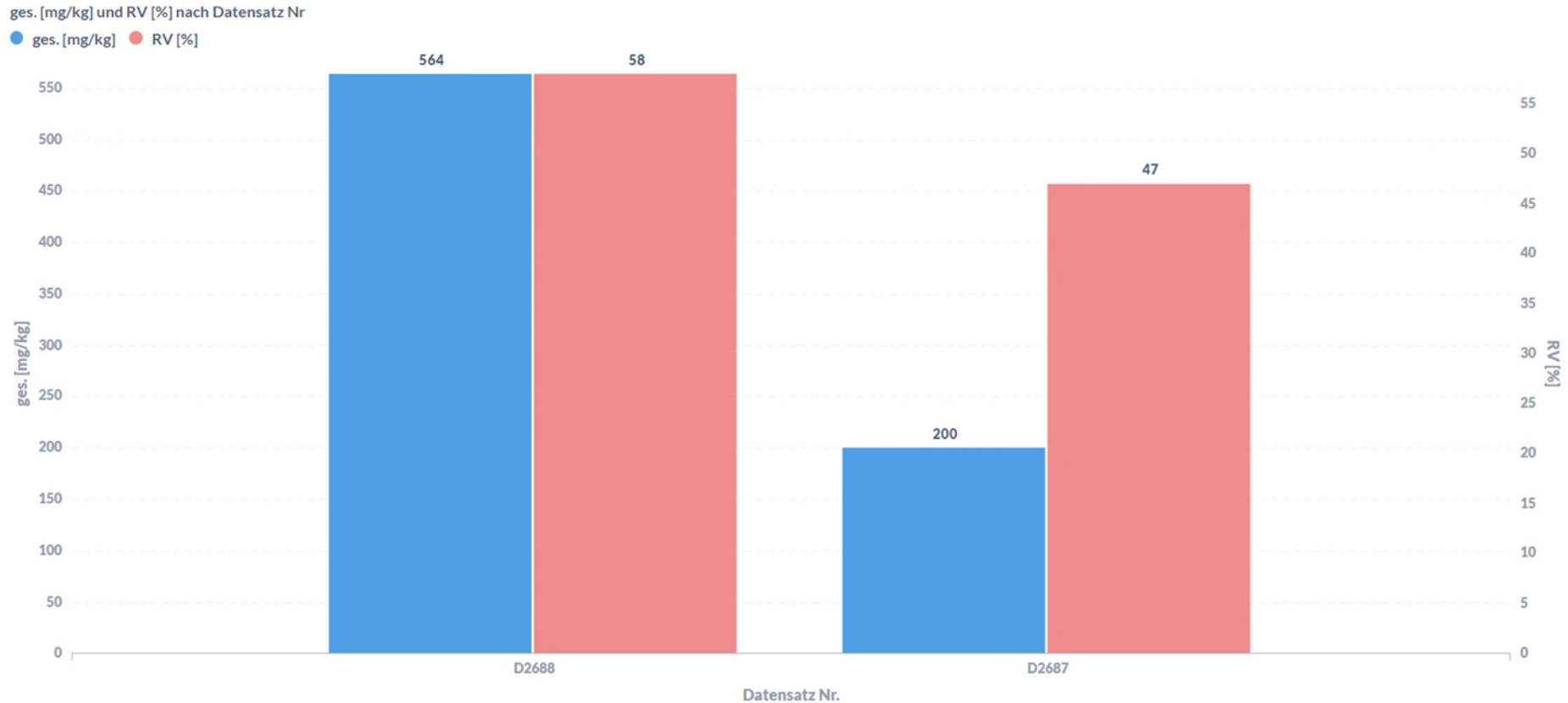
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Beim Humusgehalt ist anhand der Ergebnisse zu vermuten, dass die Resorptionsverfügbarkeit mit sinkendem Humusgehalt zunehmen könnte.

7.4.13 Nitropenta

Für Nitropenta stehen zwei Proben zur Bewertung zur Verfügung. Diese liegen im oberen Bereich der Prüfwerte Boden-Mensch der BBodSchV.

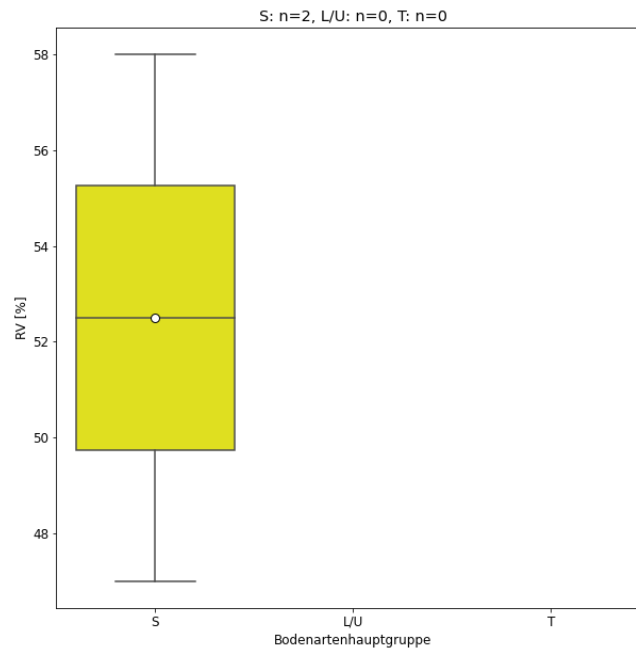
Abbildung 115: Nitropenta – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die beiden Ergebnisse zeigen bei einem niedrigeren Feststoffgehalt eine geringe Resorptionsverfügbarkeit. Vorbehaltlich weiterer Untersuchungen kann tendenziell die Verringerung der Resorptionsverfügbarkeit bei sinkenden Feststoffgehalten prognostiziert werden.

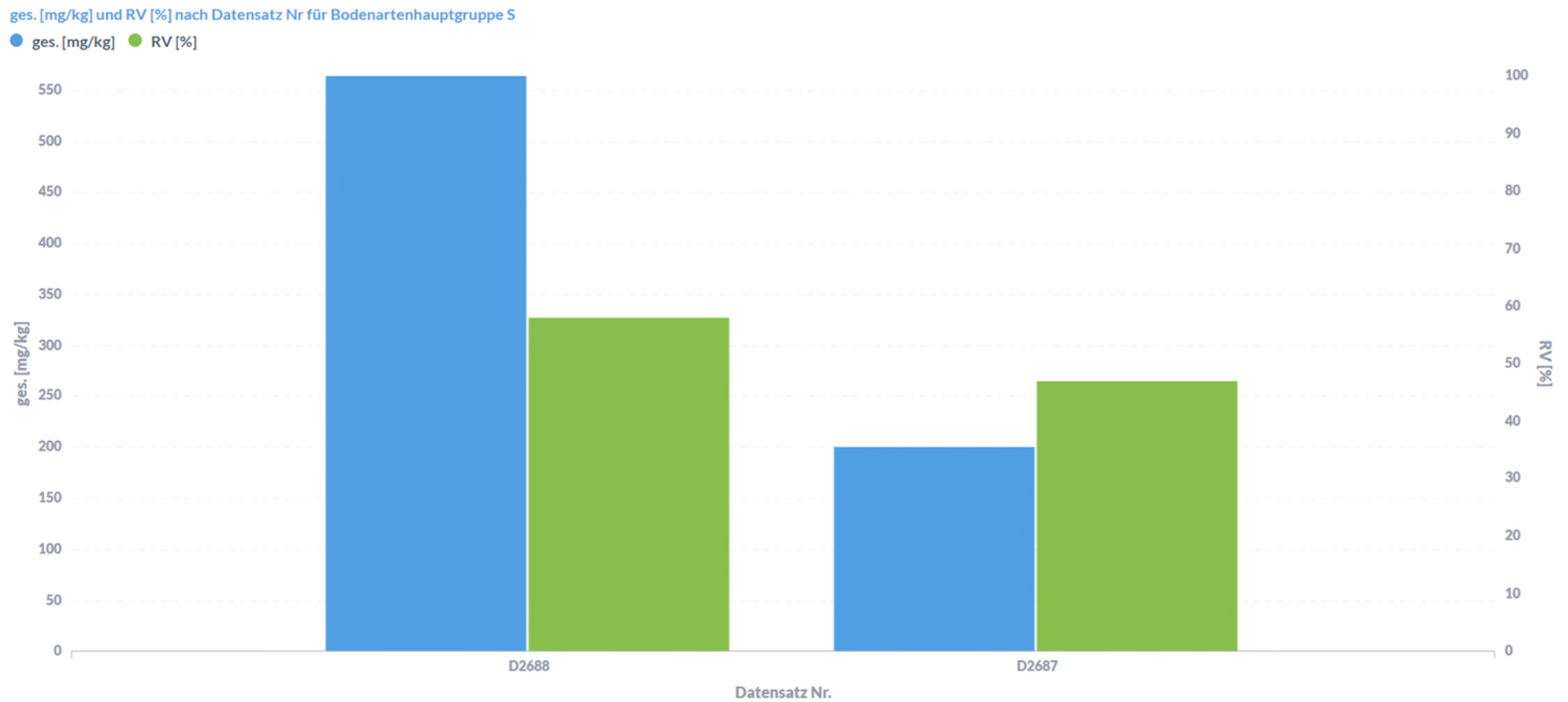
Abbildung 116: Nitropenta – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Es lassen sich keine Trends wegen der zu geringen Datenbasis ableiten.

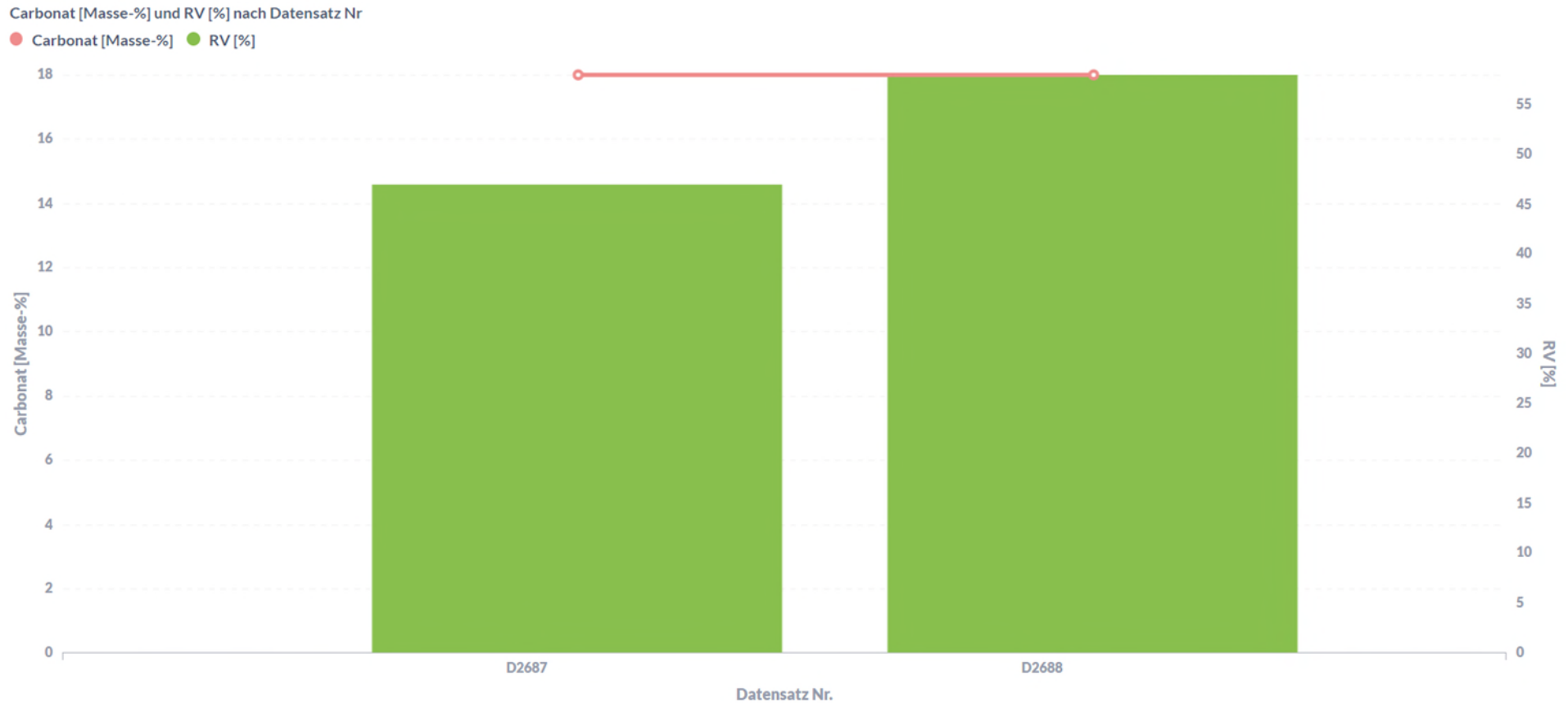
Abbildung 117: Nitropenta – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Beide Proben bestehen aus der Hauptbodenart Sand. Zu anderen Hauptbodenarten sind keine Aussagen möglich. Innerhalb der Bodenart Sand scheint mit sinkendem Feststoffgehalt auch die Resorptionsverfügbarkeit verringert.

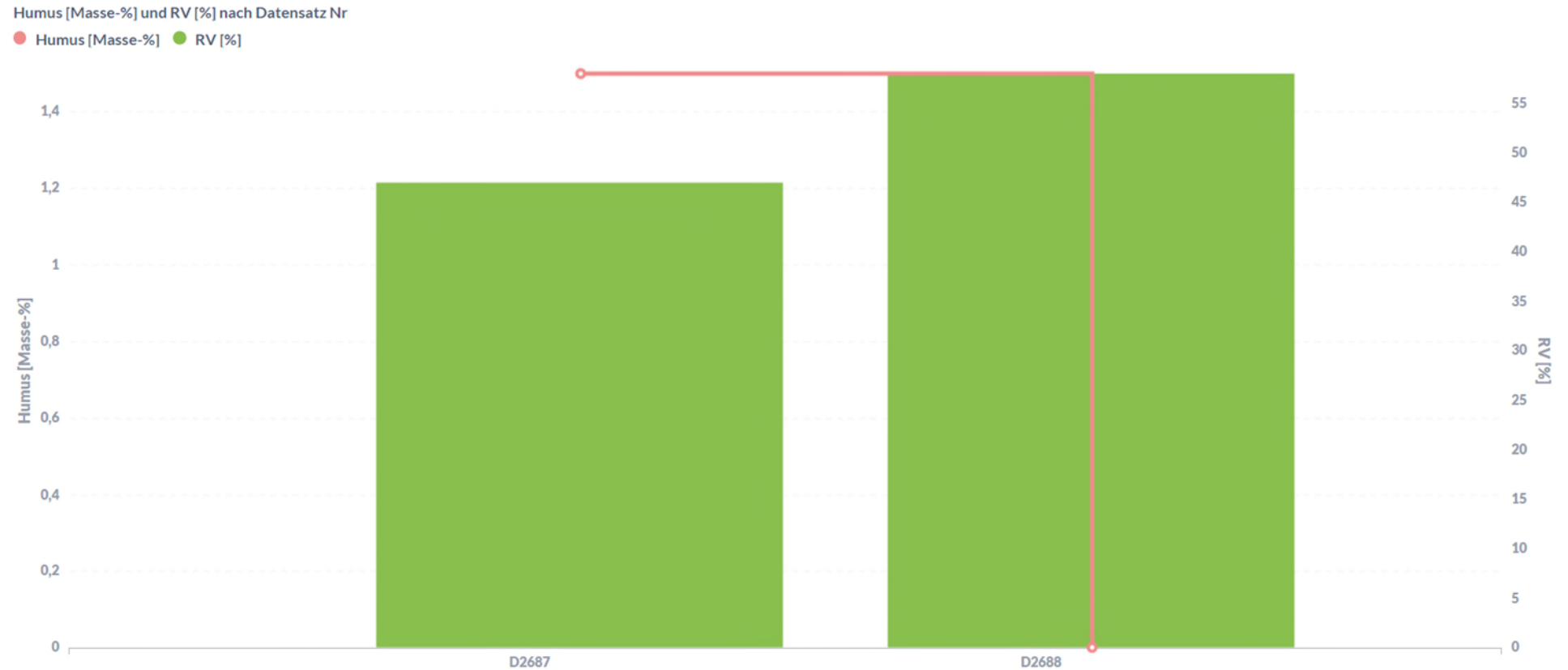
Abbildung 118: Nitropenta – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Für den Einfluss des Carbonatgehaltes auf die Resorptionsverfügbarkeit kann keine Aussage getroffen werden. Bei beiden Proben wurden identische Carbonatgehalte bestimmt.

Abbildung 119: Nitropenta – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



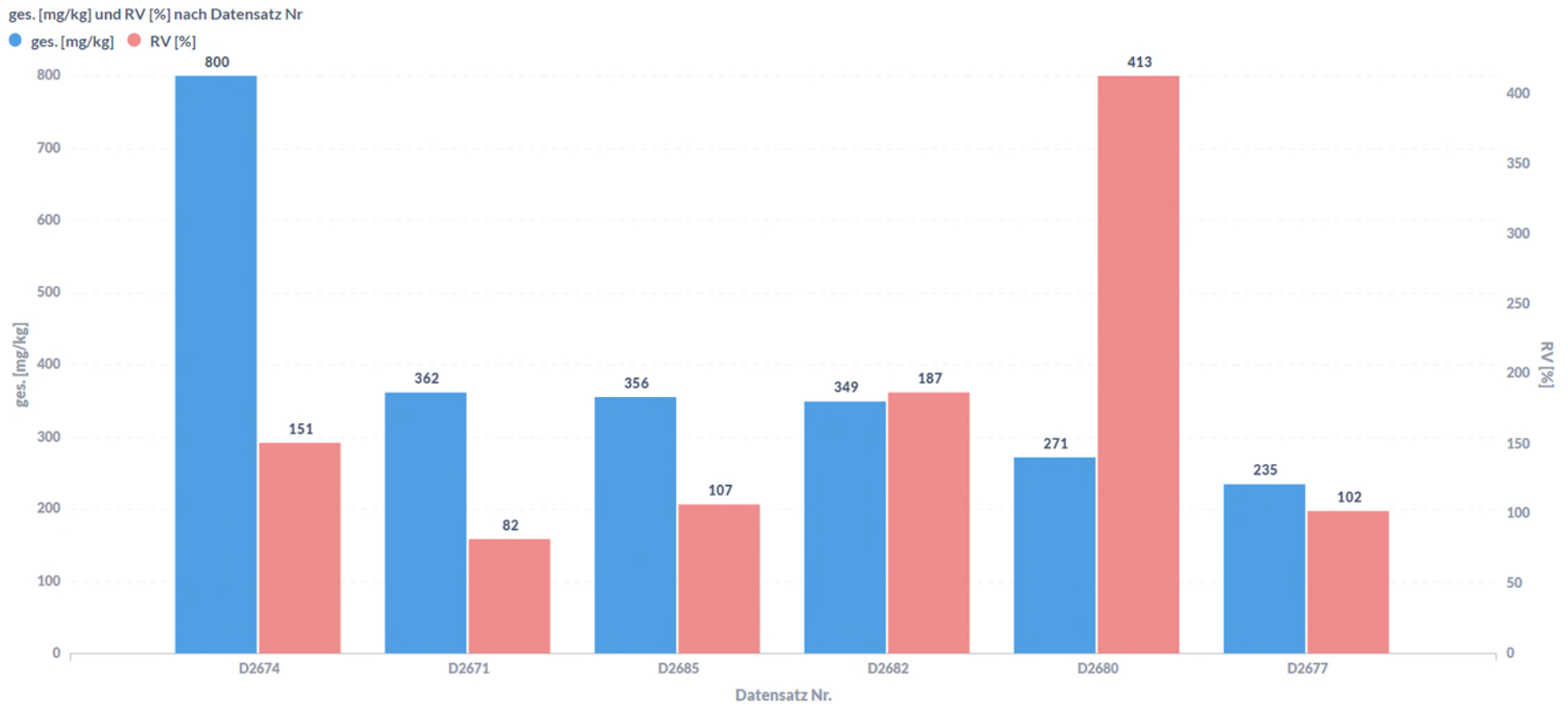
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die beiden Ergebnisse für Humus lassen die Theorie aufstellen, dass mit abnehmendem Humusgehalt die Resorptionsverfügbarkeit steigt.

7.4.14 TNT (2,4,6-Trinitrololuol)

Die vorliegenden TNT-Gehalte liegen oberhalb des Prüfwertes für Industrie- und Gewerbegrundstücke für den Pfad Boden-Mensch der BBodSchV.

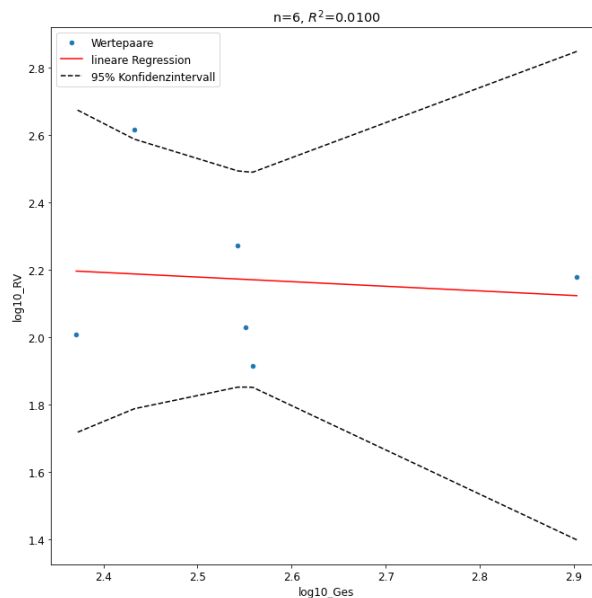
Abbildung 120: TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Es ist kein Zusammenhang der der Resorptionsverfügbarkeit mit dem Feststoffgehalt zu erkennen. Dabei ist zu beachten, dass fünf von sechs Werten über 100 % liegen, also unreal sind. Gleichwohl ist dies als Hinweis auf die extrem hohe Resorptionsverfügbarkeit von TNT zu werten. Entsprechendes ist bei dem Projekt und dem Ringversuch zur Robustheitsuntersuchung der Resorptionsverfügbarkeit [5] festgestellt worden.

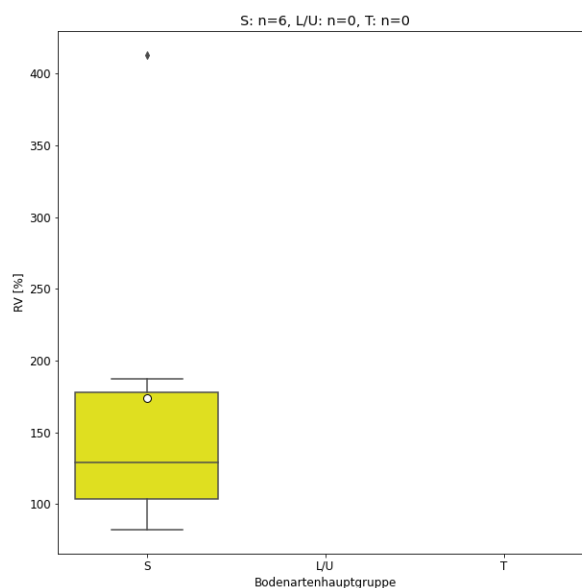
Abbildung 121: TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Zwischen dem feststoffgehalt und der Resorptionsverfügbarkeit ist kein deutlicher Trend erkennbar.

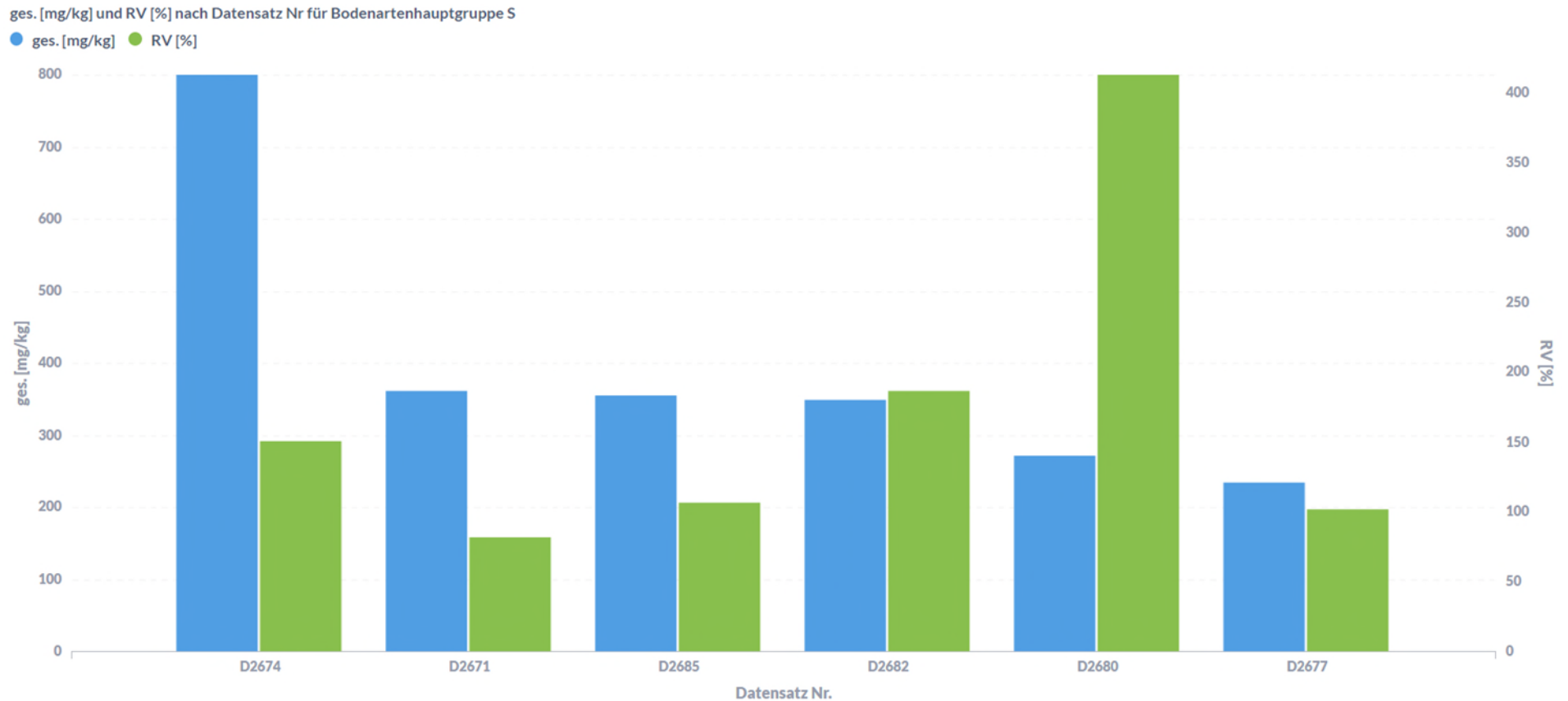
Abbildung 122: TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Da nur wenige Daten für eine einzige Hauptbodenart vorliegen können keine Trends zwischen der Bodenarten ermittelt werden.

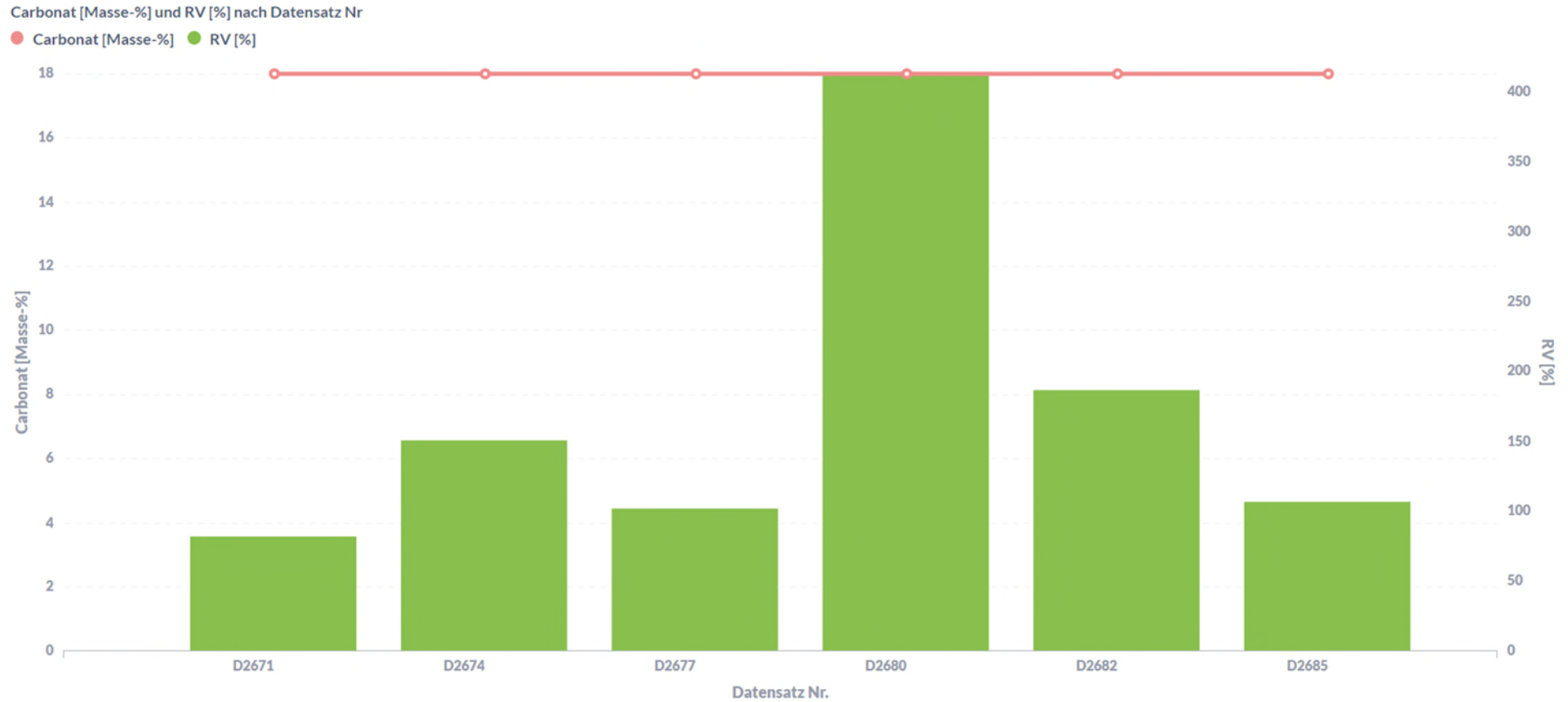
Abbildung 123: TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der Hauptbodenart Sand ist kein konzentrationsabhängiger Trend für die Resorptionsverfügbarkeit erkennbar.

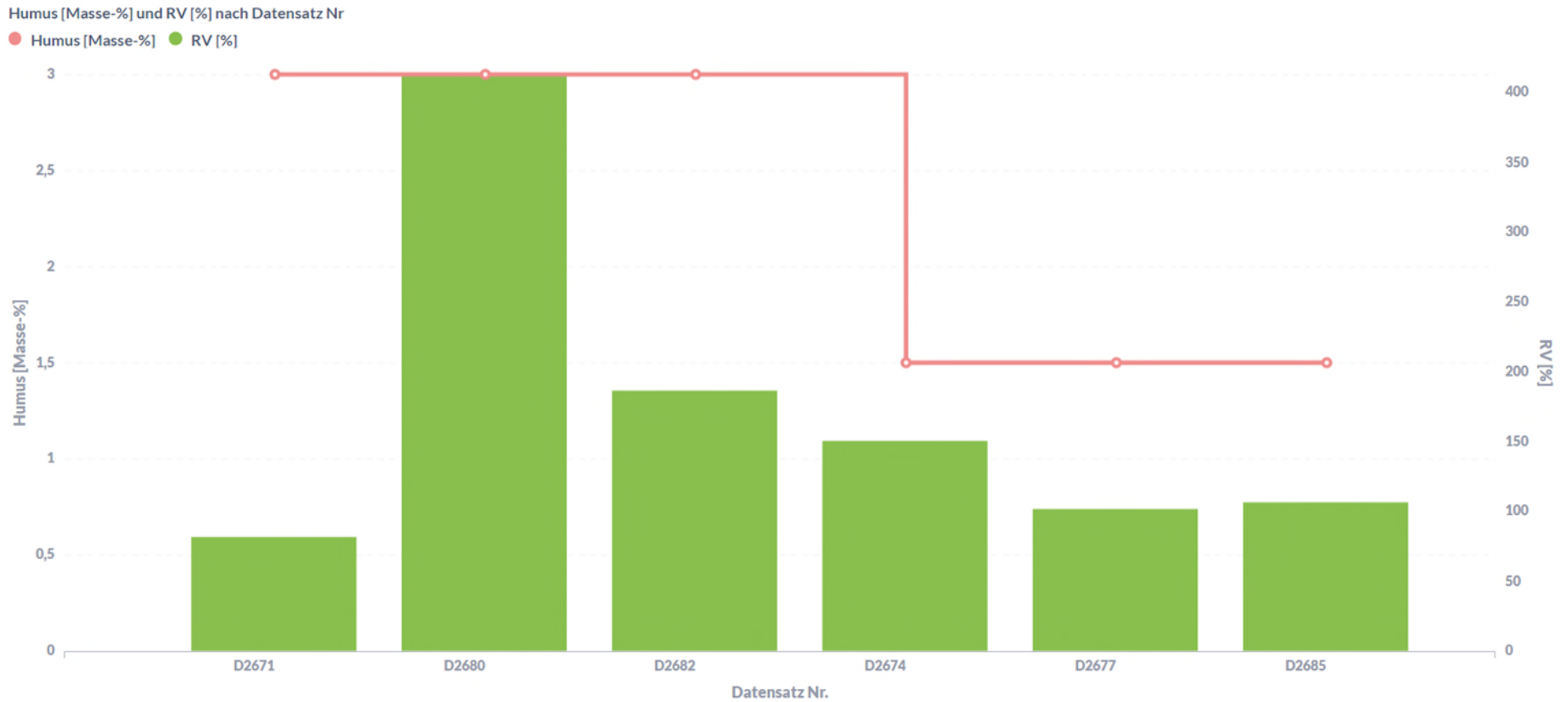
Abbildung 124: TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Da der Carbonatgehalt bei allen Proben gleich war, lässt sich kein Trend ableiten.

Abbildung 125: TNT (2,4,6-Trinitrololuol) – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



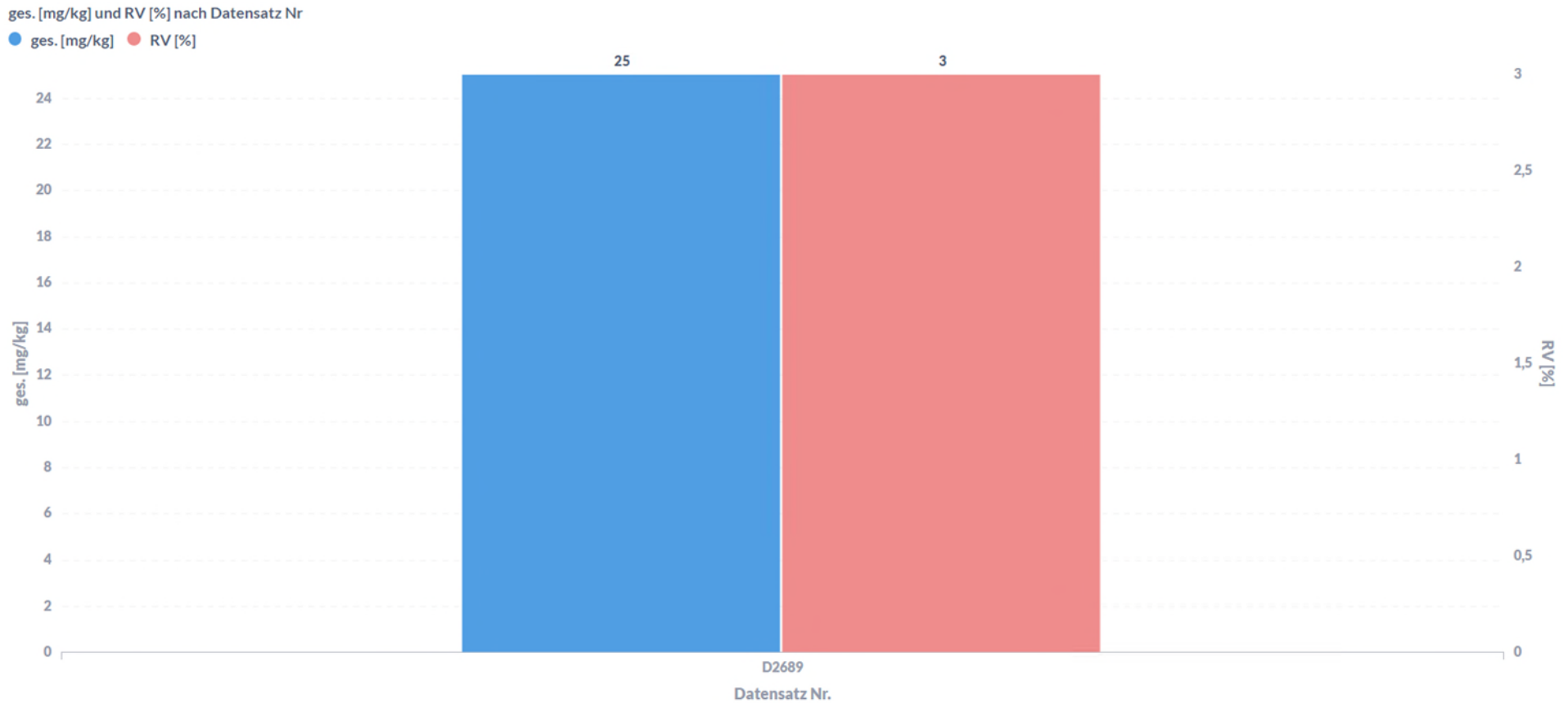
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Beim Humusgehalt wird der Trend erkennbar, dass die Resorptionsverfügbarkeit mit sinkendem Humusgehalt abnimmt.

7.4.15 Tetryl

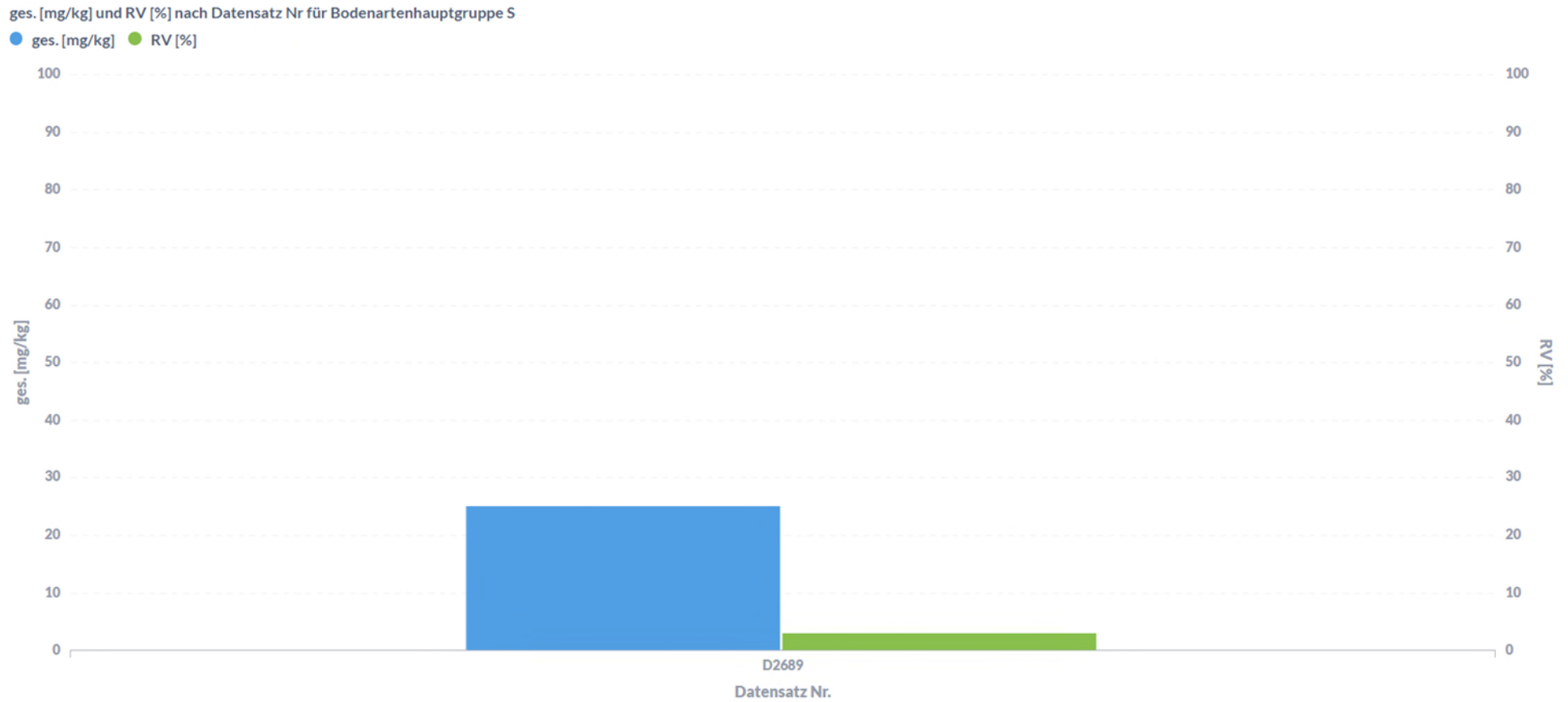
Für Tetryl liegt nur ein Datensatz vor. Damit können keine Trends abgeschätzt werden.

Abbildung 126: Tetryl – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



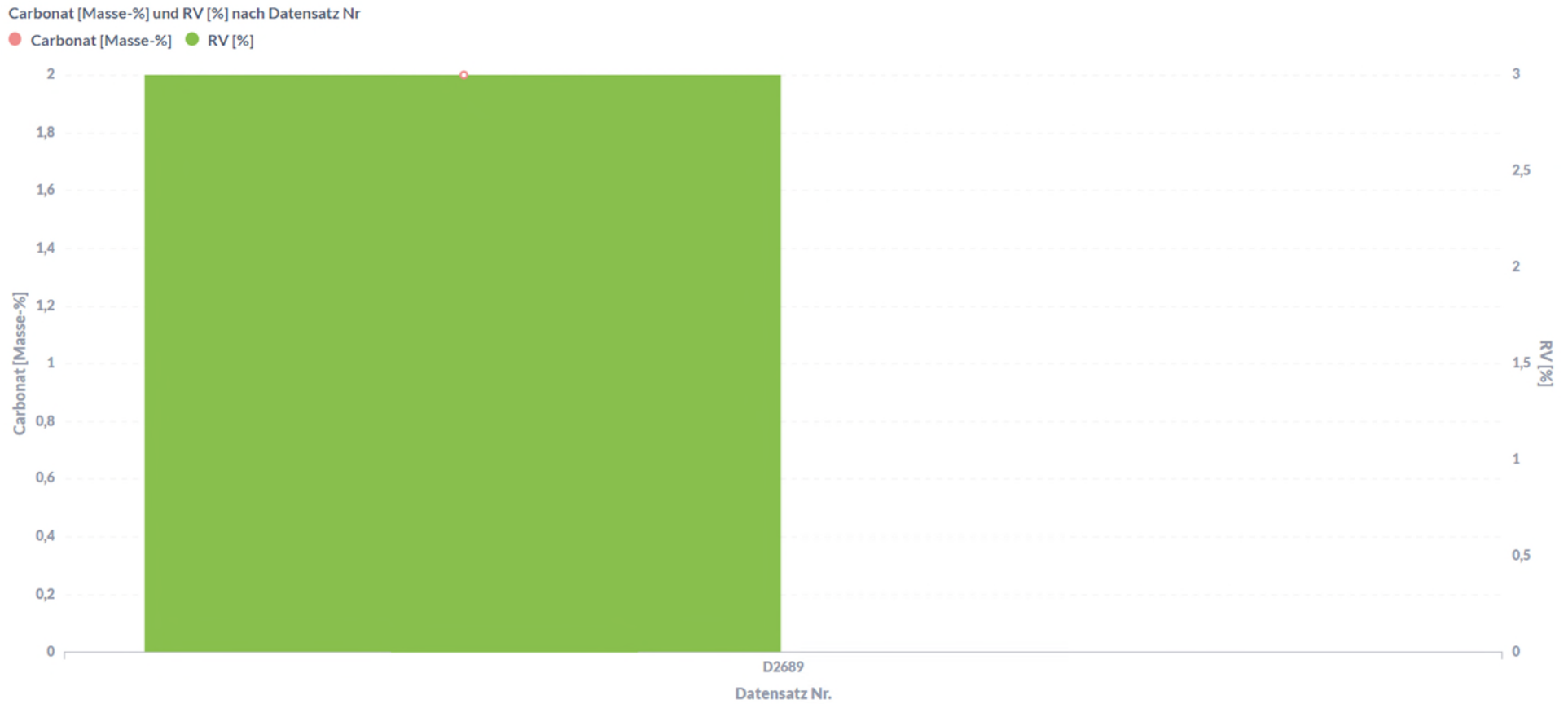
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 127: Tetryl – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



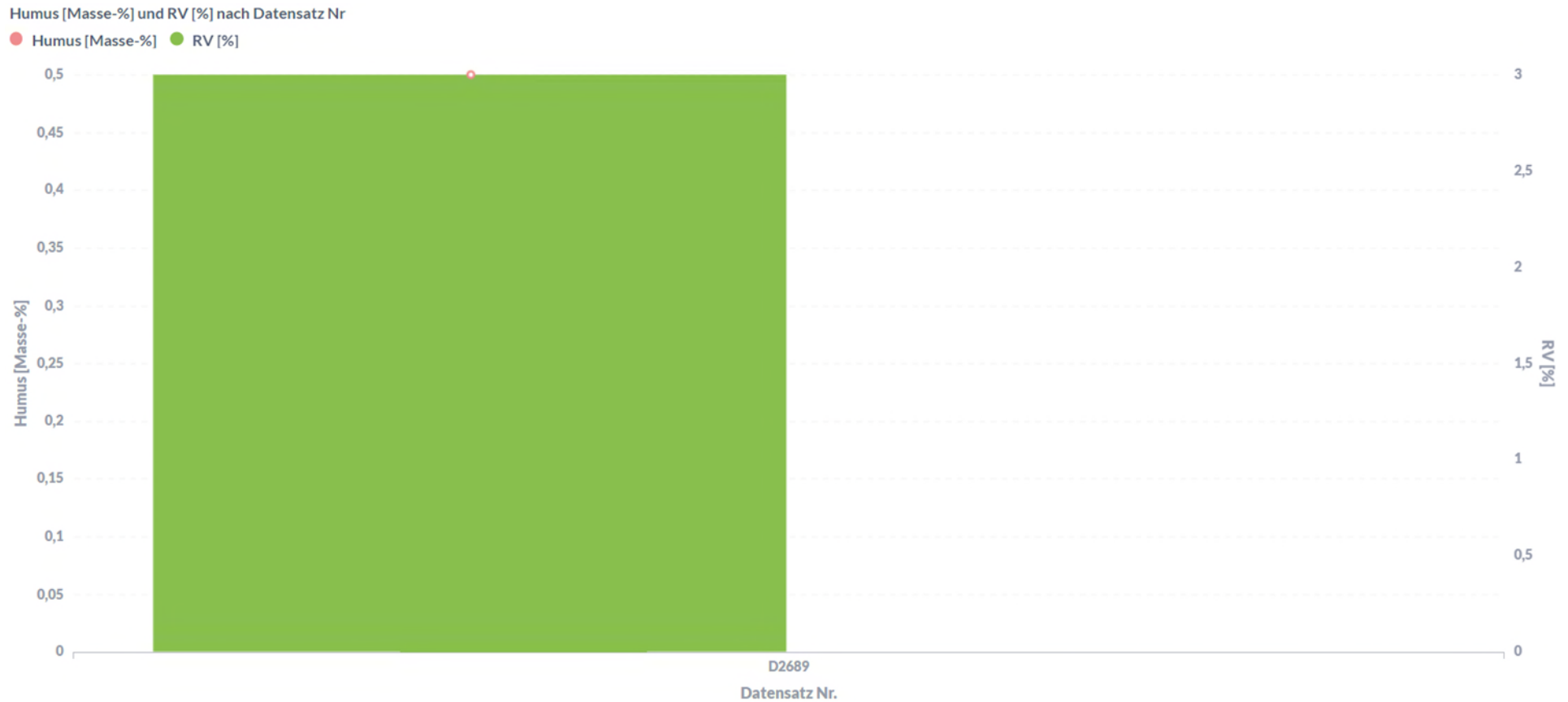
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 128: Tetryl – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 129: Tetryl – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend

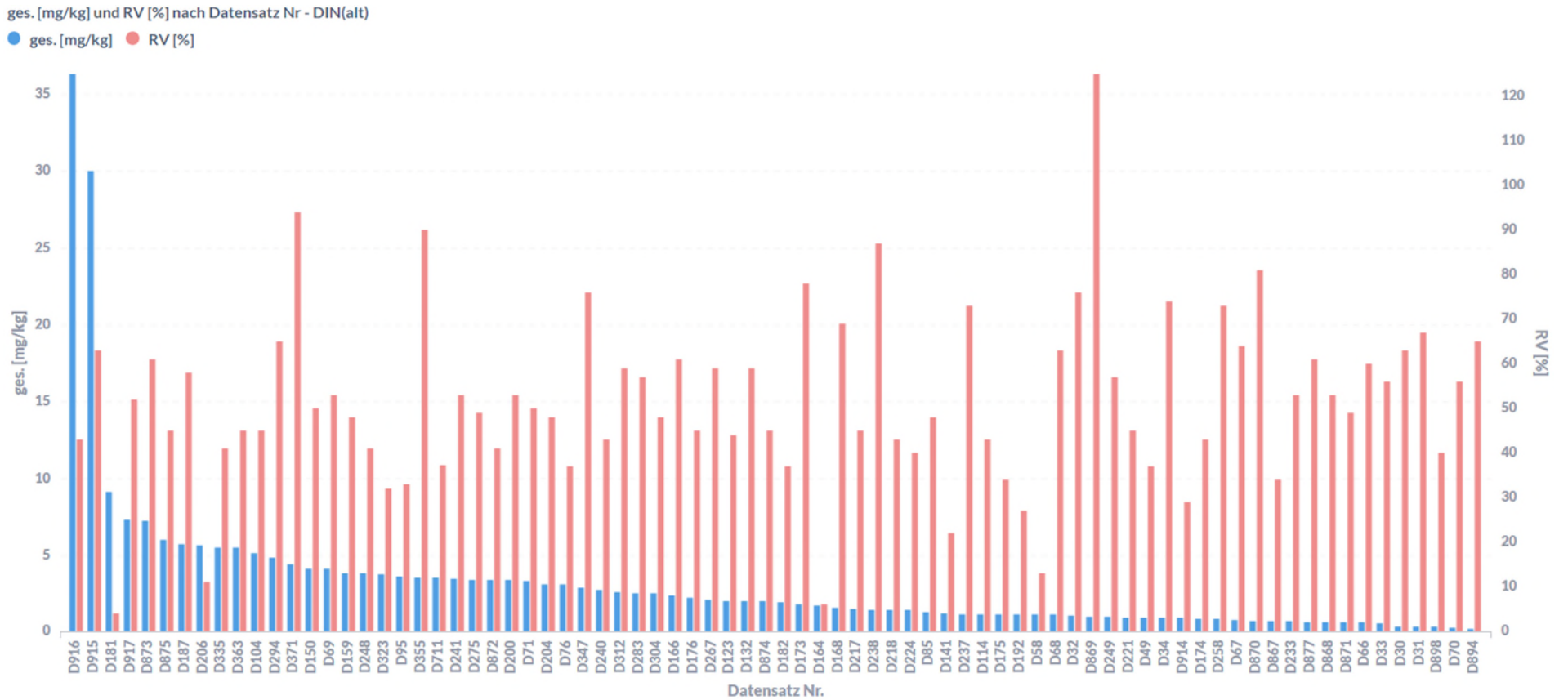


Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

7.4.16 Benzo[a]pyren

Die Feststoffgehalte der Proben decken die Prüfwerte für den Pfad Boden-Mensch der BBodSchV ab. Dabei stehen Daten bis zur 7-fachen Überschreitung des Prüfwertes für Industrie- und Gewerbegrundstücke zur Verfügung. Die Daten reichen bei der alten und neuen DIN-Methode aus, hinreichend belastbare Feststellungen zu treffen. Das gilt für alle untersuchten PAK im Folgenden.

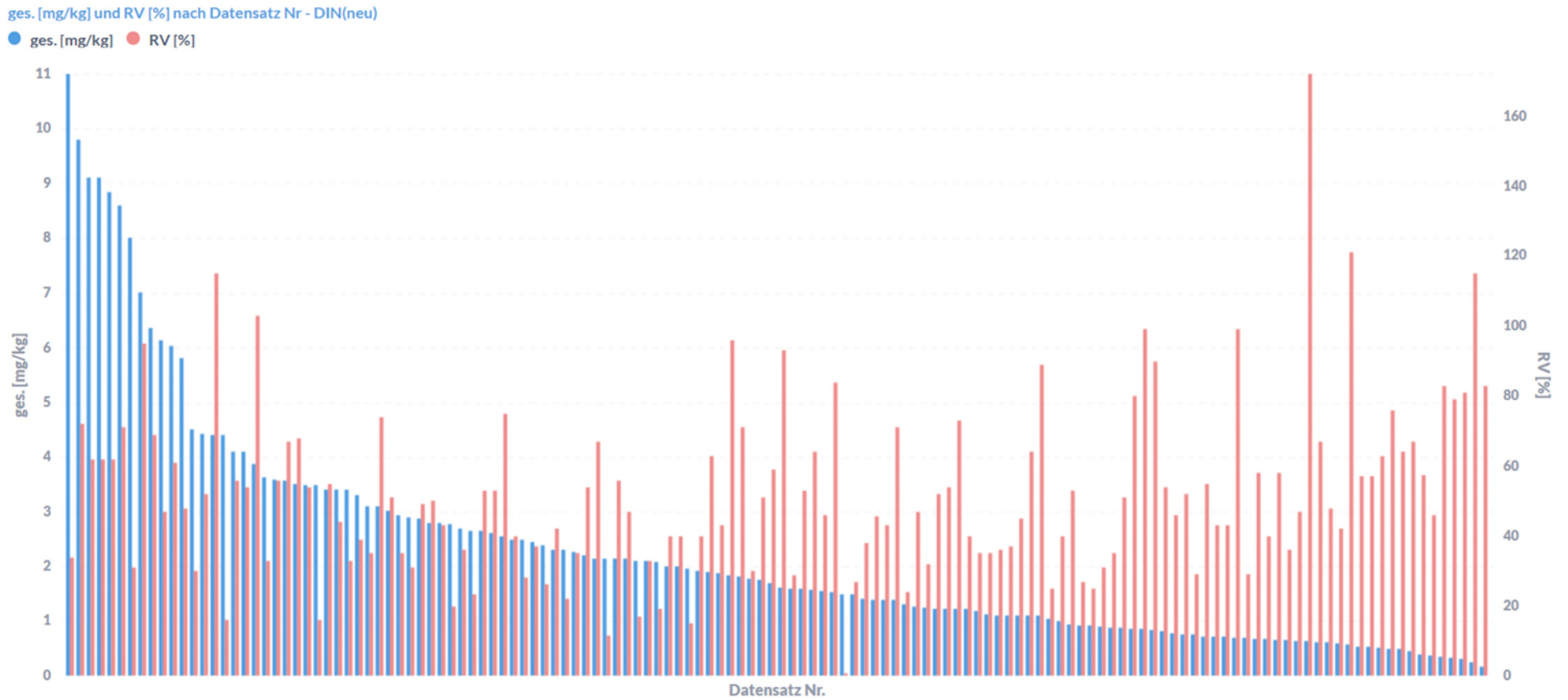
Abbildung 130: Benzo[a]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Untersuchungsergebnisse der alten DIN für die Resorptionsverfügbarkeit lassen im Säulendiagrammen keine deutlichen Trends im Zusammenhang mit dem Feststoffgehalt erkennen. Es gibt aber über die gesamte Bandbreite große Schwankungen und viele Ausreißer, teilweise über 100 %.

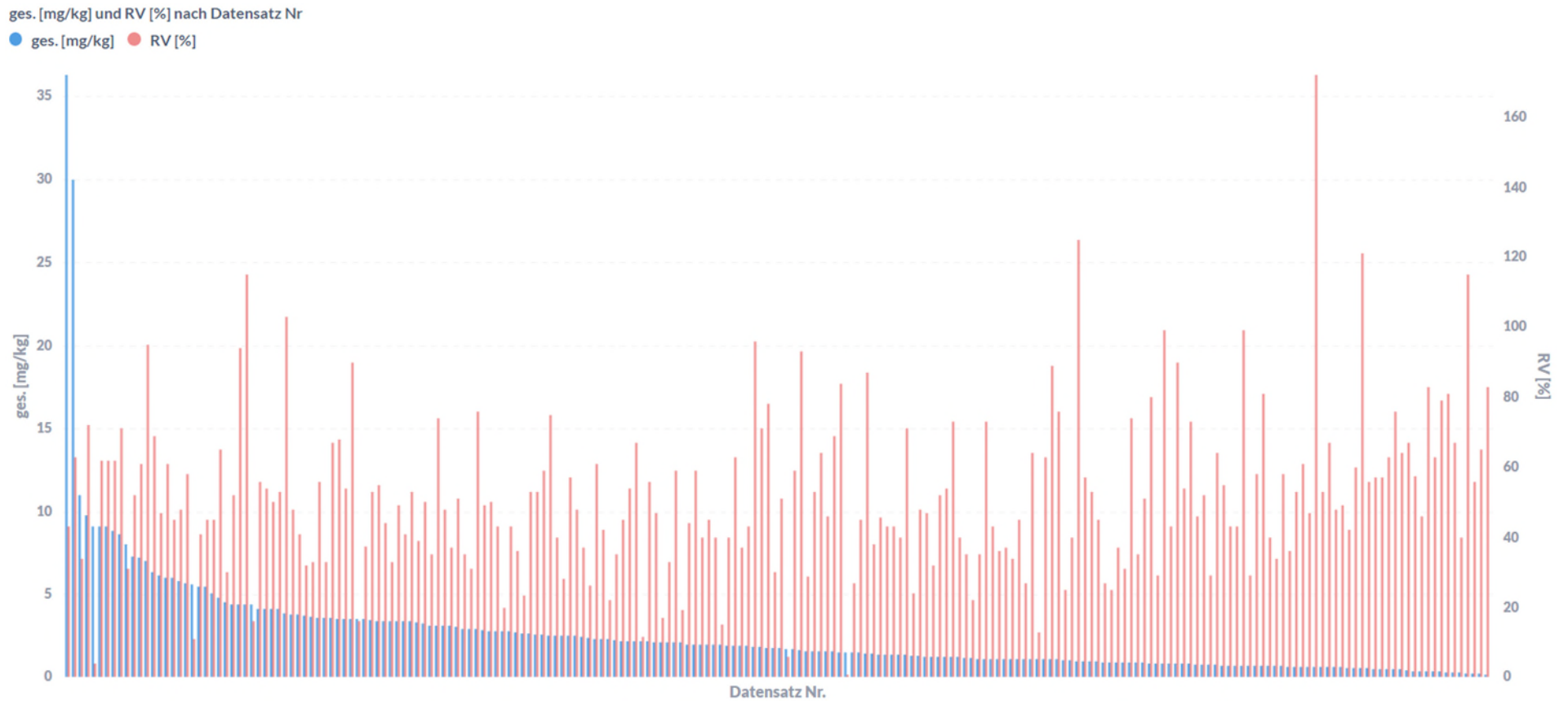
Abbildung 131: Benzo[a]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Auch nach der neuen Normmethode sind die Schwankungen und zahlreiche Ausreißer festzustellen. Ein Trend im Zusammenhang mit dem Feststoffgehalt ist kaum erkennbar. Die Resorptionsverfügbarkeit steigt mit abnehmendem Feststoffgehalt geringfügig.

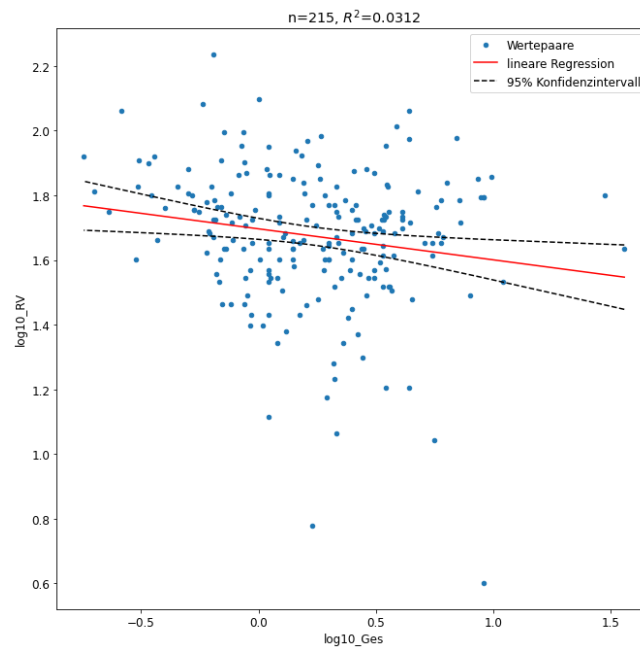
Abbildung 132: Benzo[a]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der gemeinsamen Darstellung DIN alt und neu ergeben sich keine weiteren Erkenntnisse. Nachfolgende Abbildung bestätigt dies.

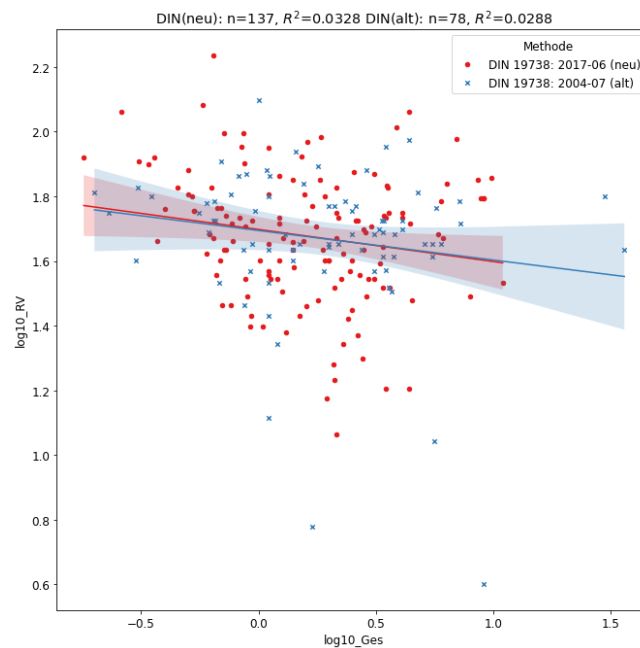
Abbildung 133: Benzo[a]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die lineare Regression verdeutlicht die Vermutung, dass die Resorptionsverfügbarkeit mit sinkender Feststoffkonzentration geringfügig sinkt.

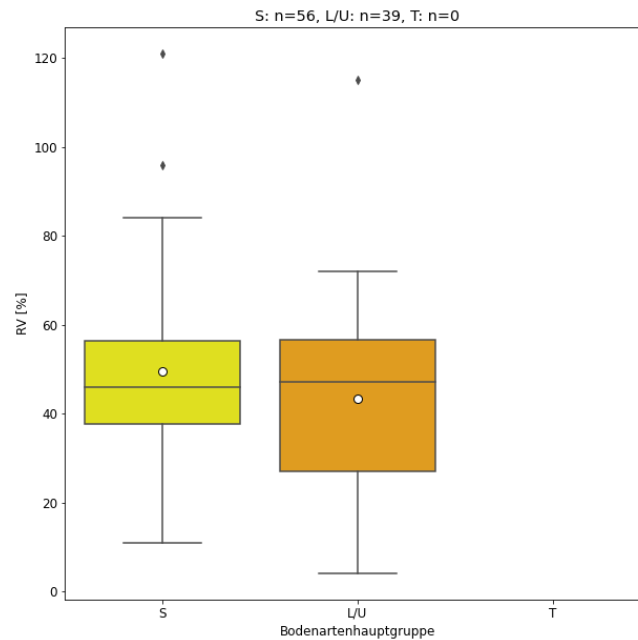
Abbildung 134: Benzo[a]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Es liegen die linearen Regressionen der Daten der alten und der aktuellen Norm fast deckungsgleich übereinander. Das zeigt, dass die Verfahren gut vergleichbare Ergebnisse, leider aber mit einer sehr hohen Streuung erreichen.

Abbildung 135: Benzo[a]pyren – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



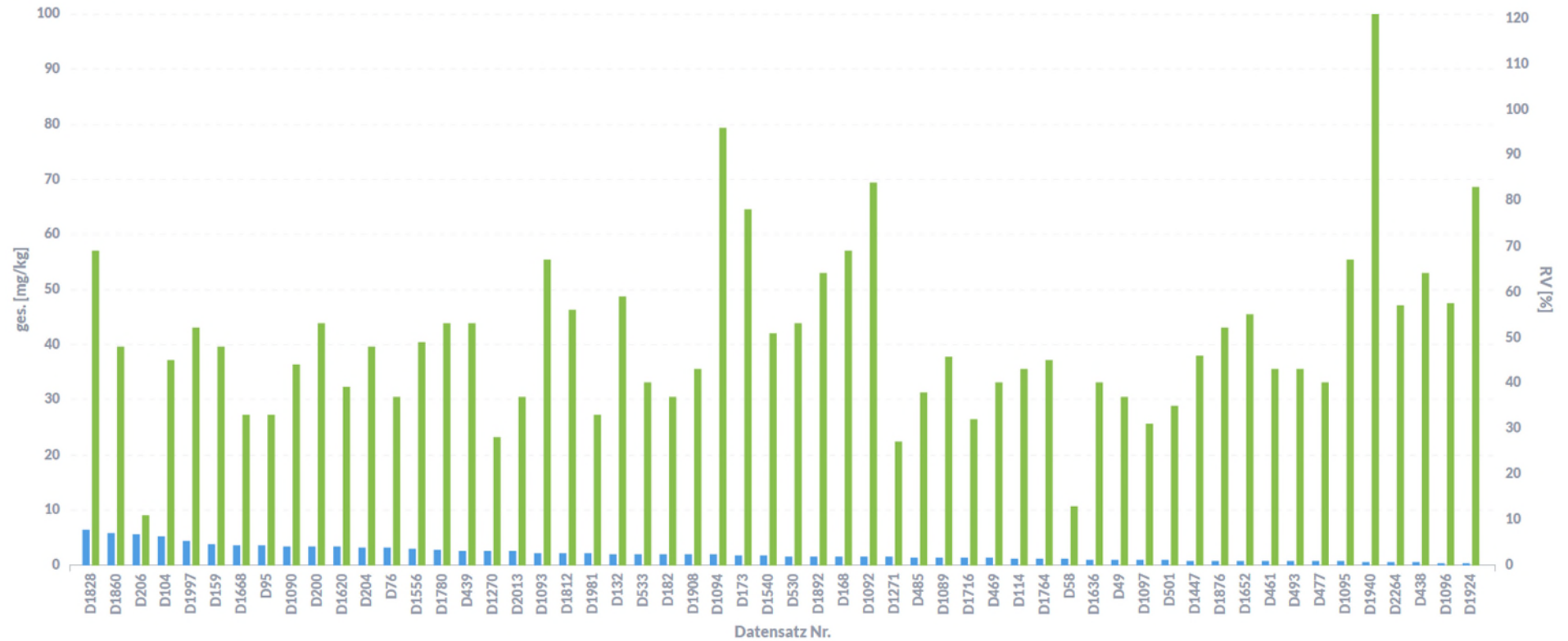
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Zwischen den Hauptbodenartenhauptgruppen ist die Resorptionsverfügbarkeit im arithmetischen Mittel bei Lehm/Schluff etwas geringer als bei Sand. Die Werte streuen auch weiter nach Unten, wobei der Median auf gleichem Niveau liegt.

Abbildung 136: Benzo[a]pyren – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte

ges. [mg/kg] und RV [%] nach Datensatz Nr für Bodenartenhauptgruppe S

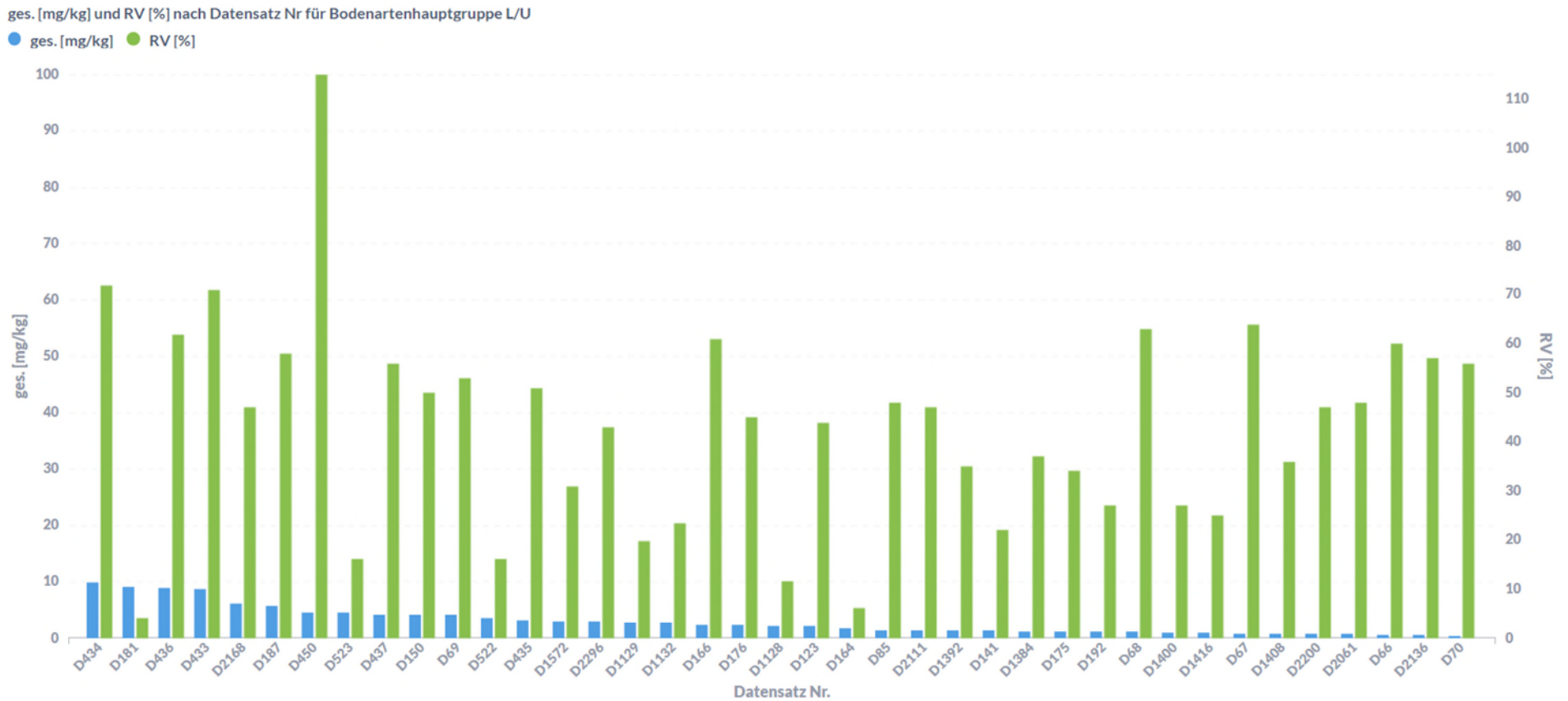
● ges. [mg/kg] ● RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der Hauptbodengruppe Sand treten diese Schwankungen der Resorptionsverfügbarkeit ohne deutlichen Zusammenhang mit dem Feststoffgehalt auch auf.

Abbildung 137: Benzo[a]pyren – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Lehm und Schluff ist ebenfalls kein deutlicher Trend erkennbar.

Abbildung 138: Benzo[a]pyren – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend

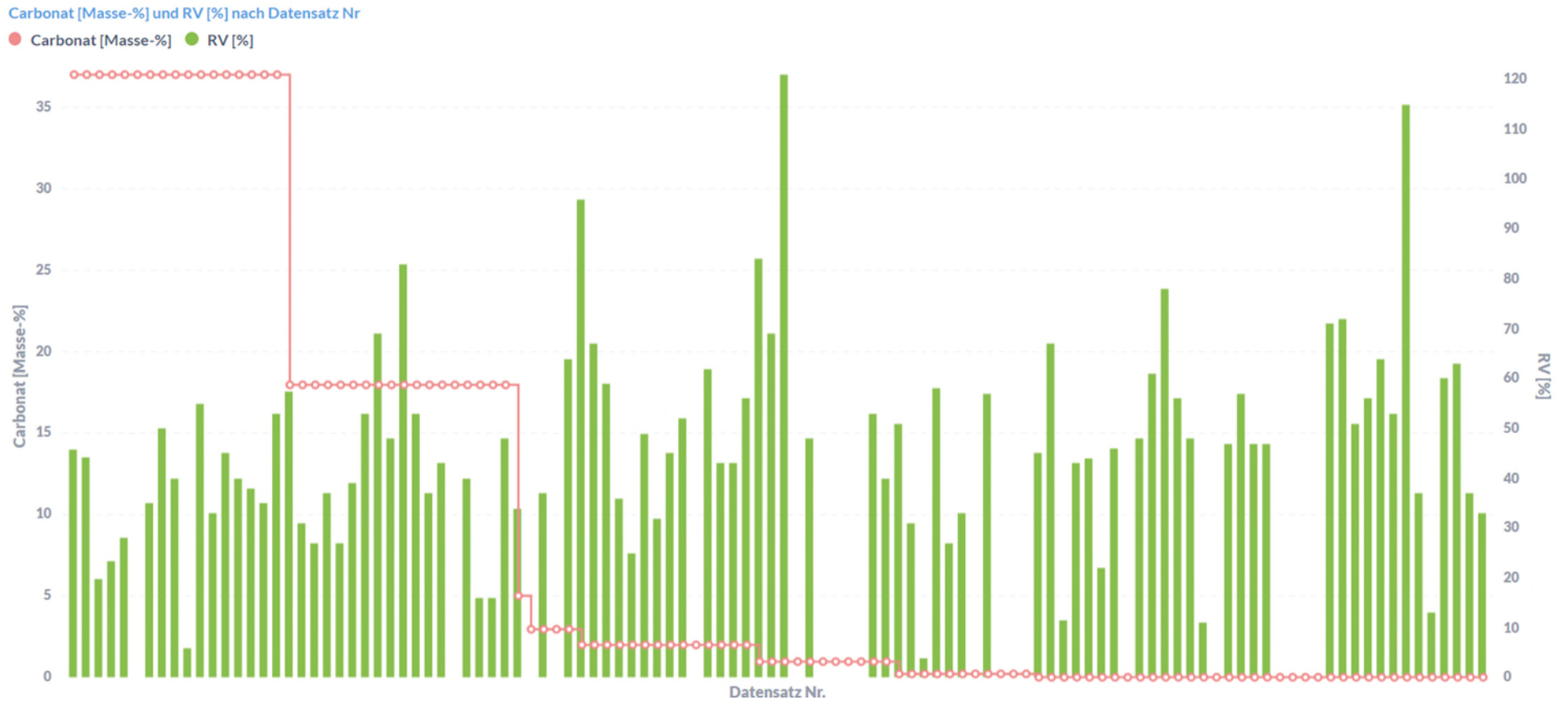
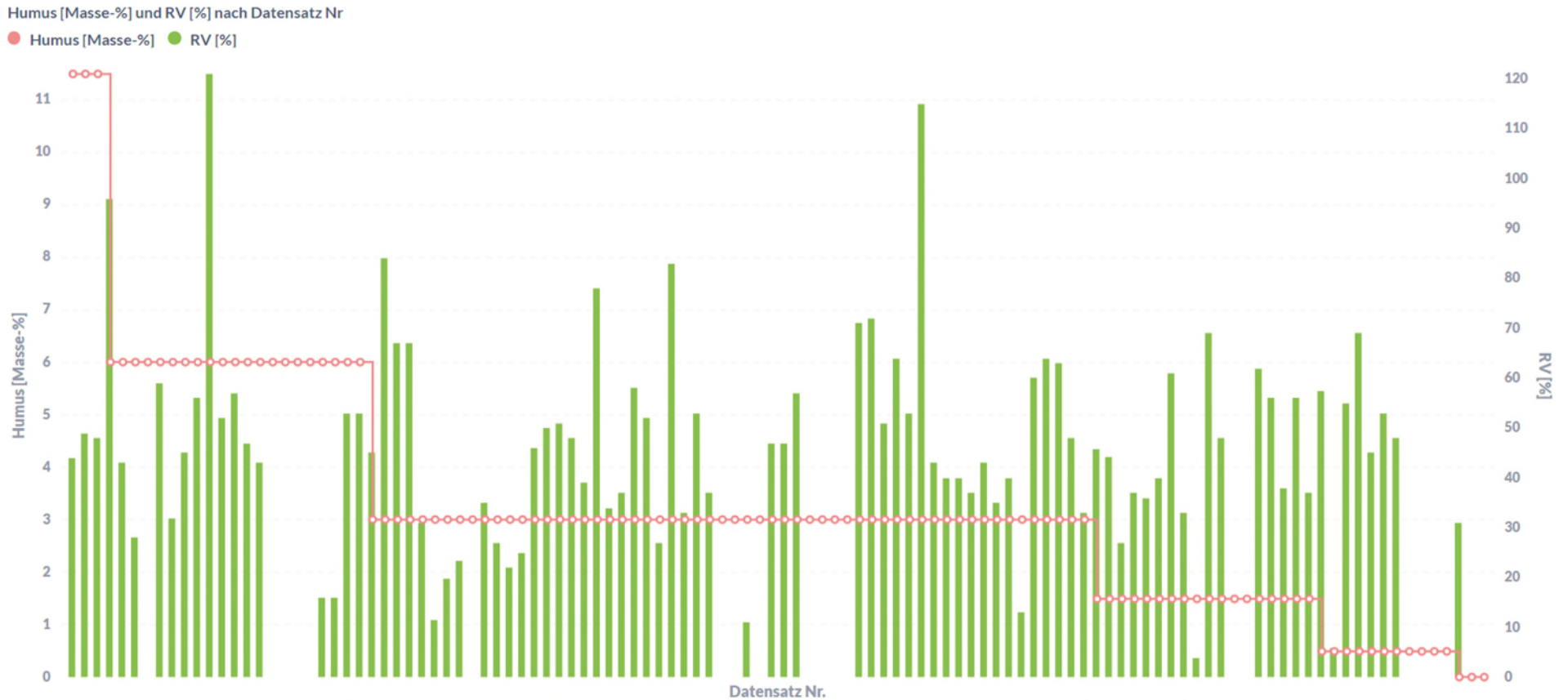


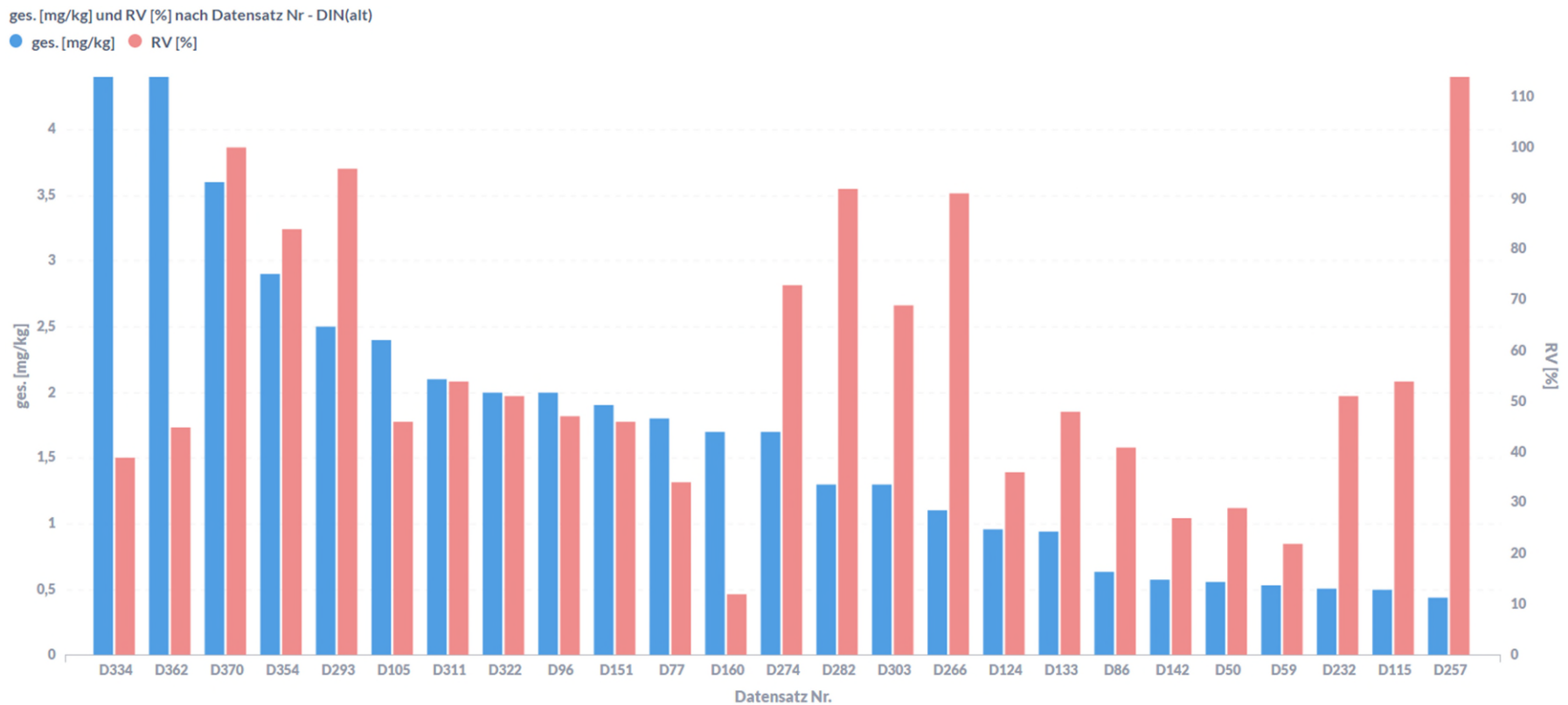
Abbildung 139: Benzo[a]pyren – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



7.4.17 Benzo[k]fluoranthen

Hier liegen weniger Daten als für Benzo[a]pyren vor, doch reichen diese auch aus, um Aussagen zur Resorptionsverfügbarkeit zu treffen.

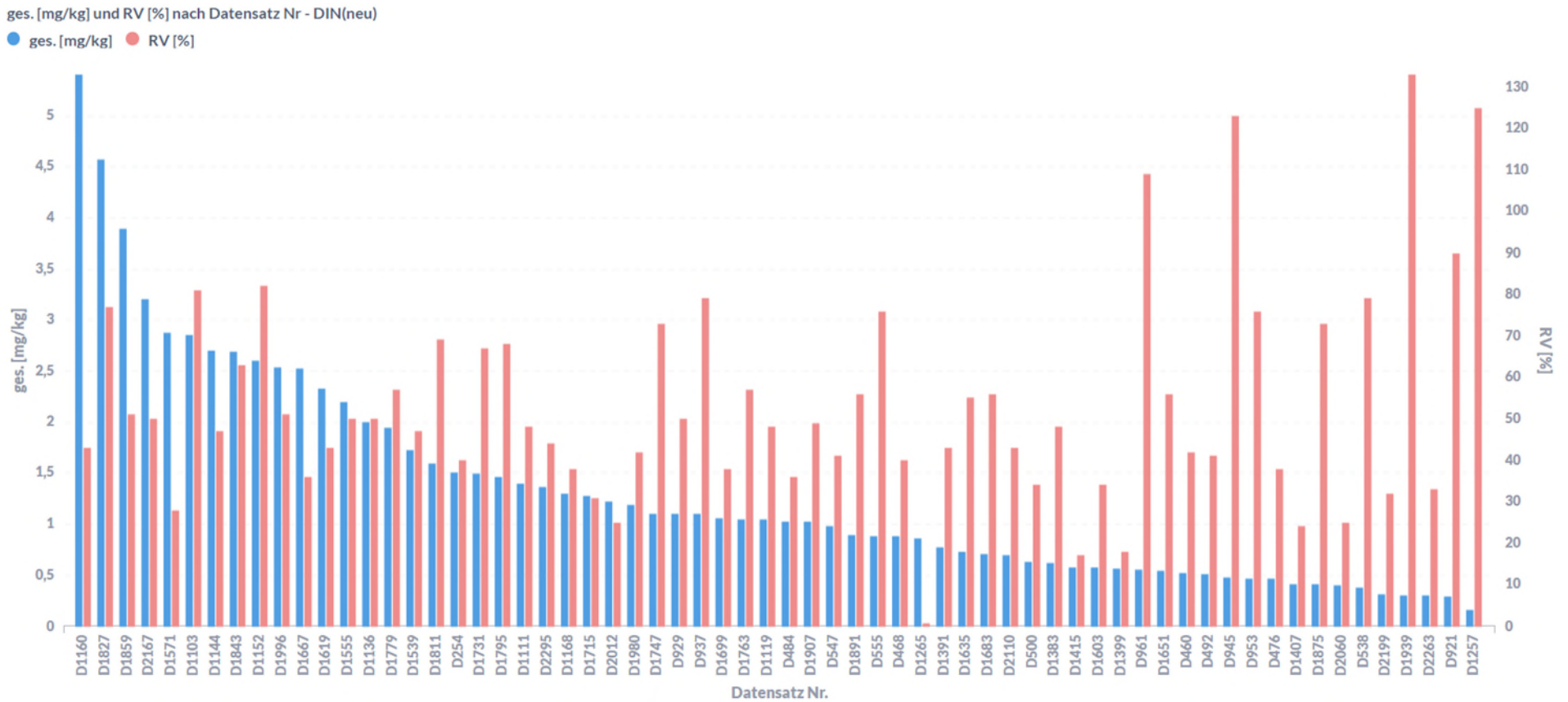
Abbildung 140: Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Für die Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[k]fluoranthen nach der alten Normmethode ist kein Trend bezogen auf den Feststoffgehalt zu erkennen. Es treten wiederum Schwankungen mit Ausreißern über 100 % Resorptionsverfügbarkeit auf.

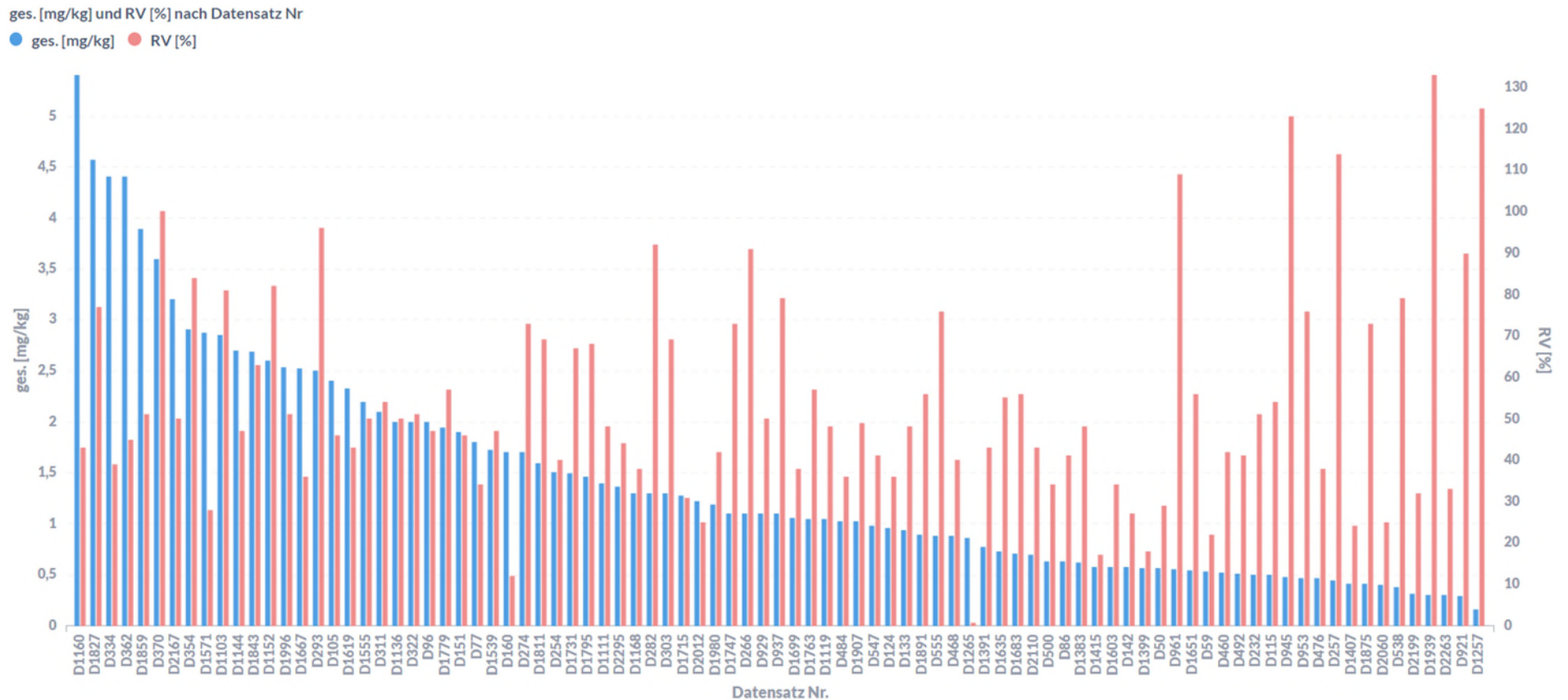
Abbildung 141: Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Nach der neuen Norm müssen dieselben Feststellungen wie bei der alten Norm getroffen werden.

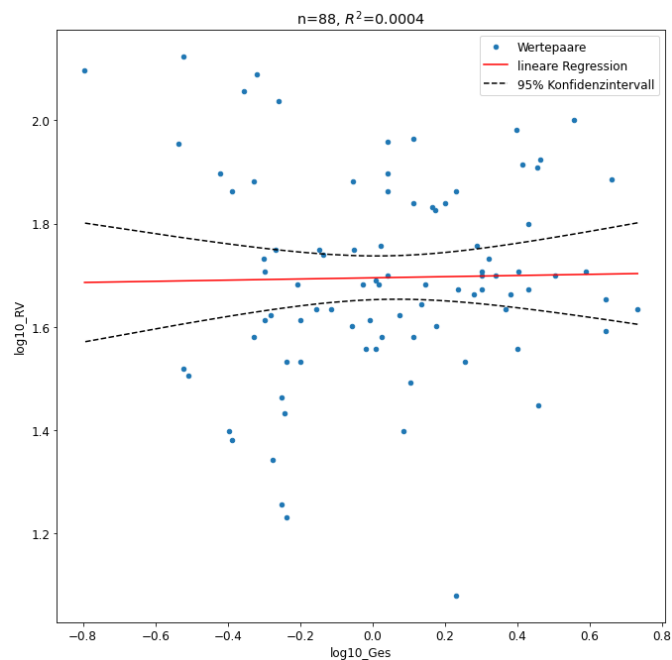
Abbildung 142: Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Das Bild ändert sich auch nicht durch die Zusammenstellung der Daten aus alter und neuer Norm. Die lineare Regression lässt auch keinen Trend erkennen.

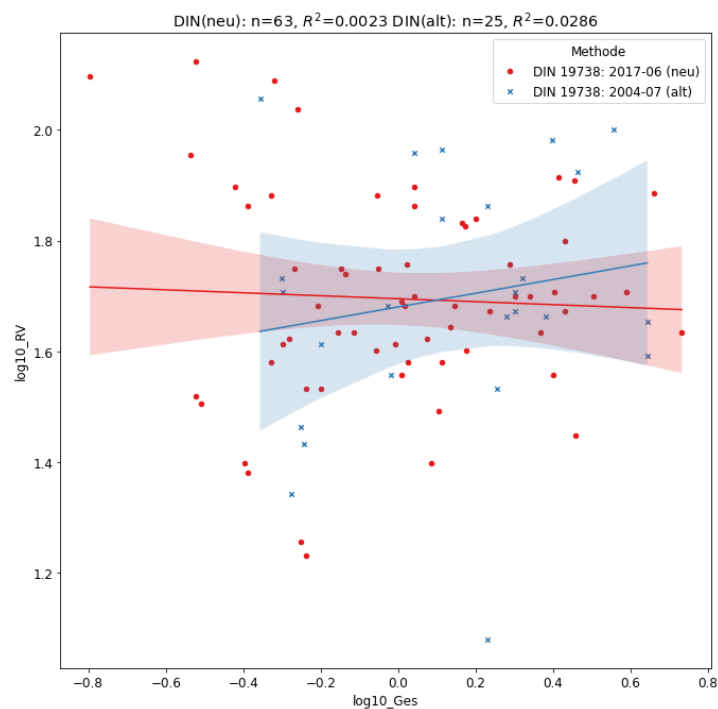
Abbildung 143: Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %], Sortierung aufsteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Darstellung der linearen Regression bestätigt die Erkenntnisse aus den Säulendiagrammen für alle Normausgaben zusammen.

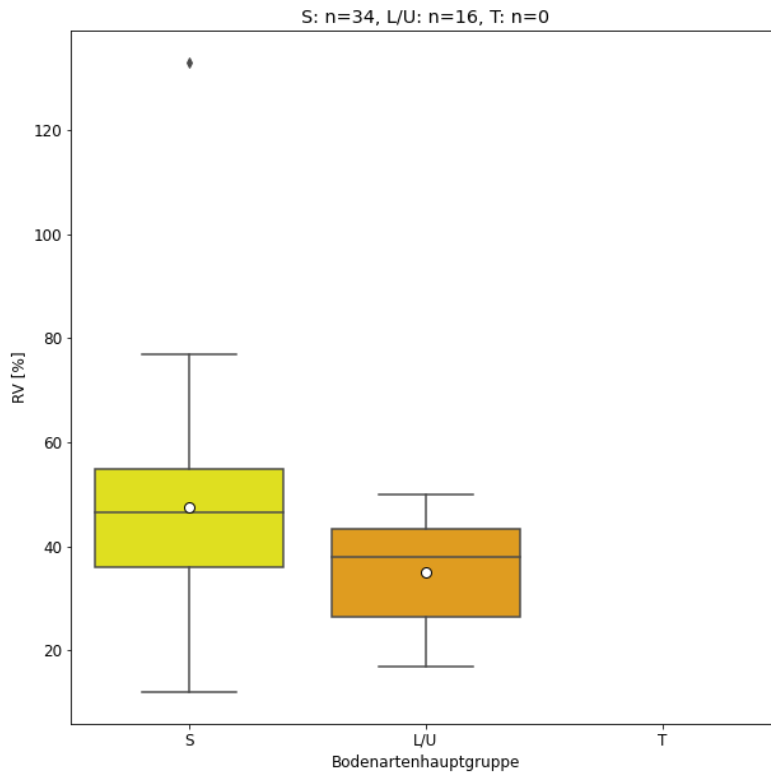
Abbildung 144: Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Ergebnisse der zurück gezogenen Normausgabe zeigen eine deutliche Absenkung der Resorptionsverfügbarkeit mit sinkendem Feststoffgehalt. Die Daten der aktuellen Norm dagegen zeigen keinen deutlichen Trend mehr.

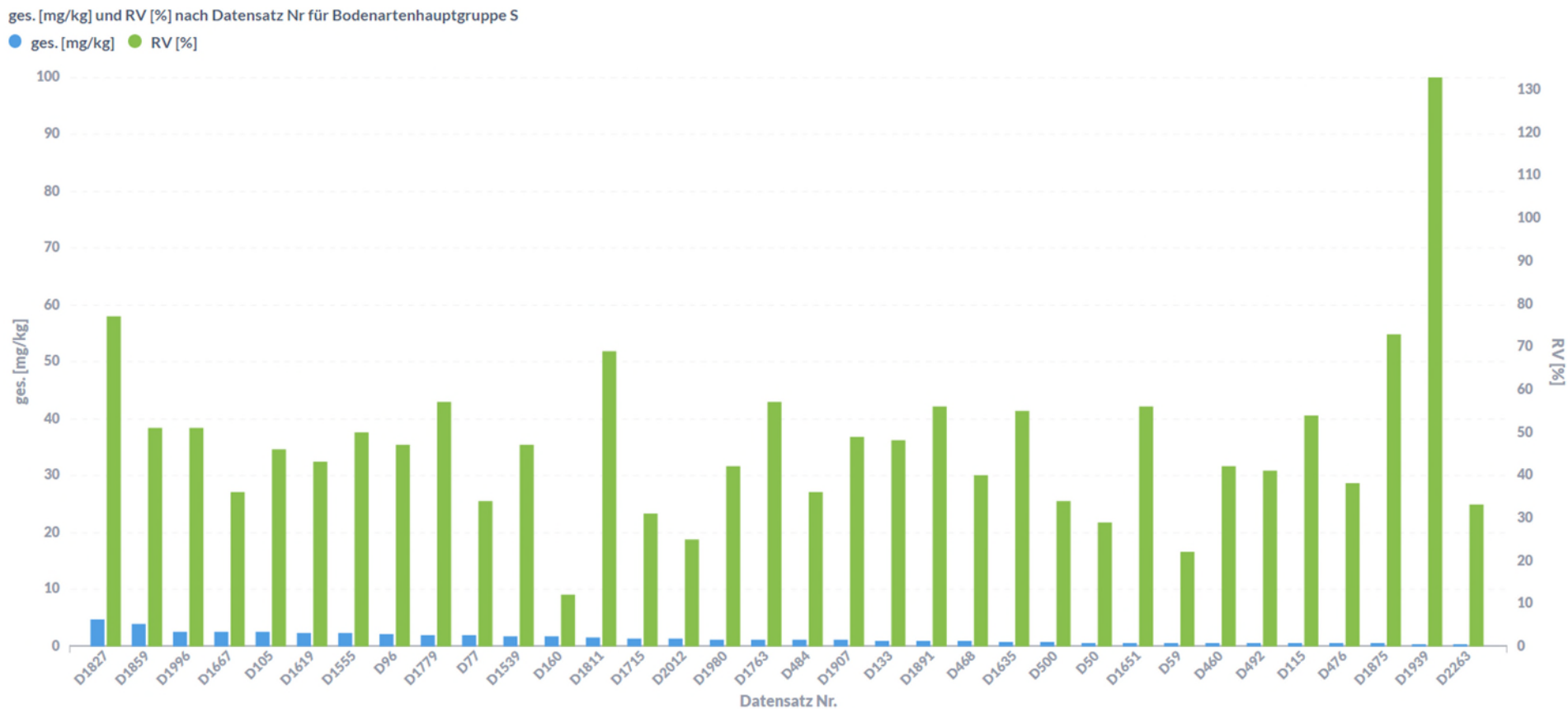
Abbildung 145: Benzo[k]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Boxplott belegt eine Absenkung der Resorptionsverfügbarkeit in Richtung Feinstkorn.

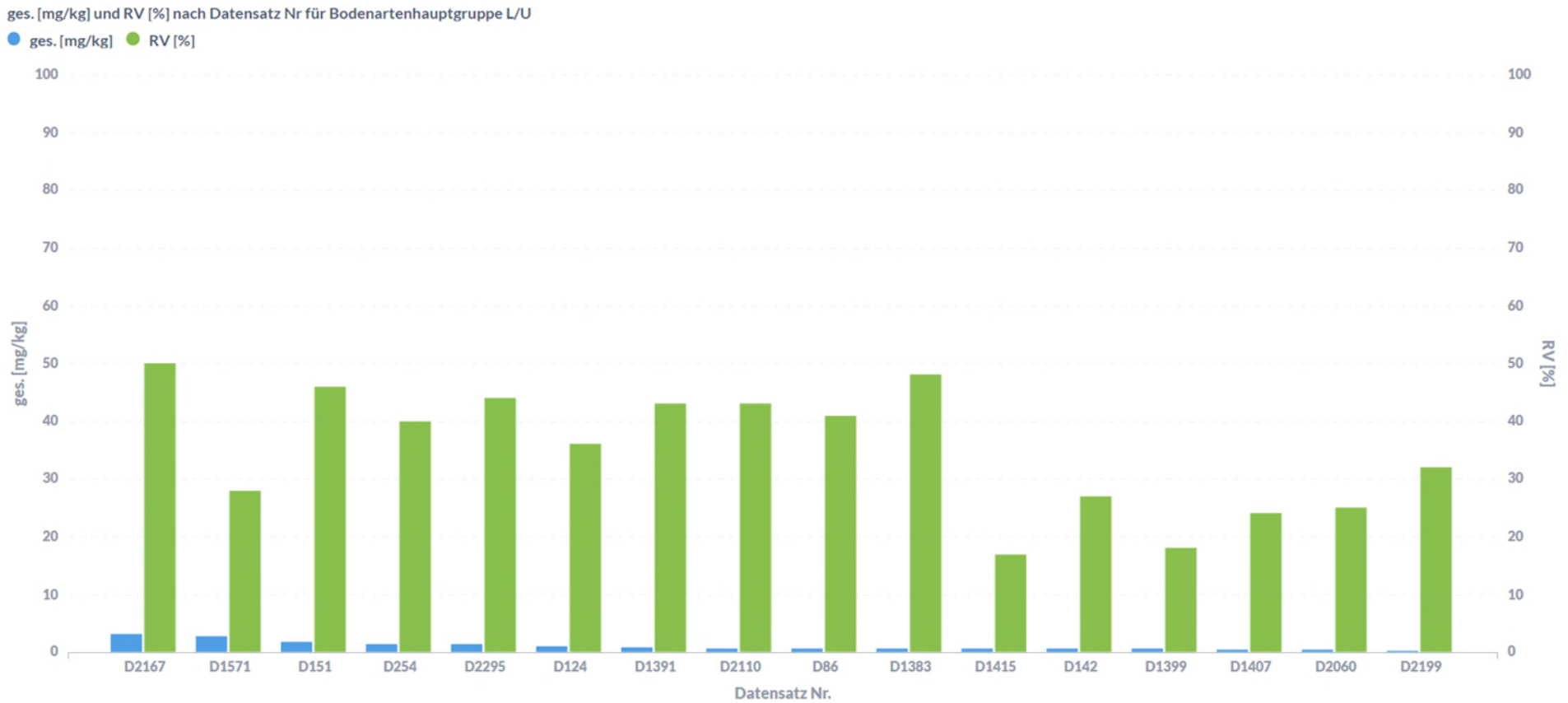
Abbildung 146: Benzo[k]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Sand treten konzentrationsabhängig keine Trends hinsichtlich der Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[k]fluoranthen auf.

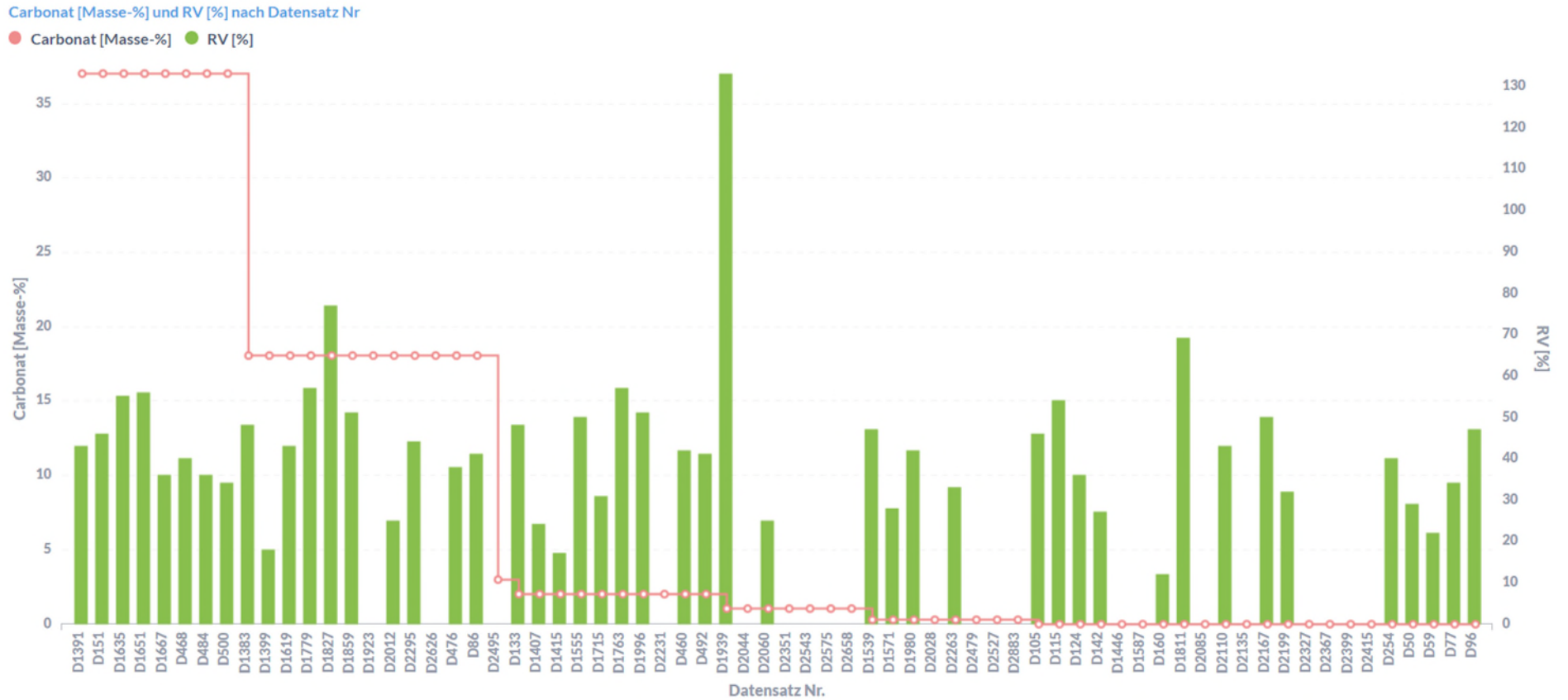
Abbildung 147: Benzo[k]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei den Hauptbodengruppen Lehm und Schluff sind lediglich Schwankungen der Resorptionsverfügbarkeit ohne Trend festzustellen.

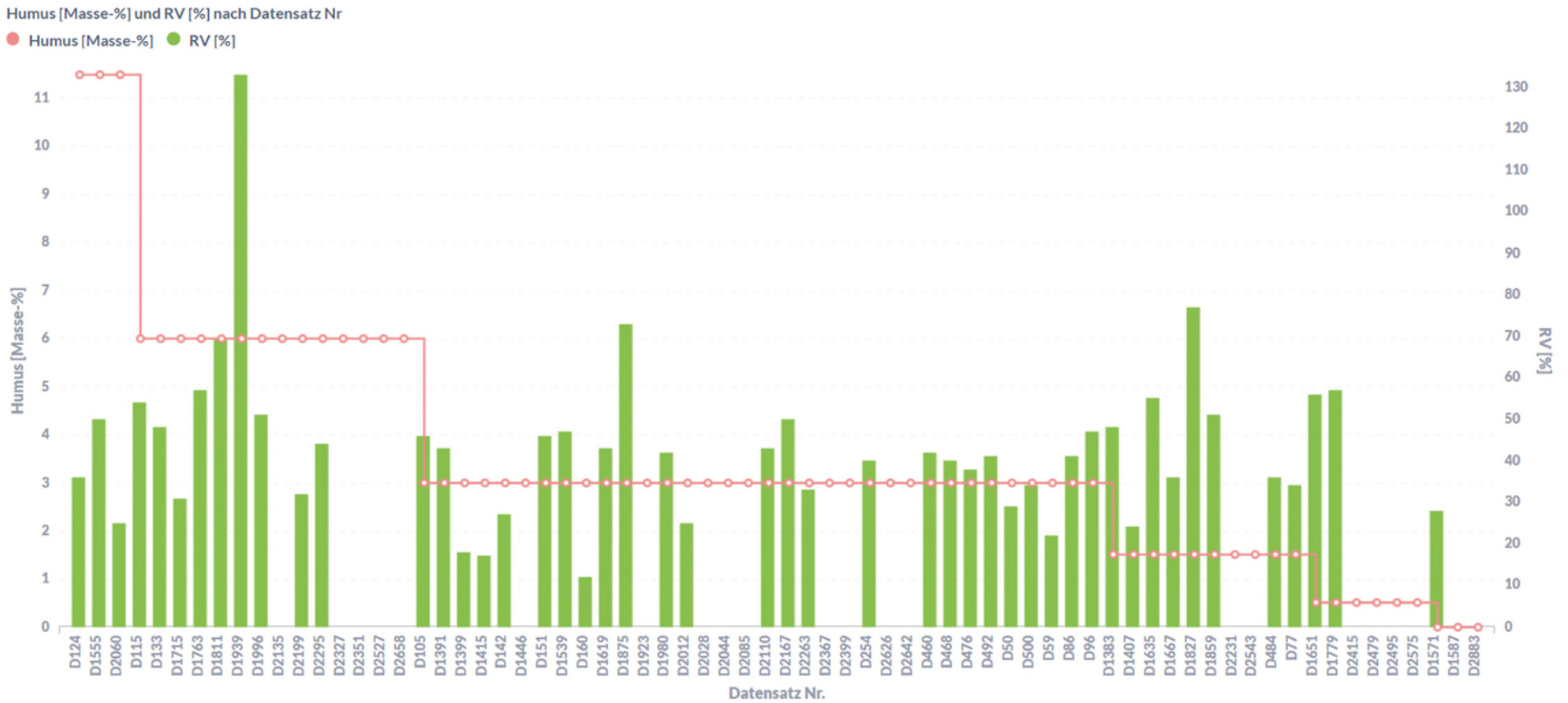
Abbildung 148: Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Carbonatgehalt hat auf die Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[k]fluoranthen keinen Einfluss.

Abbildung 149: Benzo[k]fluoranthen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



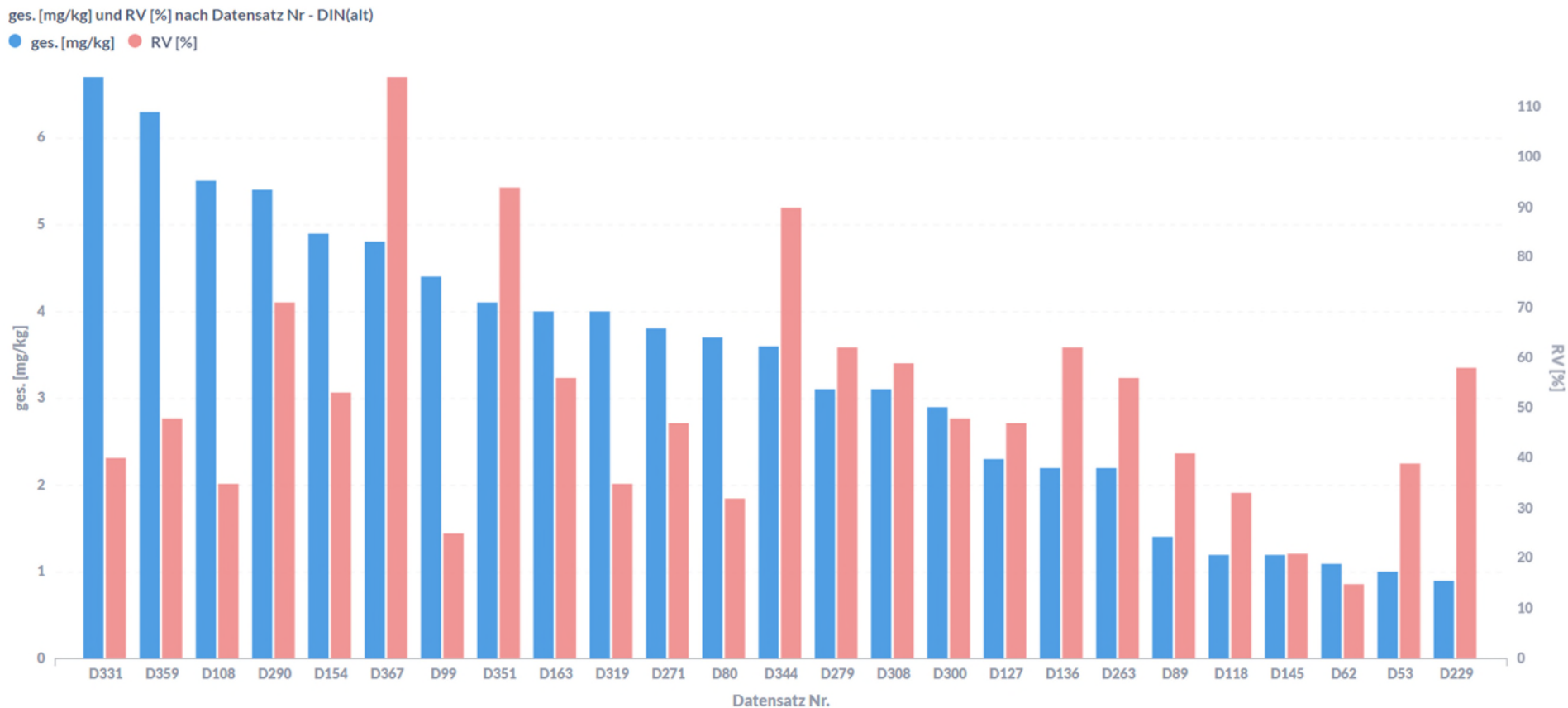
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Es ist beim Humusgehalt auch keine Trendaussage möglich.

7.4.18 Benzo[a]anthracen

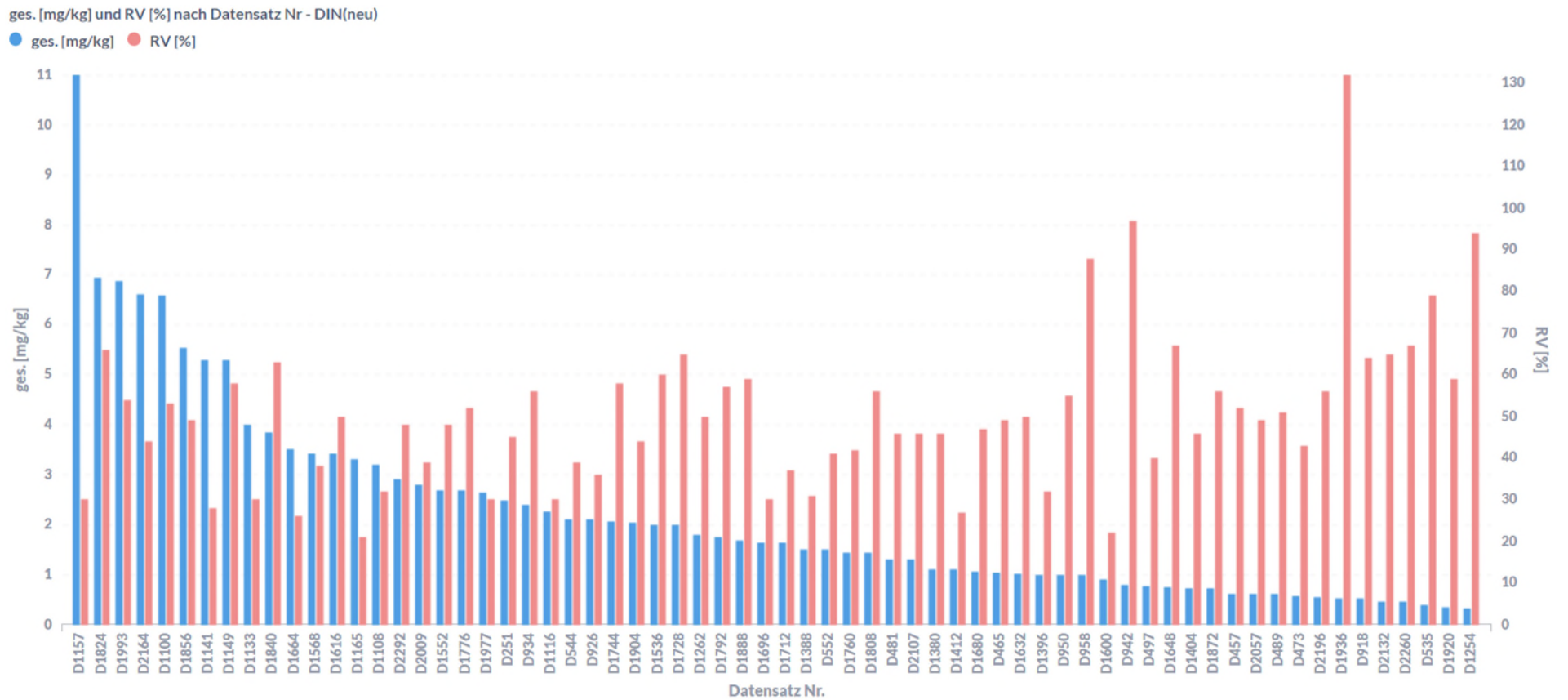
Bei Benzo[a]anthracen sind weder bei der alten noch bei der neuen Normmethode, hinsichtlich der Bodenarten, dem Carbonat- und dem Humusgehalt Trends der Resorptionsverfügbarkeit ableitbar.

Abbildung 150: Benzo[a]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



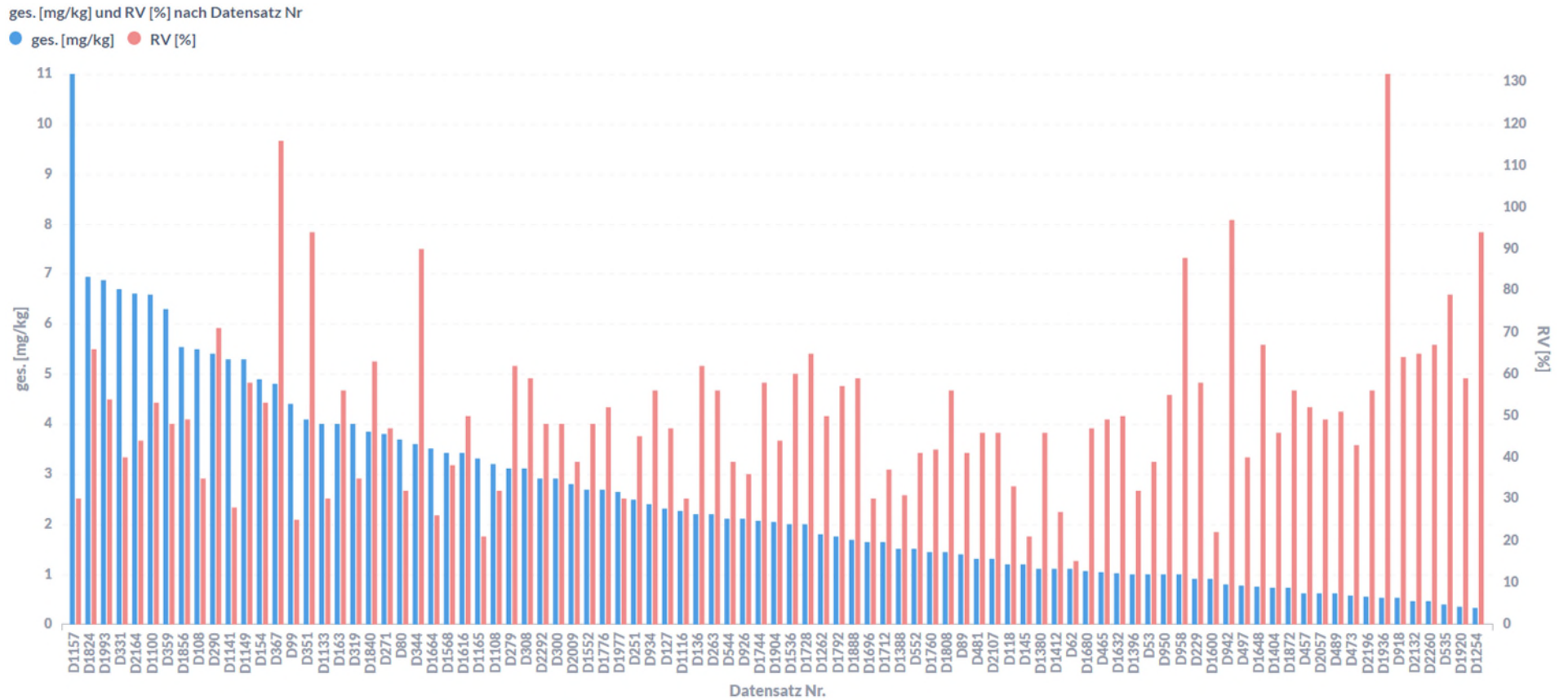
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 151: Benzo[a]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



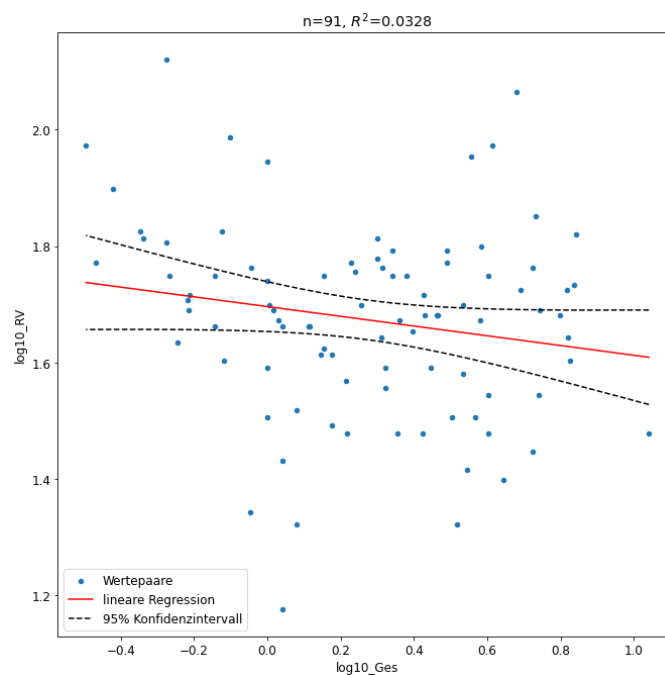
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 152: Benzo[a]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

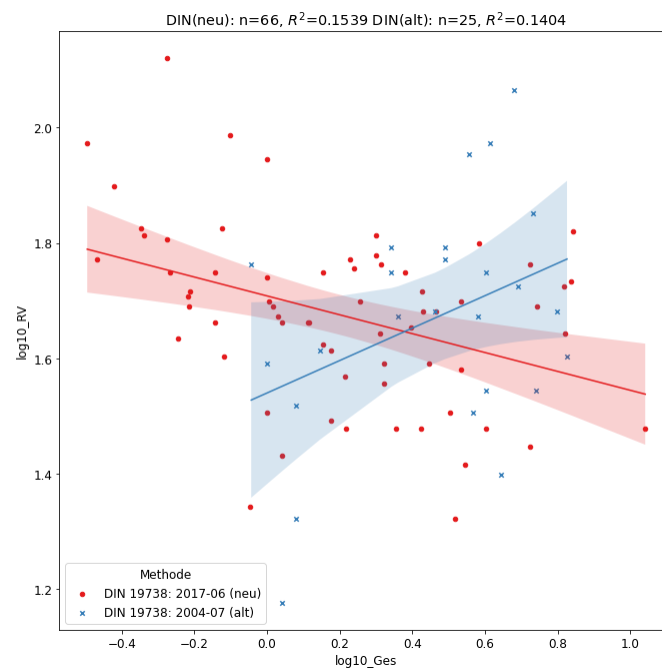
Abbildung 153: Benzo[a]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Für die Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[a]anthracen ist durch die lineare Regression ein leichter Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit in Richtung absteigenden Feststoffgehalt erkennbar.

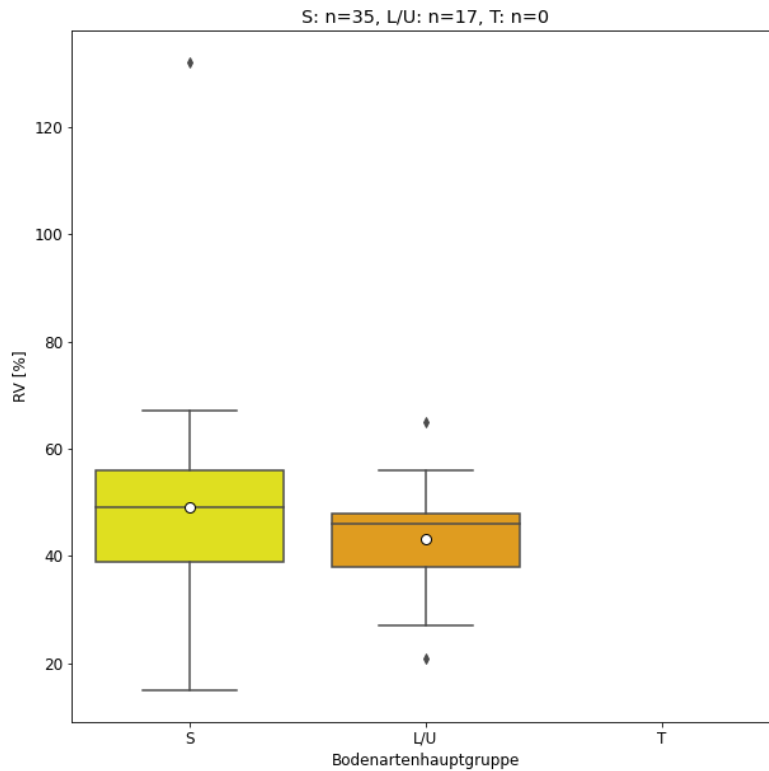
Abbildung 154: Benzo[a]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die zurückgezogene Normausgabe ergibt hier einen deutlichen Trend der Verringerung der Resorptionsverfügbarkeit mit niedriger werdenden Feststoffgehalten. Das Gegenteil zeigen die Ergebnisse der gültigen Normausgabe.

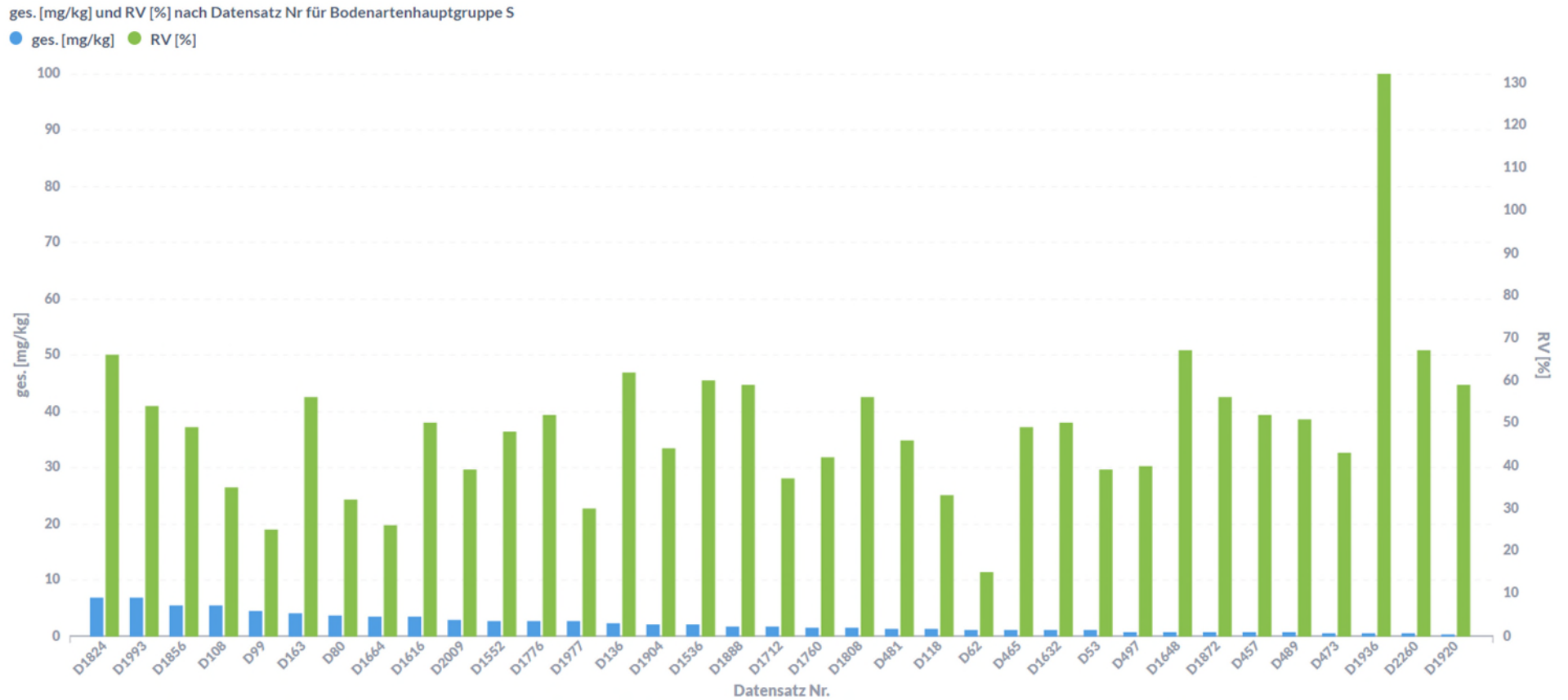
Abbildung 155: Benzo[a]anthracen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit nimmt mit abnehmender Korngröße nur geringfügig ab.

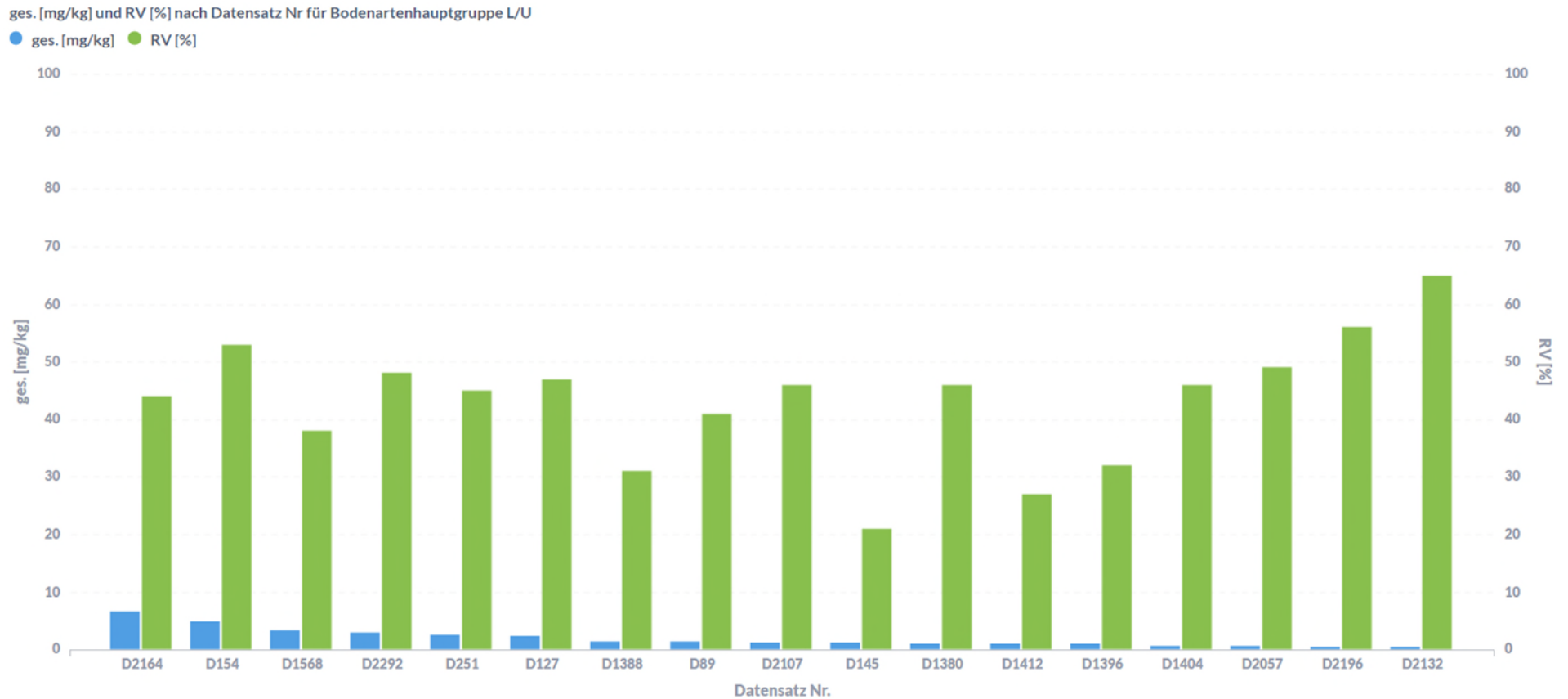
Abbildung 156: Benzo[a]anthracen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Beim Sand lässt sich kein Trend erkennen.

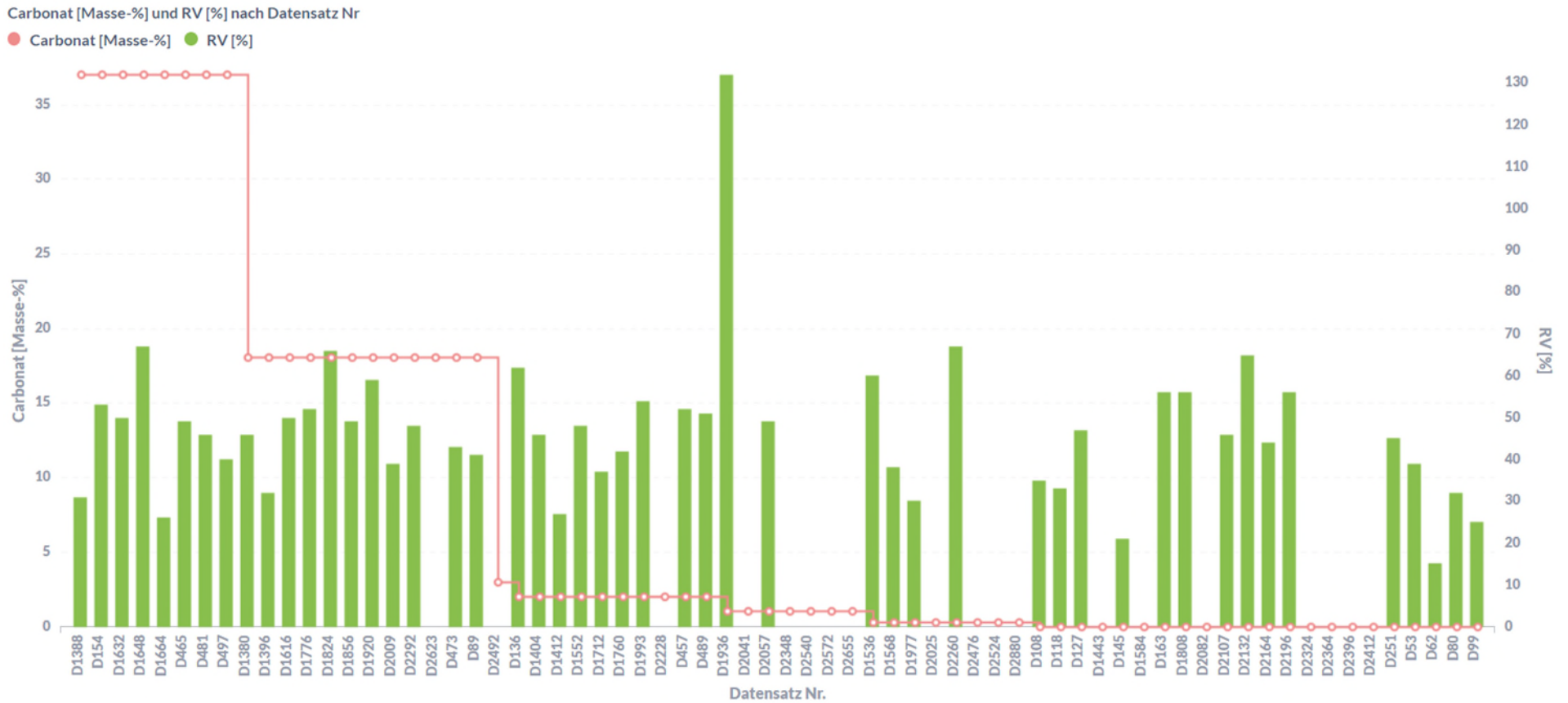
Abbildung 157: Benzo[a]anthracen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der Bodenartenhauptgruppe L/U lässt sich auch kein Trend feststellen.

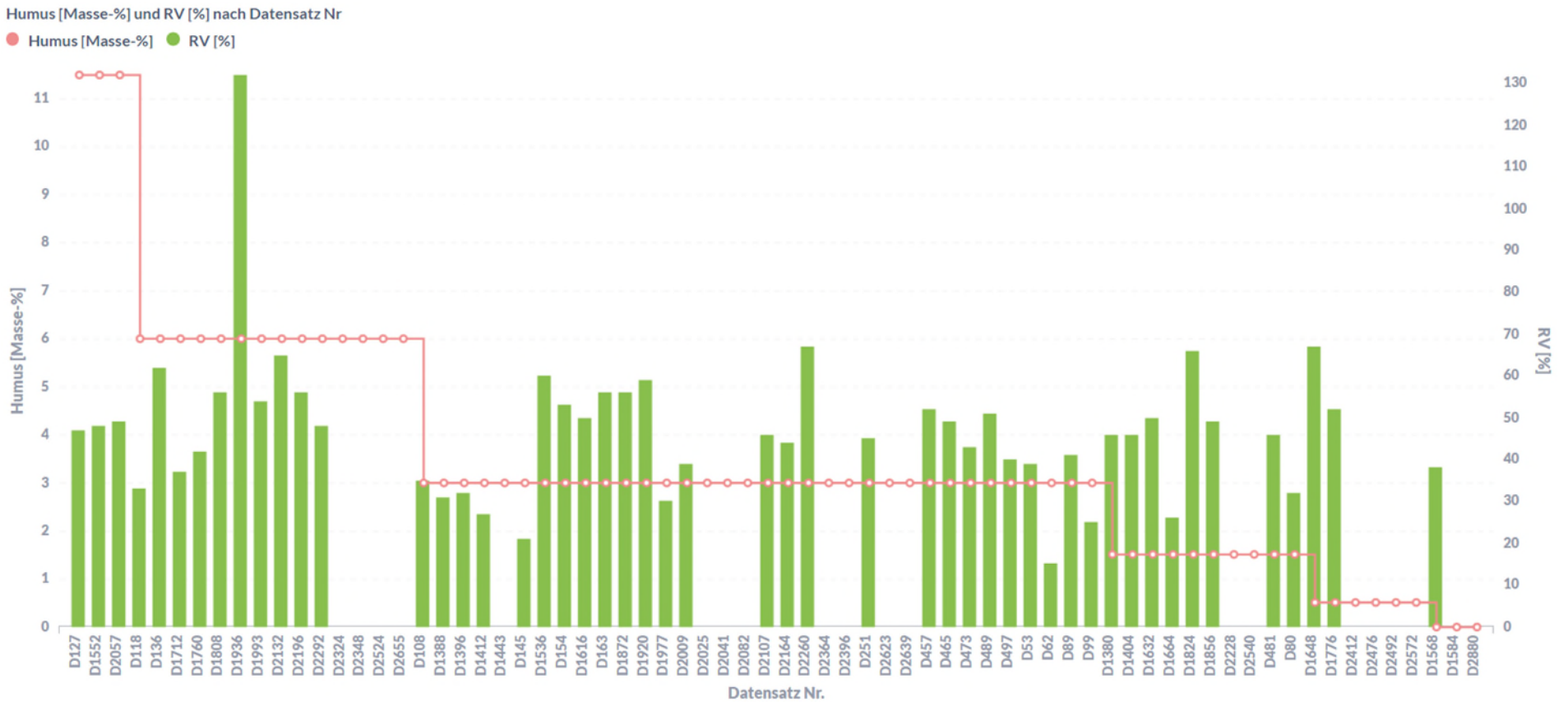
Abbildung 158: Benzo[a]anthracen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Carbonatgehalt hat auf die Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[a]anthracen im Boden offenbar auch keinen Einfluss.

Abbildung 159: Benzo[a]anthracen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



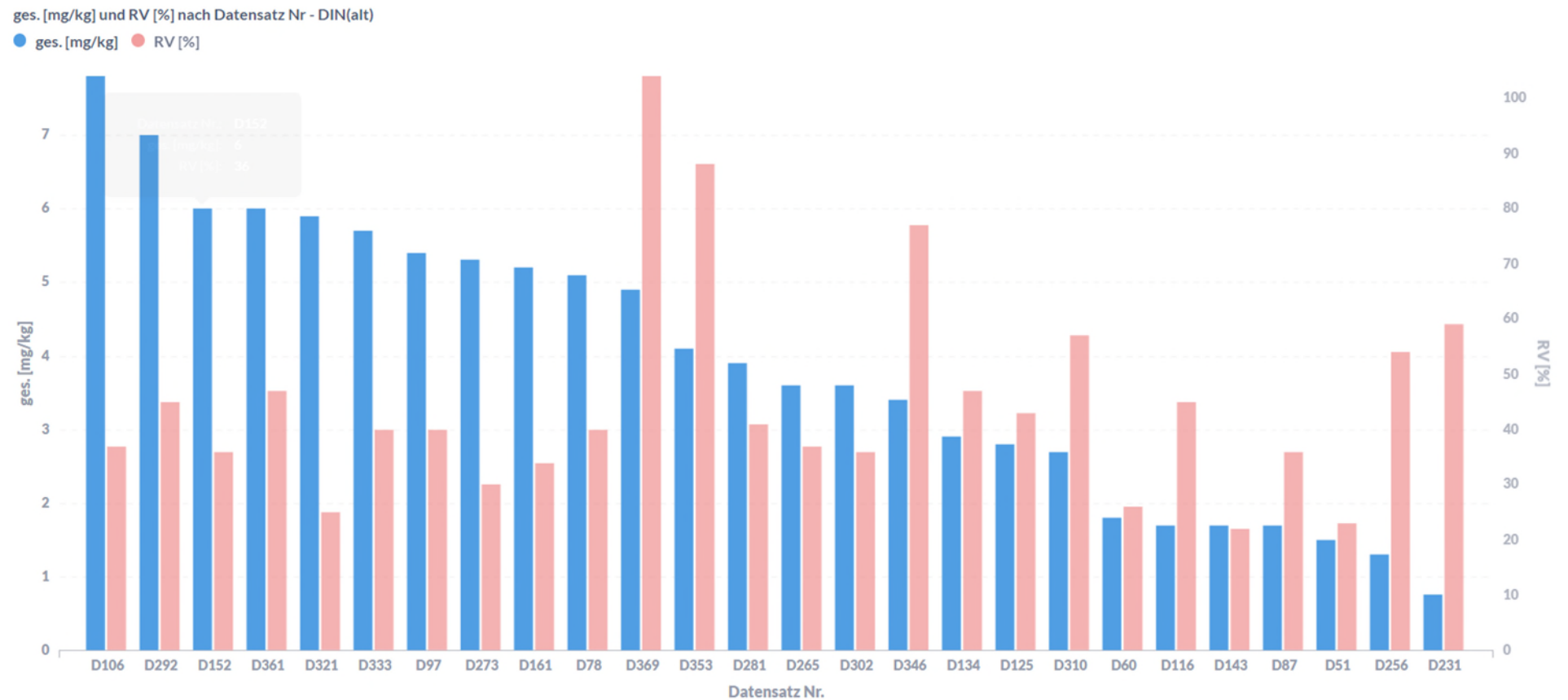
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Humusgehalt beeinflusst die Resorptionsverfügbarkeit hier offenbar auch nicht.

7.4.19 Benzo[b]fluoranthen

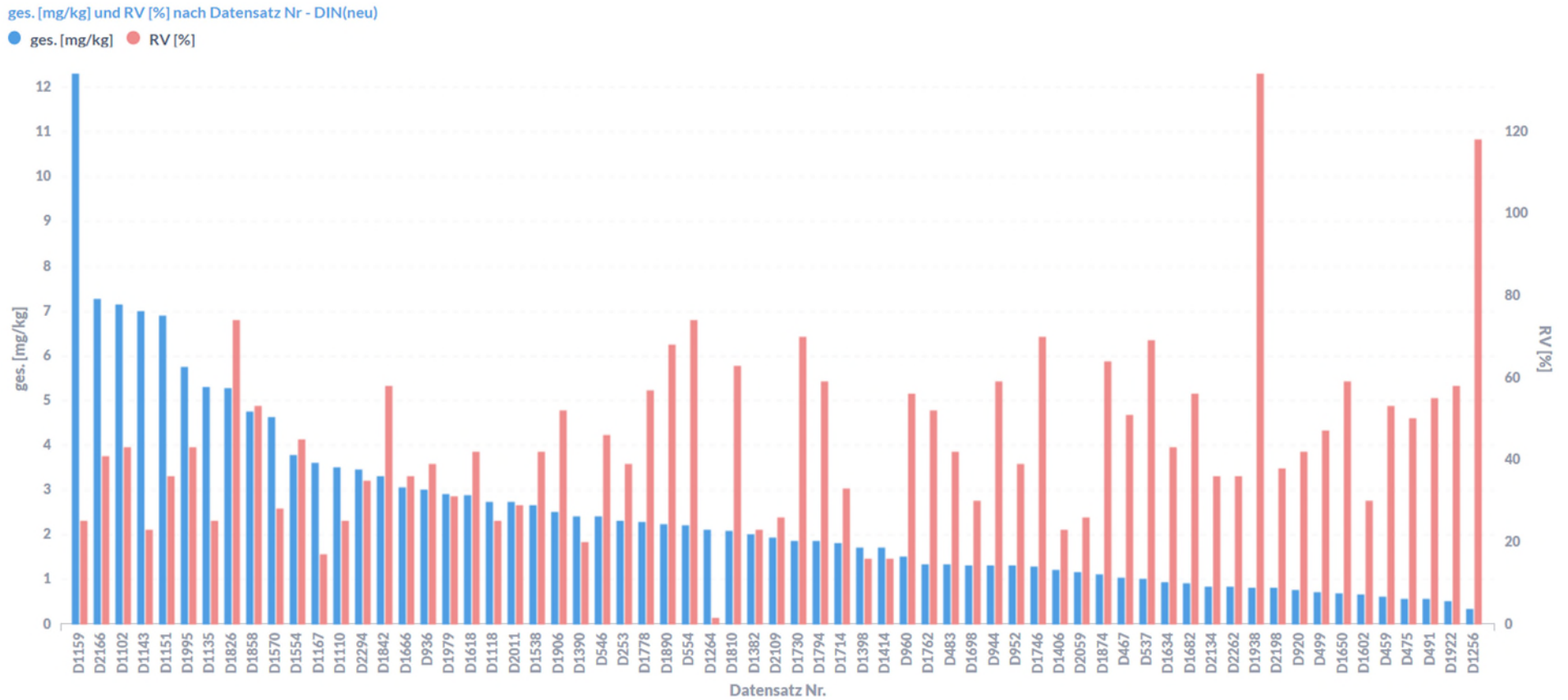
Die Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[b]fluoranthen zeigt bezüglich der Feststoffgehalte, der Bodenartenhauptgruppen, dem Carbonat- und dem Humusgehalt nur geringe Trends.

Abbildung 160: Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



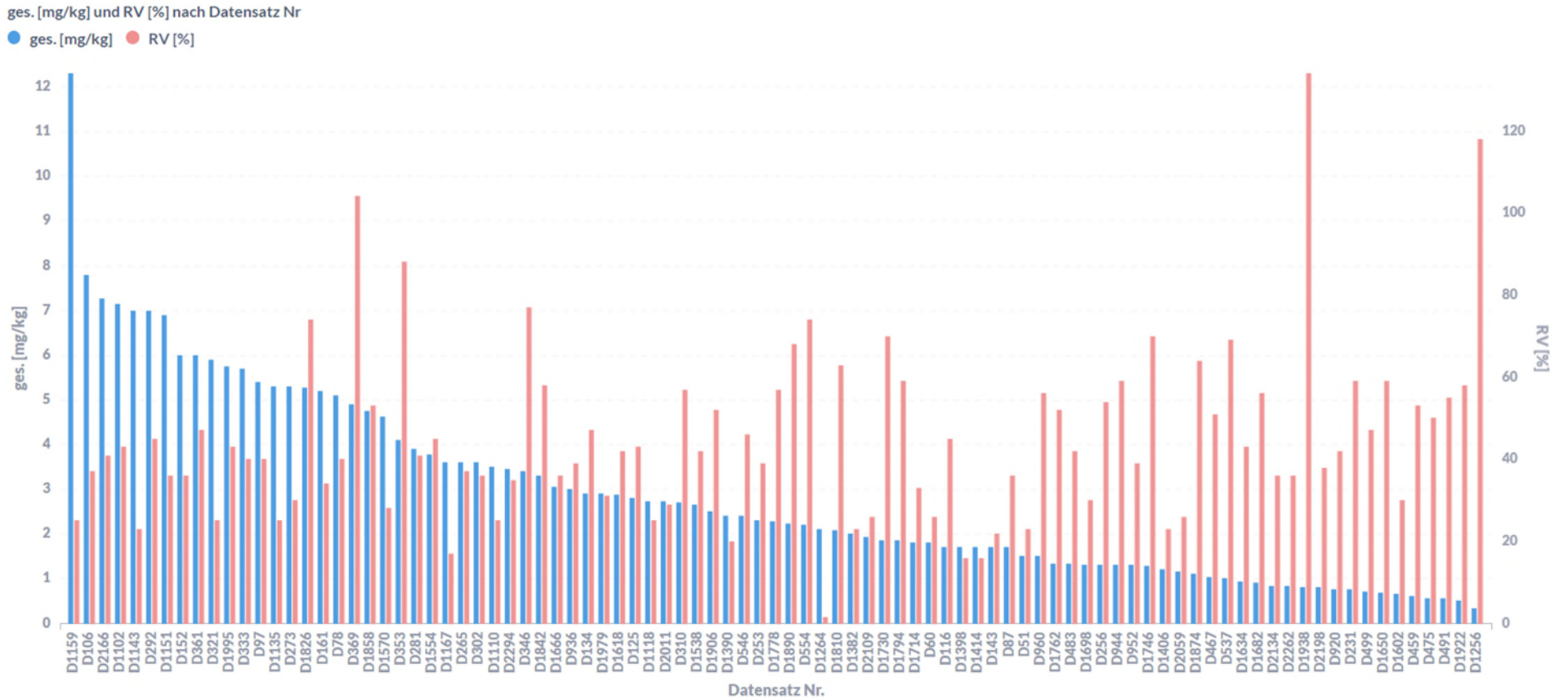
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 161: Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



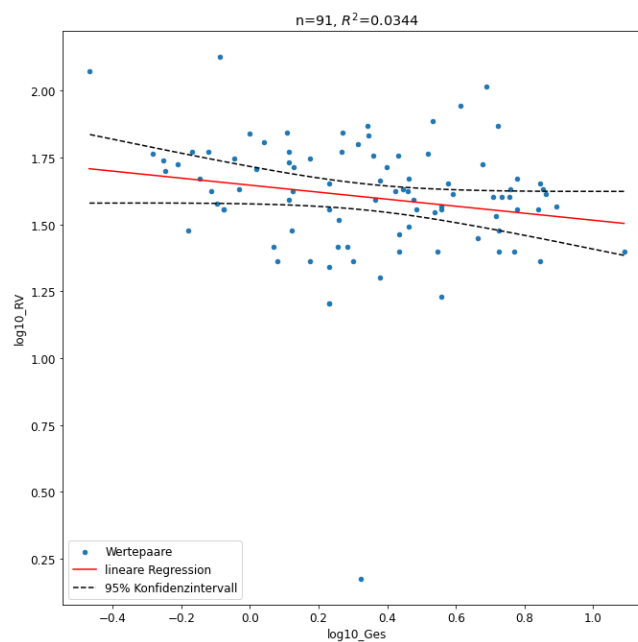
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 162: Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

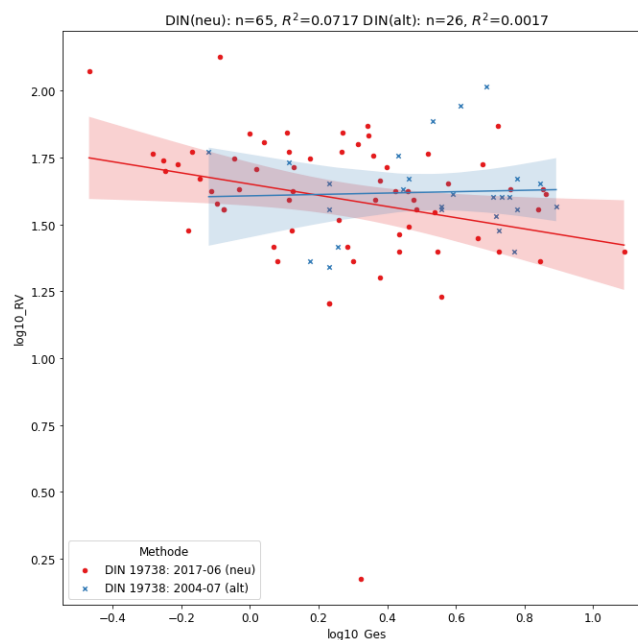
Abbildung 163: Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Benzo[b]fluoranthen ist mittels linearer Regression kein deutlicher Trend erkennbar.

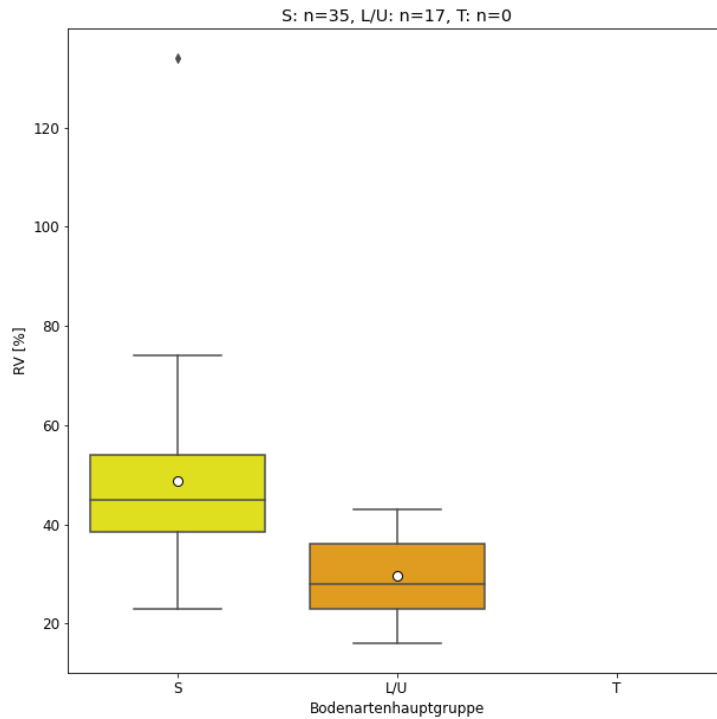
Abbildung 164: Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Daten der alten Norm wirken dem Trend des Anstiegs der Resorptionsverfügbarkeit in Richtung niedriger werdendem Feststoffgehalt bei den aktuellen Normdaten entgegen. Damit wurde der eigentliche validere Trend verfälscht.

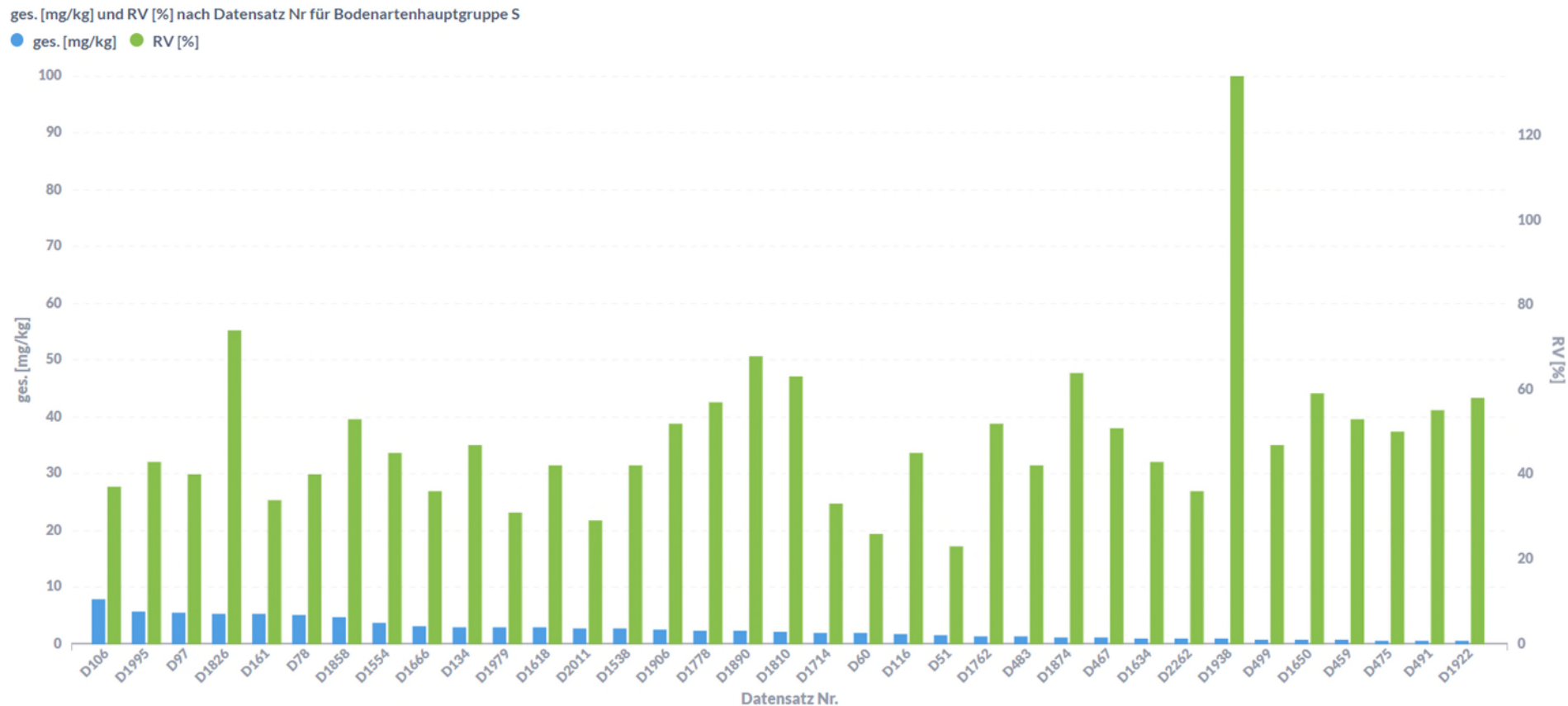
Abbildung 165: Benzo[b]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppen, unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit nimmt mit der Abnahme der Korngröße bei den Hauptbodenarten ab.

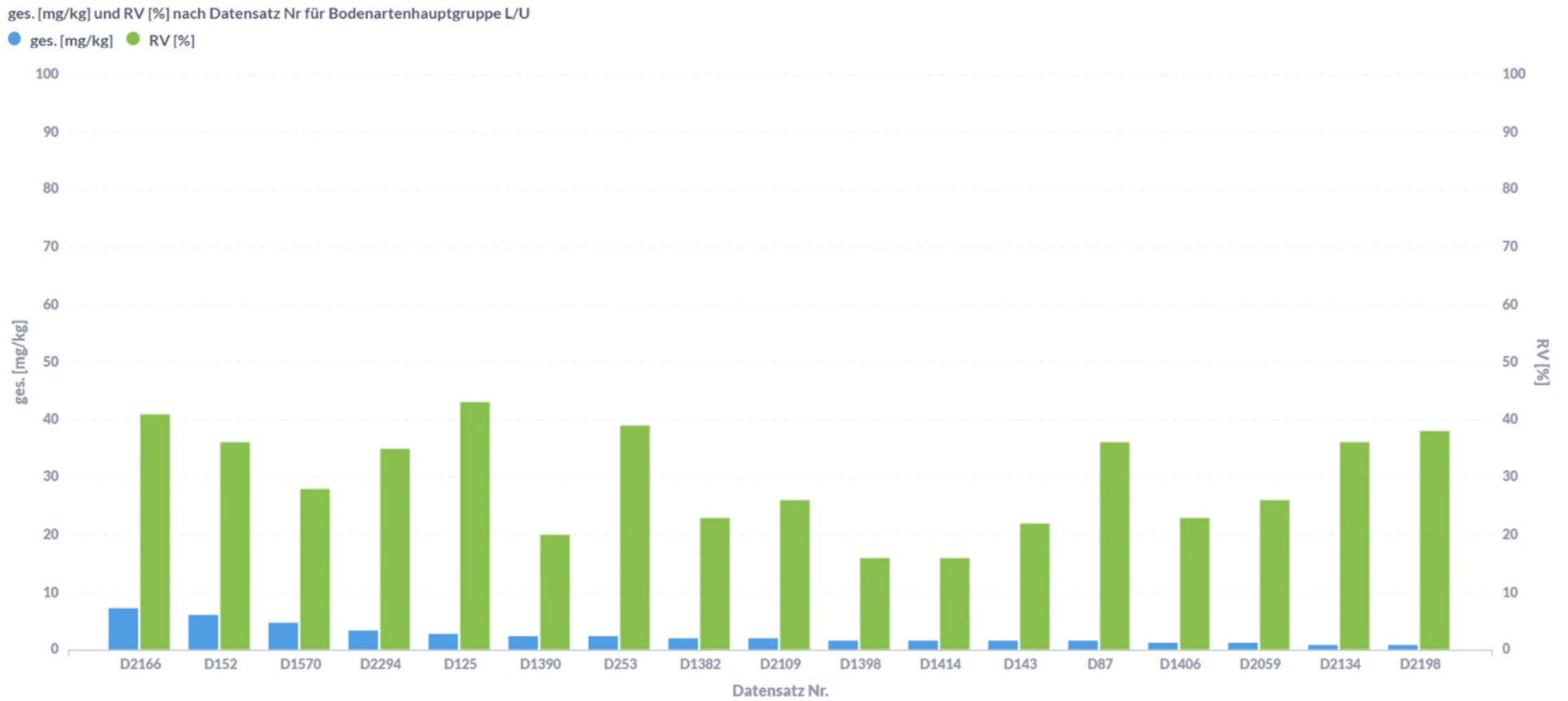
Abbildung 166: Benzo[b]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei den Sanden ist bezogen auf den Feststoffgehalt kein deutlicher Trend der Resorptionsverfügbarkeit erkennbar.

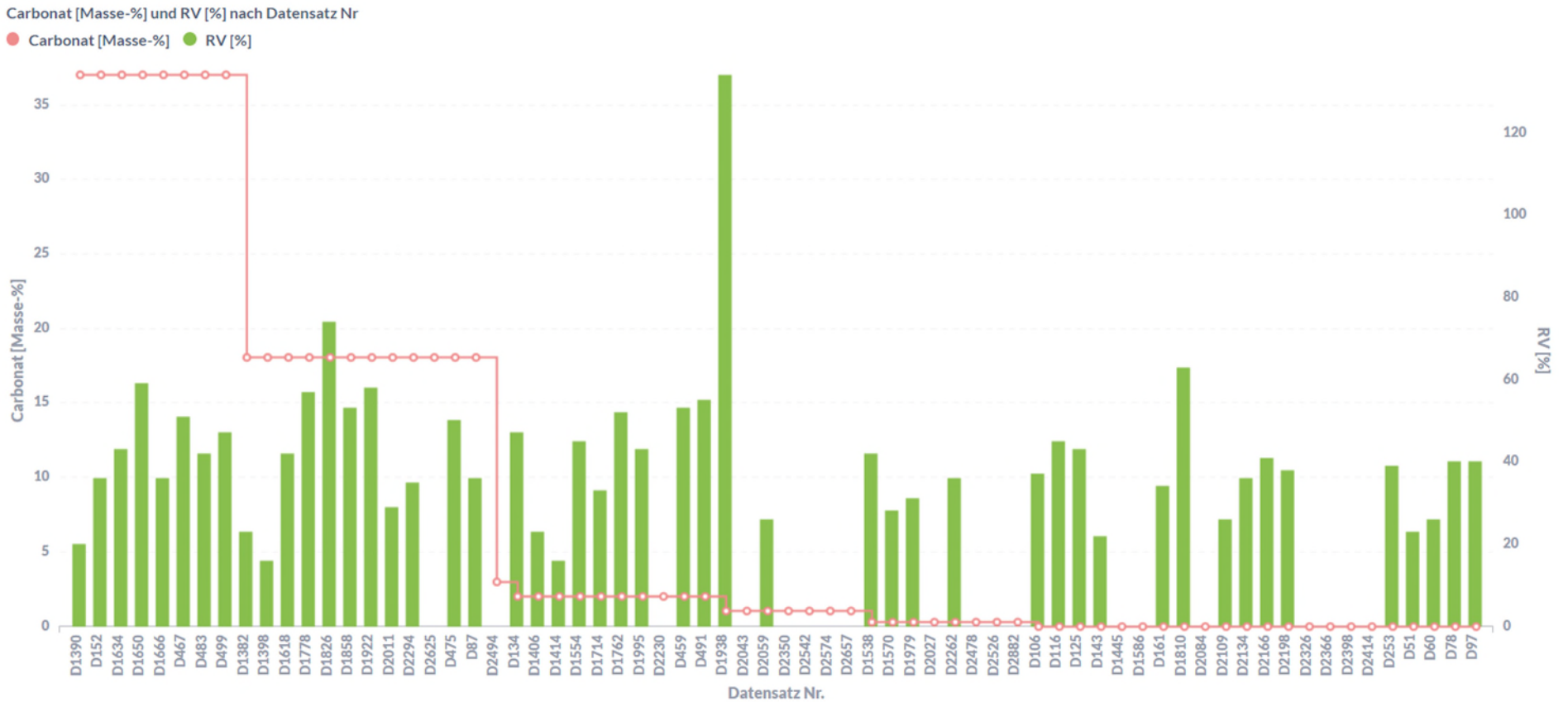
Abbildung 167: Benzo[b]fluoranthen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Es gilt wie bei dem Sand, dass auch bei L/U kein Trend in aus dem Säulendiagramm erkennbar ist.

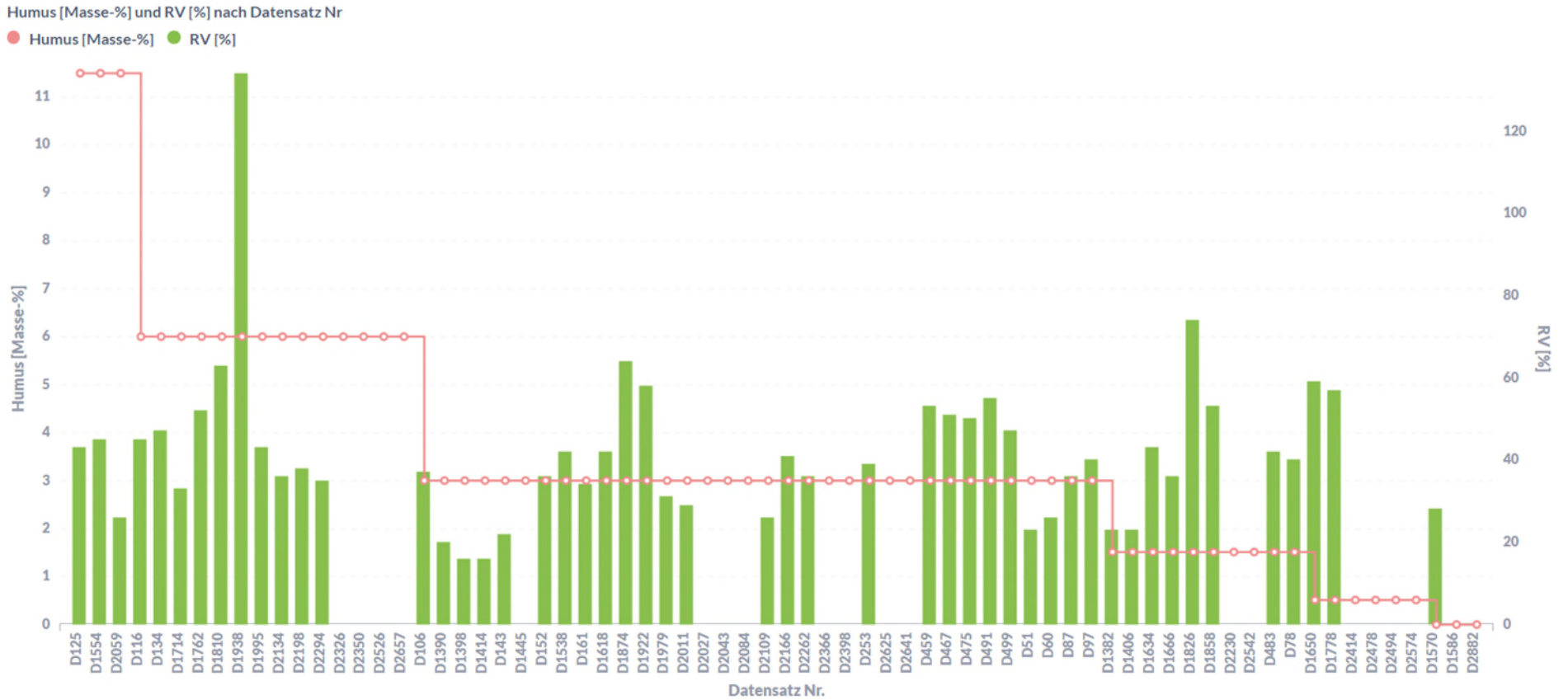
Abbildung 168: Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Carbonatgehalt hat auf die Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[b]fluoranthen offenbar auch keinen Einfluss.

Abbildung 169: Benzo[b]fluoranthen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



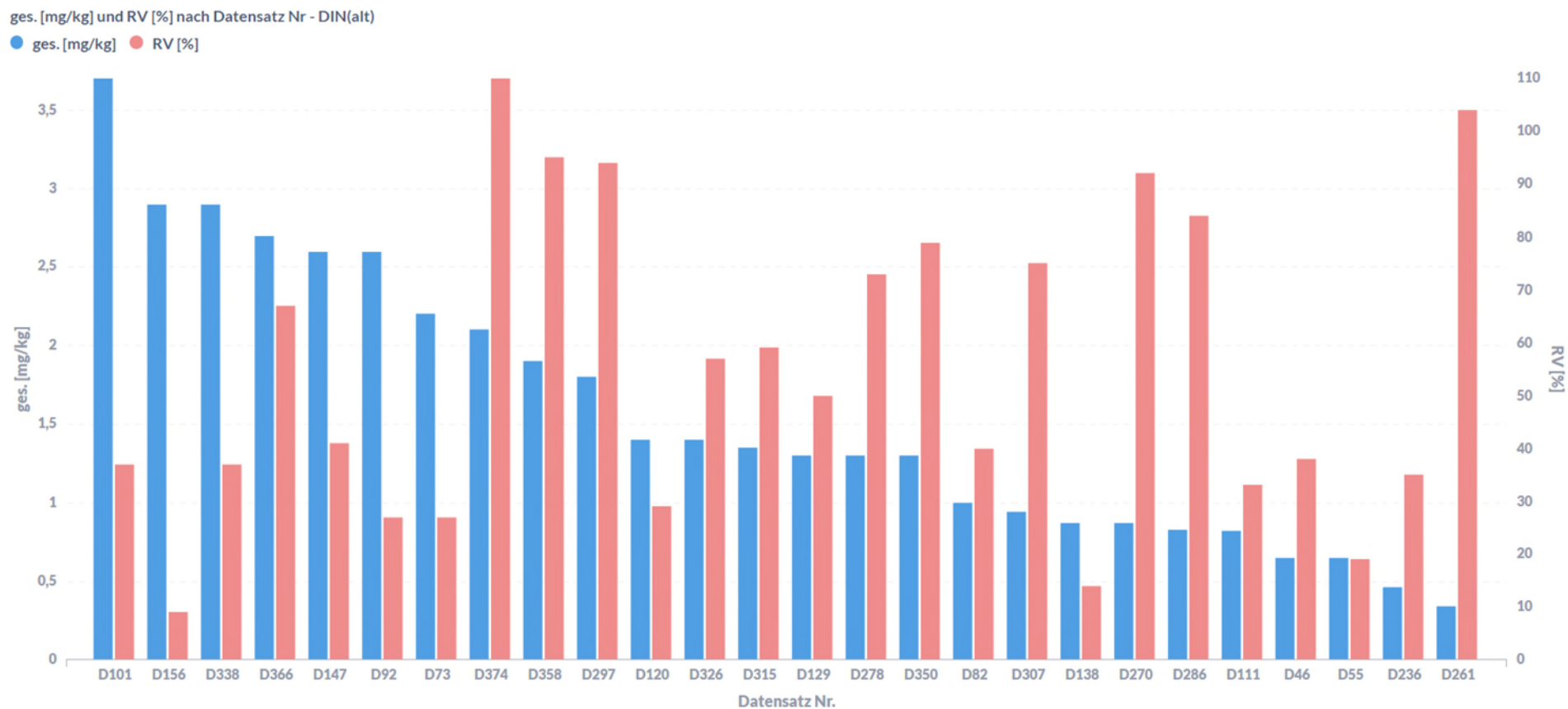
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Humus hat auch keinen Einfluss auf die Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[b]fluoranthen.

7.4.20 Benzo[ghi]perylen

Wie bei den anderen PAK sind auch hier zahlreiche Untersuchungsergebnisse zur Resorptionsverfügbarkeit vorhanden, um Trends, erkenne zu können.

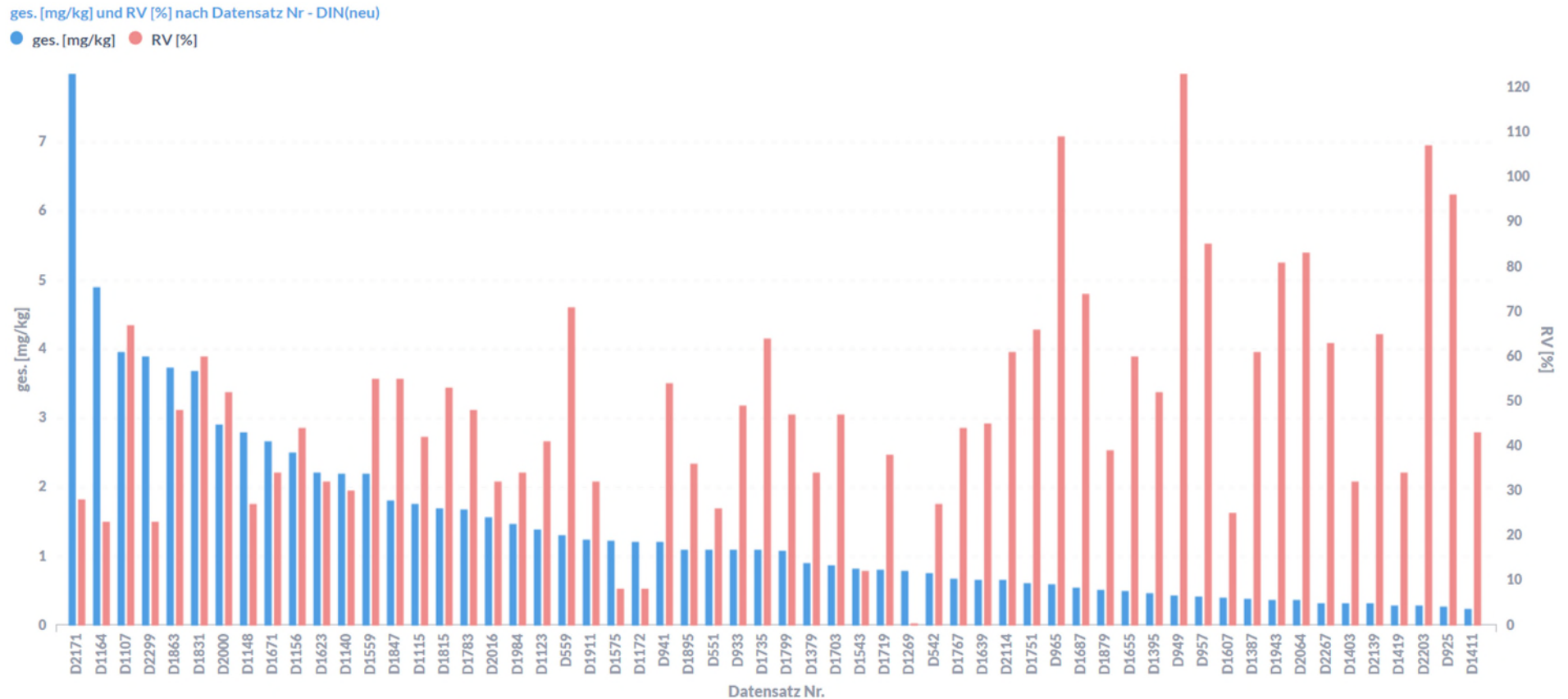
Abbildung 170: Benzo[ghi]perylen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Nach der alten Normmethode sind für die Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf den Feststoffgehalt keine Trends erkennbar.

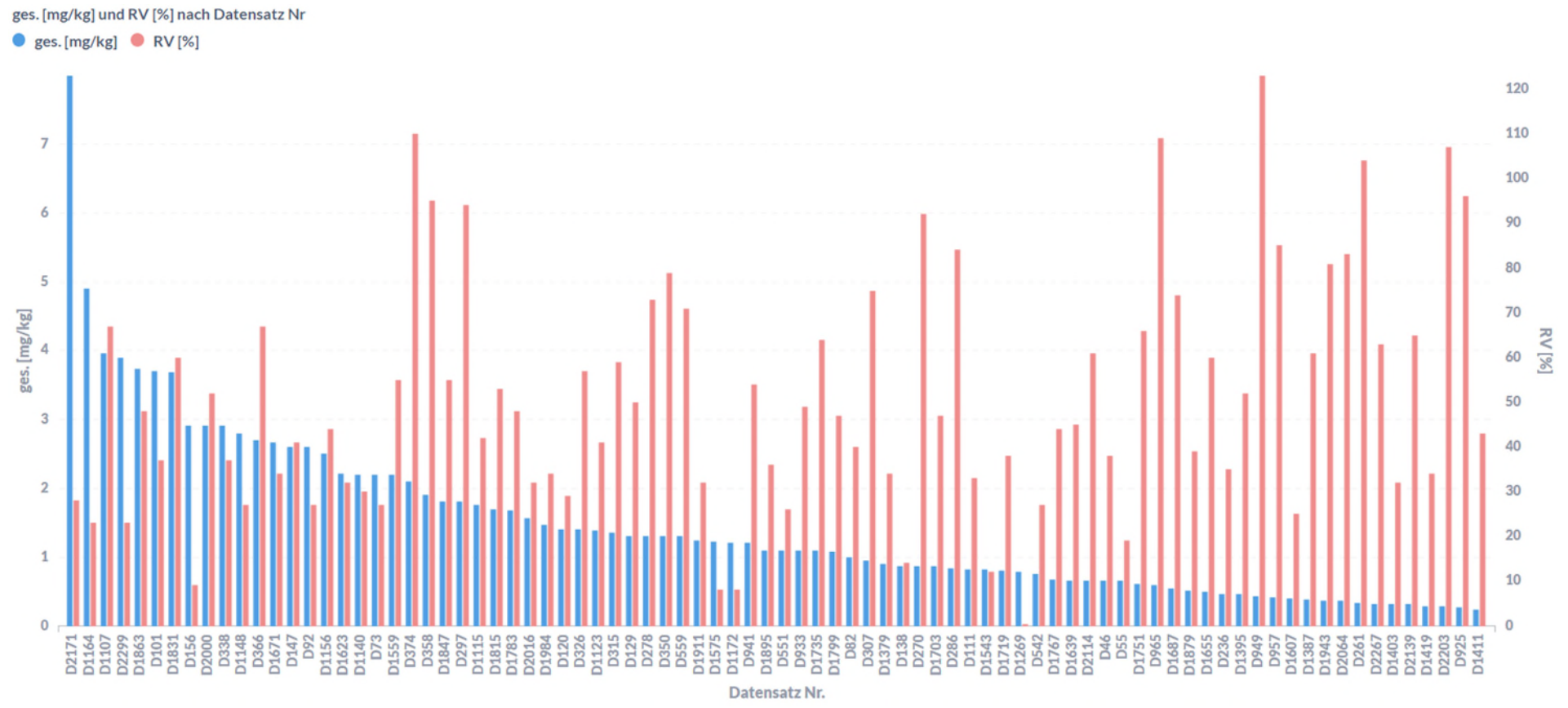
Abbildung 171: Benzo[ghi]perylen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Untersuchungsergebnisse für die Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[ghi]perylen zeigen mit sinkendem Feststoffgehalt eine leicht ansteigend Resorptionsverfügbarkeit.

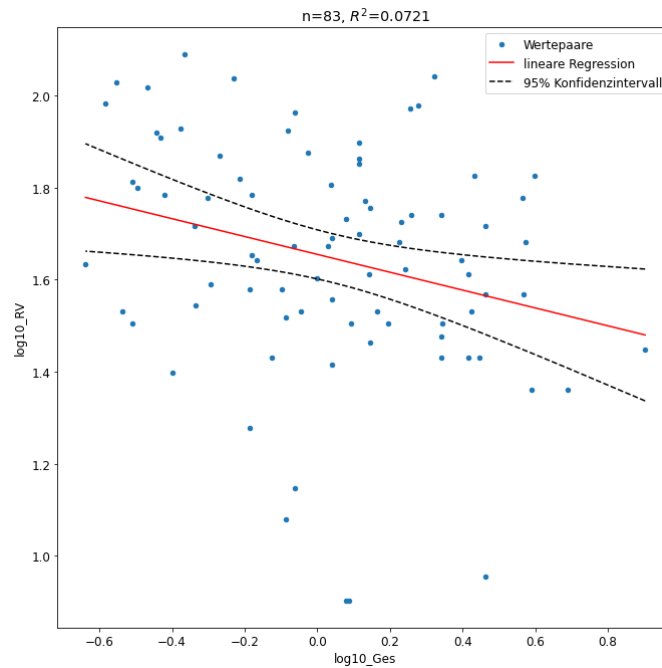
Abbildung 172: Benzo[ghi]perylen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Beim Zusammenstellen der Daten der alten Norm und der neuen Norm ist der leichte Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit festzustellen. Allerdings nimmt die Anzahl der Ausreißer über 100 % zu.

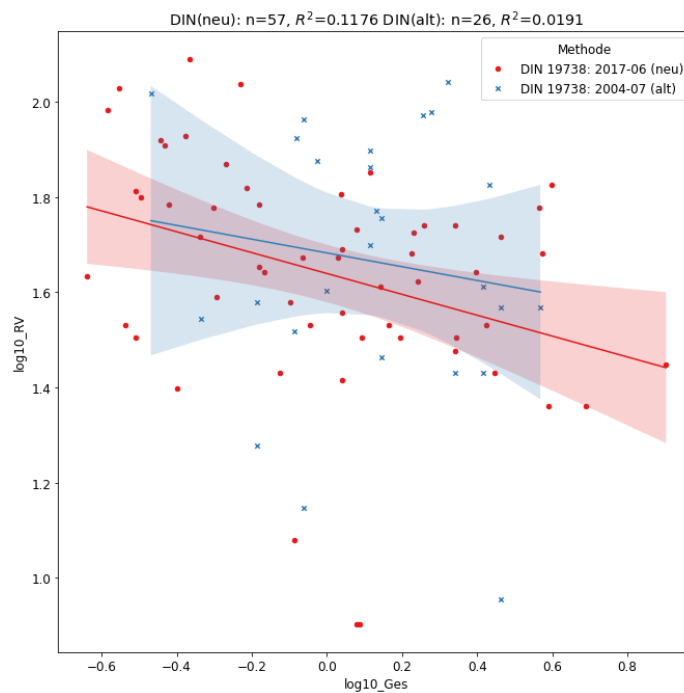
Abbildung 173: Benzo[ghi]perylen – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %], Sortierung aufsteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Durch die Datenanalyse mit der linearen Regression wird der Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit mit abnehmendem Feststoffgehalt bestätigt.

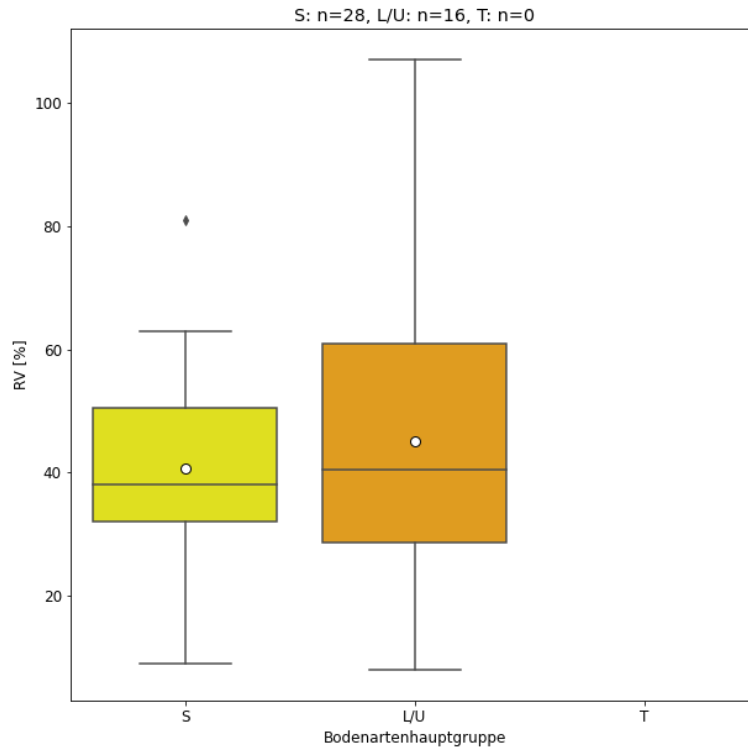
Abbildung 174: Benzo[ghi]perylen – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Daten der aktuell gültigen Norm zeigen einen stärkeren Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit mit geringer werdendem Feststoffgehalt, als die alte Norm.

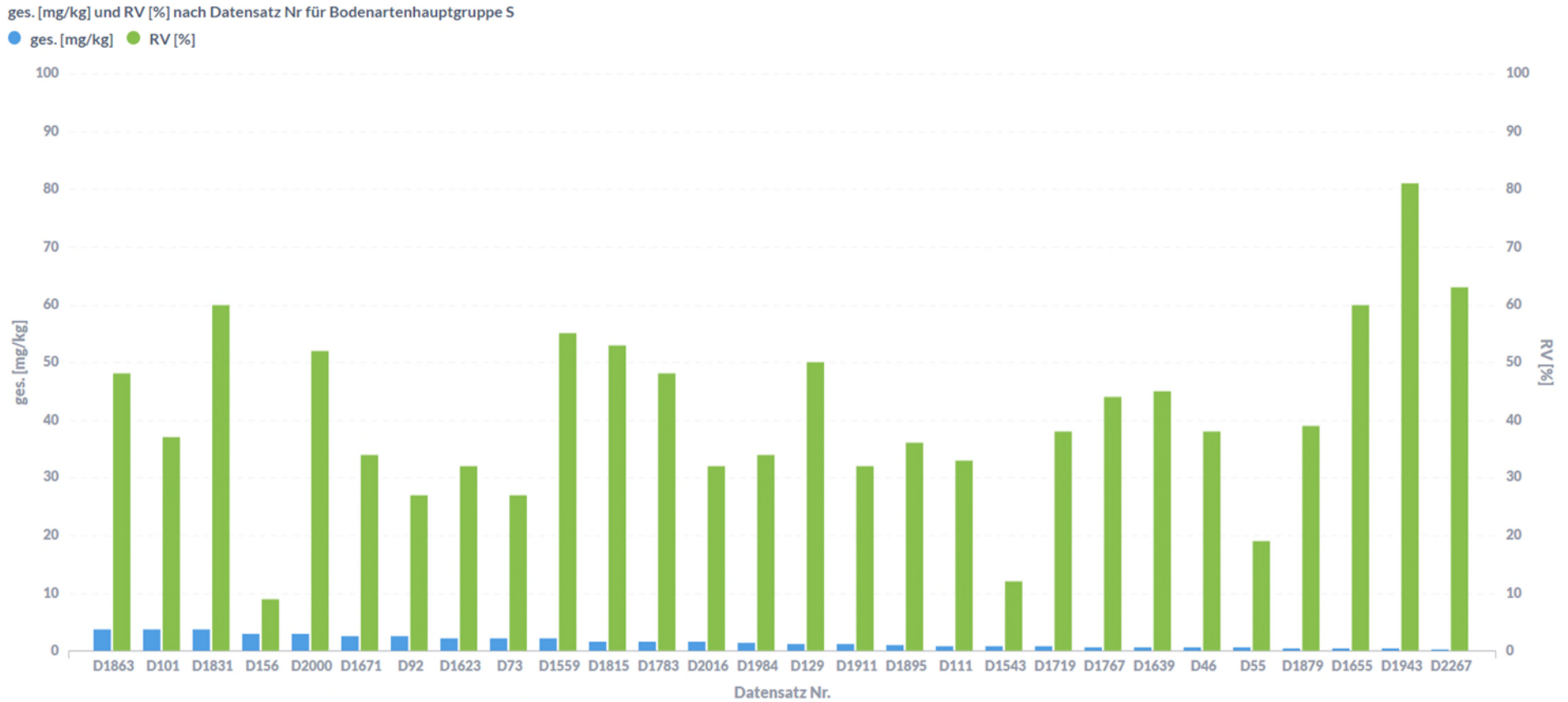
Abbildung 175: Benzo[ghi]perylen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit von Sand zu Lehm/Schluff ist nur geringfügig. Die Spannweite nimmt aber zu.

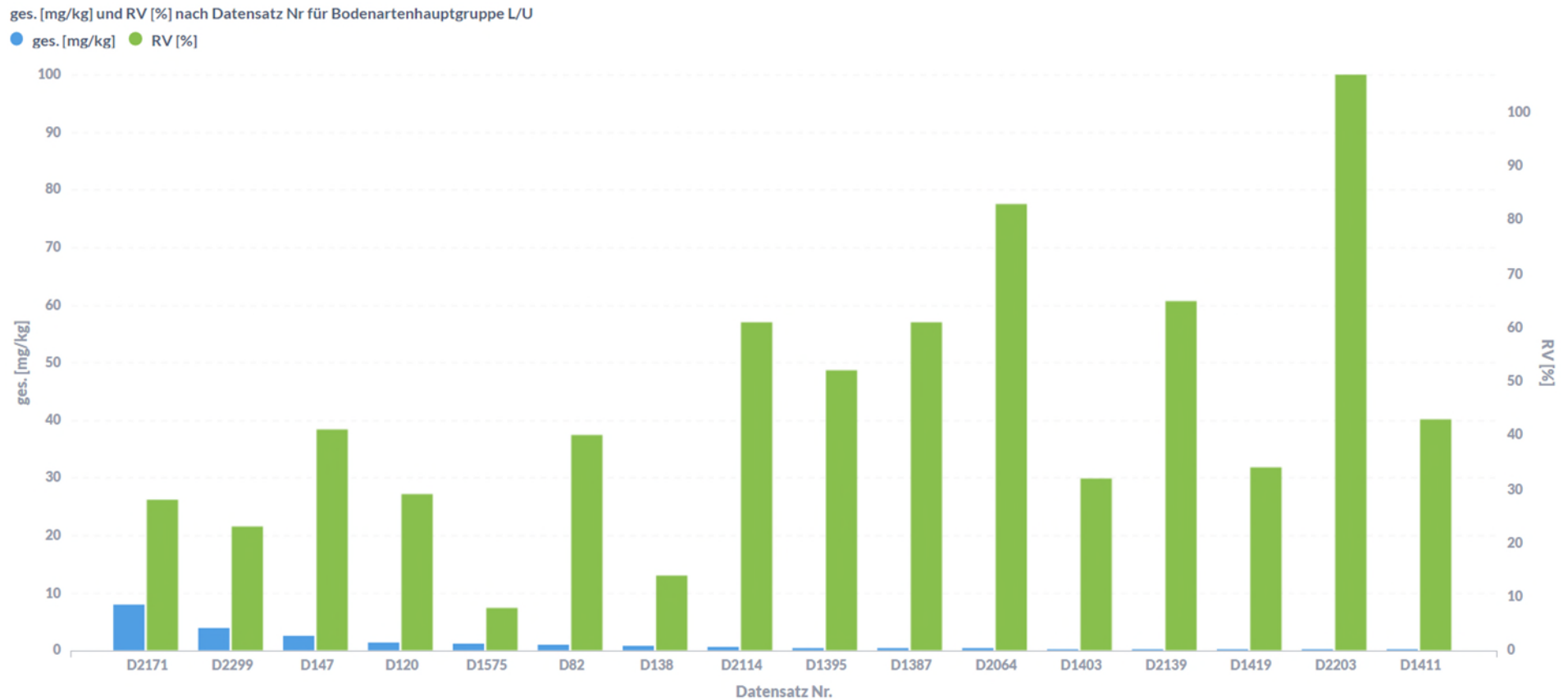
Abbildung 176: Benzo[ghi]perylen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der Bodenartenhauptgruppe Sand ist bei der Resorptionsverfügbarkeit kein konzentrationsabhängiger Trend erkennbar.

Abbildung 177: Benzo[ghi]perylen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Bodenartenhauptgruppen Lehm und Schluff verzeichnen konzentrationsabhängig bei Benzo[ghi]perylen einen leichten Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit mit sinkendem Feststoffgehalt.

Abbildung 178: Benzo[ghi]perylen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Carbonatgehalt des Bodens hat auf die Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[ghi]perylen keinen Einfluss.

Abbildung 179: Benzo[ghi]perylen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



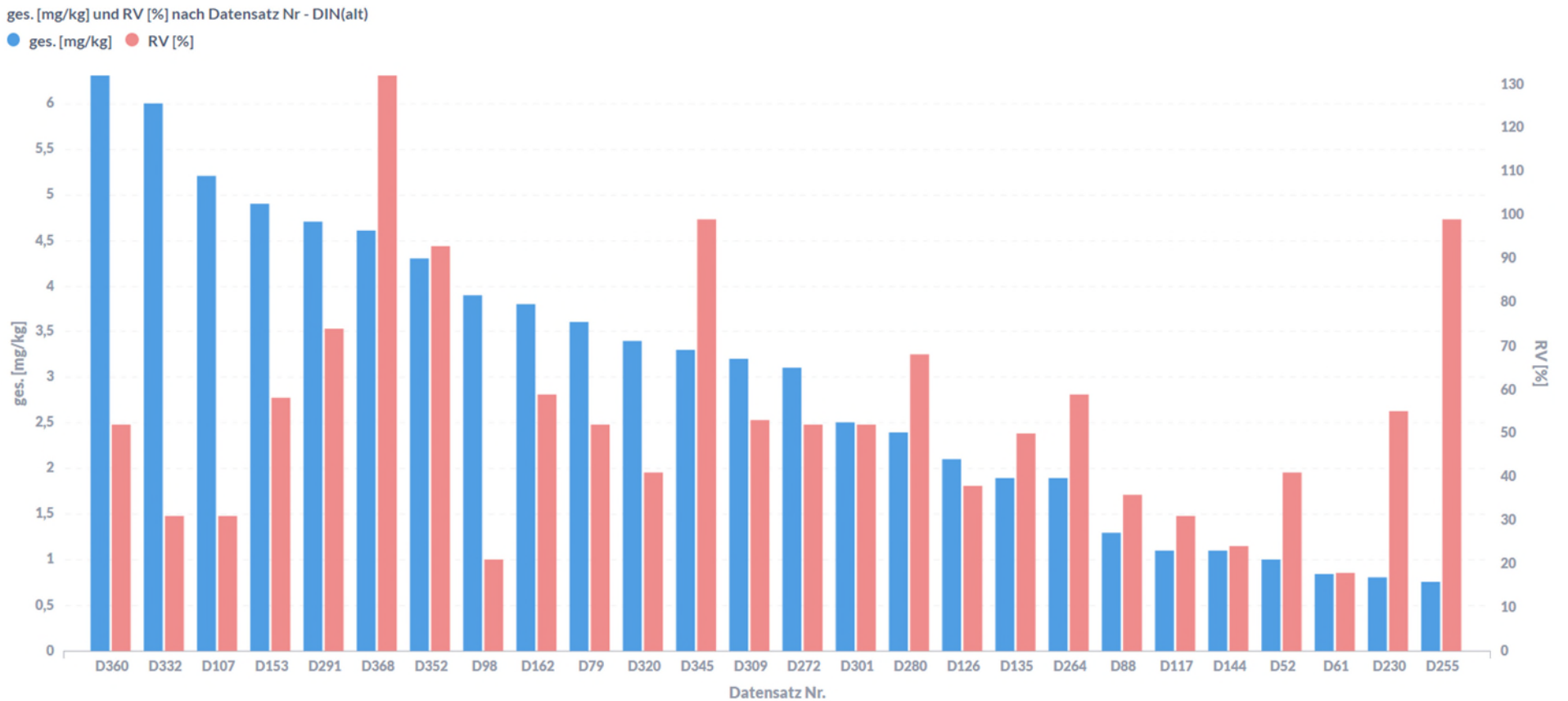
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Humusgehalt im Boden hat auf die Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[ghi]perylen keinen deutlichen Einfluss.

7.4.21 Chrysen

Die Resorptionsverfügbarkeit von Chrysen schwankt bezüglich der Feststoffgehalte, der Bodenartenhauptgruppen, dem Carbonat- und dem Humusgehalt unregelmäßig.

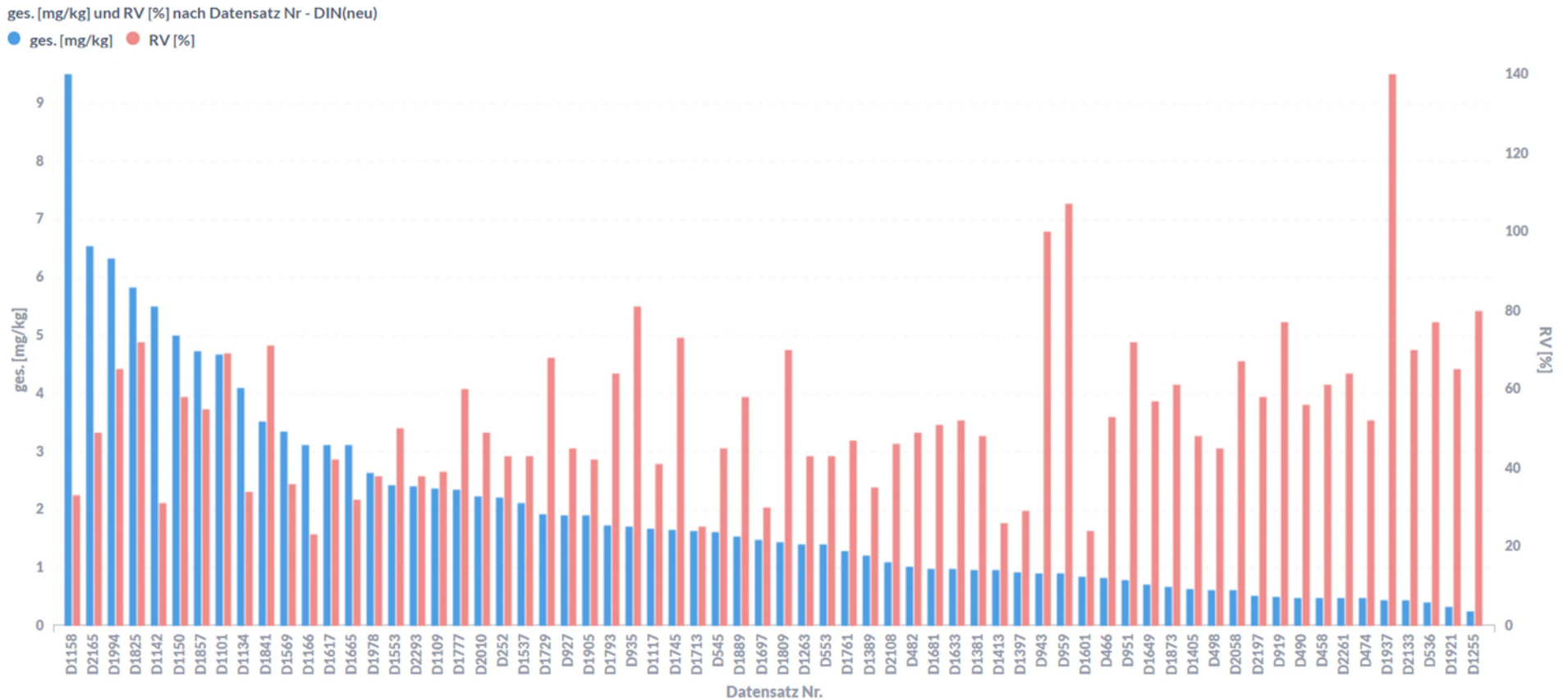
Abbildung 180: Chrysen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Aus den Schwankungen der Resorptionsverfügbarkeitsdaten im Säulendiagramm ist kein deutlicher Trend erkennbar.

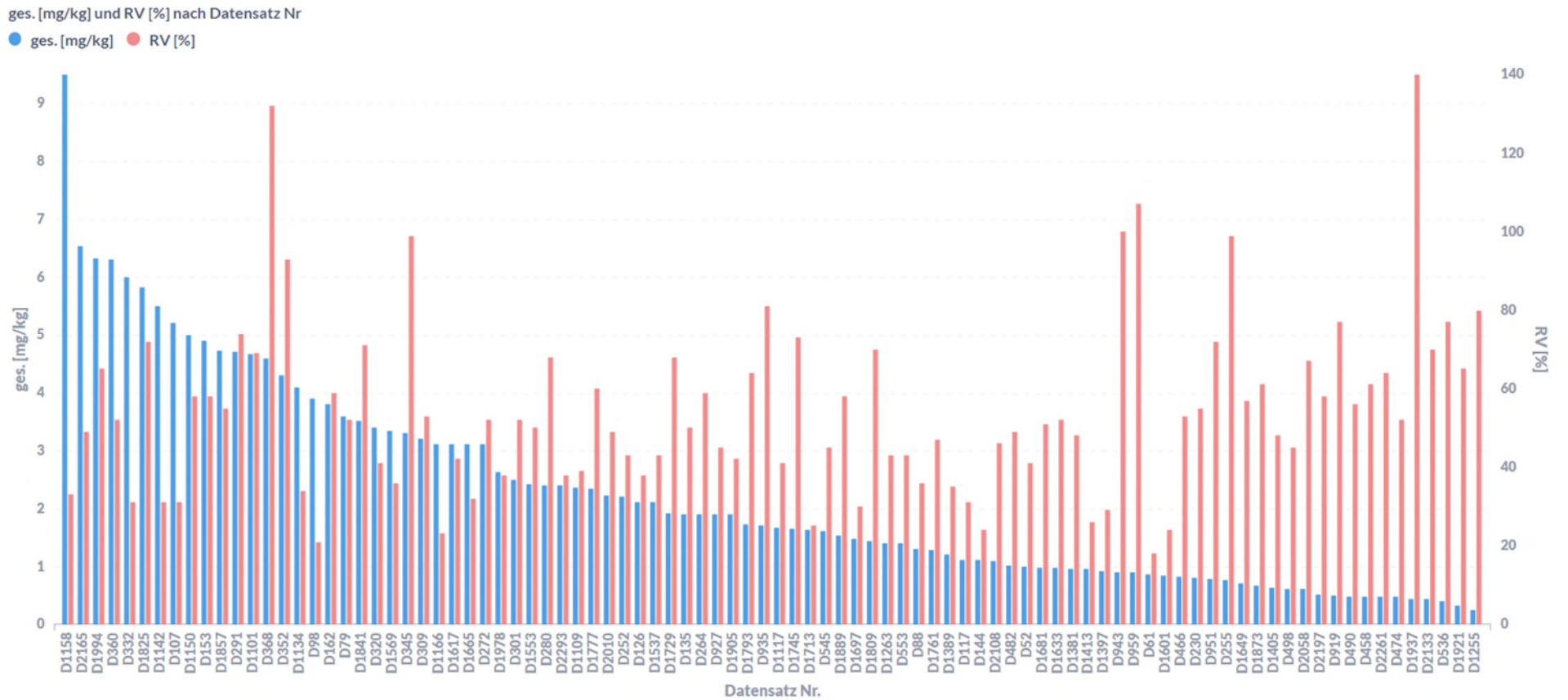
Abbildung 181: Chrysen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Im Säulendiagramm ist trotz der starken Schwankungen ein leichter Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit mit sinkendem Feststoffgehalt zu verzeichnen.

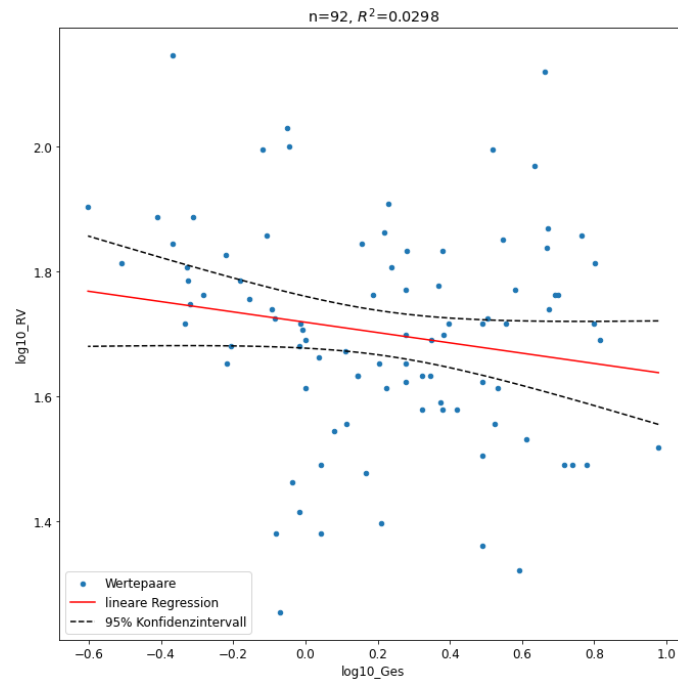
Abbildung 182: Chrysen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Auch in der Zusammenfassung beider Normausgaben ist kein deutlicher Trend ableitbar.

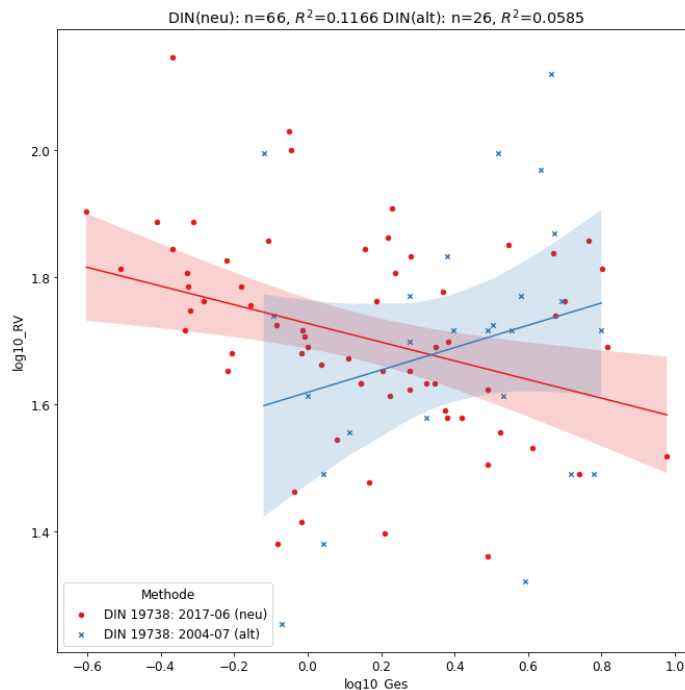
Abbildung 183: Chrysen – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Chrysen ist ein leichter Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit mit sinkendem Feststoffgehalt bei der linearen Regressionsanalyse erkennbar. Diese ist aber nicht signifikant.

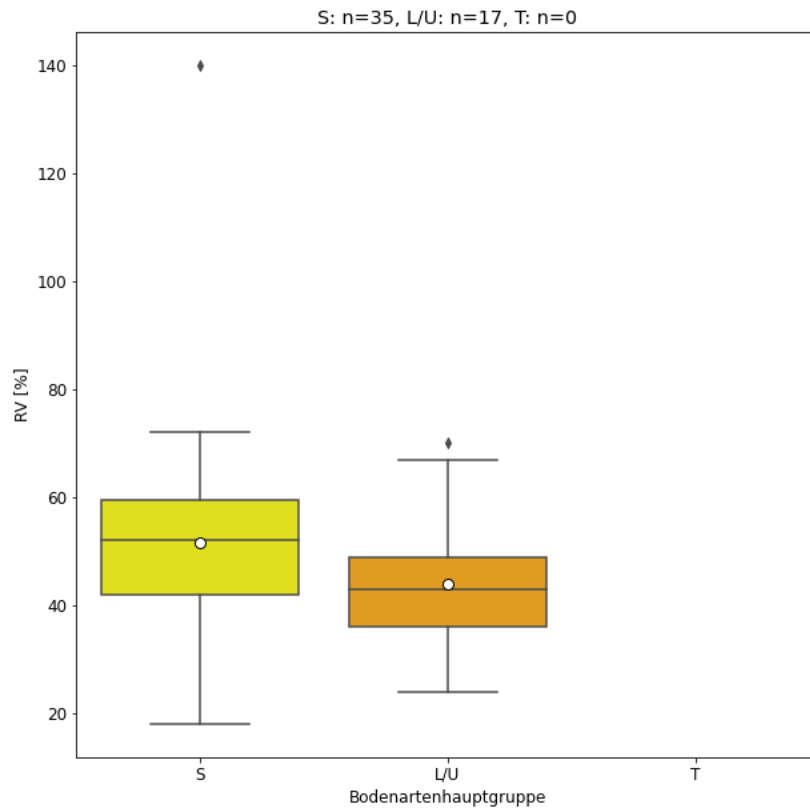
Abbildung 184: Chrysen – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Trend der Resorptionsverfügbarkeit der zurückgezogenen Norm wird dem der aktuelle gültigen entgegen. Die Daten der aktuellen Norm verdeutlichen einen Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit in Richtung niedriger Feststoffgehalte.

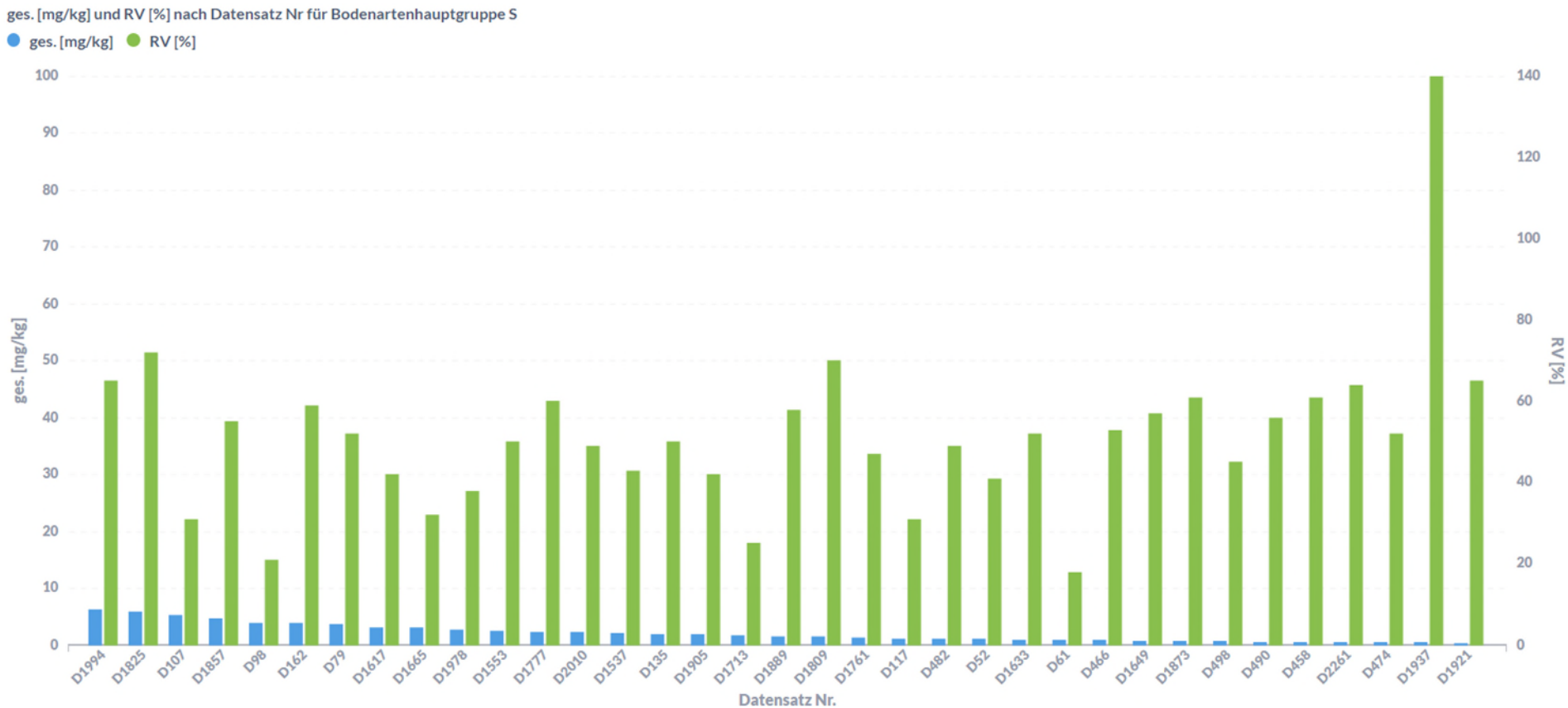
Abbildung 185: Chrysen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

In Richtung L/U sinkt die Resorptionsverfügbarkeit leicht.

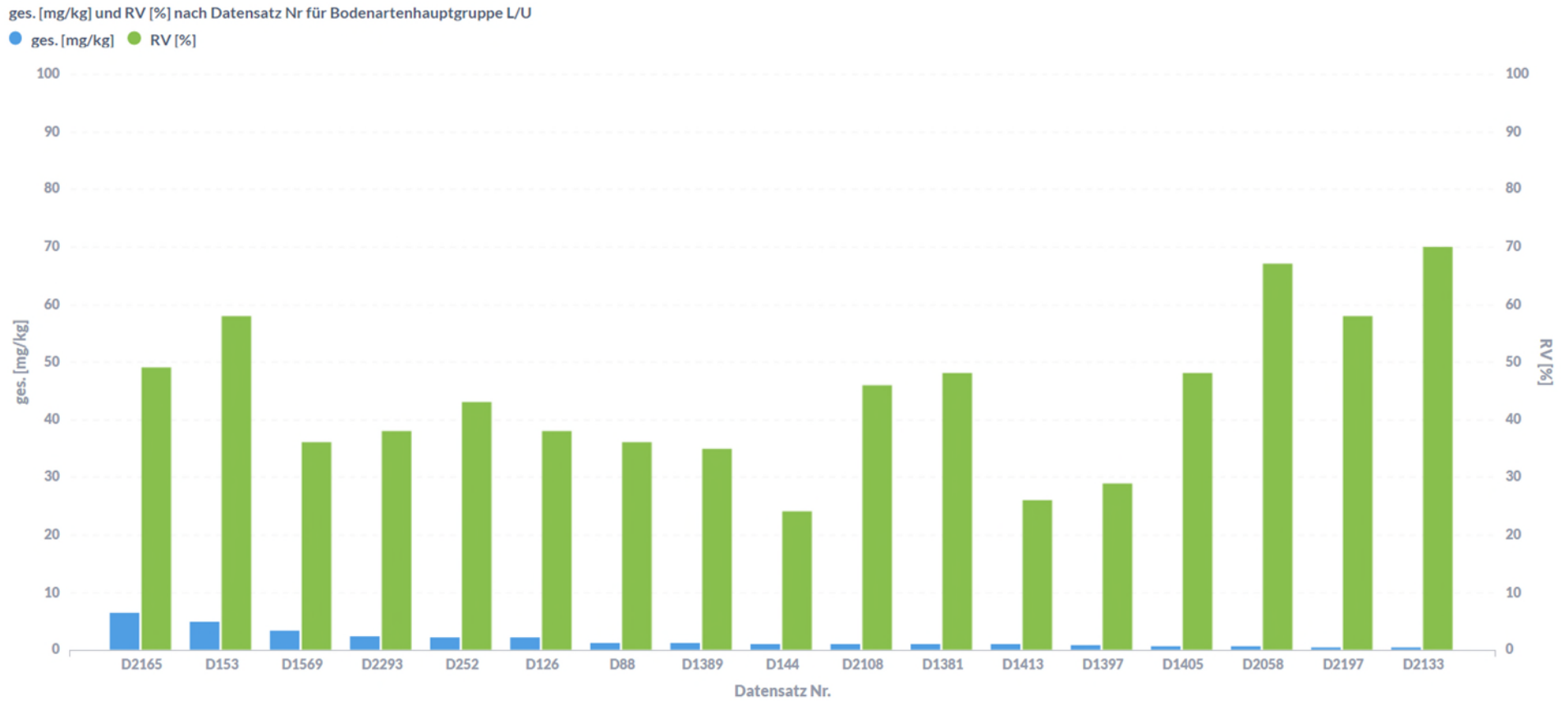
Abbildung 186: Chrysen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Innerhalb vom Sand ist kein Trend der Resorptionsverfügbarkeit erkennbar.

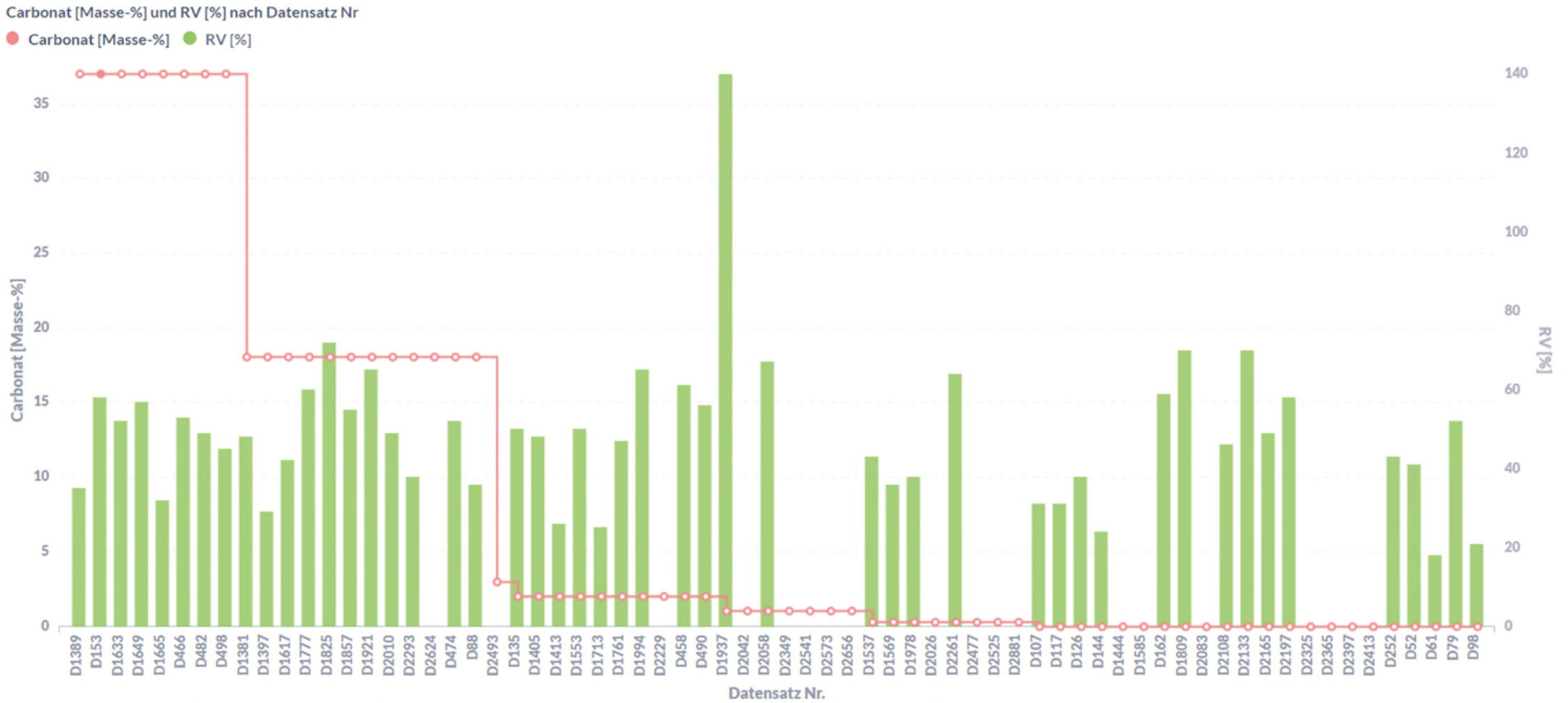
Abbildung 187: Chrysen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Das Gleiche gilt für L/U.

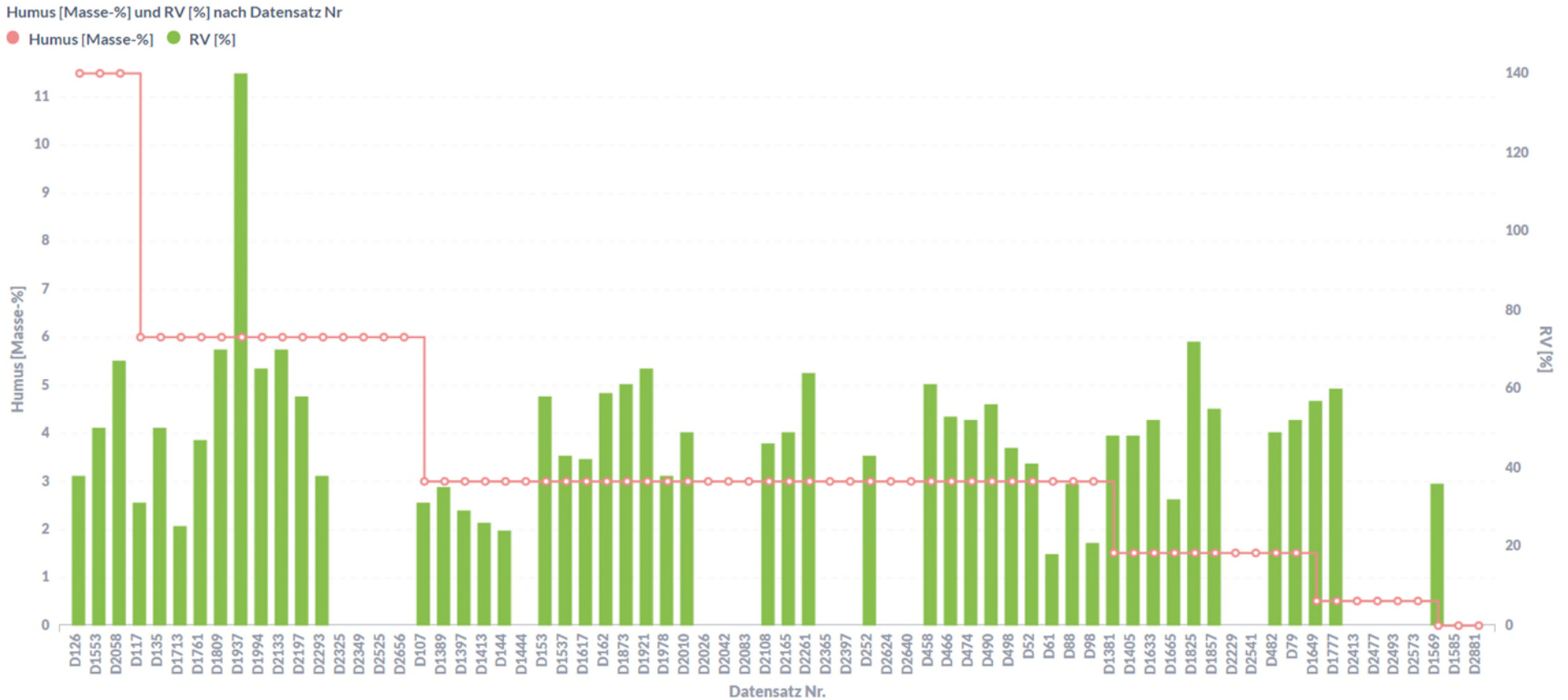
Abbildung 188: Chrysen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Carbonatgehalt des Bodens hat offenbar keinen Einfluss auf die Resorptionsverfügbarkeit von Chrysen.

Abbildung 189: Chrysen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



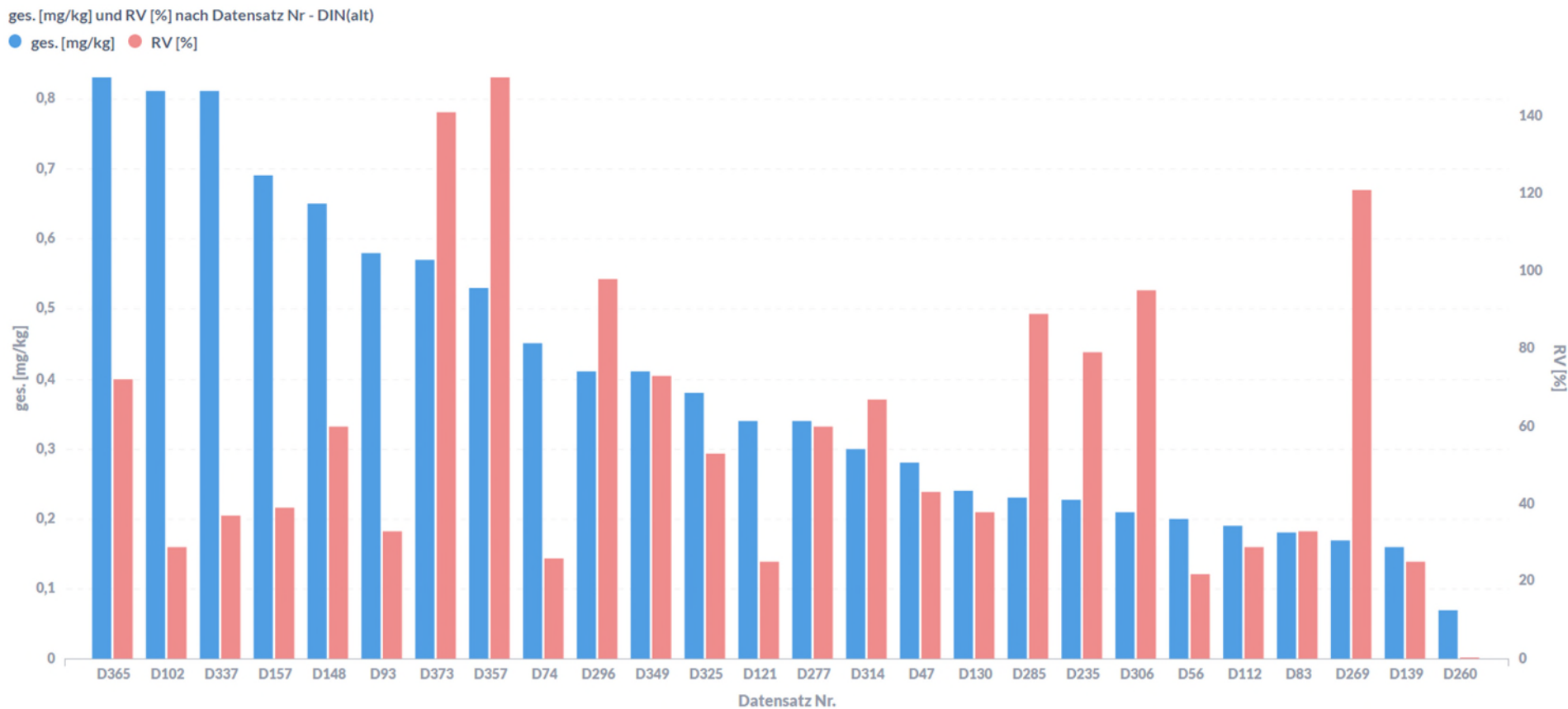
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Humusgehalt hat ebenfalls keinen Einfluss.

7.4.22 Dibenzo[a,h]anthracen

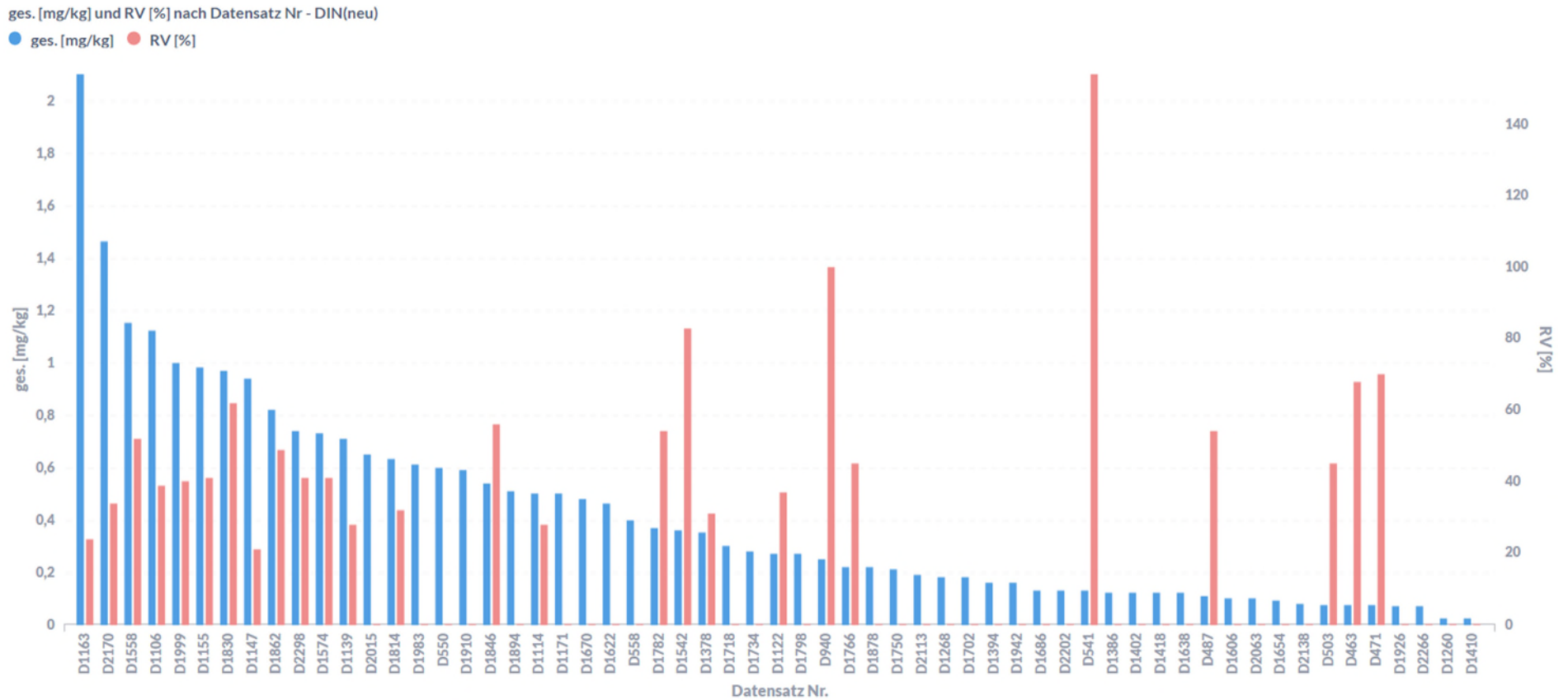
Die Resorptionsverfügbarkeit von Dibenzo[a,h]anthracen schwankt bezüglich der Feststoffgehalte, der Bodenartenhauptgruppen, dem Carbonat- und dem Humusgehalt ohne deutlich erkennbare Tendenzen aus den Säulendiagrammen erkennen zu lassen.

Abbildung 190: Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



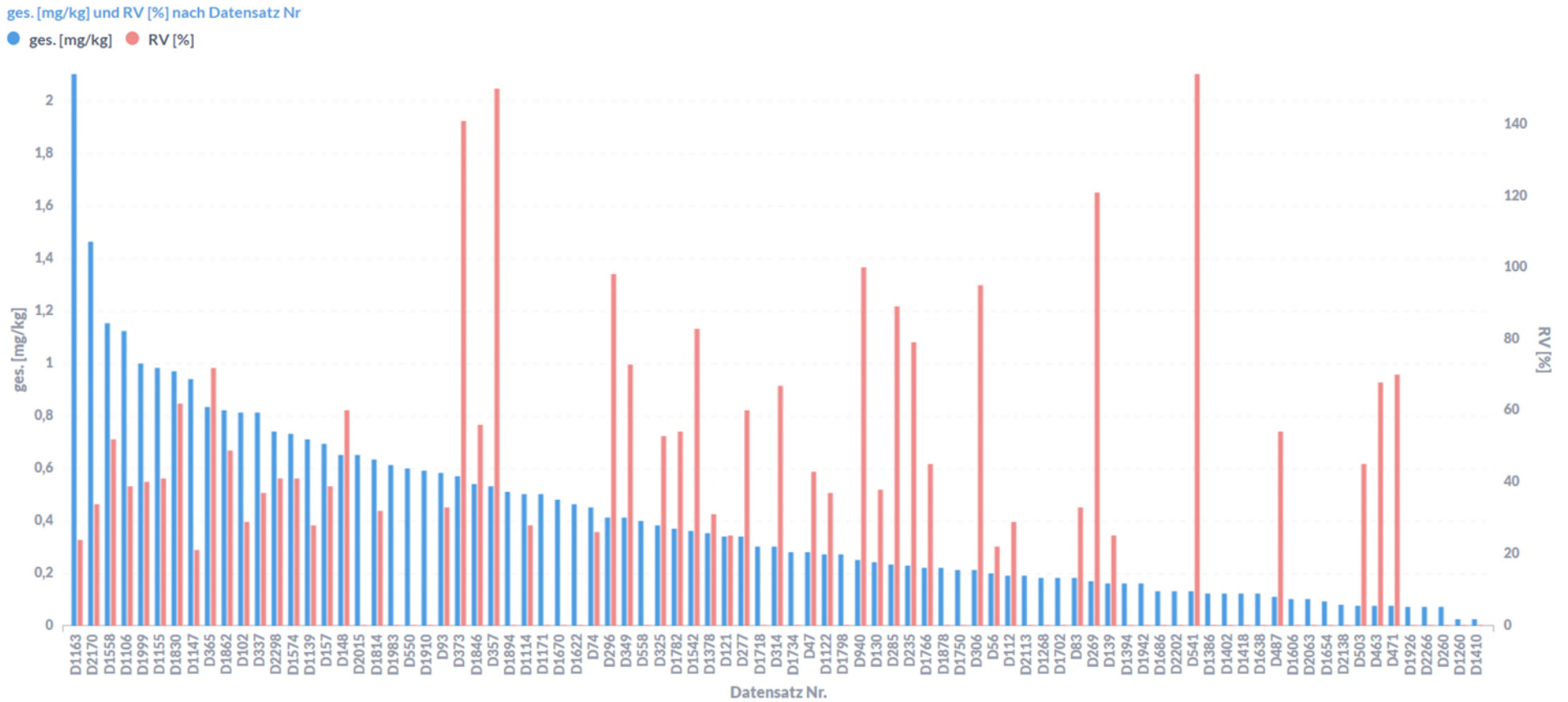
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 191: Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



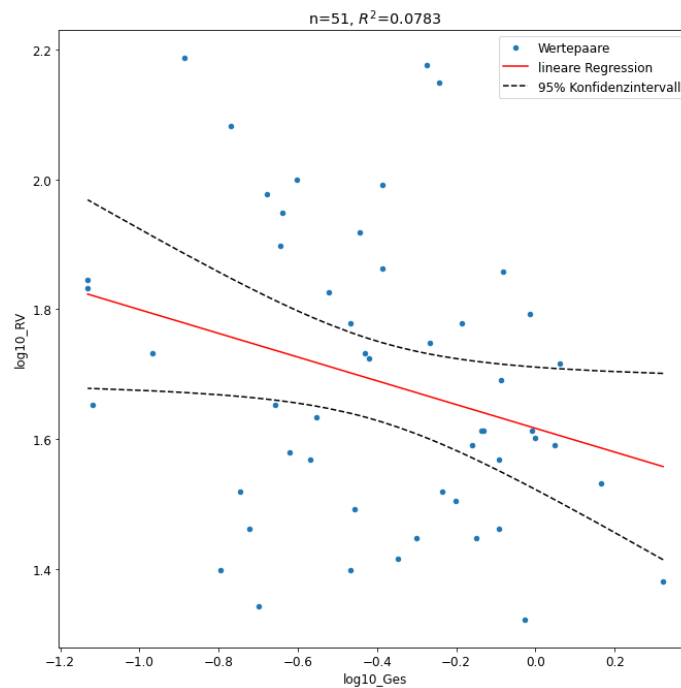
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 192: Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

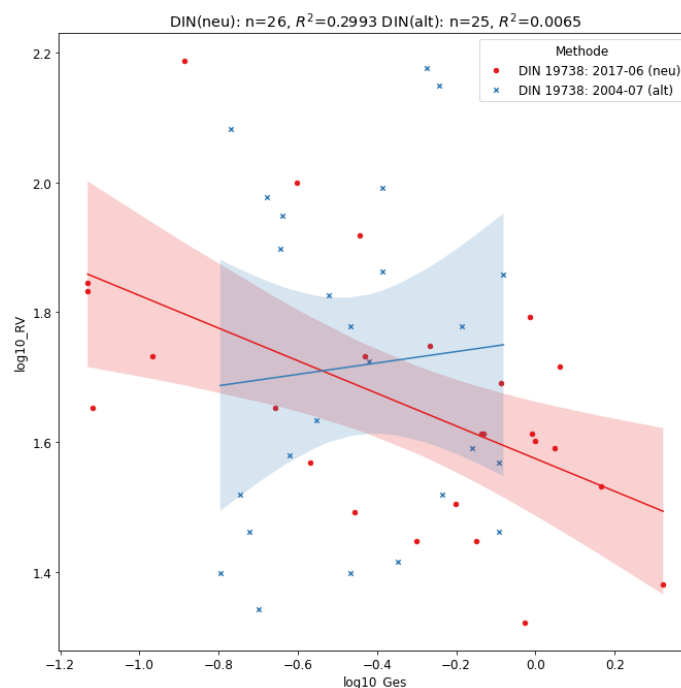
Abbildung 193: Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit nimmt gemäß der Datenanalyse mittels linearer Regression mit zunehmendem Feststoffgehalt ab. Die Untersuchungsergebnisse schwanken erheblich.

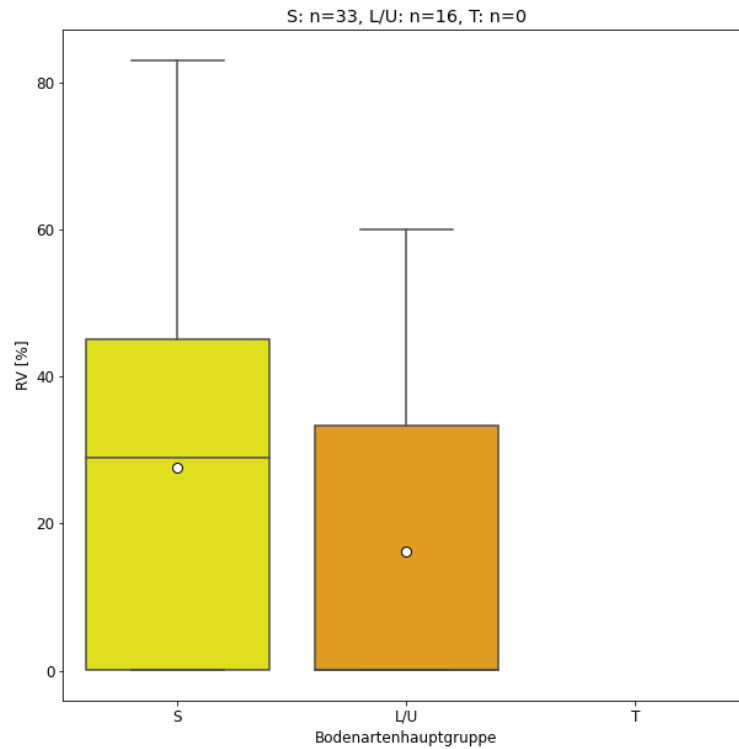
Abbildung 194: Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Feststoffgehalte [log10_Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [log10_RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Daten des alten Normausgabestandes wirken den Daten der aktuellen Norm wieder entgegen. Der Trend der Erhöhung der Resorptionsverfügbarkeit in Richtung der Verringerung der Feststoffgehalte ist deutlich.

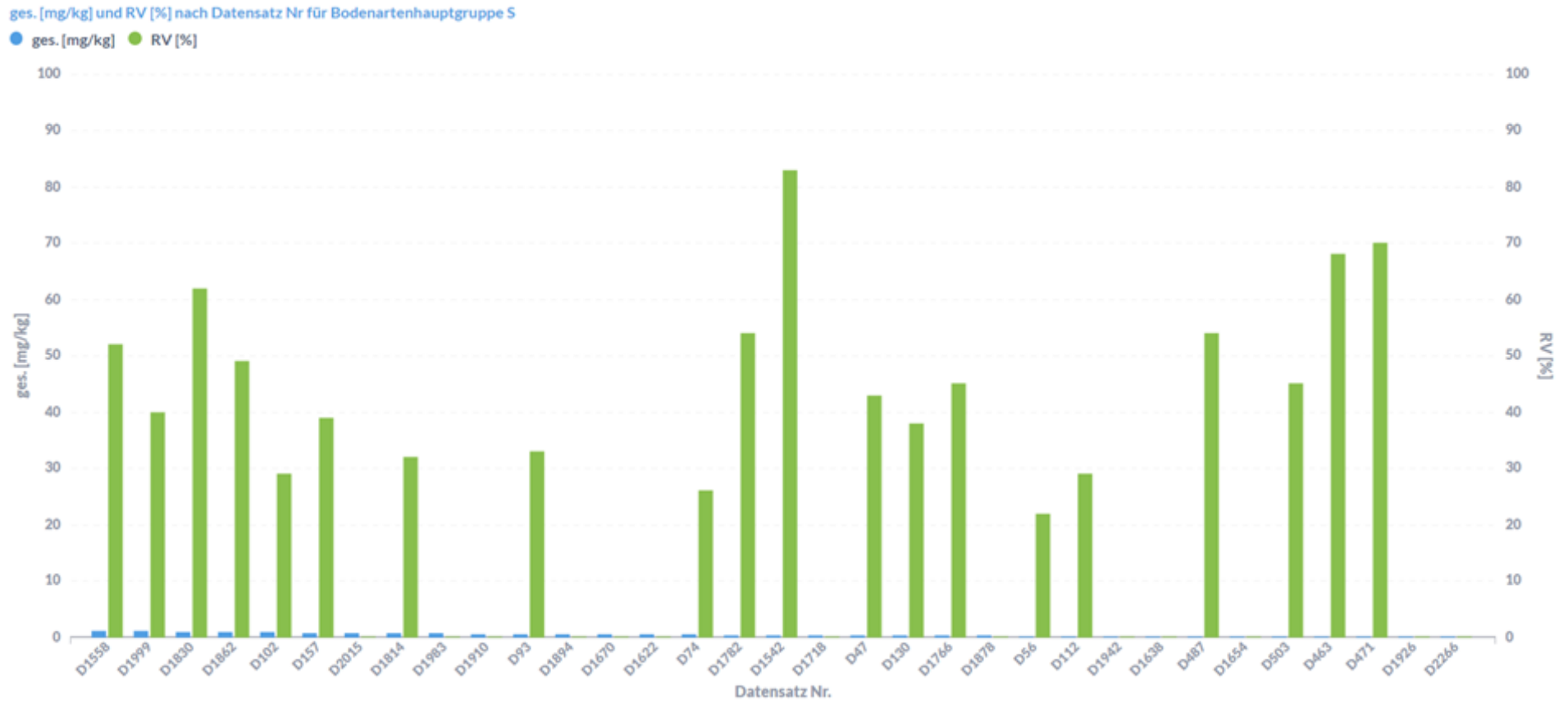
Abbildung 195: Dibenzo[a,h]anthracen – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Von Sand nimmt die Resorptionsverfügbarkeit zu Lehm/Schluff ab.

Abbildung 196: Dibenzo[a,h]anthracen – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Beim Sand ist kein deutlicher Trend zu erkennen.

Abbildung 197: Dibenzo[a,h]anthracen – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei L/U treten Schwankungen und Fehlbefunde auf. Ein deutlicher Trend kann nicht abgeleitet werden.

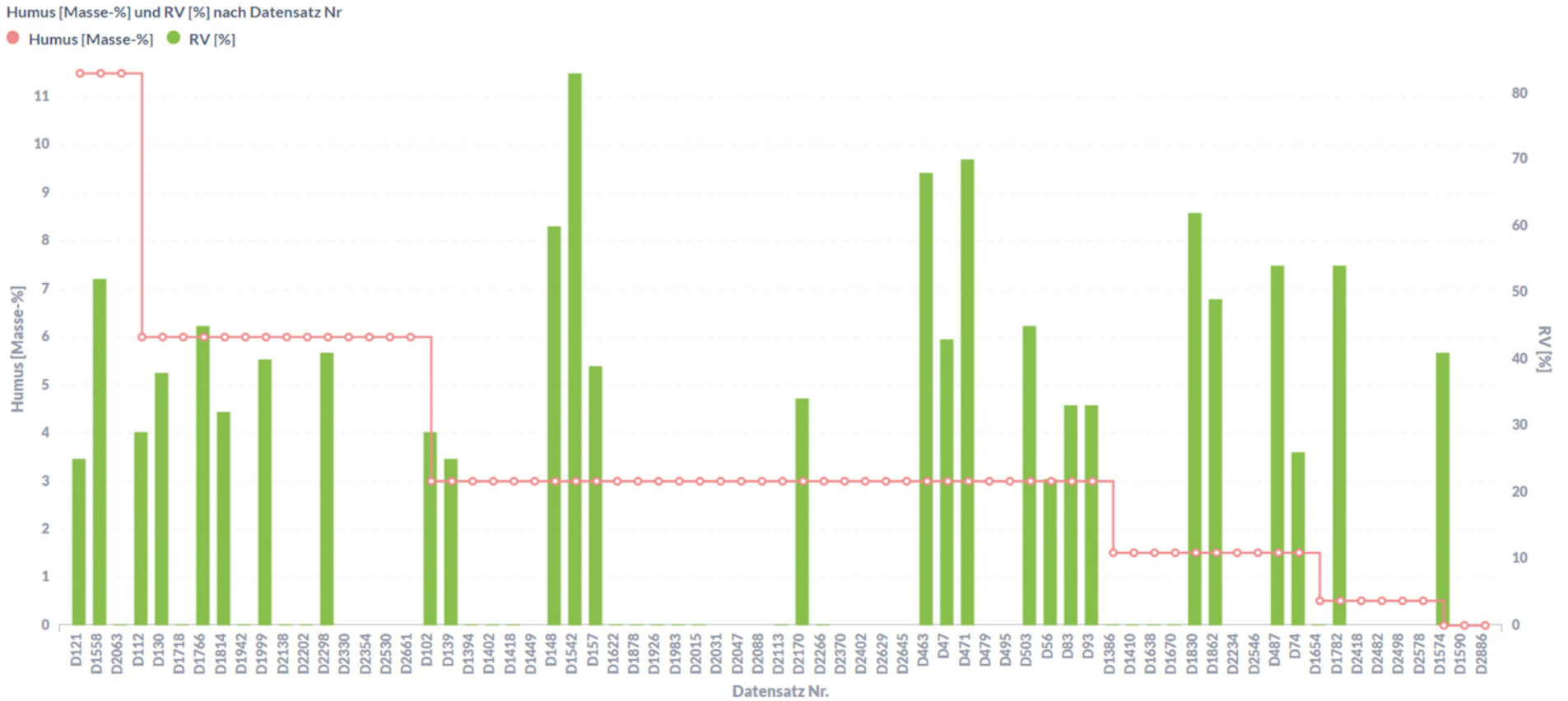
Abbildung 198: Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Carbonatgehalt des Bodens hat auf die Resorptionsverfügbarkeit des Bodens für Dibenzo[a,h]anthracen offenbar kaum Einfluss.

Abbildung 199: Dibenzo[a,h]anthracen – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



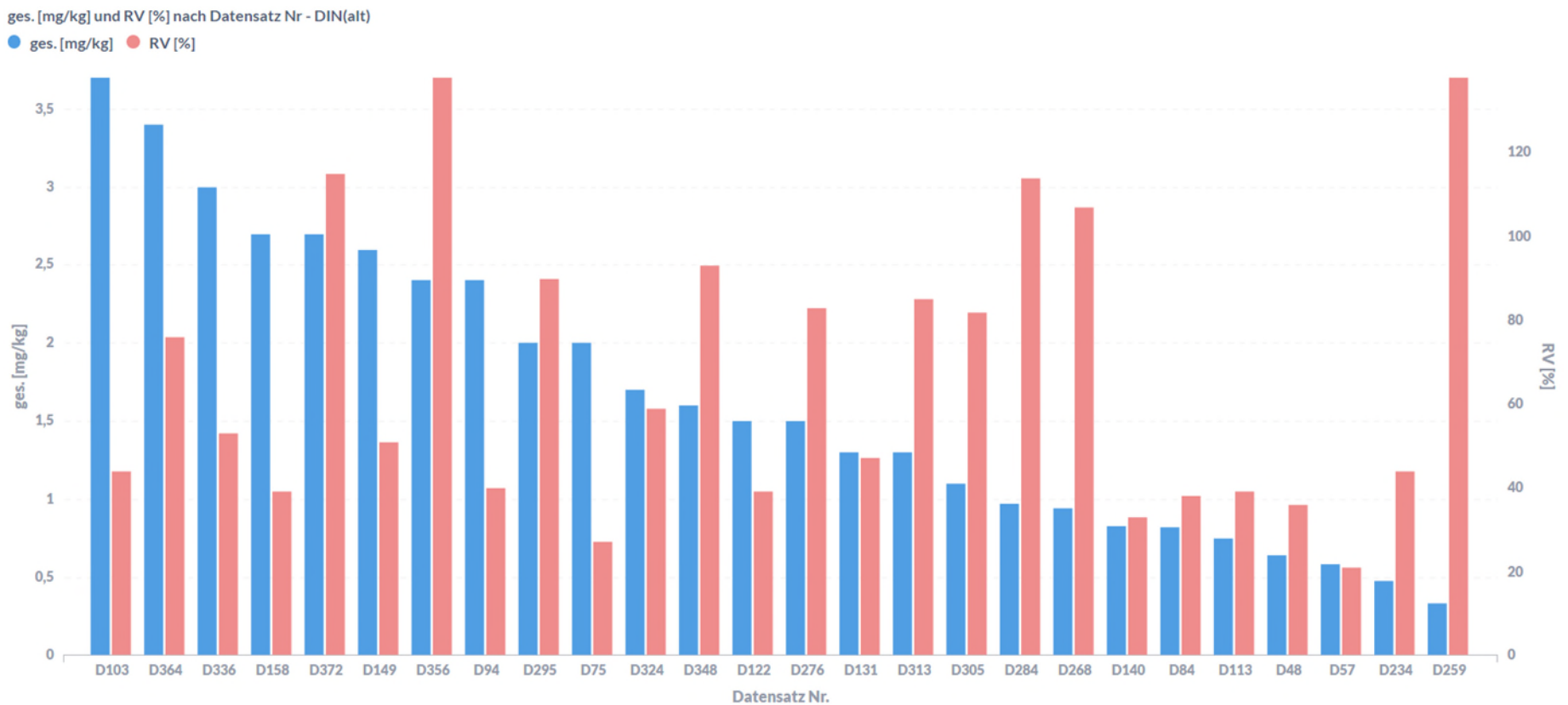
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Humus hat auf die Resorptionsverfügbarkeit von Dibenzo[a,h]anthracen auch keinen Einfluss.

7.4.23 Indeno[1,2,3-cd]pyren

Bei Indeno[1,2,3-cd]pyren waren aufgrund der Anzahl von Datensätzen Trends ermittelbar.

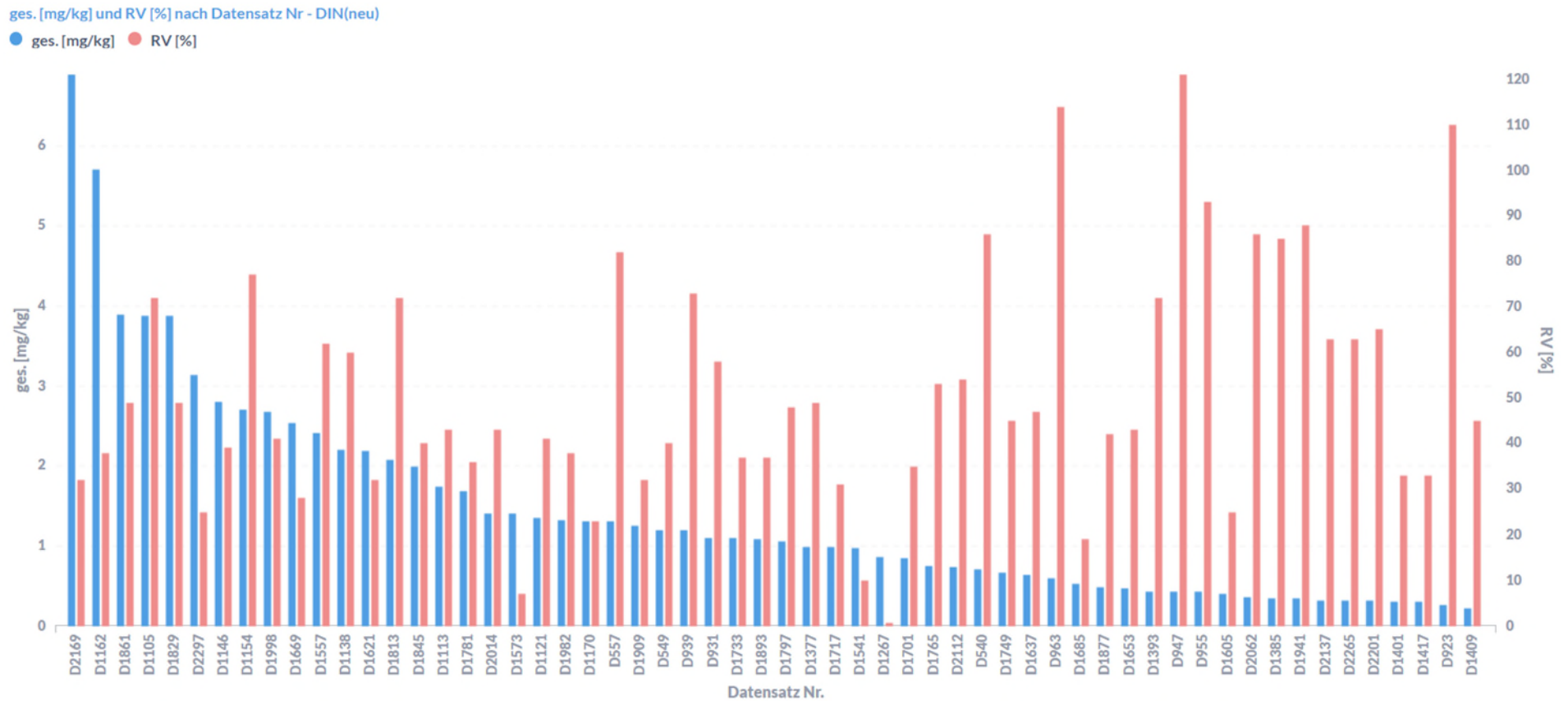
Abbildung 200: Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (alt), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Nach der alten DIN-Methode ist kein Trend im Säulendiagramm erkennbar. Die Überschreitungen der 100 % Resorptionsverfügbarkeit wurden dabei nicht beachtet.

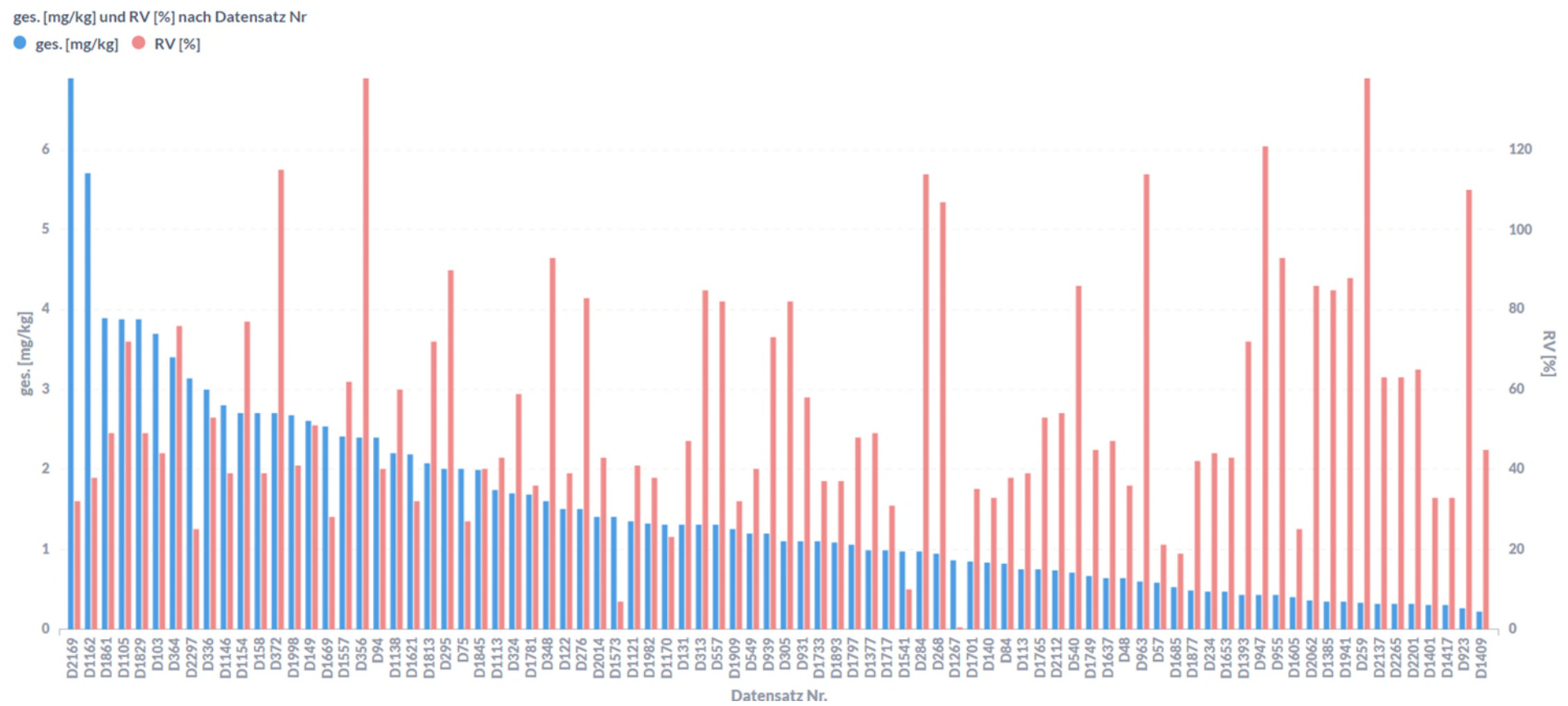
Abbildung 201: Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%] nach DIN (neu), Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der neuen DIN-Methode ist der Trend entgegengesetzt. Es kommt tendenziell zu einem Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit mit der Verringerung des Feststoffgehaltes.

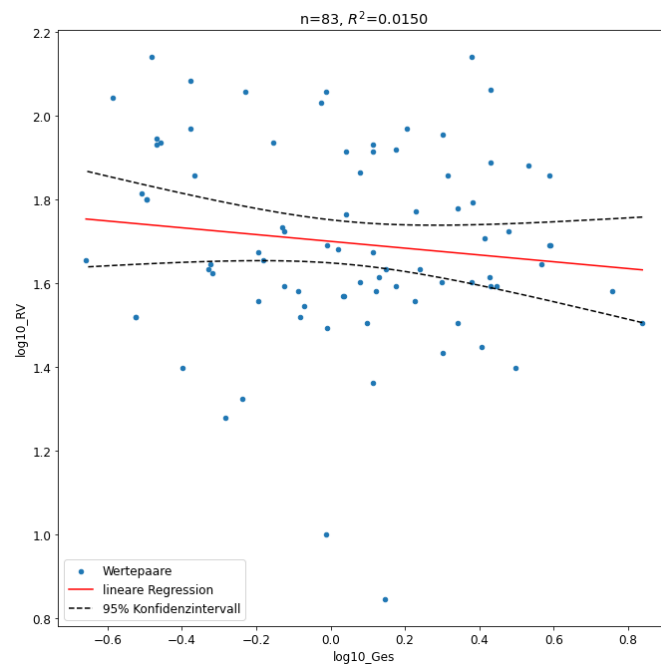
Abbildung 202: Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Zusammenstellung aller Werte verdeutlicht, den Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit mit Absinken des Feststoffgehaltes.

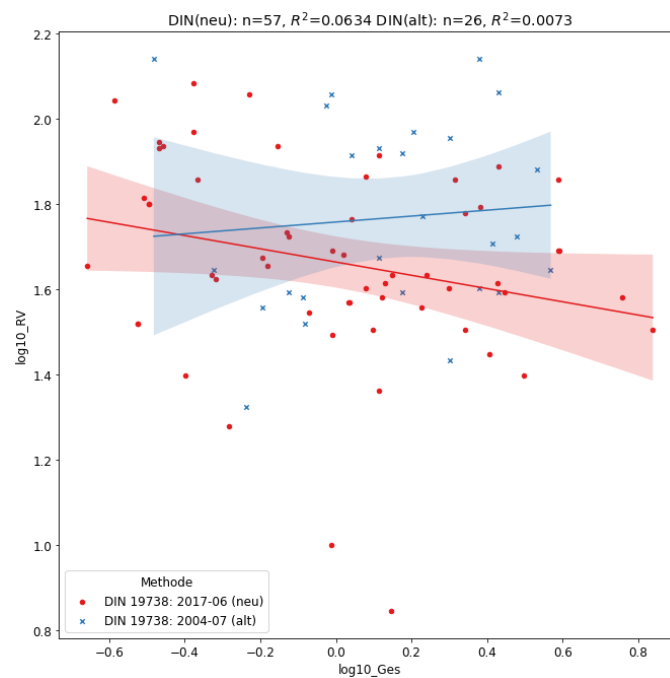
Abbildung 203: Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %], Sortierung aufsteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei der linearen Regressionsanalyse zeichnet sich der Trend des Anstiegs der Resorptionsverfügbarkeit mit Absinken des Feststoffgehaltes nur geringfügig ab.

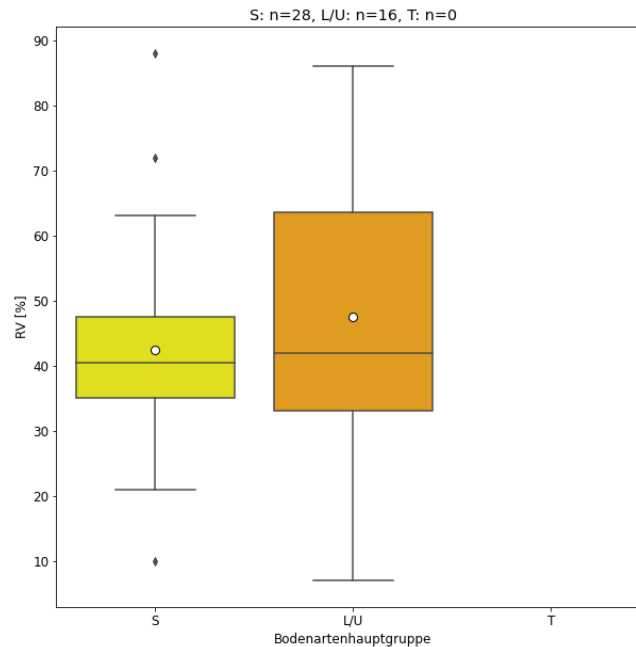
Abbildung 204: Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Feststoffgehalte [\log_{10} _Ges, mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [\log_{10} _RV, %], nach DIN-Methoden



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Trend des Anstiegs der Resorptionsverfügbarkeit mit Absinken des Feststoffgehaltes wird nur bei den Daten der aktuellen Norm deutlich und wird damit belegt.

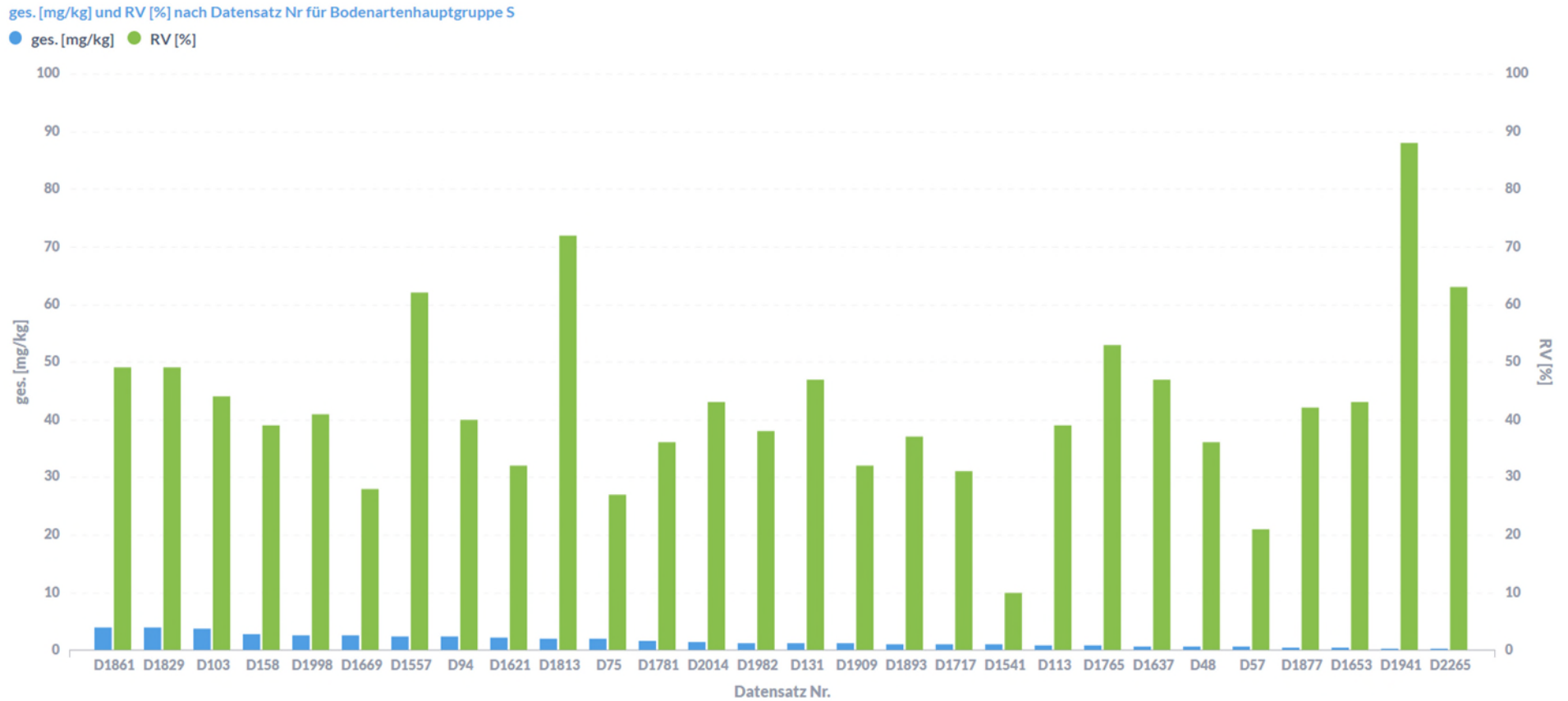
Abbildung 205: Indeno[1,2,3-cd]pyren – Bodenartenhauptgruppen, Unteres / oberes Quartil, Median und arithmetisches Mittel (o), Resorptionsverfügbarkeit RV [%]



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Das arithmetische Mittel steigt von S zu L/U an. Der Median bleibt durch die größere Streuung bei L/U gleich.

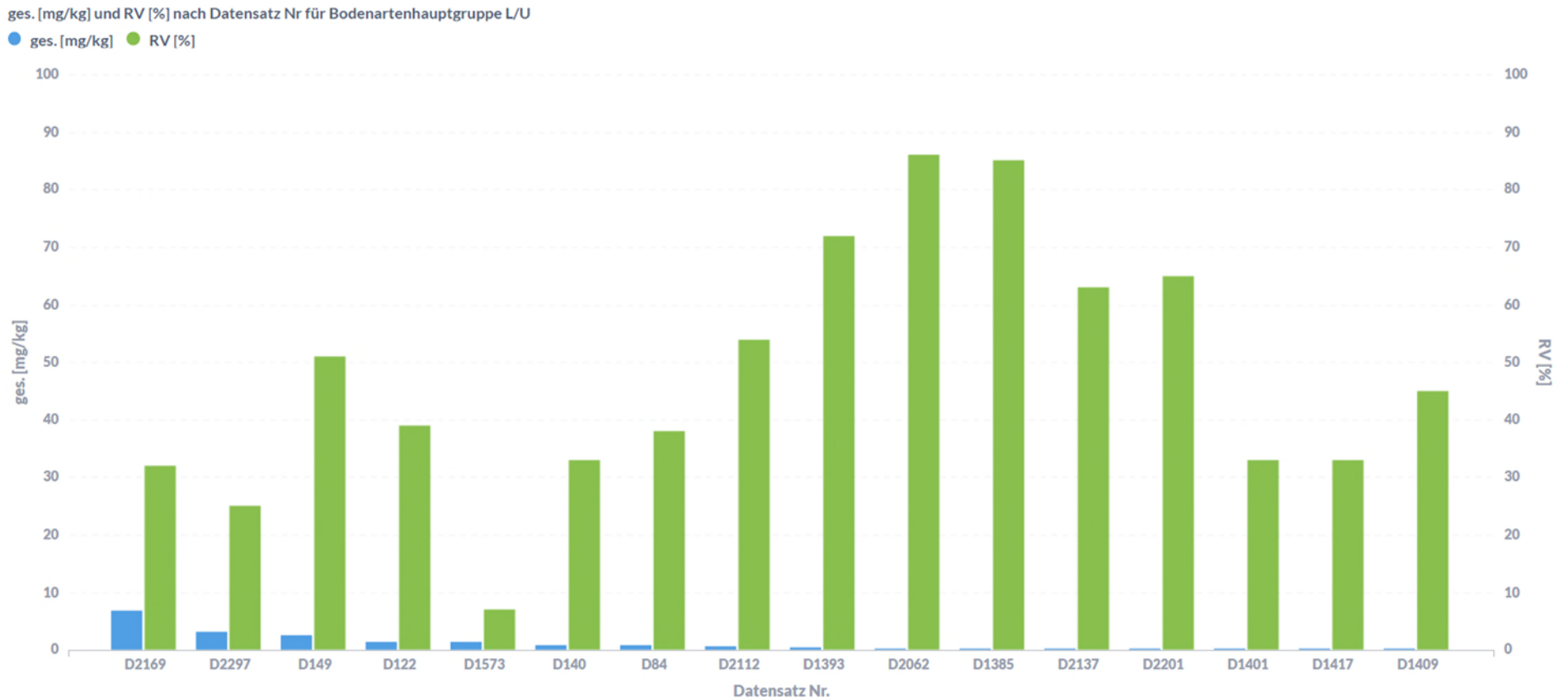
Abbildung 206: Indeno[1,2,3-cd]pyren – Bodenartenhauptgruppe S, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Sand sind im Zusammenhang mit dem Feststoffgehalt sind keine Trends erkennbar.

Abbildung 207: Indeno[1,2,3-cd]pyren – Bodenartenhauptgruppe L/U, Datensätze Feststoffgehalte [mg/kg] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung absteigende Feststoffgehalte



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei den Bodenartenhauptgruppen Lehm und Schluff ist mit sinkender Feststoffkonzentration ein Anstieg der Resorptionsverfügbarkeit festzustellen.

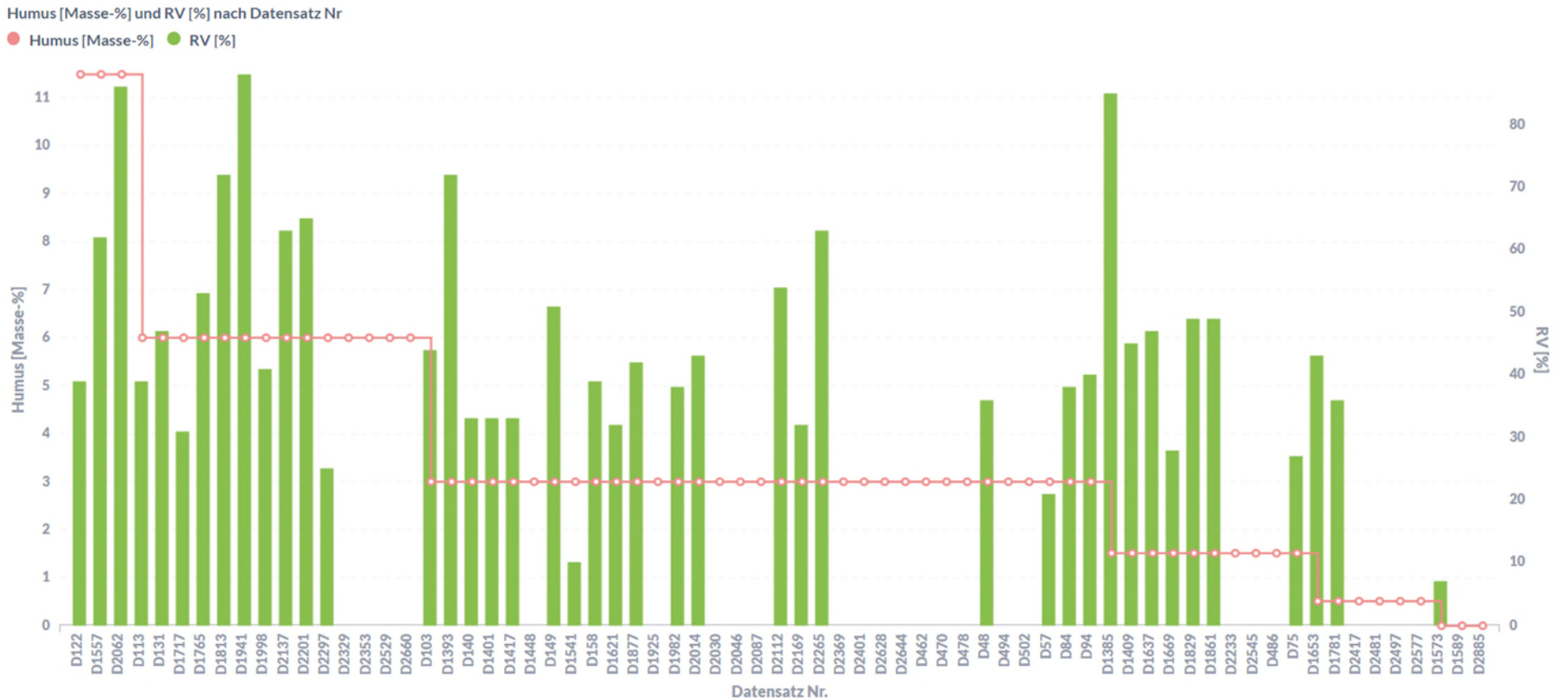
Abbildung 208: Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Carbonat [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Carbonat absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Der Carbonatgehalt im Boden hat auf die Resorptionsverfügbarkeit von Indeno[1,2,3-cd]pyren offenbar keinen Einfluss.

Abbildung 209: Indeno[1,2,3-cd]pyren – Datensätze Humus [Masse-%] und Resorptionsverfügbarkeit RV [%], Sortierung Humus absteigend



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit von Indeno[1,2,3-cd]pyren sinkt geringfügig mit niedriger werdendem Humusgehalt im Boden.

7.5 Resorptionsverfügbarkeit bezüglich der Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV

Gemäß der novellierten BBodSchV (Inkrafttreten 01.08.2023) werden bei der Untersuchung zum Wirkungspfad Boden-Mensch folgende Nutzungen unterschieden (s. BBodSchV, Anlage 2, Tab. 4 Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch):

- ▶ Kinderspielflächen
- ▶ Wohngebiete
- ▶ Park- und Freizeitanlagen
- ▶ Industrie- und Gewerbegrundstücke.

Diesen Nutzungen sind Stoffe mit Prüfwerten zugeordnet.

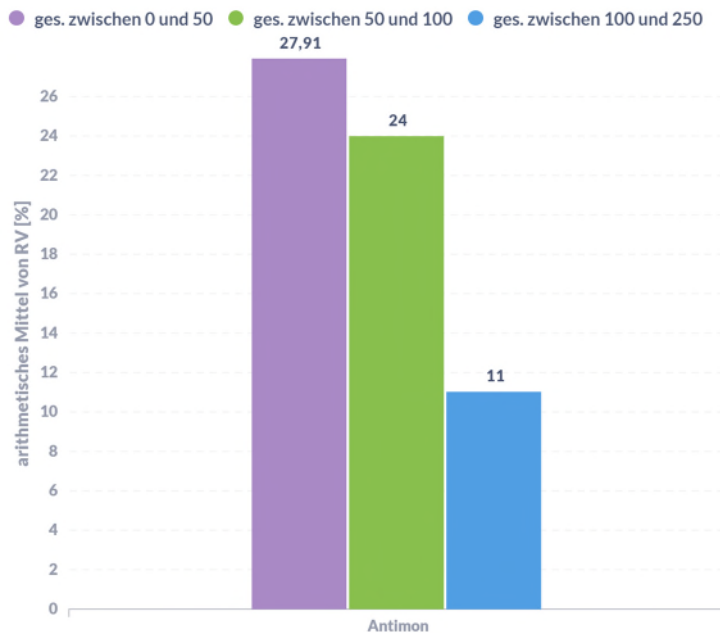
Gemäß BBodSchV ist in § 13 Abs. 3 vorgegeben, dass im Rahmen der Detailuntersuchung zur abschließenden Gefährdungsabschätzung die für die jeweils betroffenen Wirkungspfade im Sinne des § 11 Absatz 2 und 3 maßgeblichen Expositionsbedingungen sowie die bedeutsamen resorptionsverfügbaren, mobilen oder mobilisierbaren Anteile der Schadstoffgehalte ermittelt werden sollen.

Deshalb werden im Folgenden den stoffspezifischen Prüfwerten die jeweilig arithmetischen Mittel der Resorptionsverfügbarkeiten, die sich aus den zusammengestellten Daten ergeben, zugeordnet. Es handelt sich um folgende Spannen, die in den entsprechenden Abbildungen als Säulen dargestellt werden, sofern Daten dazu vorhanden sind:

- ▶ unterhalb Kinderspielflächen bis Kinderspielflächen,
- ▶ Kinderspielflächen bis Wohngebiete,
- ▶ Wohngebiete bis Park- und Freizeitanlagen,
- ▶ Park- und Freizeitanlagen bis Industrie- und Gewerbegrundstücke,
- ▶ Industrie- und Gewerbegrundstücke bis über diese Prüfwerte.

Die Angaben in den Abbildungen stellen die Spannen der Feststoffgehalte gemäß BBodSchV und ermittelten zugehörigen Resorptionsverfügbarkeiten in % dar.

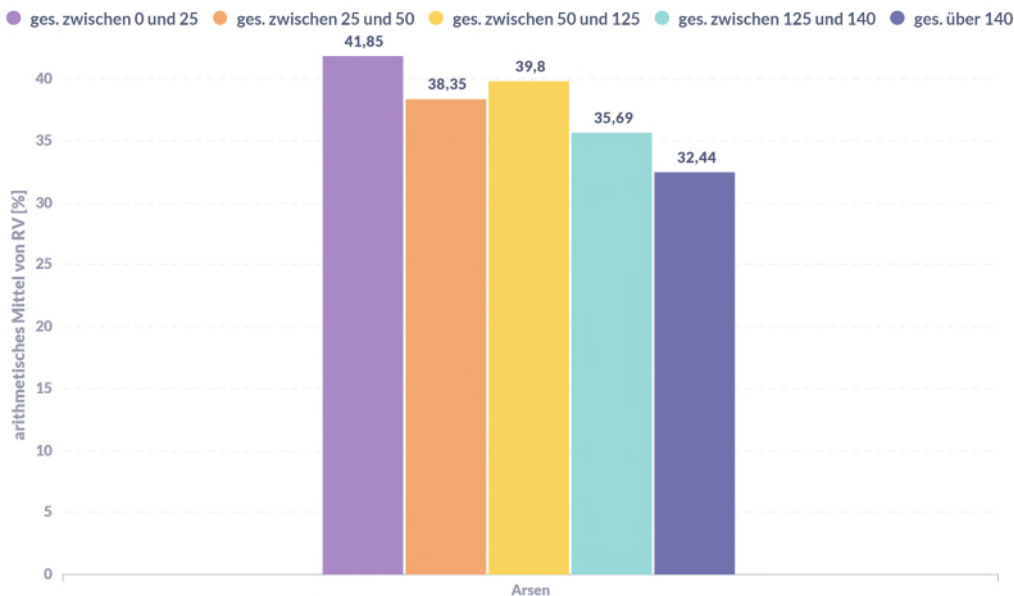
Abbildung 210: Antimon - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Es liegen Daten für Antimon vor, die zeigen, dass die Resorptionsverfügbarkeit bezüglich der Spanne für Kinderspielflächen um mehr als das Doppelte, ausgehend von der Spanne für Industrie- und Gewerbegrundstücke sowie Park- und Freizeitanlagen, zunimmt.

Abbildung 211: Arsen - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Arsen ist kaum eine Zunahme der Resorptionsverfügbarkeit von Industrie- und Gewerbegrundstücke zu Kinderspielflächen zu verzeichnen. Es handelt sich um knapp 10 %, die auch als Schwankung beim Qualitätskriterium der Messergebnisbewertung zulässig sind.

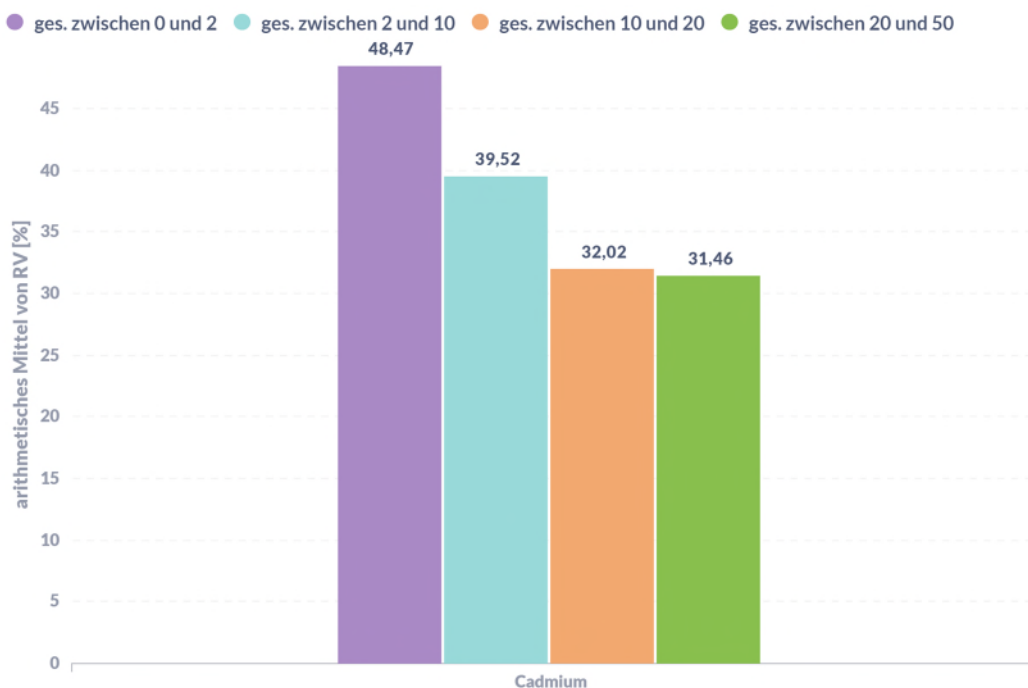
Abbildung 212: Blei - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Blei ist zwischen den Prüfwertspannen kein Trend der Zu- oder Abnahme der Resorptionsverfügbarkeit zu verzeichnen.

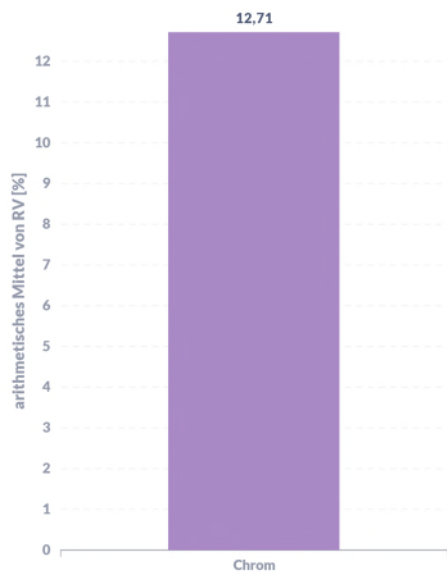
Abbildung 213: Cadmium - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Cadmium nimmt die Resorptionsverfügbarkeit von Park- und Freizeitanlagen zu den Kinderspielflächen um knapp 20 % zu.

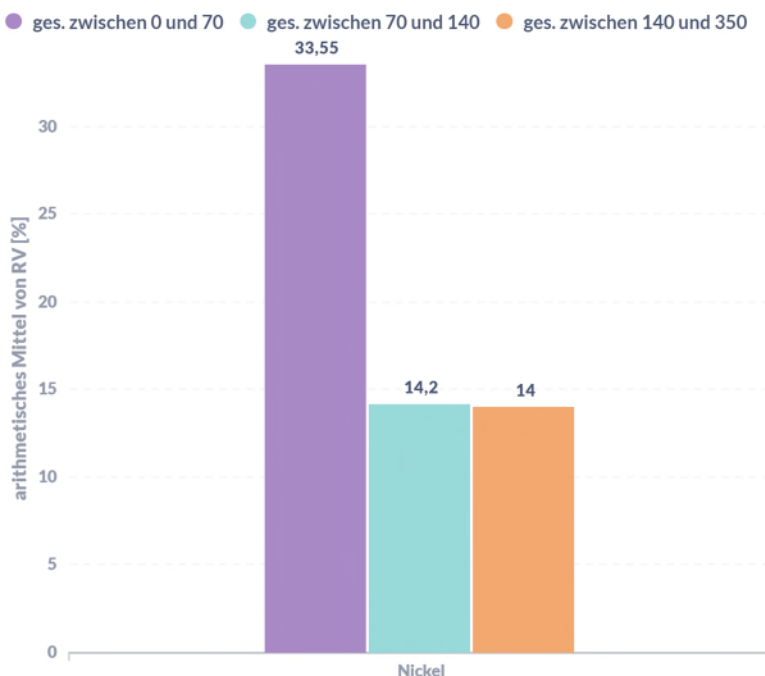
Abbildung 214: Chrom - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Für Chrom liegen im relevanten Bereich der Prüfwerte keine Daten vor (Prüfwerte unterschritten).

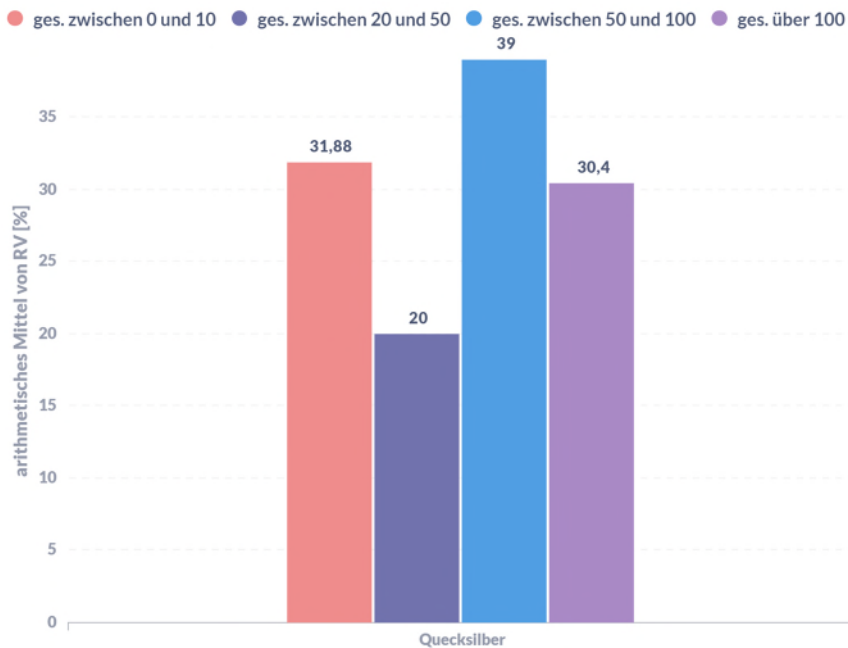
Abbildung 215: Nickel - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Nickel nimmt die Resorptionsverfügbarkeit von industriell-gewerblicher Nutzung hin zu Wohngebietsnutzung kaum zu, steigt aber darunter (Kinderspielflächen) um ca. 20 % an. Der Einfluss der relativ geringen Datenbasis ist hierbei nicht berücksichtigt.

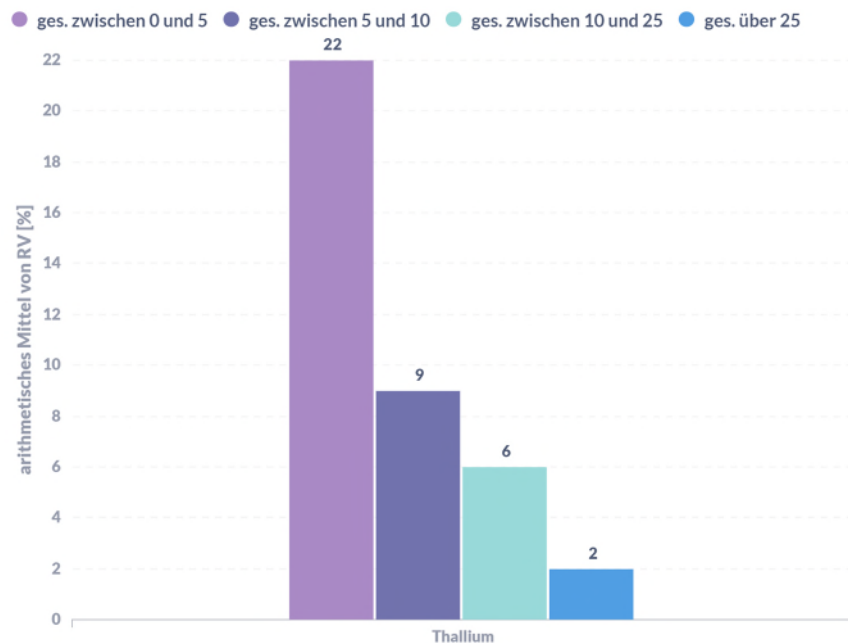
Abbildung 216: Quecksilber - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Bei Quecksilber schwankt die Resorptionsverfügbarkeit zwischen den Prüfwertspannen unregelmäßig bis zu rund 20 %.

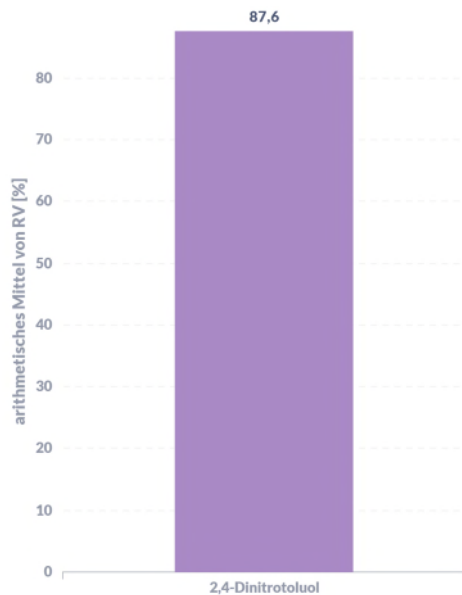
Abbildung 217: Thallium - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die Resorptionsverfügbarkeit von Thallium nimmt in Richtung Prüfwertspanne Kinderspielflächen in geringen Schritten, jedoch sukzessive zu und liegt unterhalb des Prüfwertes für Kinderspielflächen über 10 % höher.

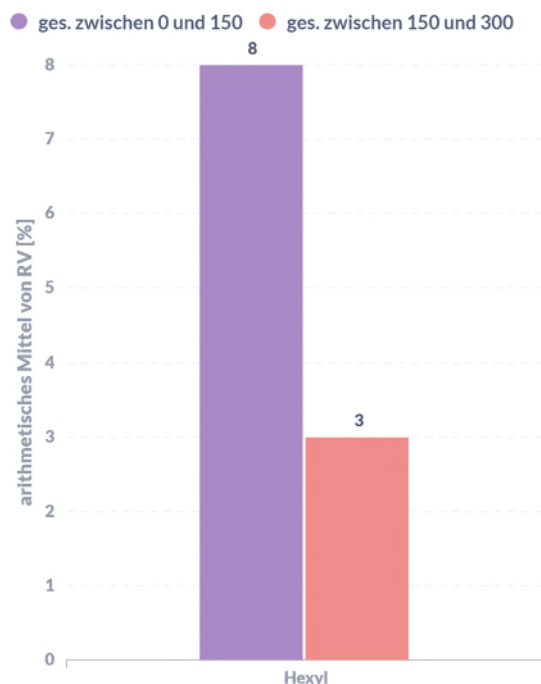
Abbildung 218: 2,4 Dinitrotoluol - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

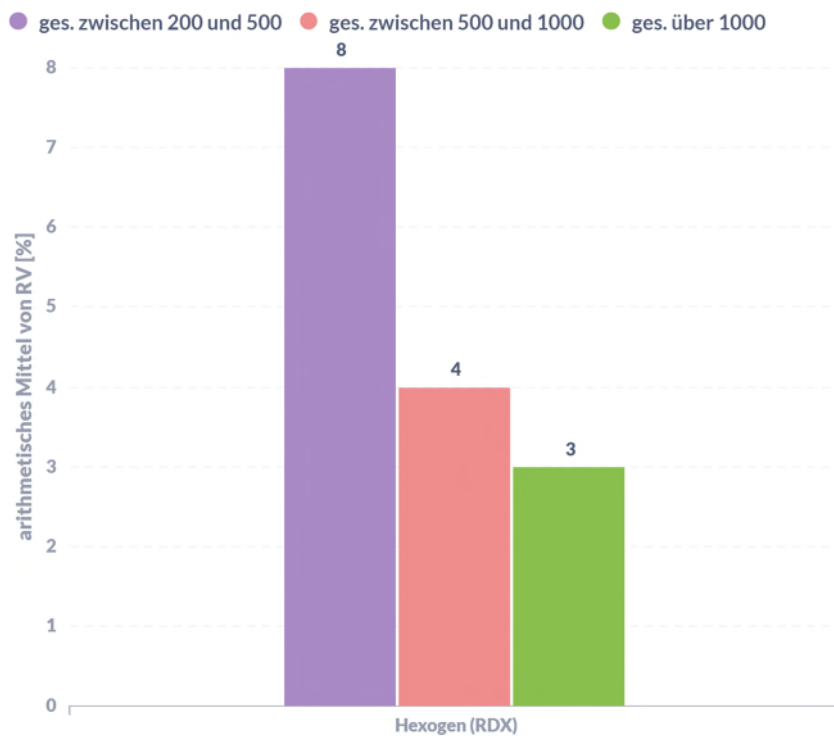
Für 2,4 Dinitrotoluol sind zu wenige belastbare Daten für die Betrachtungen der Spannen der Prüfwerte für die Resorptionsverfügbarkeit vorhanden (Qualitätskriterien nicht erfüllt). Das gilt auch für die folgenden Sprengstoffe und sprengstofftypischen Verbindungen, die in der BBodSchV geregelte Prüfwerte besitzen. Die ermittelten Feststoffgehalte überschreiten den Prüfwert von Industrie- und Gewerbegrundstücke für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu).

Abbildung 219: Hexyl - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



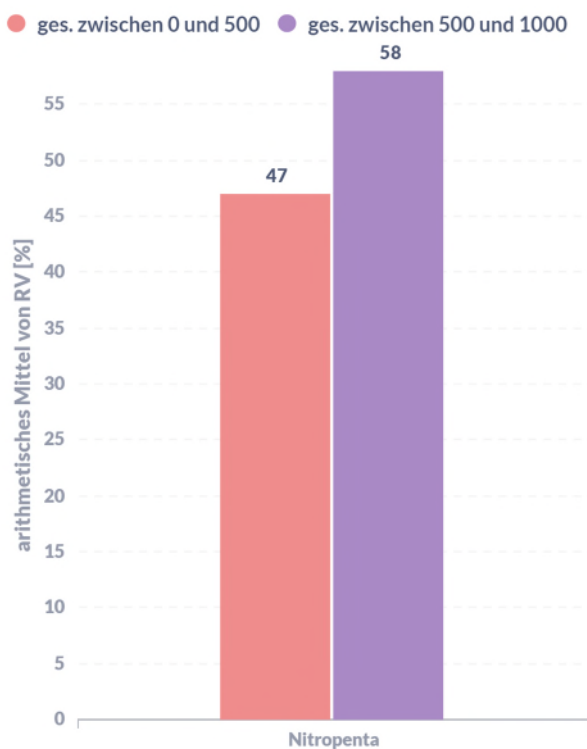
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 220: Hexogen - Resorptionsverfügbarkeit bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



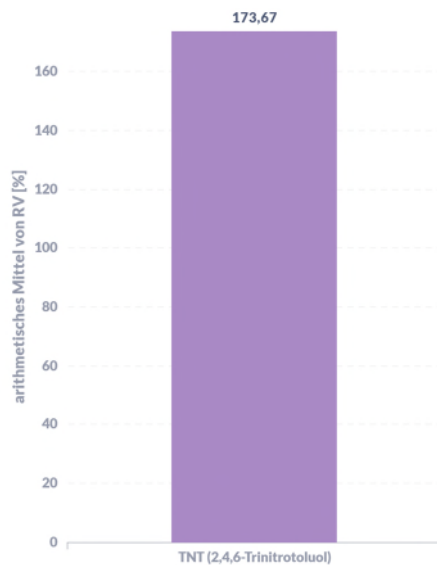
Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Abbildung 221: Nitropenta - Resorptionsverfügbarkeit Bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

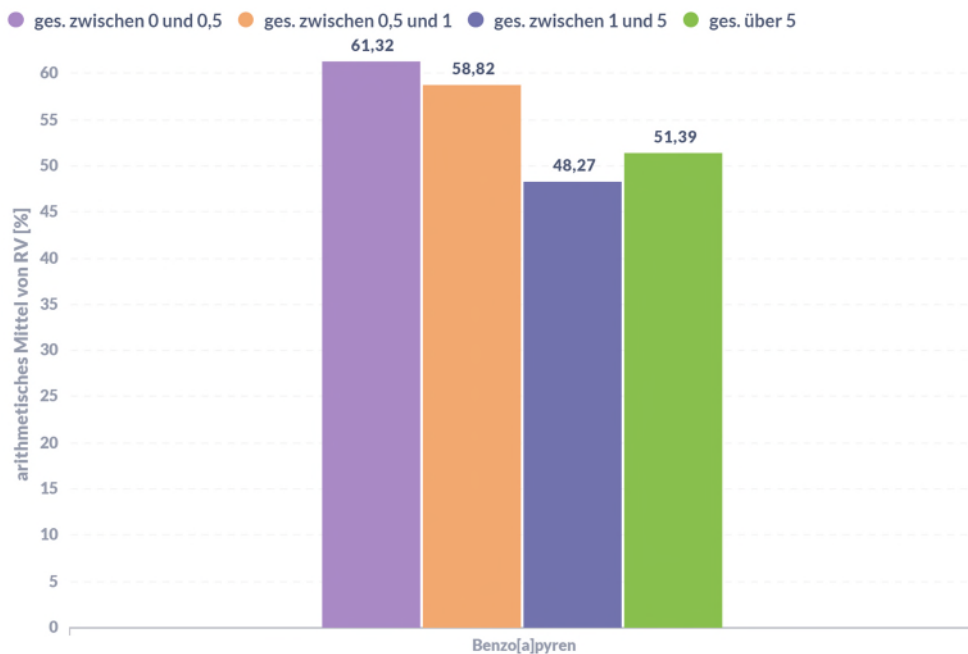
Abbildung 222: TNT (2,4,6-Trinitrotoluol) - Resorptionsverfügbarkeit Bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die ermittelten Feststoffgehalte überschreiten den Prüfwert von Industrie- und Gewerbegrundstücke für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu). Auch hier sind zu wenige belastbare Daten für die Betrachtungen der Spannen der Prüfwerte für die Resorptionsverfügbarkeit vorhanden (Qualitätskriterien nicht erfüllt).

Abbildung 223: Benzo[a]pyren - Resorptionsverfügbarkeit Bezogen auf die Prüfwerte für den Wirkungspfad Boden-Mensch der BBodSchV (neu)



Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Die vorhandenen Daten zur Resorptionsverfügbarkeit von Benzo[a]pyren zeigen zwischen den Prüfwertspannen keine signifikanten Unterschiede, nehmen aber in Richtung des oberen Prüfwertes zu.

8 A5: Erstellung einer Handlungsanleitung in Bezug auf die Handhabung der Resorptionsverfügbarkeit für den Vollzug des Bodenschutzes

Die Erstellung einer Handlungsanleitung in Bezug auf die Handhabung der Resorptionsverfügbarkeit für den Vollzug des Bodenschutzes wird nach Fertigstellung des Arbeitspaketes 4 begonnen.

Im Folgenden wird eine Übersicht der Ergebnisse des Screenings der Resorptionsverfügbarkeitsdatensätze abgebildet. Diese Übersicht ist eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der Screeninguntersuchung der Resorptionsverfügbarkeit der im Rahmen des Projektes zugänglichen und selbst ermittelten Daten. Hierbei sind alle bereits benannten Unsicherheiten integriert.

Die Handlungsanleitung kann im Vollzug nur zur Orientierung genutzt werden und ersetzt keine Amtsermittlung im Sinne des § 11 Absatz 2 und 3 BBodSchV, Fassung 2021, zu maßgeblichen Expositionsbedingungen sowie zu bedeutsamen resorptionsverfügbaren, mobilen oder mobilisierbaren Anteile der Schadstoffgehalte. Sie ist lediglich eine Hilfe, inwieweit es sinnvoll ist, konkrete Untersuchungen auf Resorptionsverfügbarkeit durchführen zu lassen.

Tabelle 25: Übersicht der Ergebnisse des Screenings der Resorptionsverfügbarkeitsdatensätze

lfd. Nr.	Parameter	Anzahl der Daten mit RV	Arithmetischer Mittelwert von RV [%]	Arithmetischer Mittelwert von RV [%] mit erfüllten Qualitätskriterien	Standardabweichung von RV [%]	Robustheitsuntersuchung zur Resorptionsverfügbarkeit [5] RV [%]	Typische RV [%]*	RV mit absteigendem Feststoffgehalt	durchschnittliche RV der Humusstufen aufsteigend	RV in Richtung S - L/U - T	RV mit absteigendem Feststoffgehalt bei Sand	RV mit absteigendem Feststoffgehalt bei Lehm/Schluff	RV mit absteigendem Feststoffgehalt bei Ton	RV Verhalten mit absteigendem Carbonatgehalt	RV Verhalten mit absteigendem Humusgehalt
1	Antimon	16	26	27	10	34	29	↗	↘	↗	↗	↗		↔	↔
2	Arsen	328	38	28	14	40	35	↔	↘	↘	↔	↔		↔	↔
3	Blei	380	25	24	10	13	21	↔	↔	↘	↔	↔	↔	↔	↔
4	Cadmium	92	42	41	13	39	41	↗	↘	↘	↔	↗		↗	↗
5	Chrom	7	13	14	4		13	↔	↗	↔	↔	↔		↔	↔
6	Cobalt	7	18		9		18	↔	↗	↗	↔	↔		↗	↔
7	Nickel	17	27	14	24		20	↔	↗	↔	↔	↔	↔	↔	↘
8	Quecksilber	18	32	17	11		25	↔	↗		↔	↔	↔	↗	↘
9	Thallium	6	11	27	9		19	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	
10	2,4-Dinitrotoluol	5	88		30		70	↔	↘		↔				↔
11	Hexyl	2	6		3		6	↔	↔						
12	Hexogen (RDX)	3	5		2		5	↗	↘		↗			↔	↗
13	Nitropenta	2	53		6		53	↘	↘		↘				↗
14	TNT (2,4,6-Trinitrotoluol)	6	174		113	77	100	↔	↗		↔				↘
15	Tetryl	1	3		0		3								
16	Benzo[a]pyren	218	51	59	23	60	57	↔	↔	↗	↔	↔		↔	↔
17	Benzo[k]fluoranthren	91	53	58	26	77	63	↔	↔	↘	↔	↔		↔	↔
18	Benzo[a]anthracen	91	51	50	20		50	↔	↗	↘	↔	↔		↔	↔
19	Benzo[b]fluoranthren	91	45	48	21	63	52	↔	↔	↘	↔	↔		↔	↔
20	Benzo[ghi]perylene	92	46	43	29	62	50	↗	↔	↗	↔	↗		↔	↔
21	Chrysen	92	54	52	22		53	↔	↗	↘	↔	↔		↔	↔
22	Dibenzo[a,h]anthracen	85	34	32	37	80	49	↔	↘	↘	↔	↔		↔	↔
23	Indeno[1,2,3-cd]pyren	92	51	45	32	70	55	↔	↗	↘	↔	↗		↔	↘

Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

Legende:

keine Tendenz	↔
leicht steigend	↗
steigend	↑
schwach fallend	↘
fallend	↓

* Fettdruck	Mittelwert aus Durchschnitt von RV [%], Durchschnitt von RV [%] mit erfüllten Qualitätskriterien, Robustheitsuntersuchung zur Resorptionsverfügbarkeit [5] RV [%]
<i>Schrägdruck</i>	Mittelwert aus Durchschnitt von RV [%], Durchschnitt von RV [%] mit erfüllten Qualitätskriterien
Normaldruck	Mittelwert aus Durchschnitt von RV [%]
<u>Normaldruck</u> <u>unterstrichen</u>	Wert festgelegt, da RV in den meisten Untersuchungen > 100 %

Quelle: eigene Darstellung, Umwelt Projekt Consult.

9 Quellenverzeichnis

- [1] DIN e.V. [Hrsg.] (DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03, 2018): DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03, Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017); Deutsche und Englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2017, Beuth-Verlag, Berlin, 2018.
- [2] DIN e.V. [Hrsg.] (DIN 19738:2004-07, 2004): DIN 19738:2004-07, Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial, Beuth-Verlag, Berlin, 2004.
- [3] DIN e.V. [Hrsg.] (DIN 19738:2017-06, 2017): DIN 19738:2017-06, Bodenbeschaffenheit – Resorptionsverfügbarkeit von organischen und anorganischen Schadstoffen aus kontaminiertem Bodenmaterial, Beuth-Verlag, Berlin, 2017.
- [4] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten [Hrsg.] (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. KA5. 5. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung oHG, Hannover, 2005.
- [5] Umweltbundesamt (2020): Robustheitsuntersuchung zur Resorptionsverfügbarkeit von Schadstoffen in Böden Abschlussbericht.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_86-2020_robustheitsuntersuchung_zur_resorptionsverfuegbarkeit_von_schadstoffen_in_boeden.pdf (16.11.2023)
- [6] Eckelmann W., Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe [Hrsg.] (2009): Arbeitshilfe für die Bodenansprache im vor- und nachsorgenden Bodenschutz - Auszug aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung KA 5. 1. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung oHG, Hannover, 2009.
- [7] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2022): Bericht Schurf-Probenahme-Ringversuch des Bayerischen Landesamtes für Umwelt 2021.
https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/untersuchungsstellen/ringversuche/schurfprobenahme/doc/schurf_probenahme_ringversuch.pdf (16.11.2023)
- [8] Fachbeirat Bodenuntersuchungen, LAGA-Forum Abfalluntersuchung (2021): Methodensammlung Feststoffuntersuchung Version 2.0.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/359/dokumente/20210615_methodensammlungfeststoffuntersuchung_v2_final_0.pdf (16.11.2023)
- [9] Scheidleder, A., Grath, J., Schramm, C., Uhlig, S. (2001): REGIONALISIERUNG VON GRUNDWASSERGÜTEPARAMETERN. In: Wasserbauinstitut an der Technischen Universität Wien, Institut für Wasserwirtschaft der Universität für Bodenkultur und Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband [Hrsg.]: Wiener Mitteilungen Band 197: Methoden der hydrologischen Regionalisierung, reposiTUm der TU Wien, Wien, S. 207 - 222
- [10] LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2011): Arbeitshilfe zum Umgang mit großflächig erhöhten Schadstoffgehalten im Boden - Anforderungen unterschiedlicher Rechtsbereiche. Erfassen, Bewerten, Handeln. Prüfwertableitung, Gefährdungsabschätzung. Gebietsbezogener Ansatz der Bearbeitung. <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/20142> (16.11.2023)
- [11] Technische Universität Berlin (2010): ABSCHLUSSBERICHT TEILVORHABEN 3 „Resorptionsverfügbarkeit und Expositionsabschätzung Beurteilung des Wirkungspfades Boden – Mensch“.
https://cleanerproduction.de/Publikationen/0330765D_-_Abschlussbericht.pdf (16.11.2023)
- [12]: Kaiser, D. B. (2012): Evaluierung vorhandener Verfahren und Daten zur Beurteilung der Resorptionsverfügbarkeit ausgewählter Schadstoffe Am Fachbereich für Geowissenschaften der Freien Universität Berlin eingereichte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doctor rerum

naturalium. <https://docplayer.org/7868905-Evaluierung-vorhandener-verfahren-und-daten-zur-beurteilung-der-resorptionsverfuegbarkeit-ausgewaehlter-schadstoffe.html> (16.11.2023)

[13] Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2010): Evaluierung Resorptionsverfügbarkeit Schriftenreihe, Heft 3/2010. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/15043> (16.11.2023)