

Anhang zu:

**Vergleichbarkeit der
Auslaugraten von
Materialien
mit und ohne
Sandzumischung
nach dem
Säulenkurzverfahren
(DIN 19528)**

von

Xiaochen Lin

Institut für Bauforschung

Volker Linnemann

Institut für Siedlungswasserwirtschaft
RWTH Aachen

Anya Vollpracht

Institut für Bauforschung
RWTH Aachen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft S 110 – Anhang

bast

Anhang A \ddot{E} Tabelle

Tab. A1: Beispiele möglicher Interferenzen bei der ICP-MS, /Hor14/

Element	Isotop	Störendes Ion	Art der Überlagerung
Arsen	$^{75}\text{As}^+$	$^{40}\text{Ar}^{35}\text{Cl}^+$	Molekülion
Barium	$^{138}\text{Ba}^{2+}$	$^{69}\text{Ga}^+$	Zweifach geladenes Ion
Bor	$^{11}\text{B}^+$	$^{23}\text{Na}^{2+}$	Zweifach geladenes Ion
Cadmium	$^{114}\text{Cd}^+$	$^{114}\text{Sn}^+$	isobar
Chrom	$^{50}\text{Cr}^+$	$^{40}\text{Ar}^{10}\text{B}^+$	Molekülion
		$^{50}\text{Ti}^+, ^{50}\text{V}^+$	isobar
	$^{52}\text{Cr}^+$	$^{36}\text{S}^{16}\text{O}^+, ^{36}\text{Ar}^{16}\text{O}^+$	Moleküliionen
	$^{53}\text{Cr}^+$	$^{37}\text{Cl}^{16}\text{O}^+$	Molekülion
	$^{54}\text{Cr}^+$	$^{54}\text{Fe}^+$	isobar
Kobalt	$^{59}\text{Co}^+$	$^{40}\text{Ar}^{19}\text{F}^+, ^{43}\text{Ca}^{16}\text{O}^+$	Moleküliionen
Kupfer	$^{63}\text{Cu}^+$	$^{31}\text{P}^{16}\text{O}_2^+, ^{47}\text{Ti}^{16}\text{O}^+, ^{40}\text{Ar}^{23}\text{Na}^+$	Moleküliionen
	$^{65}\text{Cu}^+$	$^{40}\text{Ar}^{25}\text{Mg}^+, ^{49}\text{Ti}^{16}\text{O}^+, ^{32}\text{S}^{16}\text{O}^{21}\text{H}^+$	Moleküliionen
Nickel	$^{58}\text{Ni}^+$	$^{58}\text{Fe}^+$	isobar
		$^{42}\text{Ca}^{16}\text{O}^+$	Molekülion
	$^{60}\text{Ni}^+$	$^{44}\text{Ca}^{16}\text{O}^+, ^{50}\text{Ti}^{10}\text{B}^+$	Moleküliionen
	$^{61}\text{Ni}^+$	$^{44}\text{Ca}^{16}\text{O}^1\text{H}^+$	Molekülion
$^{62}\text{Ni}^+$	$^{46}\text{Ti}^{16}\text{O}^+, ^{46}\text{Ca}^{16}\text{O}^+$	Moleküliionen	
Selen	$^{77}\text{Se}^+$	$^{40}\text{Ar}^{37}\text{Cl}^+$	Molekülion
	$^{80}\text{Se}^+$	$^{40}\text{Ar}_2^+$	Molekülion
	$^{82}\text{Se}^+$	$^{40}\text{Ar}^{42}\text{Ca}^+$	Molekülion
Vanadium	$^{51}\text{V}^+$	$^{35}\text{Cl}^{16}\text{O}^+, ^{40}\text{Ar}^{11}\text{B}^+$	Moleküliionen
Zink	$^{64}\text{Zn}^+$	$^{32}\text{S}^{16}\text{O}_2^+, ^{32}\text{S}_2^+, ^{48}\text{Ti}^{16}\text{O}^+, ^{40}\text{Ar}^{24}\text{Mg}^+$	Moleküliionen
	$^{66}\text{Zn}^+$	$^{34}\text{S}^{16}\text{O}_2^+, ^{40}\text{Ar}^{26}\text{Mg}^+$	Moleküliionen
	$^{68}\text{Zn}^+$	$^{40}\text{Ar}^{28}\text{Si}^+, ^{40}\text{Ar}^{14}\text{N}_2^+$	Moleküliionen

Tab. A2: Herkunft und Beschreibung der Ausgangsstoffe

Lfd. Nr.	Material	Angaben	Klasse
0	Sand	Quarzsand mit Körnung 0,7/1,2 mm; mit deionisiertem Wasser gewaschen; anschließend bei 105 °C getrocknet und bis zum Versuch luftdicht in PE-Folie verpackt aufbewahrt. Der Sand wurde bei Versuchen als Filtersand und zur Beimischung verwendet	BM-0 ¹⁾
1	Ton	Natürlicher Ton aus einem Ziegelwerk bei 40 °C luftgetrocknet, zerkleinert (< 2mm) und in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	BM-2 ²⁾
2	BM-a	Bodenmaterial aus einem Zwischenlager für kontaminierte Böden, < 32 mm gesiebt und in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	BM-1 ²⁾
3	BM-b	Bodenmaterial von einem Grundstück neben einer ehemaligen Teeröl-Behandlungsstelle, < 32 mm gesiebt und in mit PTFE-Glasgewebe beschichteten Weißblechheimern bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	BM-0 ²⁾
4	BM-c	Gemisch verschiedener kontaminierter Böden aus Projekt FE 05.0167, < 8 mm.	> BM-3 ²⁾
5	RC-a	Bauschutt mit Boden, aus einem Recyclinghof, Anteil an Holz, Glas, Ziegel und Kunststoff < 5 %, < 16 mm gesiebt und in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	RC-1 ²⁾
6	RC-b	Gemisch aus verschiedenen Recycling-Materialien inkl. Ziegel und Asphaltgranulaten, < 16 mm gesiebt und in mit PTFE-Glasgewebe beschichteten Weißblechheimern bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	RC-1 ²⁾
7	ZM	Bruch aus Hochlochziegeln, < 8 mm gesiebt und in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	> RC-3 ²⁾
8	HMVA	Metallentfrachtete Hausmüllverbrennungasche, < 32 mm gesiebt und in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	HMVA-2 ²⁾
9	SKA	Kesselsand bei 105°C getrocknet, < 16 mm gesiebt und in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	SKA ²⁾
10	SFA	Steinkohlenflugasche in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	> SFA ²⁾
11	BFA	Braunkohlenflugasche in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	> BFA ²⁾
12	HOS	Hochofenschlacke, < 32 mm gesiebt und in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	HOS-1 ²⁾
13	HSM	Hüttensand gemahlen (4200 nach Blaine) und in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	HS ²⁾
14	GRS	Furanharz-gebundener Gießereirestsand, Korngröße < 1 mm, in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	> GRS-2 ²⁾
15	SWS	LD-Schlacke, Korngröße < 8 mm, bei 40°C getrocknet und bis zum Versuch luftdicht in PE-Folie verpackt aufbewahrt	SWS-1 ²⁾
16	EDS	sekundärmetallurgische Edelstahlschlacke, Korngröße < 8 mm, luftgetrocknet an das ibac geliefert, in PE-Folie bis zum Versuch luftdicht verpackt aufbewahrt	EDS-2 ²⁾

1) Klassifizierung nach /Bun15/ anhand der vorgeschlagenen Grenzwerte des Säulenschnelltests (W/F = 2)

2) Klassifizierung nach /Bun15/ anhand der vorgeschlagenen Grenzwerte des Schütteltests (W/F = 2)

Tab. A3: Sieblinie der Ausgangsstoffe analog DIN ISO 11277 – Siebdurchgang, Mittelwert der Doppelbestimmung, in %

Material	Siebdurchgang, in mm												
	0,045	0,063	0,090	0,125	0,20	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32
Ton	n. b	97,7	n. b	98,4	n. b	99,2	99,6	99,8	100	100	100	100	100
BM-a ¹⁾	n. b	21,9	n. b	33,3	n. b	43,5	49,9	61,4	78,9	84,5	91,9	97,0	100
BM-b ¹⁾	n. b	12,6	n. b	15,5	n. b	21,6	38,4	47,5	55,5	62,5	71,0	80,9	100
BM-c ¹⁾	n. b	31,2	n. b	34,3	n. b	40,9	55,3	67,5	76,9	92,7	100	100	100
RC-a	n. b	16,0	n. b	17,9	n. b	22,3	33,1	46,1	56,7	67,7	84,8	100	100
RC-b	n. b	5,1	n. b	6,0	n. b	8,0	14,7	23,7	33,8	45,9	67,9	100	100
ZM	n. b	9,5	n. b	16,6	n. b	23,1	30,7	41,6	58,5	81,7	100	100	100
HMVA	n. b	7,7	n. b	8,8	n. b	10,6	14,7	21,5	35,1	47,4	60,5	85,4	100
SKA	n. b	5,9	n. b	10,7	n. b	21,3	36,1	44,2	54,1	65,0	93,8	99,8	100
SFA ²⁾	77,1	85,9	92,4	97,12	99,38	99,62	100	100	100	100	100	100	100
BFA ²⁾	67,9	75,2	82,3	90,4	96,9	98,4	100	100	100	100	100	100	100
HOS	n. b	1,7	n. b	2,9	n. b	4,6	6,6	9,1	12,5	24,3	30,6	59,9	100
HSM ²⁾	93,93	97,9	98,45	98,95	99,39	99,58	100	100	100	100	100	100	100
GRS	n. b	0,4	n. b	5,6	n. b	60,5	93,5	98,9	100	100	100	100	100
SWS	n. b	12,5	n. b	18,4	n. b	29,8	54,0	66,7	75,8	85,3	96,5	100	100
EDS	n. b	22,5	n. b	27,3	n. b	32,1	41,5	54,2	66,1	80,3	94,8	100	100

1) Nasssiebung

2) Luftstrahlsiebung

n. b.: nicht bestimmt

Tab. A4: Chemische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe – Gehalt bezogen auf bei 105 °C getrocknete Probe

Bestandteil / Parameter	Ton ¹⁾	BM-a	BM-b	BM-c	RC-a	RC-b	ZM	HMVA	
	M.-%								
Glühverlust, Atmosphäre, 950 °C	8,13	16,5	14,8	8,52	4,39	17,2	0,46	8,97	
Gesamtschwefel als SO ₃	0,03	0,08	0,30	0,76	0,23	0,53	0,11	1,25	
Gesamtkohlenstoff	als CO ₂	0,26	19,7	34,6	10,4	3,67	17,3	0,21	6,53
	als C	0,07	5,36	9,43	2,83	1,00	4,70	0,06	1,78
Carbonate, als CO ₂	0,25	11,6	31,0	6,75	0,93	14,3	0,01	0,47	
Freikalk als CaO	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
Chlorid	0,010	0,036	0,020	0,024	0,027	0,024	0,017	0,385	
Na ₂ O	1,11	< 0,01	0,09	0,00	0,66	0,46	1,78	4,32	
K ₂ O,	2,36	0,71	0,36	2,26	1,12	1,69	4,09	1,30	
Na ₂ O-Äquivalent	2,67	0,47	0,33	1,49	1,40	1,57	4,47	5,18	
MgO	0,71	4,95	5,64	0,47	0,51	2,69	2,48	1,83	
Al ₂ O ₃	24,6	3,55	8,86	9,33	5,82	6,56	21,2	8,43	
SiO ₂	51,9	60,01	31,34	69,35	78,8	48,59	58,7	46,2	
P ₂ O ₅	0,11	0,23	0,00	0,17	0,13	0,12	0,15	0,82	
CaO	0,31	9,51	34,57	1,83	4,31	19,21	3,81	14,4	
TiO ₂	1,08	0,28	0,83	0,40	0,29	0,30	0,78	0,83	
MnO	0,02	0,23	0,37	0,03	0,04	0,07	0,03	0,20	
Fe ₂ O ₃	8,69	2,53	0,36	4,44	1,72	2,40	5,51	10,7	

1): enthält noch ca. 3 % Wasser
n. b.: nicht bestimmt

Tab. A4: \varnothing (rt*^c ~) *

Bestandteil / Parameter	SKA	SFA	BFA	HOS	HSM	GRS	SWS	EDS	
	M.-%								
Glühverlust, Atmosphäre, 950 °C	12,3	4,22	-0,07	-0,28	-1,52	3,22	6,83	6,15	
Glühverlust, Schutzgas, 950 °C	n. b.	n. b.	n. b.	1,68	1,16	n. b.	n. b.	n. b.	
Gesamtschwefel als SO ₃	0,26	0,79	6,27	3,06	3,82	0,58	0,15	0,47	
Gesamtkohlenstoff	als CO ₂	37,8	–	–	0,51	0,55	10,9	2,07	4,90
	als C	10,3	3,48	0,10	0,14	0,15	2,97	0,56	1,34
Carbonate, als CO ₂	0,03	n. b.	n. b.	0,18	0,12	0,30	1,93	3,94	
Freikalk als CaO	n. b.	1,01	3,61	n. b.	n. b.	n. b.	12,9	1,41	
Chlorid	0,012	0,012	0,013	0,013	0,013	0,020	0,014	0,014	
Na ₂ O	1,33	0,59	0,09	0,14	0,11	< 0,01	0,06	< 0,01	
K ₂ O,	1,70	1,29	0,48	0,39	0,43	0,12	0,15	0,22	
Na ₂ O-Äquivalent	2,45	1,44	0,40	0,40	0,39	0,08	0,15	0,14	
MgO	1,97	1,59	2,49	5,84	6,72	8,81	7,55	5,32	
Al ₂ O ₃	22,1	25,5	15,9	10,4	10,56	16,6	2,19	2,22	
SiO ₂	44,4	50,4	28,1	37,9	37,36	14,7	11,27	26,65	
P ₂ O ₅	0,41	0,99	0,22	0,02	0,01	0,01	1,42	0,01	
CaO	3,55	6,61	34,4	39,4	41,22	0,29	44,44	49,65	
TiO ₂	0,72	1,27	0,88	1,13	0,98	0,65	0,71	0,65	
MnO	0,15	0,06	0,18	0,46	0,45	0,20	2,29	0,66	
Fe ₂ O ₃	10,0	6,64	10,6	0,89	0,43	25,6	22,83	2,46	

n. b.: nicht bestimmt

Tab. A5: Gehalt der Spurenelemente in Ausgangstoffen

Element	Ton	BM-a	BM-b	BM-c	RC-a	RC-b	ZM	HMVA
	mg/kg							
Antimon (Sb)	0,86	1,95	8,16	46,2	0,95	0,606	0,699	49,0
Arsen (As)	15,0	13,3	25,2	64,9	9,88	7,99	7,78	11,5
Barium (Ba)	111	147	574	2350	130	101	279	712
Blei (Pb)	30,3	88,1	186	2325	33,0	17,2	8,02	573
Bor (B)	29,2	22,8	29,3	29,1	46,7	51,5	76,0	250
Cadmium (Cd)	0,0647	1,85	1,50	1,98	0,313	0,191	0,121	4,89
Chrom (Cr)	88,3	60,9	201	28,9	30,6	38,4	56,2	161
Kobalt (Co)	13,4	18,7	22,3	9,35	12,7	10,4	17,7	46,1
Kupfer (Cu)	43,7	52,6	116	208	17,0	16,3	29,7	1900
Molybdän (Mo)	0,46	1,60	4,87	11,0	1,09	1,09	1,51	19,4
Nickel (Ni)	53,9	27,5	42,5	26,2	19,5	24,8	33,6	379
Quecksilber (Hg)	0,0558	0,330	0,544	2,34	0,0775	0,0528	0,0417	0,0673
Selen (Se)	3,73	1,09	2,03	11,0	1,06	0,766	1,66	1,03
Thallium (Tl)	0,323	0,261	0,407	1,33	0,124	0,126	0,198	0,0607
Vanadium (V)	91,7	20,5	87,8	44,1	25,5	33,3	101	29,9
Zink (Zn)	89,1	394	387	431	145	55,1	37,9	3615

Tab. A5: \varnothing (σ^c) *

Element	SKA	SFA	BFA	HOS	HSM	GRS	SWS	EDS
	mg/kg							
Antimon (Sb)	0,33	4,35	4,61	0,0668	< 0,034	2,28	0,0883	0,384
Arsen (As)	4,02	27,2	43,4	0,712	0,589	0,533	0,433	1,78
Barium (Ba)	557	819	152	677	479	57,8	44,9	90,6
Blei (Pb)	3,61	20,8	22,3	1,04	1,05	61,5	3,68	8,39
Bor (B)	77,4	204	221	61,3	55,4	29,8	44,9	75,3
Cadmium (Cd)	0,083	0,562	0,418	0,247	0,278	0,236	<0,034	0,247
Chrom (Cr)	34,0	55,6	70,8	n. b.	24,2	583	1170	2170
Kobalt (Co)	46,0	18,0	18,6	0,399	0,242	26,6	0,771	5,37
Kupfer (Cu)	14,2	46,2	21,8	4,35	4,83	517	6,70	16,6
Molybdän (Mo)	2,98	14,9	4,09	1,02	0,472	3,52	5,49	14,6
Nickel (Ni)	37,7	51,1	122	n. b.	1,41	56,2	3,02	144
Quecksilber (Hg)	0,0976	0,229	0,0163	< 0,0098	0,00571	0,0563	0,0157	0,0165
Selen (Se)	0,95	10,6	3,30	3,47	2,87	0,114	2,12	0,904
Thallium (Tl)	0,045	0,514	0,194	< 0,098	< 0,034	< 0,034	< 0,034	< 0,034
Vanadium (V)	38,1	124	94,4	62,0	17,7	9,85	1090	68,6
Zink (Zn)	33,5	41,7	63,9	13,0	3,92	165	13,4	51,3

n. b.: nicht bestimmt

Tab. A6: Gehalt an organischen Substanzen in Böden und Bauschutt

Parameter	Ton	BM-a	BM-b	BM-c	RC-a	RC-b
	mg/kg					
Naphthalin	< 0,001	0,0039	0,112	0,00239	< 0,001	0,00634
Acenaphthylen	< 0,001	0,000959	0,16	0,000524	< 0,001	0,00298
Acenaphthen	< 0,001	0,00107	0,0668	0,00148	< 0,001	0,0023
Fluoren	< 0,001	0,00107	0,403	0,00138	< 0,001	0,00215
Phenanthren	< 0,001	0,0271	24,7000	0,0323	0,0099	0,1010
Anthracen	< 0,001	0,00103	3,3000	0,00258	0,0010	0,0090
Fluoranthren	< 0,001	0,0515	36,300	0,0871	0,020	0,190
Pyren	< 0,001	0,0439	38,000	0,0716	0,015	0,108
Benz(a)anthracen	< 0,001	0,0197	16,800	0,0284	0,011	0,047
Chrysen	< 0,001	0,0253	15,300	0,0387	0,011	0,072
Benzo(b)fluoranthren	< 0,001	0,0454	16,400	0,0366	0,014	0,104
Benzo(k)fluoranthren	< 0,001	0,0141	5,1000	0,00905	0,0056	0,0394
Benzo(a)pyren	< 0,001	0,0214	7,3200	0,0181	0,0078	0,0354
Dibenz(a,h)anthracen	< 0,001	0,0129	5,3800	0,00598	0,0056	0,0531
Benzo(g,h,i)perylene	< 0,001	0,00313	1,5400	0,00172	0,0018	0,0155
Indeno(1,2,3,c,d)pyren	< 0,001	0,0181	4,6700	0,00642	0,0054	0,0651
Quantifizierbare PAK ₁₆	0	0,291	176	0,344	0,108	0,852
EOX	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8
MKW (C ₁₀ -C ₄₀)	< 20	3,2	800	61,0	< 20	310

Tab. A7: Ergebnisse der Schütteltests nach DIN 19529 an Böden – anorganische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	Untersuchte Bodenmaterialien								Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/			
		Ton		BM-a		BM-b		BM-c		BM-0	BM-1	BM-2	BM-3
		a ¹⁾	b ¹⁾	a	b	a	b	a	b				
pH-Wert	-	8,2	8,0	8,0	8,1	8,0	8,2	7,6	7,7	6,5-9,5 ²⁾	6,5-9,5 ²⁾	6,5-9,5 ²⁾	5,5-12,0 ²⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	89	79	650	664	357	364	821	757	350 ²⁾	500 ²⁾	500 ²⁾	2000 ²⁾
Redoxpotential	mV	380	348	386	395	367	391	233	328	-	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	3,6	3,8	9,9	10,7	2,8	2,8	19,1	17,6	-	-	-	-
Kalium (K)		11,7	15,4	9,6	9,6	9,3	9,0	27,1	26,0	-	-	-	-
Calcium (Ca)		2,6	2,4	105	105	61,0	59,9	113	101	-	-	-	-
Chlorid (Cl ⁻)		0,57	0,60	8,67	9,84	1,84	1,83	42,6	36,1	-	-	-	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		0,55	0,60	129	128	69,4	70,4	189	165	-	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		7,3	6,5	97,8	99,8	17,7	17,3	80,5	74,7	250	450	450	1000
Cyanid (CN ⁻)		0,019	0,039	<0,002	<0,002	0,003	0,004	0,006	0,007	-	-	-	-
Fluorid (F ⁻)		0,91	0,98	0,30	0,29	0,41	0,59	0,79	0,90	-	-	-	-
Antimon (Sb)		0,324	0,404	1,36	1,39	4,49	5,07	194	180	10	10	10	15
Arsen (As)	2,92	4,84	1,83	1,73	3,31	3,45	6,91	8,49	15	15	15	30	
Barium (Ba)	171	286	56,6	56,6	120	121	153	153	-	-	-	-	
Blei (Pb)	17,4	29,5	0,229	0,417	3,39	4,37	189	197	35	91	250	470	
Bor (B)	134	170	52,2	49,0	59,8	60,0	95,1	91,8	-	-	-	-	
Cadmium (Cd)	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,795	0,766	3	3	10	15	
Chrom (Cr)	103	142	31,0	30,1	3,39	3,40	1,64	2,30	15	150	290	530	
Kobalt (Co)	5,65	9,37	0,181	0,201	0,158	0,166	0,533	0,572	-	-	-	-	
Kupfer (Cu)	12,0	17,6	5,38	5,56	10,0	8,78	66,5	62,8	30	110	170	320	
Molybdän (Mo)	1,84	1,37	11,3	11,1	5,93	6,09	7,63	8,70	55	55	55	110	
Nickel (Ni)	39,1	47,9	0,569	0,658	1,33	1,42	3,84	3,68	30	30	150	280	
Quecksilber (Hg)	0,029	0,041	< 0,01	< 0,01	0,0173	0,0137	0,335	0,420	-	-	-	-	
Selen (Se)	96,8	96,0	< 1	< 1	< 1	< 1	6,48	6,77	-	-	-	-	
Thallium (Tl)	0,63	1,15	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,140	0,140	-	-	-	-	
Vanadium (V)	58,2	104	0,777	0,744	4,67	4,75	2,65	4,32	30	65	450	840	
Zink (Zn)	73,8	115	16,1	19,5	39,3	30,1	60,0	49,5	150	160	840	1600	

a, b: Einzelmessungen

- 1) Königwasser-Aufschluss mit Mikrowellenbehandlung an dem Eluat für ICP-MS-Analyse durchgeführt (Auflösen von Niederschlägen, die nach dem Ansäuern entstanden)
- 2) Stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A8: Ergebnisse der Schütteltests nach DIN 19529 bzw. DIN 19527 an Böden – PAKs und DOC

Parameter / Stoff	Einheit	Untersuchte Bodenmaterialien								Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/			
		Ton		BM-a		BM-b		BM-c		BM-0	BM-1	BM-2	BM-3
		a	b	a	b	a	b	a	b				
Naphthalin	µg/l	< 0,01	< 0,01	<0,012	<0,012	0,0097	<0,001	<0,015	<0,015	-	-	-	-
Acenaphthylen		< 0,01	< 0,01	<0,012	<0,012	0,0097	0,0051	<0,015	<0,015	-	-	-	-
Acenaphthen		< 0,01	< 0,01	<0,012	<0,012	0,0049	0,0015	<0,015	<0,015	-	-	-	-
Fluoren		< 0,01	< 0,01	<0,012	0,012	0,0053	0,0024	0,0158	0,0152	-	-	-	-
Phenanthren		< 0,01	< 0,01	0,0247	0,246	0,0408	0,023	0,0405	0,0357	-	-	-	-
Anthracen		< 0,01	< 0,01	<0,012	<0,012	0,0346	0,0173	<0,015	0,0149	-	-	-	-
Fluoranthren		< 0,01	< 0,01	0,0151	0,0169	0,0771	0,0473	0,0292	0,0288	-	-	-	-
Pyren		< 0,01	< 0,01	0,0153	0,0162	0,0733	0,0403	0,0269	0,0288	-	-	-	-
Benz(a)anthracen		< 0,01	< 0,01	0,0366	0,0357	0,0673	0,0467	0,0514	0,051	-	-	-	-
Chrysen		< 0,01	< 0,01	0,0162	0,0194	0,0967	0,0422	0,0252	0,0283	-	-	-	-
Benzo(b)fluoranthren		< 0,01	< 0,01	0,0464	0,0307	0,173	0,0943	0,0519	0,0494	-	-	-	-
Benzo(k)fluoranthren		< 0,01	< 0,01	0,0323	0,021	0,115	0,0629	0,0256	0,0289	-	-	-	-
Benzo(a)pyren		< 0,01	< 0,01	0,0424	0,0272	0,0874	0,0567	0,0392	0,0384	-	-	-	-
Dibenz(a,h)anthracen		< 0,01	< 0,01	<0,012	0,0288	0,170	0,102	0,0440	0,0454	-	-	-	-
Benzo(g,h,i)perylene		< 0,01	< 0,01	<0,012	0,0317	0,0449	0,0273	0,0430	0,0427	-	-	-	-
Indeno(1,2,3,c,d)pyren		< 0,01	< 0,01	<0,012	0,0274	0,115	0,0604	0,0436	0,0441	-	-	-	-
Quantifizierbare PAK ₁₅		-	-	0,229	0,513	1,12	0,629	0,436	0,452	0,3	2,3	6,8	20
Quantifizierbare PAK ₁₆		-	-	0,229	0,513	1,12	0,629	0,436	0,452	-	-	-	-
DOC	mg/l	< 1	< 1	3,86	6,10	38,4	37,5	45,0	44,8	-	-	-	-

Tab. A9: Ergebnisse der Schütteltests nach DIN 19529 an Bauabfällen – anorganische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	Untersuchte Bauabfälle						Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/		
		RC-a		RC-b		ZM		RC-1	RC-2	RC-3
		a	b	a	b	a	b			
pH-Wert	-	12,0	12,0	12,3	12,3	10,6	10,6	6-13 ¹⁾	6-13 ¹⁾	6-13 ¹⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	2022	1910	192,0	188,0	759	740	2500 ¹⁾	3200 ¹⁾	10000 ¹⁾
Redoxpotential	mV	160	165	1423,0	1469,0	255	271	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	39,0	39,0	52,4	51,6	22,3	22,0	-	-	-
Kalium (K)		63,0	62,0	64,0	62,7	23,5	23,0	-	-	-
Calcium (Ca)		142	131	92,9	95,4	108	106	-	-	-
Chlorid (Cl ⁻)		10,1	9,9	17,32	18,24	7,4	6,9	-	-	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		11,7	11,6	9,3	9,6	< 0,1	< 0,1	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		44,1	27,0	72,1	68,3	318	309	600	1000	3500
Cyanid (CN ⁻)		0,008	0,013	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	-	-	-
Fluorid (F ⁻)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,25	4,50	-	-	-
Antimon (Sb)		0,675	0,830	0,670	0,657	0,68	0,83	-	-	-
Arsen (As)		1,99	2,00	1,52	1,51	13,4	13,2	-	-	-
Barium (Ba)	62,9	58,2	39,3	40,4	19	16	-	-	-	
Blei (Pb)	0,25	0,17	0,280	0,209	< 0,1	< 0,1	-	-	-	
Bor (B)	< 1,0	< 1,0	87,5	120	1700	1230	-	-	-	
Cadmium (Cd)	< 0,1	< 0,1	<0,1	<0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-	
Chrom (Cr)	30,8	28,9	11,9	9,35	241	228	150	440	900	
Kobalt (Co)	1,80	1,71	1,76	1,76	< 0,1	< 0,1	-	-	-	
Kupfer (Cu)	72,5	69,3	42,1	41,6	0,83	0,52	110	180	500	
Molybdän (Mo)	7,09	6,50	15,9	15,7	195	192	-	-	-	
Nickel (Ni)	14,8	13,8	10,8	11,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-	
Quecksilber (Hg)	0,058	0,036	<0,01	<0,01	0,034	0,034	-	-	-	
Selen (Se)	1,06	1,06	1,20	1,21	27,8	29,1	-	-	-	
Thallium (Tl)	< 0,1	<0,1	<0,1	<0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-	
Vanadium (V)	4,03	4,35	13,4	12,9	1930	1950	140	700	1400	
Zink (Zn)	1,42	1,33	2,85	5,16	2,31	2,00	-	-	-	

a, b: Einzelmessungen

1): stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A10: Ergebnisse der Schütteltests nach DIN 19529 bzw. DIN 19527 an Bauabfällen – PAK und DOC

Parameter / Stoff	Einheit	Untersuchte Bodenmaterialien						Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/		
		RC-a		RC-b		ZM		RC-1	RC-2	RC-3
		a	b	a	b	a	b			
Naphthalin	µg/l	< 0,01	0,019	0,181	0,0687	n. b.	n. b.	-	-	-
Acenaphthylen		< 0,01	< 0,01	0,0068	0,0036	n. b.	n. b.	-	-	-
Acenaphthen		< 0,01	0,011	0,0510	0,0218	n. b.	n. b.	-	-	-
Fluoren		< 0,01	0,010	0,0474	0,0394	n. b.	n. b.	-	-	-
Phenanthren		< 0,01	0,033	0,159	0,109	n. b.	n. b.	-	-	-
Anthracen		< 0,01	< 0,01	0,0374	0,0326	n. b.	n. b.	-	-	-
Fluoranthren		< 0,01	0,019	0,0783	0,0738	n. b.	n. b.	-	-	-
Pyren		< 0,01	0,012	0,0528	0,0453	n. b.	n. b.	-	-	-
Benz(a)anthracen		< 0,01	< 0,01	0,0409	0,0340	n. b.	n. b.	-	-	-
Chrysen		< 0,01	< 0,01	0,0248	0,0173	n. b.	n. b.	-	-	-
Benzo(b)fluoranthren		< 0,01	< 0,01	0,0600	0,0259	n. b.	n. b.	-	-	-
Benzo(k)fluoranthren		< 0,01	< 0,01	0,0151	0,0081	n. b.	n. b.	-	-	-
Benzo(a)pyren		< 0,01	< 0,01	0,0492	0,0226	n. b.	n. b.	-	-	-
Dibenz(a,h)anthracen		< 0,01	< 0,01	0,0686	0,0296	n. b.	n. b.	-	-	-
Benzo(g,h,i)perylen		< 0,01	< 0,01	0,0193	0,0096	n. b.	n. b.	-	-	-
Indeno(1,2,3,c,d)pyren		< 0,01	< 0,01	0,0438	0,0184	n. b.	n. b.	-	-	-
Quantifizierbare PAK ₁₅		-	0,085	0,754	0,491	n. b.	n. b.	6	12	25
Quantifizierbare PAK ₁₆		-	0,104	0,935	0,560	n. b.	n. b.	-	-	-
DOC	mg/l	20,0	19,6	19,3	16,8	2,66	< 1	-	-	-

Tab. A11: Ergebnisse der Schütteltests nach DIN 19529 an Aschen und Schlacken aus Verbrennungsprozessen

Parameter / Stoff	Einheit	HMVA		HMVA-1 ¹⁾	HMVA-2 ¹⁾	SKA		SKA ¹⁾
		a	b			a	b	
pH-Wert	-	10,6	11,4	7-13 ²⁾	7-13 ²⁾	9,5	8,4	7-12 ²⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	5620	5880	10000 ²⁾	10000 ²⁾	985	914	2100 ²⁾
Redoxpotential	mV	263	213	-	-	321	349	-
Natrium (Na)	mg/l	662	664	-	-	36,3	20,6	-
Kalium (K)		291	292	-	-	17,3	6,5	-
Calcium (Ca)		312	186	-	-	118	131	-
Chlorid (Cl ⁻)		1627	1642	3000	3000	46,5	8,0	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		1060	483	2000	2000	387	437	600
Cyanid (CN ⁻)		0,046	0,026	-	-	< 0,002	0,004	-
Fluorid (F ⁻)		< 0,1	< 0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-
Antimon (Sb)		17,0	23,7	57	150	2,23	2,11	-
Arsen (As)		7,47	6,91	-	-	9,14	8,64	-
Barium (Ba)	418	632	-	-	332	268	-	
Blei (Pb)	0,27	0,46	-	-	1,72	0,31	-	
Bor (B)	749	432	-	-	3300	4030	-	
Cadmium (Cd)	0,19	0,15	-	-	0,10	0,23	-	
Chrom (Cr)	14,1	17,1	460	600	0,99	0,75	-	
Kobalt (Co)	1,18	0,88	-	-	0,18	0,24	-	
Kupfer (Cu)	1760	1810	1000	2000	34,7	2,69	-	
Molybdän (Mo)	219	231	400	1000	56,5	62,7	350	
Nickel (Ni)	23,1	21,0	-	-	1,73	10,4	-	
Quecksilber (Hg)	0,124	0,091	-	-	0,075	0,243	-	
Selen (Se)	2,10	1,95	-	-	3,07	3,63	-	
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-	
Vanadium (V)	12,2	10,7	150	200	17,0	16,2	230	
Zink (Zn)	58,5	148	-	-	102	182	-	
DOC	mg/l	166	176	-	-	8,69	10,6	-

a, b: Einzelmessungen

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

1) Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/

2) Stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A11: \varnothing (σ^c)*

Parameter / Stoff	Einheit	SFA		SFA ¹⁾	BFA		BFA ¹⁾
		a	b		a	b	
pH-Wert	-	12,6	12,6	8-13 ²⁾	12,7	12,7	11-13 ²⁾
el. Leitfähigkeit	μS/cm	9340	9080	10000 ²⁾	11640	11840	15000 ²⁾
Redoxpotential	mV	145	155	-	74,2	69,0	-
Natrium (Na)	mg/l	98,5	99,9	-	41,5	39,5	-
Kalium (K)		54,6	55,6	-	57,3	55,0	-
Calcium (Ca)		1119	1130	-	1608	1606	-
Chlorid (Cl ⁻)		< 0,1	< 0,1	-	< 0,1	< 0,1	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		0,1	< 0,1	-	< 0,1	< 0,1	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		1079	1120	4500	1688	1703	2500
Cyanid (CN ⁻)		0,005	0,005	-	0,002	< 0,002	-
Fluorid (F ⁻)		0,52	0,51	-	< 0,1	< 0,1	-
Antimon (Sb)		< 0,1	< 0,1	-	< 0,1	< 0,1	-
Arsen (As)		1,78	1,87	-	1,67	1,85	-
Barium (Ba)	370	349	-	464	484	-	
Blei (Pb)	1,1	1,11	-	0,505	0,446	-	
Bor (B)	420	426	-	84,7	85,3	-	
Cadmium (Cd)	0,775	0,851	-	< 0,1	< 0,1	-	
Chrom (Cr)	1250	1250	1000	308	317	150	
Kobalt (Co)	0,381	0,396	-	0,557	0,579	-	
Kupfer (Cu)	0,898	0,76	-	0,169	0,191	-	
Molybdän (Mo)	2220	2220	7000	227	230	400	
Nickel (Ni)	0,435	0,450	-	0,687	0,644	-	
Quecksilber (Hg)	0,0440	0,0442	-	0,0262	0,0344	-	
Selen (Se)	54,9	45,6	-	4,19	4,30	-	
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	-	< 0,1	< 0,1	-	
Vanadium (V)	5,87	5,80	300	3,02	3,12	-	
Zink (Zn)	2,46	2,46	-	6,23	5,24	-	
DOC	mg/l	5,9	4,0	-	4,3	3,4	-

a, b: Einzelmessungen

1) Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/

2) Stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A12: Ergebnisse der Schütteltests nach DIN 19529 an Hochofenschlacke

Parameter / Stoff	Einheit	HOS		HOS-1 ¹⁾	HOS-2 ¹⁾	HSM		HS ¹⁾
		a	b			a	b	
pH-Wert	-	11,3	11,4	9-12 ²⁾	9-12 ²⁾	11,9	11,8	8-12 ²⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1659	1522	5000 ²⁾	7000 ²⁾	1579	1572	4000 ²⁾
Redoxpotential	mV	75,0	75,4	-	-	-95,6	-76,4	-
Natrium (Na)	mg/l	2,9	2,5	-	-	13,5	13,5	-
Kalium (K)		42,4	32,2	-	-	10,8	10,8	-
Calcium (Ca)		301	264	-	-	183	183	-
Chlorid (Cl ⁻)		1,3	1,1	-	-	7,8	8,1	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		< 0,1	< 0,1	-	-	0,3	0,3	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		693	461	1300 ³⁾	3800 ³⁾	222	227	350
Cyanid (CN ⁻)		< 0,002	< 0,002	-	-	0,007	0,008	-
Fluorid (F ⁻)		< 0,1	< 0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-
Antimon (Sb)		<0,1	<0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-
Arsen (As)		<1	<1	-	-	< 1	< 1	-
Barium (Ba)	133	196	-	-	176	180	-	
Blei (Pb)	<0,1	<0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-	
Bor (B)	20,9	12,3	-	-	79,9	82,0	-	
Cadmium (Cd)	<0,1	<0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-	
Chrom (Cr)	2,23	3,04	-	-	1,41	1,56	-	
Kobalt (Co)	<0,1	<0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-	
Kupfer (Cu)	0,43	0,18	-	-	0,225	0,222	-	
Molybdän (Mo)	9,60	6,45	-	-	11,1	11,4	-	
Nickel (Ni)	<0,1	<0,1	-	-	0,250	0,279	-	
Quecksilber (Hg)	0,022	0,025	-	-	0,526	0,534	-	
Selen (Se)	<1	<1	-	-	< 1	< 1	-	
Thallium (Tl)	<0,1	<0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-	
Vanadium (V)	94,2	60,9	-	-	4,97	4,90	65	
Zink (Zn)	1,45	13,2	-	-	1,09	1,21	-	
DOC	mg/l	< 1	< 1	-	-	4,84	2,20	-

a, b: Einzelmessungen

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

1) Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/

2) Stoffspezifischer Orientierungswert

3) Summe aus Sulfat- und Thiosulfatschwefel; bestimmt als Gesamtschwefel, umgerechnet in Sulfat

Tab. A13: Ergebnisse der Schütteltests nach DIN 19529 an Gießereirestsand

Parameter / Stoff	Einheit	GRS		GRS-1 ¹⁾	GRS-2 ¹⁾	
		a	b			
pH-Wert	-	5,0	4,8	> 9	> 6	
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1159	1239	2700 ²⁾	4200 ²⁾	
Redoxpotential	mV	448	452	-	-	
Natrium (Na)	mg/l	53,4	59,9	-	-	
Kalium (K)		9,4	10,7	-	-	
Calcium (Ca)		78,1	88,2	-	-	
Chlorid (Cl ⁻)		40,6	46,0	-	-	
Nitrat (NO ₃ ⁻)		1,4	25,2	-	-	
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		551	610	-	-	
Cyanid (CN ⁻)		0,004	0,004	-	-	
Fluorid (F ⁻)		0,60	0,99	9,0	80	
Antimon (Sb)		µg/l	1,34	1,40	-	-
Arsen (As)			<1	<1	63	100
Barium (Ba)	202		297	-	-	
Blei (Pb)	27,7		24,4	92	600	
Bor (B)	462		497	-	-	
Cadmium (Cd)	23,1		26,7	-	-	
Chrom (Cr)	7,25		6,41	100	120	
Kobalt (Co)	537		568	-	-	
Kupfer (Cu)	2660		3000	110	150	
Molybdän (Mo)	0,20		0,31	55	350	
Nickel (Ni)	2890		3050	30	230	
Quecksilber (Hg)	<0,01		<0,01	-	-	
Selen (Se)	<1		<1	-	-	
Thallium (Tl)	<0,1		<0,1	-	-	
Vanadium (V)	0,25		0,29	230	250	
Zink (Zn)	8350		9330	160	650	
DOC	mg/l		465	444	30	200

a, b: Einzelmessungen

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

1) Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/

2) Stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A14: Ergebnisse der Schütteltests nach DIN 19529 an Stahlwerksschlacke

Parameter / Stoff	Einheit	SWS		SWS-1 ¹⁾	SWS-2 ¹⁾	SWS-3 ¹⁾	
		a	b				
pH-Wert	-	12,7	12,7	9-13 ²⁾	9-13 ²⁾	9-13 ²⁾	
el. Leitfähigkeit	µS/cm	8370	8560	10000 ²⁾	10000 ²⁾	10000 ²⁾	
Redoxpotential	mV	129	130	-	-	-	
Natrium (Na)	mg/l	24,3	24,1	-	-	-	
Kalium (K)		5,8	5,7	-	-	-	
Calcium (Ca)		921	900	-	-	-	
Chlorid (Cl ⁻)		2,7	2,4	-	-	-	
Nitrat (NO ₃ ⁻)		< 0,1	0,2	-	-	-	
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		0,2	0,4	-	-	-	
Cyanid (CN ⁻)		< 0,002	< 0,002	-	-	-	
Fluorid (F ⁻)		< 0,1	< 0,1	1,1	2,0	4,0	
Antimon (Sb)		µg/l	<0,1	<0,1	-	-	-
Arsen (As)			<1	<1	-	-	-
Barium (Ba)	550		529	-	-	-	
Blei (Pb)	1,31		0,79	-	-	-	
Bor (B)	52,2		55,6	-	-	-	
Cadmium (Cd)	<0,1		<0,1	-	-	-	
Chrom (Cr)	1,21		1,23	110	190	250	
Kobalt (Co)	0,51		0,43	-	-	-	
Kupfer (Cu)	1,09		0,57	-	-	-	
Molybdän (Mo)	1,80		1,89	55	220	1000	
Nickel (Ni)	0,47		0,19	-	-	-	
Quecksilber (Hg)	<0,01		<0,01	-	-	-	
Selen (Se)	<1		<1	-	-	-	
Thallium (Tl)	<0,1		<0,1	-	-	-	
Vanadium (V)	0,59		0,58	180	360	1000	
Zink (Zn)	3,52		1,12	-	-	-	
DOC	mg/l		4,35	3,59	-	-	-

a, b: Einzelmessungen

- 1) Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/
- 2) Stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A15: Ergebnisse der Schütteltests nach DIN 19529 an Edelstahlschlacke

Parameter / Stoff	Einheit	EDS		EDS-1 ¹⁾	EDS-2 ¹⁾	EDS-3 ¹⁾	
		a	b				
pH-Wert	-	12,6	12,6	11-13 ²⁾	11-13 ²⁾	11-13 ²⁾	
el. Leitfähigkeit	µS/cm	6990	7520	10000 ²⁾	10000 ²⁾	10000 ²⁾	
Redoxpotential	mV	112,2	109,8	-	-	-	
Natrium (Na)	mg/l	18,8	19,7	-	-	-	
Kalium (K)		10,3	10,9	-	-	-	
Calcium (Ca)		734,4	734,4	-	-	-	
Chlorid (Cl ⁻)		19,2	19,9	-	-	-	
Nitrat (NO ₃ ⁻)		1,7	1,5	-	-	-	
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		4,6	4,5	900	900	1000	
Cyanid (CN ⁻)		< 0,002	< 0,002	-	-	-	
Fluorid (F ⁻)		3,0	3,5	1,1	4,7	8,7	
Antimon (Sb)		µg/l	<0,1	<0,1	-	-	-
Arsen (As)			<1	<1	-	-	-
Barium (Ba)	487		484	-	-	-	
Blei (Pb)	2,00		2,40	-	-	-	
Bor (B)	12,0		10,3	-	-	-	
Cadmium (Cd)	<0,1		<0,1	-	-	-	
Chrom (Cr)	67,3		70,4	110	110	250	
Kobalt (Co)	0,56		0,59	-	-	-	
Kupfer (Cu)	11,5		18,5	-	-	-	
Molybdän (Mo)	84,3		84,7	55	220	2000	
Nickel (Ni)	4,45		5,44	-	-	-	
Quecksilber (Hg)	0,035		0,033	-	-	-	
Selen (Se)	<1		<1	-	-	-	
Thallium (Tl)	<0,1		<0,1	-	-	-	
Vanadium (V)	0,36		0,36	-	-	-	
Zink (Zn)	2,30		18,9	-	-	-	
DOC	mg/l		10,1	10,6	-	-	-

a, b: Einzelmessungen

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

1) Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/

2) Stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A16: Ergebnisse der Blindversuche . anorganische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	Säulenmaterial						Hintergrundkonzentration in den verwendeten Laugen	
		Glas	PMMA						
		4 cm Filtersand	4 cm Filtersand	20 cm Sand	40 cm Sand				
		Elution mit DW ¹⁾				Elution mit NaOH-Lsg. ²⁾	Elution mit Ca(OH) ₂ -Lsg. ³⁾		
pH-Wert	-	7,2	7,2	8,6	7,1	13,4	12,6	13,5	12,6
el. Leitfähigkeit	µS/cm	4	11	16	384⁴⁾	13400	7280	17200	8050
Redoxpotential	mV	443	406	324	420	137	149	144	164
Natrium (Na)	mg/l	< 0,1	< 0,1	0,2	0,3	2080	0,7	2120	0,5
Kalium (K)		0,1	0,1	0,2	0,4	2,3	1,1	0,5	0,2
Calcium (Ca)		< 0,1	0,8	1,3	0,5	7,2	728	7,6	842
Chlorid (Cl ⁻)		0,4	0,3	0,5	0,6	0,4	0,2	0,4	0,1
Nitrat (NO ₃ ⁻)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		0,5	0,5	0,3	5,5⁴⁾	2,5	1,4	0,7	0,7
Cyanid (CN ⁻)		< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Fluorid (F ⁻)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	< 0,1
Antimon (Sb)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,278	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Arsen (As)		< 1	< 1	< 1	< 1	41,5⁴⁾	< 1	< 1	< 1
Barium (Ba)	0,9	3,2	2,9	1,3	3,3	26,1⁴⁾	43,0⁴⁾	7,1	
Blei (Pb)	< 0,1	0,50	3,51	0,41	2,49	1,04	< 0,1	0,63	
Bor (B)	< 1	< 1	0,51	3,86	6,66	4,90	3,14	1,75	
Cadmium (Cd)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Chrom (Cr)	0,105	< 0,1	< 0,1	0,24	2,40	1,49	1,07	1,16	
Kobalt (Co)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,29	0,47	< 0,1	0,51	
Kupfer (Cu)	0,53	0,75	2,05	0,90	6,88	1,79	0,30	0,93	
Molybdän (Mo)	< 0,1	< 0,1	0,14	0,16	9,57	0,58	8,64	0,11	
Nickel (Ni)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,18	< 0,1	0,44	
Quecksilber (Hg)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,024	< 0,01	< 0,01	
Selen (Se)	< 1	< 1	< 1	< 1	1,69	< 1	1,15	< 1	
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Vanadium (V)	0,155	0,193	0,820	0,693	41,4⁴⁾	0,728	< 0,1	0,621	
Zink (Zn)	4,36	26,1⁴⁾	4,73	2,88	10,3	20,7	4,80	3,46	

1): DW: deionisiertes Wasser

2): Natronlauge, Konzentration: ca. 0,1 mol/l NaOH

3): gesättigte Calciumhydroxid-Lösung

4): wahrscheinlich Kontamination bei der Analyse

Tab. A17: Ergebnisse der Blindversuche – organische Parameter (Glassäule mit 4 cm Filtersand, Elution mit deionisiertem Wasser)

Parameter / Stoff	Einheit	Wert
Naphthalin	µg/l	< 0,002
Acenaphthylen		< 0,002
Acenaphthen		< 0,002
Fluoren		< 0,002
Phenanthren		< 0,002
Anthracen		< 0,002
Fluoranthren		< 0,002
Pyren		< 0,002
Benzo(a)anthracen		< 0,002
Chrysen		< 0,002
Benzo(b)fluoranthren		< 0,002
Benzo(k)fluoranthren		< 0,002
Benzo(a)pyren		< 0,002
Dibenz(ah)anthracen		< 0,002
Benzo(ghi)perylene		< 0,002
Indeno(1,2,3-cd)pyren		< 0,002
Quantifizierbare PAK ₁₅		-
Quantifizierbare PAK ₁₆		-
DOC	mg/l	< 1

Tab. A18: Ergebnisse des Abstimmungsversuchs zur Optimierung des Prüfverfahrens – anorganische Parameter
(Analyse in Labor B)

Parameter	Einheit	Aufbereitung	Blindversuch mit 4 cm Filtersand				20 % Ton + 80 % Sand			
			Labor A		Labor B		Labor A		Labor B	
			a	b	a	b	a	b	a	b
pH-Wert	-	Original bzw. unbehandelt	7,2	6,6	6,2	6,0	7,0	6,9	7,0	7,0
el. Leitfähigkeit	µS/cm		2,2	1,7	2,1	2	67	65	62	59
Natrium (Na)	µg/l	zentrifugiert und filtriert	160	170	< 50	< 50	3.400	3.700	3.000	2.900
Kalium (K)			78	69	84	81	3.300	3.400	3.100	3.300
Calcium (Ca)			200	160	140	180	6.200	6.300	5.400	5.600
Chlorid (Cl ⁻)	mg/l		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Nitrat (NO ₃ ⁻)			< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Sulfat (SO ₄ ²⁻)			< 5	<5	< 5	< 5	8,6	7,3	6,5	6,4
Cyanid (CN ⁻)			<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Antimon (Sb)	µg/l		zentrifugiert, filtriert, angesäuert und dekantiert	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Arsen (As)		< 5		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Barium (Ba)		< 5		< 5	< 5	< 5	21	21	21	27
Blei (Pb)		< 5		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Bor (B)		100		190	150	140	52	39	61	61
Cadmium (Cd)		< 0,5		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrom (Cr)		< 5		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Kobalt (Co)		< 2		< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Kupfer (Cu)		< 3		< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	4,6
Molybdän (Mo)		< 2		< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,1
Nickel (Ni)		< 5		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Quecksilber (Hg)		< 0,4		< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Selen (Se)		< 5		< 5	< 5	< 5	110	100	94	88
Thallium (Tl)		< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Vanadium (V)		< 2		< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,6
Zink (Zn)		< 10		< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

a, b: Einzelmessungen

Tab. A19: Ergebnisse des Abstimmungsversuchs zur Optimierung des Prüfverfahrens – organische Parameter
($\mu\text{g/l}$ / mg/l)

Parameter	Einheit	Aufbereitung	Blindversuch mit 4 cm Filtersand				20 % Ton + 80 % Sand				
			Labor A		Labor B		Labor A		Labor B		
			a	b	a	b	a	b	a	b	
Naphthalin	$\mu\text{g/l}$	Zentrifugiert	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,14	0,15	0,11	0,1	
Acenaphthylen			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Acenaphthen			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,07	<0,02	<0,02
Fluoren			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05
Phenanthren			<0,02	<0,02	0,04	0,04	0,26	0,31	0,27	0,24	0,24
Anthracen			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Fluoranthren			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Pyren			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo(a)anthracen			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Chrysen			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo(b)fluoranthren			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo(k)fluoranthren			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo(a)pyren			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Dibenz(ah)anthracen			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Benzo(ghi)perylene			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Indeno(1,2,3-cd)pyren			<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Quantifizierbare PAK ₁₅					-	-	0,04	0,04	0,31	0,37	0,40
Quantifizierbare PAK ₁₆			-	-	0,04	0,04	0,45	0,52	0,51	0,39	
DOC	mg/l		<0,5	<0,5	0,6	<0,5	5,4	5,7	5,5	5,6	

a, b: Einzelmessungen

Tab. A20: Ergebnisse der Versuche zur Optimierung des Sandanteils – Material Ton . zentrifugierte und filtrierte Eluate

Parameter / Stoff	Einheit	80 % Sand + 20 % Ton				60 % Sand + 40 % Ton		50% Sand + 50 % Ton			
		Labor A		Labor B		Labor A		Labor A		Labor B	
		a	b	a	b	a	b ¹⁾	a	b	a	b
pH-Wert	-	8,2	7,9	6,7	6,7	7,6	7,7	7,8	7,8	6,9	6,9
el. Leitfähigkeit	µS/cm	68	86	59	64	55	66	55	64	20	20
Redoxpotential	mV	375	396	-	-	414	418	422	411	-	-
Natrium (Na)	mg/l	3,8	4,5	2,50	2,50	2,6	3,2	2,4	2,9	0,86	0,94
Kalium (K)		8,3	8,6	2,70	2,90	4,3	4,8	3,8	4,4	1,30	1,40
Calcium (Ca)		2,4	3,3	3,70	4,40	3	3,8	3,8	4	1,40	1,40
Chlorid (Cl)		1,02	1,50	< 1	< 1	0,86	0,92	1,24	0,98	< 1	< 1
Nitrat (NO ₃)		0,68	0,92	< 1	< 1	0,68	0,92	0,89	1,10	< 1	< 1
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		6,38	8,46	6,8	7,6	7,05	9,63	8,22	9,53	2,9	2,7
Cyanid (CN)		0,015	0,013	< 0,005	< 0,005	0,004	0,003	0,002	0,002	< 0,005	< 0,005
Fluorid (F)		0,95	1,00	0,87	0,92	0,70	0,77	0,62	0,75	0,24	0,27
Antimon (Sb)		< 0,1	0,114	< 5	< 5	0,102	0,111	0,107	0,109	< 5	< 5
Arsen (As)		< 1	< 1	< 5	< 5	< 1	< 1	< 1	< 1	< 5	< 5
Barium (Ba)	34,8	35,1	13	14	23,6	31,2	25,2	27,8	5,6	5,8	
Blei (Pb)	1,39	0,784	< 5	< 5	0,371	0,477	0,144	0,203	<5	<5	
Bor (B)	29,1	30,3	28	27	< 1	2,15	<1	< 1	16	20	
Cadmium (Cd)	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,5	< 0,25	
Chrom (Cr)	1,13	0,905	< 5	< 5	2,09	3,41	1,50	1,71	< 5	<5	
Kobalt (Co)	0,625	0,375	< 2	< 2	0,297	0,368	0,172	0,205	< 2	< 2	
Kupfer (Cu)	2,89	2,01	< 3	< 3	0,892	0,874	0,653	0,674	< 3	< 3	
Molybdän (Mo)	0,464	0,872	5,4	4,5	0,667	0,811	0,599	0,746	2,9	2,7	
Nickel (Ni)	1,62	1,06	< 5	< 5	0,700	1,04	0,286	0,387	< 5	< 5	
Quecksilber (Hg)	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,05	
Selen (Se)	86,2	112	110	120	80,8	99,1	88,3	92,4	50	48	
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	< 0,8	< 0,8	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,8	< 0,8	
Vanadium (V)	1,14	0,754	< 2	< 2	1,89	2,76	1,44	1,58	< 2	< 2	
Zink (Zn)	5,99	4,47	< 10	< 10	31,7¹⁾	6,09	3,09	2,56	< 10	< 10	

a, b Einzelmessungen

1): wahrscheinlich Kontamination bei der Analyse

Tab. A21: Ergebnisse der Versuche zur Optimierung des Sandanteils – Material Ton, Labor A – unbehandelte Eluate

Parameter	Einheit	80 % Sand + 20 % Ton		60 % Sand + 40 % Ton		50% Sand + 50 % Ton	
		a	b	a	b	a	b
pH-Wert	-	7,5	8,1	7,9	7,9	6,8	7,0
el. Leitfähigkeit	µS/cm	54,5	49,4	71	67,3	64,5	79,7
Redoxpotential	mV	411	414	396	403	406	417

a,b Einzelmessungen

Tab. A22: Ergebnisse der Versuche zur Optimierung des Sandanteils – Material RC-a, Labor A – filtrierte Eluate

Parameter / Stoff	Einheit	80 % Sand + 20 % RC-a		60 % Sand + 40 % RC-a		40 % Sand + 60 % RC-a		20 % Sand + 80 % RC-a		100 %RC-a	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
pH-Wert	-	12,0	12,1	12,4	12,4	11,9	11,9	12,0	12,0	12,0	12,1
el. Leitfähigkeit	µS/cm	699	876	1386	1587	1955	1818	1818	1763	1763	2101
Redoxpotential	mV	211	200	193	183	187	186	178	183	168	175
Natrium (Na)	mg/l	40,3	38,4	40,7	41,2	41,9	42,2	41,2	42,8	41,8	40,9
Kalium (K)		70,9	66,7	82,1	82,6	90,9	88,9	81,8	84,4	88,6	85,1
Calcium (Ca)		7,2	23,8	51,5	78,9	101	99,8	113	107	100	135
Chlorid (Cl ⁻)		8,71	8,47	9,49	9,44	10,2	10,9	10,3	10,9	10,7	10,6
Nitrat (NO ₃ ⁻)		10,9	10,2	11,6	11,7	12,4	13,4	13,0	13,3	13,0	13,3
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		23,9	26,4	21,1	21,2	22,4	22,0	19,3	19,2	18,5	16,5
Cyanid (CN ⁻)		0,011	0,011	0,012	0,013	0,011	0,011	0,01	0,01	0,014	0,014
Fluorid (F ⁻)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Antimon (Sb)		0,955	0,940	0,867	0,870	0,948	0,859	0,818	0,821	0,792	0,771
Arsen (As)	2,02	1,87	1,69	1,79	2,10	1,87	2,06	2,14	1,84	2,10	
Barium (Ba)	18,4	21,7	37,0	46,6	53,8	55,2	53,6	52,2	53,0	60,1	
Blei (Pb)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,122	< 0,1	0,111	0,189	0,174	0,177	0,189	
Bor (B)	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	4,82	5,34	4,02	3,85	
Cadmium (Cd)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Chrom (Cr)	27,7	25,1	27,5	28,2	29,8	29,2	25,2	26,5	26,4	24,9	
Kobalt (Co)	1,77	1,61	1,73	1,78	2,08	2,09	2,08	2,09	1,88	1,81	
Kupfer (Cu)	67,5	61,0	64,8	66,1	74,5	76,1	75,7	76,2	71,8	69,6	
Molybdän (Mo)	6,37	5,87	6,07	6,27	6,53	6,45	6,01	6,35	6,38	6,08	
Nickel (Ni)	13,8	12,3	13,5	13,7	16,1	16,3	16,6	16,8	15,3	14,9	
Quecksilber (Hg)	0,0585	0,0708	0,0423	0,0431	0,0270	0,0246	0,0314	0,0330	0,0323	0,0339	
Selen (Se)	1,57	1,68	1,39	1,40	1,42	1,30	1,14	1,19	< 1	1,17	
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Vanadium (V)	9,31	9,17	5,70	5,68	5,93	5,09	4,74	4,66	3,67	3,71	
Zink (Zn)	1,78	10,3	19,5¹⁾	3,63	11,0	7,25	8,98	8,37	8,73	7,16	

a, b Einzelmessungen

1): wahrscheinlich Kontamination bei der Analyse

Tab. A23: Ergebnisse der Versuche zur Optimierung des Sandanteils – Material RC-a, Labor A – unbehandelte Eluate

Parameter	Einheit	80 % Sand + 20 % RC-a		60 % Sand + 40 % RC-a		40 % Sand + 60 % RC-a		20 % Sand + 80 % RC-a		100 %RC-a	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
pH-Wert	-	12,9	12,0	12,3	12,4	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1
el. Leitfähigkeit	µS/cm	778	966	1494	1768	1965	1882	1868	1796	1890	2070
Redoxpotential	mV	197	190	177	172	183	184	184	188	160	158

a, b Einzelmessungen

Tab. A24: Ergebnisse der Versuche zur Optimierung des Sandanteils – Material RC-a, Labor B

Parameter / Stoff	Einheit	80 % Sand + 20 % RC-a		50 % Sand + 50 % RC-a		100 %RC-a	
		a	b	a	b	a	b
pH-Wert	-	11,4	11,8	11,8	11,8	12,0	12,0
el. Leitfähigkeit	µS/cm	800	2200¹⁾	2200	2200	2230	2150
Redoxpotential	mV	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
Natrium (Na)	mg/l	34	41	34	38	26	20
Kalium (K)		51	73	91	94	96	88
Calcium (Ca)		15	75¹⁾	110	110	120	130
Chlorid (Cl ⁻)		6,6	8,1	42	2,7	7,3	6,2
Nitrat (NO ₃ ⁻)		12,9	10	1,1	< 1	8,7	7,0
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		< 5	24,0¹⁾	7,5	4,7	13,0	15,0
Cyanid (CN ⁻)		< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Fluorid (F ⁻)		0,26	0,25	0,20	0,20	0,15	0,11
Antimon (Sb)		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Arsen (As)		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Barium (Ba)	µg/l	7,4	25	49	50	40	38
Blei (Pb)		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Bor (B)		14	10	11	9,9	6,8	7,5
Cadmium (Cd)		< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Chrom (Cr)		16	21	25	26	21	20
Kobalt (Co)		2,1	2,3	< 2	2,2	< 2	< 2
Kupfer (Cu)		56	71	69	80	51	43
Molybdän (Mo)		8,1	7,6	8,2	7,5	7,9	7,1
Nickel (Ni)		16	16	16	19	16	14
Quecksilber (Hg)		0,12	< 0,05	0,06	0,09	< 0,05	< 0,05
Selen (Se)		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Thallium (Tl)		< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8
Vanadium (V)		12,0	9,0	4,9	5,1	4,4	3,5
Zink (Zn)		< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

a, b Einzelmessungen

n. b.: nicht bestimmt

1): wahrscheinlich Kontamination

Tab. A25: Mittlere Kontaktzeit (kumulativ) in Abhängigkeit von der Porosität und dem Sandanteil, Beispielrechnung für eine $S[\]$ dichte des Materials von $2,65 \text{ g/cm}^3$

n	Mittlere Kontaktzeit bei einem Sandanteil von								
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %
0,25	4,91 h	4,90 h	4,88 h	4,87 h	4,84 h	4,81 h	4,76 h	4,69 h	4,53 h
0,30	4,88 h	4,87 h	4,85 h	4,83 h	4,80 h	4,76 h	4,70 h	4,60 h	4,39 h
0,35	4,85 h	4,83 h	4,81 h	4,78 h	4,75 h	4,70 h	4,62 h	4,49 h	4,24 h
0,40	4,81 h	4,79 h	4,76 h	4,73 h	4,69 h	4,62 h	4,53 h	4,37 h	4,06 h
0,45	4,77 h	4,74 h	4,71 h	4,67 h	4,61 h	4,54 h	4,42 h	4,23 h	3,84 h
0,50	4,72 h	4,69 h	4,65 h	4,60 h	4,53 h	4,43 h	4,29 h	4,06 h	3,58 h
0,55	4,65 h	4,62 h	4,57 h	4,51 h	4,42 h	4,31 h	4,14 h	3,85 h	3,30 h
0,60	4,58 h	4,53 h	4,47 h	4,39 h	4,29 h	4,15 h	3,94 h	3,58 h	- ¹⁾
0,65	4,47 h	4,42 h	4,34 h	4,25 h	4,12 h	3,95 h	3,69 h	- ¹⁾	- ¹⁾
0,70	4,34 h	4,27 h	4,17 h	4,06 h	3,90 h	3,68 h	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾
0,75	4,15 h	4,06 h	3,94 h	3,79 h	3,58 h	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾
0,80	3,87 h	3,74 h	3,58 h	3,39 h	- ¹⁾				

gelb hinterlegte Felder: mittlere Kontaktzeit kleiner als 4 Stunden

1): nicht relevant

Tab. A26: Versuche zur Überprüfung der Einflussfaktoren Sättigungsdauer, Verdichtungsmethode und L/D-Verhältnis

Parameter / Stoff	Einheit	80 % Sand + 20 % RC-a												
		Referenz		5 h Sättigung		Fallgewicht		Vibration		L/D = 3		L/D = 6		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
pH-Wert	-	12,0	12,1	11,6	11,7	11,6	11,6	11,7	11,6	11,4	11,3	11,6	11,7	
el. Leitfähigkeit	µS/cm	699	876	1090	2101	968	1009	1125	1007	699	685	987	1099	
Redoxpotential	mV	211	200	111	125	145	126	123	132	150	167	140	139	
Natrium (Na)	mg/l	40,3	38,4	40,4	41,6	38,0	37,5	39,8	38,5	37,9	39,8	37,1	37,9	
Kalium (K)		70,9	66,7	69,9	69,4	62,0	64,3	62,3	65,0	66,0	69,7	68,0	66,9	
Calcium (Ca)		7,2	23,8	37,7	58,1	19,6	14,6	29,7	23,9	0,7	1,7	17,4	30,6	
Chlorid (Cl ⁻)		8,71	8,47	7,0	8,1	7,0	6,8	7,7	7,6	7,1	7,4	6,8	7,0	
Nitrat (NO ₃ ⁻)		10,9	10,2	9,5	10,2	9,5	9,6	10,6	10,4	10,2	10,0	9,1	9,3	
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		23,9	26,4	24,6	29,5	37,8	38,4	35,9	33,2	35,7	34,2	32,9	34,3	
Cyanid (CN ⁻)		0,011	0,011	0,013	0,015	0,005	0,005	0,011	0,011	0,013	0,011	0,01	0,012	
Fluorid (F ⁻)		<0,10	<0,1	<0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Antimon (Sb)		0,955	0,940	0,970	0,987	1,01	0,980	0,976	0,956	0,922	0,952	0,911	0,914	
Arsen (As)		2,02	1,87	3,46	3,64	3,26	3,33	3,78	2,81	2,45	2,60	2,57	3,21	
Barium (Ba)	18,4	21,7	30,2	27,0	24,6	23,9	25,6	23,6	18,1	16,4	24,9	26,8		
Blei (Pb)	<0,1	<0,1	0,428	0,320	0,219	0,308	0,175	0,156	0,173	0,144	0,233	1,31		
Bor (B)	<1	<1	12,8	6,94	8,27	7,46	8,23	6,77	6,54	6,84	6,61	6,94		
Cadmium (Cd)	<0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
Chrom (Cr)	27,7	25,1	22,5	20,3	18,5	17,6	18,5	18,3	17,6	18,8	16,9	17,1		
Kobalt (Co)	1,77	1,61	2,57	2,59	2,34	2,23	2,45	2,35	2,34	2,42	2,19	2,27		
Kupfer (Cu)	67,5	61,0	95,7	71,7	67,1	64,6	68,2	65,1	66,1	68,5	62,3	64,9		
Molybdän (Mo)	6,37	5,87	5,64	5,55	5,30	5,20	5,78	5,40	5,52	5,67	5,00	5,10		
Nickel (Ni)	13,8	12,3	16,5	15,8	13,6	13,6	14,3	14,1	14,4	14,8	12,8	13,9		
Quecksilber (Hg)	0,0585	0,0708	0,0477	0,0706	0,0783	0,0756	0,0791	0,0764	0,0611	0,0712	0,0647	0,0659		
Selen (Se)	1,57	1,68	2,07	2,02	1,81	1,69	1,90	1,89	1,79	2,08	1,75	1,71		
Thallium (Tl)	<0,10	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		
Vanadium (V)	9,31	9,17	13,1	11,6	12,2	11,8	11,9	11,3	10,9	11,6	10,7	10,9		
Zink (Zn)	1,78	10,3	3,59	3,83	2,35	3,78	2,71	5,93	1,79	1,06	3,41	2,40		

a, b Einzelmessungen

Tab. A27: Ergebnisse der Versuche an einem Ton-Sand-Gemisch (50 % Ton und 50 % Sand) in Trocken- bzw. Nasseinbau

Parameter / Stoff	Einheit	50 % Sand + 50 % Ton				
		3 % Wassergehalt (trocken), Porosität 0,46		30 % Wassergehalt (nass), Porosität 0,38		
		a	b	a	b	
pH-Wert	-	7,8	7,8	7,3	7,4	
el. Leitfähigkeit	µS/cm	55	64	25	27	
Redoxpotential	mV	422	411	471	454	
Natrium (Na)	mg/l	2,4	2,9	1,1	1,3	
Kalium (K)		3,8	4,4	3,6	5,0	
Calcium (Ca)		3,8	4	0,8	0,8	
Chlorid (Cl ⁻)		1,2	1,0	0,6	0,7	
Nitrat (NO ₃ ⁻)		0,9	1,1	0,6	0,5	
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		8,2	9,5	2,2	3,0	
Cyanid (CN ⁻)		0,002	0,002	0,013	0,024	
Fluorid (F ⁻)		0,62	0,75	0,38	0,57	
Antimon (Sb)		µg/l	0,11	0,11	<0,1	<0,1
Arsen (As)			<1	<1	<1	<1
Barium (Ba)	25,2		27,8	15,0	21,2	
Blei (Pb)	0,144		0,203	0,637	1,03	
Bor (B)	<1		<1	7,40	9,52	
Cadmium (Cd)	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	
Chrom (Cr)	1,50		1,71	0,96	1,41	
Kobalt (Co)	0,172		0,205	0,221	0,329	
Kupfer (Cu)	0,65		0,67	1,66	2,49	
Molybdän (Mo)	0,599		0,746	0,248	0,205	
Nickel (Ni)	0,286		0,387	0,634	0,776	
Quecksilber (Hg)	<0,01		<0,01	<0,01	<0,01	
Selen (Se)	88,3		92,4	37,5	40,3	
Thallium (Tl)	<0,1		<0,1	<0,1	<0,1	
Vanadium (V)	1,44		1,58	1,12	1,59	
Zink (Zn)	3,09		2,56	7,74	13,7	

a, b Einzelmessungen

Tab. A28: Ergebnisse des Laborvergleichstests zur Abstimmung der Analysemethode der Hauptparameter

Porosität	Einheit	Labor A		Labor B	
		Wert	Methode	Wert	Methode
pH-Wert	-	11,9	Elektrode	11,7	Elektrode
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1695		1830	
Redoxpotential	mV	151		-	
Natrium (Na)	mg/l	33,0	F-AES	32,0	ICP-OES
Kalium (K)		62,3		61,0	
Calcium (Ca)		110		140	
Chlorid (Cl ⁻)		7,59	IC	7,80	IC
Nitrat (NO ₃ ⁻)		9,84		9,50	
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		36,5		36,0	

Tab. A29: Ergebnisse der Versuche an einem Ton-Sand-Gemisch (40 % Ton und 60 % Sand) mit und ohne Königwasseraufschluss mit Mikrowellenbehandlung

Element	60 % Sand + 40 % Ton			
	mit Bodensatz, Aufschluss durchgeführt	ohne Bodensatz, Aufschluss durchgeführt	mit Bodensatz, kein Aufschluss	ohne Bodensatz, kein Aufschluss
	µg/l			
Antimon (Sb)	0,231	0,263	0,138	0,137
Arsen (As)	1,07	1,13	<1	<1
Barium (Ba)	59,7	42,8	36,0	25,9
Blei (Pb)	4,62	6,23	0,42	0,46
Bor (B)	62,5	49,1	40,3	36,1
Cadmium (Cd)	<0,25	<0,25	<0,1	<0,1
Chrom (Cr)	19,2	14,8	0,82	0,72
Kobalt (Co)	1,24	1,11	0,224	0,18
Kupfer (Cu)	3,89	5,21	1,65	2,25
Molybdän (Mo)	1,36	1,05	1,13	0,747
Nickel (Ni)	7,15	6,51	0,56	0,54
Quecksilber (Hg)	<0,025	0,113	<0,01	<0,01
Selen (Se)	106	112	109	104
Thallium (Tl)	<0,25	<0,25	<0,1	<0,1
Vanadium (V)	12,6	9,09	0,76	0,87
Zink (Zn)	23,6	27,4	2,50	4,0

Tab. A30: Ergebnisse des ersten Laborvergleichstests zur Probenvorbereitung bei der Schwermetallanalytik mit einem Eluat
 c[} RC-a

Element	Labor A		Labor B				Labor C			
	Ansäuern erst unmittelbar vor der Analyse ¹⁾	Ansäuern bei Eluatgewinnung	Ansäuern erst unmittelbar vor der Analyse ¹⁾		Ansäuern bei Eluatgewinnung		ohne Ansäuern		Ansäuern bei Eluatgewinnung	
	KWA ²⁾	ohne Aufschluss	SSA ³⁾	ohne Aufschluss	SSA ³⁾	ohne Aufschluss	KWA ²⁾	ohne Aufschluss	KWA ²⁾	ohne Aufschluss
	µg/l		µg/l				µg/l			
Antimon (Sb)	1,19	1,00	< 5	< 5	< 5	< 5	1,2	5,0	0,8	2,0
Arsen (As)	2,04	1,92	< 5	< 5	< 5	< 5	3,5	4,3	3,0	1,9
Barium (Ba)	54,9	55,1	45	50	45	49	59	58	58	64
Blei (Pb)	0,857	0,441	< 5	< 5	< 5	< 5	0,26	0,17	0,50	0,47
Bor (B)	8,74	7,96	13,0	9,9	12,0	8,9	8,0	12,5	7,0	7,8
Cadmium (Cd)	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 3	0,080	< 3	0,014
Chrom (Cr)	34,9	27,3	22	23	23	23	26,3	48	27,0	30,4
Kobalt (Co)	2,77	2,66	2,6	2,3	2,6	2,4	2,5	4,5	2,5	2,87
Kupfer (Cu)	89,5	85,9	81	88	81	86	73	97	72	88
Molybdän (Mo)	6,07	5,83	8,7	7,7	9,0	7,9	11,0	19,0	5,0	6,3
Nickel (Ni)	23,0	19,0	19	17	19	17	19,0	28,0	17,9	20,4
Quecksilber (Hg)	0,0575	0,0226	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,3	1,70	< 0,3	0,06
Selen (Se)	1,47	1,17	< 5	< 5	< 5	< 5	< 10	3,6	< 10	1,2
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,2	0,018	< 0,2	0,019
Vanadium (V)	6,30	4,96	5,5	5,2	5,2	5,1	4,4	8,0	4,9	5,6
Zink (Zn)	22,8⁴⁾	6,65	13	< 10	13	11	-	3,7	-	5,6

1): Gemäß den Empfehlungen des Geräteherstellers wurde unmittelbar vor der Messung 0,5 M-% Salzsäure zugegeben.

2): Königwasseraufschluss mit Mikrowelle nach DIN ISO 15587-1 (im Labor C mit geringerer Probemenge)

3): Salpetersäureaufschluss mit H₂O₂

4): Wahrscheinlich Kontaminationen

Tab. A31: Ergebnisse des zweiten Laborvergleichstests zur Probenvorbereitung bei der Schwermetallanalytik Eluat aus Ton-Sand-Gemisch (40 % Ton und 60 % Sand) mit verschiedenen Aufschlüssen

Element	60 % Sand + 40 % Ton							
	Labor A		Labor B				Labor C	
	ohne Aufschluss	KWA ¹⁾	ohne Aufschluss	KWA ²⁾	SSA ³⁾	SSA ⁴⁾	ohne Aufschluss	KWA ¹⁾
	µg/l							
Antimon (Sb)	0,104	0,438	< 5	29⁵⁾	< 5	< 5	0,34	0,40
Arsen (As)	1,39	3,05	6,4⁵⁾	< 5	5,2	< 5	1,28	2,70
Barium (Ba)	33,6	95,9	47	61	57	86	28,9	85,0
Blei (Pb)	1,14	8,48	< 5	< 5	< 5	< 5	1,02	3,30
Bor (B)	24,1	93,3	57⁵⁾	37	59	23	19,4	56,0
Cadmium (Cd)	< 0,1	0,696	< 0,25	< 0,5	< 0,25	< 0,5	0,012	< 0,1
Chrom (Cr)	5,41	58,0	18⁵⁾	33	29	18	2	40
Kobalt (Co)	0,763	3,14	< 2	2,6	2,8	2,2	0,44	3,10
Kupfer (Cu)	2,60	13,3	3,9	66,0⁵⁾	5,1	22	2,1	3,20
Molybdän (Mo)	0,457	1,48	14⁵⁾	< 2	13	< 2	0,53	0,70
Nickel (Ni)	3,44	27,2	7,8	20,0	11,0	5,9	1,4	15,7
Quecksilber (Hg)	< 0,01	0,126	< 0,05	< 0,2	< 0,05	< 0,2	< 0,01	< 0,1
Selen (Se)	58,4	57,6	79	70	71	56	62	63
Thallium (Tl)	< 0,1	0,304	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	0,03	0,25
Vanadium (V)	4,82	29,4	13,0⁵⁾	26,0	19,0	6,3	1,7	28,0
Zink (Zn)	8,86	108⁵⁾	43⁵⁾	67	51	< 10	6,1	40,0

1): Königwasseraufschluss mit Mikrowelle nach DIN ISO 15587-1 (in Labor C mit geringerer Probenmenge)

2): Königwasseraufschluss ohne Mikrowelle nach DIN ISO 15587-1

3): Salpetersäureaufschluss mit H₂O₂

4): Salpetersäureaufschluss ohne H₂O₂

5): wahrscheinlich Kontaminationen

Tab. A32: Ergebnisse des zweiten Laborvergleichstests zur Probenvorbereitung bei der Schwermetallanalytik – Eluat aus RC-a mit verschiedenen Aufschlüssen

Element	100 % RC-a							
	Labor A		Labor B				Labor C	
	ohne Aufschluss	KWA ¹⁾	ohne Aufschluss	KWA ²⁾	SSA ³⁾	SSA ⁴⁾	ohne Aufschluss	KWA ¹⁾
	µg/l							
Antimon (Sb)	0,658	0,922	<5	6,7	<5	<5	1,90	0,69
Arsen (As)	1,31	2,03	6,2	<5	<5	<5	1,4	2,7
Barium (Ba)	45,9	70,8	41	57	43	66	51,0	49,9
Blei (Pb)	<0,1	5,64⁵⁾	<5	<5	<5	<5	0,16	0,13
Bor (B)	7,22	22,5⁵⁾	37⁵⁾	<5	28⁵⁾	<5	8,2	8,7
Cadmium (Cd)	<0,1	0,934	<0,25	<0,5	<0,25	<0,5	0,03	<0,1
Chrom (Cr)	19,8	41,7⁵⁾	20	23	20	18	22,1	22,0
Kobalt (Co)	2,27	2,51	2,5	2,2	2,8	<2	2,41	2,43
Kupfer (Cu)	54,6	62,8	54	92	53	51	51	57
Molybdän (Mo)	3,75	4,83	13⁵⁾	<2	15⁵⁾	<2	4,08	3,93
Nickel (Ni)	12,7	28,3⁵⁾	13	21⁵⁾	14	<5	13,4	14,1
Quecksilber (Hg)	<0,01	0,163	<0,05	<0,2	<0,05	<0,2	0,03	<0,1
Selen (Se)	0,851	1,38	<5	<5	<5	<5	1,0	1,2
Thallium (Tl)	<0,1	<0,1	<0,8	<0,8	<0,8	<0,8	0,019	<0,2
Vanadium (V)	5,06	8,21	4,3	13,0⁵⁾	4,8	<2	5,5	5,0
Zink (Zn)	0,680	84,0⁵⁾	23⁵⁾	<10	29	<10	1,3	8,0

1): Königwasseraufschluss mit Mikrowelle nach DIN ISO 15587-1 (in Labor C mit geringerer Probenmenge)

2): Königwasseraufschluss ohne Mikrowelle nach DIN ISO 15587-1

3): Salpetersäureaufschluss mit H₂O₂

4): Salpetersäureaufschluss ohne H₂O₂

5): wahrscheinlich aus Kontamination

Tab. A33: Ergebnisse des zweiten Laborvergleichstests zur Probenvorbereitung bei der Schwermetallanalytik – Standardlösung

Parameter-	Soll-Wert	Labor		
		Labor A	Labor B	Labor C
µg/l				
Antimon (Sb)	-	-	1,2	1,2
Arsen (As)	990 ± 50	962	970	1034 ¹⁾
Barium (Ba)	101 ± 5	98,0	100	139,4
Blei (Pb)	100 ± 5	96,0	99	96,2
Bor (B)	990 ± 50	962	980	990 ¹⁾
Cadmium (Cd)	100 ± 5	97,5	97	97
Chrom (Cr)	101 ± 5	96,8	100	99
Kobalt (Co)	100 ± 5	97,4	98	101
Kupfer (Cu)	100 ± 5	102	100	107,4
Molybdän (Mo)	101 ± 5	95,2	97	98
Nickel (Ni)	100 ± 5	97,6	100	104
Quecksilber (Hg)	-	-	<0,2	0,12
Selen (Se)	1020 ± 50	971	1000	1030 ¹⁾
Thallium (Tl)	101 ± 5	96,4	100	96,4
Vanadium (V)	101 ± 5	95,6	99	100,3
Zink (Zn)	1000 ± 50	971	1000	1260 ¹⁾

1): sind weit außerhalb der Kalibration und nicht repräsentativ

Tab. A34: Ergebnisse des zweiten Laborvergleichstests zur Probenvorbereitung bei der Schwermetallanalytik – filtrierte und HNO_3 -säurierte Eluate ohne Aufschluss

Parameter	60 % Sand + 40 % Ton			RC-a		
	Labor A	Labor B	Labor C	Labor A	Labor B	Labor C
	µg/l					
Antimon (Sb)	0,10	<5	0,34	0,66	<5	1,9
Arsen (As)	1,39	6,4¹⁾	1,28	1,31	6,2¹⁾	1,4
Barium (Ba)	33,6	47	28,9	45,9	41	51
Blei (Pb)	1,14	<5	1,02	<0,1	<5	0,16
Bor (B)	24,1	57¹⁾	19,4	7,2	37¹⁾	8,2
Cadmium (Cd)	<0,1	<0,25	0,012	<0,1	<0,25	0,03
Chrom (Cr)	5,4	18¹⁾	2	19,8	20	22,1
Kobalt (Co)	0,76	<2	0,44	2,27	2,5	2,41
Kupfer (Cu)	2,6	3,9	2,1	54,6	54	51
Molybdän (Mo)	0,46	14¹⁾	0,53	3,75	13¹⁾	4,08
Nickel (Ni)	3,4	7,8	1,4	12,7	13	13,4
Quecksilber (Hg)	<0,01	<0,05	<0,01	<0,01	<0,05	0,03
Selen (Se)	58,4	79	62	0,9	<5	1
Thallium (Tl)	<0,1	<0,8	0,03	<0,1	<0,8	0,019
Vanadium (V)	4,8	13¹⁾	1,7	5,1	4,3	5,5
Zink (Zn)	8,9	43¹⁾	6,1	0,7	23¹⁾	1,3

1): wahrscheinlich Kontamination bei der Analyse

Tab. A35: Ergebnisse des zweiten Laborvergleichstests zur Probenvorbereitung bei der Schwermetallanalytik – Analyse von aufgeschlossenen Proben aus Labor A (Königwasseraufschluss mit Mikrowelle)

Parameter-	Blindprobe des Aufschlusses			60 % Sand + 40 % Ton			RC-a		
	Labor A	Labor B	Labor C	Labor A	Labor B	Labor C	Labor A	Labor B	Labor C
	µg/l								
Antimon (Sb)	<0,1	<5	0,3	0,438	8,1¹⁾	0,625	0,922	9,6¹⁾	1,13
Arsen (As)	<1	<5	<0,08	3,05	7,5¹⁾	3,63	2,03	7,6¹⁾	4,35
Barium (Ba)	1,99	26¹⁾	3,67	95,9	85	108	70,8	63	80,8
Blei (Pb)	1,71	<5	2,2	8,48	7,7	9,25	5,64	5,5	6,68
Bor (B)	13,8	21	10,7	93,3	130	105	22,5	53¹⁾	22,5
Cadmium (Cd)	<0,1	<0,5	0,08	0,696	0,75	0,775	0,934	1,1	1,03
Chrom (Cr)	2,50	<5	0,9	58,0	53	65	41,7	36	42,5
Kobalt (Co)	<0,1	<2	0,206	3,14	2,8	3,1	2,51	2,4	2,55
Kupfer (Cu)	2,66	3,8	2,52	13,3	16	15	62,8	61	63,5
Molybdän (Mo)	0,321	4,6¹⁾	0,295	1,48	10¹⁾	1,6	4,83	15¹⁾	5,08
Nickel (Ni)	5,17	6	5,01	27,2	27	26,5	28,3	29	28
Quecksilber (Hg)	0,0424	<5	0,08	0,126	<0,2	0,175	0,163	<0,2	0,2
Selen (Se)	<1	<0,8	<0,2	57,6	62	54,3	1,38	<5	1,5
Thallium (Tl)	<0,1	<2	0,07	0,304	<0,8	0,388	<0,1	<0,8	<0,2
Vanadium (V)	0,825	<0,2	<0,2	29,4	27	31,3	8,21	6,9	8,5
Zink (Zn)	59,0	210¹⁾	80	107,5	120	120	84,0	110	93,8

1): wahrscheinlich Kontamination bei der Analyse

Tab. A36: Ergebnisse des zweiten Laborvergleichstests zur Probenvorbereitung bei der Schwermetallanalytik – Analyse von aufgeschlossenen Proben aus Labor B (HNO₃+H₂O₂-Aufschluss)

Parameter	60 % Sand + 40 % Ton			RC-a		
	Labor A	Labor B	Labor C	Labor A	Labor B	Labor C
	µg/l					
Antimon (Sb)	0,167	<5	1,2	0,679	<5	1,13
Arsen (As)	1,95	5,2¹⁾	1,8	1,23	<5	1,3
Barium (Ba)	64,4	57	50,1	45,9	43	44,8
Blei (Pb)	2,83	<5	2,57	0,384	<5	0,4
Bor (B)	46,0	59	30,4	9,69	28¹⁾	4,6
Cadmium (Cd)	<0,1	<0,25	0,03	<0,1	<0,25	<0,02
Chrom (Cr)	28,0	29	23	19,5	20	20,8
Kobalt (Co)	2,30	2,8	2,22	2,38	2,8	2,64
Kupfer (Cu)	4,66	5,1	4,4	53,4	53	54
Molybdän (Mo)	0,507	13¹⁾	0,84	3,55	15¹⁾	4,6
Nickel (Ni)	10,9	11	9,6	12,0	14	14
Quecksilber (Hg)	<0,01	<0,05	0,6	<0,01	<0,05	0,39
Selen (Se)	57,4	71	57	<1	<5	2
Thallium (Tl)	0,241	<0,8	0,27	<0,1	<0,8	0,088
Vanadium (V)	19,0	19	15,3	4,92	4,8	5,62
Zink (Zn)	28,5	51¹⁾	23,9	5,39	29¹⁾	5,8

1): wahrscheinlich Kontamination bei der Analyse

Tab. A37: Ergebnisse der ersten PAK-Probe zur Abstimmung der Analysemethode für PAK

PAK	Labor A	Labor B	Verhältnis Labor B/A
	µg/l	µg/l	-
Naphthalin	0,006	0,26	42,2
Acenaphthylen	0,010	<0,1	-
Acenaphthen	0,005	<0,1	-
Fluoren	0,006	<0,1	-
Phenanthren	0,048	0,32	6,61
Anthracen	0,102	<0,1	-
Fluoranthren	0,155	1	6,44
Pyren	0,128	0,92	7,19
Benzo(a)anthracen	0,220	0,59	2,69
Chrysen	0,205	0,96	4,69
Benzo(b)fluoranthren	0,259	0,79	3,05
Benzo(k)fluoranthren	0,151	0,52	3,45
Benzo(a)pyren	0,257	0,81	3,16
Dibenz(ah)anthracen	0,355	<0,1	-
Benzo(ghi)perylen	0,241	1	4,15
Indeno(1,2,3-cd)pyren	0,256	0,74	2,90
Quantifizierbare PAK ₁₅	2,40	7,65	3,19
Quantifizierbare PAK ₁₆	2,40	7,91	3,29

Tab. A38: Ergebnisse der zweiten PAK-Probe zur Abstimmung der Analysemethode für PAK

PAK	Extrakt Labor A ¹⁾		Extrakt Labor B ²⁾		
	Analyse im Labor A	Analyse im Labor C ³⁾	Analyse im Labor A ⁴⁾	Analyse im Labor B	Analyse im Labor C
	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Naphthalin	0,003	<0,05	0,002	<0,02	<0,05
Acenaphthylen	0,040	<0,02	0,043	<0,02	<0,02
Acenaphthen	< 0,0025	<0,02	< 0,0025	<0,02	0,025
Fluoren	0,003	<0,02	0,003	<0,02	<0,02
Phenanthren	0,026	0,061	0,026	0,050	0,114
Anthracen	0,335	0,103	0,329	<0,02	0,132
Fluoranthren	0,120	0,118	0,112	0,160	0,202
Pyren	0,108	0,118	0,103	0,150	0,197
Benzo(a)anthracen	0,148	0,080	0,145	0,080	0,151
Chrysen	0,091	0,104	0,089	0,120	0,175
Benzo(b)fluoranthren	0,306	0,352	0,329	0,190	0,453
Benzo(k)fluoranthren	0,121	n. b.	0,122	0,100	n. b.
Benzo(a)pyren	0,151	0,141	0,180	0,140	0,224
Dibenz(ah)anthracen	0,207	<0,05	0,243	<0,02	<0,05
Benzo(ghi)perylene	0,047	0,226	0,057	0,220	0,290
Indeno(1,2,3-cd)pyren	0,170	0,212	0,179	0,100	0,307
Quantifizierbare PAK ₁₅	1,869	1,514	1,958	1,310	2,271
Quantifizierbare PAK ₁₆	1,872	1,514	1,961	1,310	2,271

1): Extraktion wurde von Labor A durchgeführt und anschließend zu den beiden anderen Laboren zugeschickt

2): Extraktion wurde von Labor B durchgeführt und anschließend zu den beiden anderen Laboren zugeschickt

3): Probe wurde wegen einer Trübung filtriert

4): Labor A hat Probe nach der angegebenen Methode von Labor B extrahiert, da die Originalprobe wegen des störenden Keepers (3-Methylcyclohexanol) nicht ausgewertet werden konnte.

Tab. A39: Ergebnisse der 8-fach Bestimmung an RC-a ohne Sandzumischung, Analyse 1

Parameter / Stoff	Einheit	Probe							
		A	B	C	D	E	F	G	H
pH-Wert	-	11,3	11,6	11,5	11,4	11,5	11,5	11,5	11,4
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1360	1690	1630	1560	1740	1620	1990	1710
Redoxpotential	mV	220	200	200	210	190	190	170	180
Natrium (Na)	mg/l	44,2	46,3	47,3	57,5^{T1)}	47,4	47,7	47,3	43,2
Kalium (K)		79,3	90,0	100	112	87,7	89,4	95,9	80,5
Calcium (Ca)		89,2	95,8	92,9	64,9	98,0	83,4	113	101
Chlorid (Cl ⁻)		19	20	21	24^{T1)}	21	21	21	20
Nitrat (NO ₃ ⁻)		11,5^{T1)}	13,3	13,3	15,9^{T1)}	13,3	13,7	13,3	13,3
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		24	20	23	24	23	22	21	21
Antimon (Sb)		0,92	0,94	0,92	1,01	0,97	1,04	0,94	0,92
Arsen (As)		2,21	2,24	2,38	2,41	2,55	2,43	2,38	2,15
Barium (Ba)	µg/l	42,2	45,9	42,9	38,9	47,5	44,4	61,8^{T1)}	49,2
Blei (Pb)		< 0,1	0,11	0,10	< 0,1	0,16	0,14	0,27^{T1)}	0,14
Bor (B)		11,4	10,1	9,4	8,7	9,1	12,1	9,4	12,1
Cadmium (Cd)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Chrom (Cr)		19,7	22,9	27,6	31,9	25,0	26,1	24,6	20,3
Kobalt (Co)		3,51	3,30	3,62	4,26^{T1)}	3,55	3,74	3,53	3,18
Kupfer (Cu)		91,6	91,8	101	142^{T1)}	96,1	104	97,8	86,4
Molybdän (Mo)		4,98	5,87	7,19	8,15	6,61	6,89	6,35	5,29
Nickel (Ni)		19,8	20,5	22,5	26,9^{T1)}	21,2	22,7	21,0	18,8
Quecksilber (Hg)		0,015	< 0,01^{T1)}	0,014	0,017	0,016	0,017	0,016	0,019
Selen (Se)		1,25	1,27	1,50	1,70	1,50	1,43	1,41	1,34
Thallium (Tl)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Vanadium (V)		6,06	5,31	5,63	4,80	5,26	5,57	5,11	4,95
Zink (Zn)		83,4^{T1)}	7,46	2,32	66,0^{T1)}	4,64	4,26	58,0^{T1)}	6,33

T1) :Ausreißer Typ 1

Tab. A40: Ergebnisse der 8-fach Bestimmung an RC-a ohne Sandzumischung, Analyse 2

Parameter / Stoff	Einheit	Probe							
		A	B	C	D	E	F	G	H
pH-Wert	-	12,4	12,4	12,4	12,3	12,4	12,4	12,5	12,4
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1649	1782	1754	1680	1766	1604	1984^{T1)}	1746
Redoxpotential	mV	163	167	150	175	186	187	184	188
Natrium (Na)	mg/l	46,1	47,6	49,2	60,2^{T1)}	48,3	49,1	48,6	44,5
Kalium (K)		83,5	92,9	104	117	91,9	94,2	102	84,9
Calcium (Ca)		82,4	88,0	78,5	57,6	80,6	62,6	101	87,6
Chlorid (Cl ⁻)		14,5	11,6	13,3	14,7	12,6	13,0	12,5	12,1
Nitrat (NO ₃ ⁻)		13,1	14,1	15,2	18,0	15,0	15,7	15,2	15,1
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		37,1	24,6	36,0	32,5	28,0	26,9	26,1	25,7
Antimon (Sb)		1,11	1,12	1,11	1,25^{T1)}	1,12	1,14	1,08	1,06
Arsen (As)		2,40	2,40	2,54	2,53	2,55	2,33	2,36	2,12
Barium (Ba)	µg/l	42,4	47,2	44,4	40,1	50,5	43,9	63,0^{T1)}	49,8
Blei (Pb)		< 0,1	0,11	0,11	0,30	0,17	0,15	0,34	0,16
Bor (B)		9,7^{T1)}	7,6	7,5	7,8	8,1	8,4	8,0	8,2
Cadmium (Cd)		0,031	0,025	0,033	0,029	0,025	0,025	0,028	0,024
Chrom (Cr)		25,0	29,0	34,0	40,0	31,0	30,4	30,0	24,4
Kobalt (Co)		5,10	4,90	5,20	6,30^{T1)}	5,10	5,13	5,03	4,47^{T1)}
Kupfer (Cu)		112	115	122	151^{T1)}	117	121	116	103
Molybdän (Mo)		4,79	5,80	7,16	8,24	7,14	7,09	6,87	5,66
Nickel (Ni)		28,0	30,3	32,4	39,5^{T1)}	31,1	31,8	30,5	27,5
Quecksilber (Hg)		0,019	< 0,02	0,019	0,025	0,020	0,022	< 0,02	< 0,02
Selen (Se)		1,40	1,40	1,60	1,90^{T1)}	1,40	1,30	1,30	1,20
Thallium (Tl)		0,023	< 0,02	0,023	0,022	0,023	0,021	0,021	< 0,02
Vanadium (V)		7,70	6,80	7,10	6,10	6,60	6,60	6,30	5,90
Zink (Zn)		8,40	3,80	3,10	8,70	8,00	3,10	25,0^{T1)}	3,30

T1) :Ausreißer Typ 1

Tab. A41: Ergebnisse der 8-fach Bestimmung an RC-a mit 50 % Sandzumischung, Analyse 1

Parameter / Stoff	Einheit	Probe							
		A	B	C	D	E	F	G	H
pH-Wert	-	11,5	11,4	11,5	11,4	11,5	11,4	11,4	11,4
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1860	1620	1960	1820	1870	1690	1950	1760
Redoxpotential	mV	180	180	180	180	170	180	180	180
Natrium (Na)	mg/l	42,2	43,5	40,5	43,1	39,7	42,8	43,5	41,4
Kalium (K)		96,9	98,7	96,5	101	94,3	97,7	97,5	99,1
Calcium (Ca)		100	77,5	103	91,0	98,6	77,1	99,0	86,0
Chlorid (Cl ⁻)		19	19	19	18	18	19	18	17
Nitrat (NO ₃ ⁻)		11,5	12,0	11,1	12,0	12,0	12,0	12,8	11,5
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		24	23	23	24	23	23	23	26^{T1)}
Antimon (Sb)		1,04	0,95	0,94	0,98	1,15^{T1)}	0,98	0,96	0,98
Arsen (As)		2,99	2,54	3,06	2,52	2,74	2,33	3,14	2,92
Barium (Ba)	µg/l	45,2	37,2	49,0	46,9	45,6	38,7	46,8	42,1
Blei (Pb)		0,16	0,11	0,20	0,32^{T1)}	0,15	< 0,1	0,13	0,10
Bor (B)		11,7	11,1	9,4	9,7	10,2	10,7	9,1	10,6
Cadmium (Cd)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Chrom (Cr)		23,0	24,8	23,5	26,4	22,6	25,9	25,1	25,0
Kobalt (Co)		3,32	3,45	3,27	3,69	3,27	3,62	3,58	3,51
Kupfer (Cu)		80,7	84,8	80,1	88,5	76,9	87,6	88,5	80,8
Molybdän (Mo)		6,20	6,36	6,50	6,92	5,89	6,88	6,48	6,81
Nickel (Ni)		17,5	18,5	17,2	19,1	16,6	19,3	19,1	17,5
Quecksilber (Hg)		0,027	0,030	0,029	0,028	0,021	0,025	0,021	0,018
Selen (Se)		1,72	1,78	1,80	1,84	1,73	1,73	1,69	1,85
Thallium (Tl)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Vanadium (V)		7,45	7,59	7,20	7,34	7,47	7,68	7,70	7,94
Zink (Zn)		3,57	8,04	3,75	2,48	17,8^{T1)}	2,16	5,63	3,46

T1) :Ausreißer Typ 1

Tab. A42: Ergebnisse der 8-fach Bestimmung an RC-a mit 50 % Sandzumischung, Analyse 2

Parameter / Stoff	Einheit	Probe							
		A	B	C	D	E	F	G	H
pH-Wert	-	12,5	12,4	12,5	12,5	11,6	11,6	11,7	12,1
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1807	1603	1893	1764	1640	1429	1507	1688
Redoxpotential	mV	194	195	190	186	203	211	209	204
Natrium (Na)	mg/l	43,4	45,0	42,4	45,5	41,6	44,8	43,9	46,0
Kalium (K)		104	106	105	110	102	106	108	106
Calcium (Ca)		93,6	64,0	105	84,0	75,6	54,2	59,1	77,7
Chlorid (Cl ⁻)		11,0	10,8	11,4	12,2	11,7	12,2	12,4	11,8
Nitrat (NO ₃ ⁻)		13,1	23,3^{T1)}	12,8	13,7	13,5	13,7	14,3	13,4
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		30,5	28,5	35,8^{T1)}	32,3	29,9	30,7	30,6	32,3
Antimon (Sb)		1,14	1,14	1,11	1,13	1,39^{T1)}	1,15	1,17	1,17
Arsen (As)		2,93	2,42	3,01	2,58	2,87	2,39	3,29	2,97
Barium (Ba)	µg/l	46,7	39,3	53,1	50,9	47,4	40,2	48,7	44,2
Blei (Pb)		0,17	0,12	0,22^{T1)}	0,14	0,15	0,12	0,15	0,13
Bor (B)		9,4	8,9	9,1	9,3	9,0	9,1	9,3	9,2
Cadmium (Cd)		0,026	0,026	0,027	0,025	0,029	0,022	0,023	0,026
Chrom (Cr)		29,2	30,4	30,1	32,5	28,5	31,4	31,3	31,4
Kobalt (Co)		4,95	5,01	4,90	5,36	4,81	5,13	5,22	5,06
Kupfer (Cu)		101	103	101	109	98,2	106	110	100
Molybdän (Mo)		6,51	6,84	6,92	7,43	6,02	7,04	6,76	6,89
Nickel (Ni)		27,5	28,0	27,2	29,5	26,5	28,6	29,5	27,2
Quecksilber (Hg)		0,040^{T1)}	0,032^{T1)}	0,025	0,023	0,020	0,022	0,020	0,024
Selen (Se)		1,60	1,60	1,60	1,80	1,80	1,70	1,80	2,10^{T1)}
Thallium (Tl)		0,033^{T1)}	0,028	0,027	0,027	0,026	0,028	0,028	0,026
Vanadium (V)		9,60	9,50	9,32	9,20	9,52	9,48	9,70	9,90
Zink (Zn)		4,80	3,00	49,0^{T1)}	37,0^{T1)}	7,00	3,50	4,50	4,20

T1) :Ausreißer Typ 1

Tab. A43: Ergebnisse der 8-fach Bestimmung an RC-b ohne Sandzumischung, Analyse 1 – anorganische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	Probe							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Antimon (Sb)	µg/l	1,50^{T1)}	0,52	0,53	0,55	0,50	0,51	0,53	0,52
Arsen (As)		1,73	1,44	1,97	1,82	1,47	1,56	1,61	1,76
Barium (Ba)		46,7^{T1)}	35,0	34,3	36,8	33,7	34,0	34,4	37,9
Blei (Pb)		0,98^{T1)}	< 0,1	0,17^{T1)}	< 0,1	0,11	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Bor (B)		175	367^{T1)}	133	99,0	87,9	85,3	144	75,0
Cadmium (Cd)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Chrom (Cr)		15,8	11,8	15,0	9,33	8,63	9,13	7,62	7,44
Kobalt (Co)		2,18	1,79	1,96	1,38	1,23	1,20	1,11	1,13
Kupfer (Cu)		41,9	32,0	36,4	37,2	30,2	28,9	25,9	30,5
Molybdän (Mo)		19,6	14,4	17,7	16,8	13,2	13,0	12,3	13,8
Nickel (Ni)^{T2)}		10,6	8,05	9,09	11,5	8,36	8,23	7,80	10,8
Quecksilber (Hg)		< 0,01	< 0,01	0,012	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Selen (Se)		1,14	< 1	1,18	< 1	< 1	< 1	1,30	1,38
Thallium (Tl)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Vanadium (V)		12,5	11,9	13,9	12,7	12,2	13,1	11,9	12,5
Zink (Zn)		4,46	2,56	2,35	13,8^{T1)}	2,40	4,68	1,96	1,98

T1) :Ausreißer Typ 1
T2) :Ausreißer Typ 2

Tab. A44: Ergebnisse der 8-fach Bestimmung an RC-b ohne Sandzumischung, Analyse 2 . anorganische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	Probe							
		A	B	C	D	E	F	G	H
pH-Wert	-	11,9	11,9	11,9	11,9	11,6	11,7	11,8	11,8
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1774^{T1)}	1402	1517	1535	1498	1531	1522	1623
Redoxpotential	mV	164	200	267	218	237	297	191	185
Natrium (Na)	mg/l	71,1	56,8	65,2	55,9	47,5	49,7	47,9	53,6
Kalium (K)		80,6	72,8	74,9	72,7	60,4	63,9	61,8	70,4
Calcium (Ca)		64,6	68,6	82,9	88,9	83,6	88,1	65,7	85,4
Chlorid (Cl ⁻)		32,5	23,3	27,5	23,5	20,4	20,8	19,9	21,5
Nitrat (NO ₃ ⁻)		17,2^{T1)}	12,5	14,4	11,7	10,8	11,6	9,9	11,0
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		75,1	70,7	70,3	57,1	55,1	56,2	60,1	56,4
Antimon (Sb)		1,75	1,67	1,86	1,89	0,70	0,63	- ¹⁾	- ¹⁾
Arsen (As)	1,67	1,47	1,61	1,46	2,40	2,20	- ¹⁾	- ¹⁾	
Barium (Ba)	44,1	39,8	38,9	39,9	36,0	35,0	- ¹⁾	- ¹⁾	
Blei (Pb)	0,24	0,11	0,12	0,13	0,17	0,09	- ¹⁾	- ¹⁾	
Bor (B)	133	310^{T1)}	94	81	105	90	- ¹⁾	- ¹⁾	
Cadmium (Cd)	0,021	0,027	0,013	0,012	< 0,07	< 0,07	- ¹⁾	- ¹⁾	
Chrom (Cr)	19,1	14,0	15,8	9,4	10,7	10,6	- ¹⁾	- ¹⁾	
Kobalt (Co)	2,48	2,04	2,14	1,43	1,57	1,55	- ¹⁾	- ¹⁾	
Kupfer (Cu)	46,0^{T1)}	35,3	37,3	36,4	36,1	34,8	- ¹⁾	- ¹⁾	
Molybdän (Mo)	25,3	20,0	23,1	21,1	11,5	11,1	- ¹⁾	- ¹⁾	
Nickel (Ni)	12,4	9,4	9,7	11,7	10,7	10,2	- ¹⁾	- ¹⁾	
Quecksilber (Hg)	0,12^{T1)}	0,07	0,07	0,058	< 0,08	< 0,08	- ¹⁾	- ¹⁾	
Selen (Se)	1,04	0,93	0,89	0,86	2,90	2,70	- ¹⁾	- ¹⁾	
Thallium (Tl)	0,074	0,067	0,070	0,072	< 0,02	< 0,02	- ¹⁾	- ¹⁾	
Vanadium (V)	14,5	13,5	14,3	12,7	14,3	14,6	- ¹⁾	- ¹⁾	
Zink (Zn)^{T3)}	11,4	39,5	6,15	1,70	57,0	46,9	- ¹⁾	- ¹⁾	

1): Fehler beim Probenversand, daher wurden nur 6 Eluate analysiert.

T1) :Ausreißer Typ 1

T3) :Ausreißer Typ 3

Tab. A45: Kontrolluntersuchung an sechs Eluaten der 8-fach Bestimmung an RC-b ohne Sandzumischung, Analyse 3* .
 8 [1* 8] 6che Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	Probe					
		A	B	C	D	E	F
Antimon (Sb)	µg/l	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Arsen (As)		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Barium (Ba)		35	31	30	32	29	29
Blei (Pb)		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Bor (B)		130	300^{T1)}	110	94	81	72
Cadmium (Cd)		< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Chrom (Cr)		16	11	15	8,7	9,3	9,7
Kobalt (Co)		2,3	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Kupfer (Cu)		46	35	41	57	31	31
Molybdän (Mo)		19	15	15	14	12	12
Nickel (Ni)		12	9,5	11	12	9,8	10
Quecksilber (Hg)		< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,2	< 0,2
Selen (Se)		< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
Thallium (Tl)		< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8	< 0,8
Vanadium (V)		12	12	13	11	11	13
Zink (Zn)		< 10	< 10	< 10	20	< 10	18

T1) :Ausreißer Typ 1

*: Kontrollanalyse nur an 6 Eluaten durchgeführt

Tab. A46: Ergebnisse der 8-fach Bestimmung an RC-b ohne Sandzumischung, Analyse 1 – PAK

PAK	Einheit	Probe							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Naphthalin	µg/l	0,020	0,658	1,720^{T1)}	0,960	0,495	0,535	0,718	0,640
Acenaphthylen		< 0,01	0,013	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Acenaphthen		0,029^{T1)}	0,117	0,108	0,113	0,081^{T1)}	0,100	0,109	0,105
Fluoren		0,045^{T1)}	0,113	0,101	0,102	0,084	0,096	0,106	0,099
Phenanthren		0,164	0,251	0,213	0,197	0,192	0,208	0,238	0,237
Anthracen		0,051	0,070^{T1)}	0,049	0,059	0,054	0,057	0,057	0,057
Fluoranthen		0,064	0,087	0,080	0,066	0,074	0,074	0,092	0,090
Pyren		0,038	0,046	0,043	0,031	0,038	0,039	0,051	0,048
Benzo(a)anthracen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Chrysen		< 0,01	< 0,01	0,012	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,016	0,015
Benzo(b)fluoranthen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(k)fluoranthen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(a)pyren		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Dibenz(ah)anthracen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(ghi)perylene		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Indeno(1,2,3-cd)pyren		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Quantifizierbare PAK ₁₅	µg/l	0,391	0,696	0,605	0,568	0,524	0,574	0,670	0,652
Quantifizierbare PAK ₁₆		0,412	1,354	2,325	1,528	1,019	1,109	1,388	1,292

T1) :Ausreißer Typ 1

Tab. A47: Ergebnisse der 8-fach Bestimmung an RC-b ohne Sandzumischung, Analyse 2 – PAK

PAK	Einheit	Probe							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Naphthalin	µg/l	0,798	0,052	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,417	0,353
Acenaphthylen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Acenaphthen^{T2)}		0,110	0,104	0,028	0,032	0,089	0,079	0,106	0,130
Fluoren		0,110	0,108	0,049	0,066	0,135	0,096	0,118	0,147
Phenanthren		0,269	0,303	0,191	0,276	0,488^{T1)}	0,297	0,277	0,344
Anthracen		0,048	0,049	< 0,02	0,039	0,075	0,050	0,050	0,073
Fluoranthren		0,103	0,107	0,073	0,101	0,160	0,112	0,111	0,131
Pyren		0,054	0,055	0,036	0,050	0,079	0,058	0,053	0,064
Benzo(a)anthracen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Chrysen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,026	0,039	0,027	< 0,02	< 0,02
Benzo(b)fluoranthren		< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Benzo(k)fluoranthren		n. b.	n. b.	n. b.	n. b.				
Benzo(a)pyren		< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Dibenz(ah)anthracen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Benzo(ghi)perylene		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Indeno(1,2,3-cd)pyren		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Quantifizierbare PAK ₁₅	µg/l	0,694	0,725	0,377	0,589	1,07	0,719	0,715	0,889
Quantifizierbare PAK ₁₆		1,49	0,777	0,377	0,589	1,07	0,719	1,13	1,24

T1) :Ausreißer Typ 1

T2) Ausreißer Typ 2

Tab. A48: Kontrolluntersuchung der 8-fach Bestimmung an RC-b ohne Sandzumischung, Analyse 3 – PAK

PAK	Einheit	Probe							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Naphthalin ^{T3)}	µg/l	2,7	0,79	3,5	1,2	0,19	0,18	0,96	0,77
Acenaphthylen		0,03	0,02	0,02	0,02	< 0,02	< 0,02	0,02	0,02
Acenaphthen		0,14	0,11	0,19	0,15	0,03	0,03	0,12	0,1
Fluoren		0,15	0,12	0,16	0,13	0,03	0,03	0,13	0,1
Phenanthren		0,32	0,27	0,37	0,31	0,06	0,06	0,27	0,25
Anthracen		0,05	0,04	0,09	0,07	< 0,02	< 0,02	0,09	0,08
Fluoranthen		0,11	0,09	0,13	0,12	0,02	0,02	0,13	0,11
Pyren		0,06	0,05	0,08	0,06	< 0,02	< 0,02	0,07	0,06
Benzo(a)anthracen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,01	0,01
Chrysen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,01	0,02
Benzo(b)fluoranthen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01
Benzo(k)fluoranthen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01
Benzo(a)pyren		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01
Dibenz(ah)anthracen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01
Benzo(ghi)perylene		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01
Indeno(1,2,3-cd)pyren		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01
Quantifizierbare PAK ₁₅	µg/l	0,860	0,700	1,04	0,860	0,140	0,140	0,850	0,750
Quantifizierbare PAK₁₆ ^{T3)}		3,56	1,49	4,54	2,06	0,33	0,32	1,81	1,52

T3) :Ausreißer Typ 3

Tab. A49: Ergebnisse der 7-fach Bestimmung* an RC-b mit 50 % Sandzumischung, Analyse 1 – anorganische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	Probe						
		A	B	C	D	E	F	G
Antimon (Sb)	µg/l	0,61	0,56	0,58	0,52	0,55	0,58	0,59
Arsen (As)		2,34	2,10	2,11	2,23	2,15	2,11	2,18
Barium (Ba)		29,2	29,7	30,3	28,6	32,3^{T1)}	28,7	29,7
Blei (Pb)		0,15	< 0,1	0,16	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Bor (B)^{T3)}		176	155	124	80,4	84,6	34,9	329
Cadmium (Cd)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Chrom (Cr)		13,8	13,9	7,91	9,45	8,49	8,03	10,2
Kobalt (Co)		2,04	2,12	1,31	1,21	1,24	1,28	1,49
Kupfer (Cu)		32,7	34,0	31,6	27,2	29,0	31,8	32,0
Molybdän (Mo)		15,2	16,7	14,6	12,3	13,3	13,1	13,9
Nickel (Ni)		7,69	7,56	9,13	7,28	8,79	10,0	8,94
Quecksilber (Hg)		0,056	0,034	0,012	0,020	0,022	0,084	0,068
Selen (Se)		1,21	1,22	1,16	1,01	1,55	1,13	1,47
Thallium (Tl)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Vanadium (V)		15,5	14,8	15,4	16,1	16,0	15,5	18,0^{T1)}
Zink (Zn)		3,05	2,46	3,61	3,43	6,79^{T1)}	2,19	2,80

*: Ein Eluat ist aufgrund von Undichtigkeiten der Säule entfallen

T1) :Ausreißer Typ 1

T3) :Ausreißer Typ 3

Tab. A50: Ergebnisse der 7-fach Bestimmung* an RC-b mit 50 % Sandzumischung, Analyse 2 – anorganische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	Probe						
		A	B	C	D	E	F	G
pH-Wert	-	11,8	11,8	11,6	11,6	11,8	11,8	11,8
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1519	1556	1588	1390^{T1)}	1528	1522	1502
Redoxpotential	mV	196	188	184	195	205	198	189
Natrium (Na)	mg/l	55,9	58,2	51,9	48,5	52,9	53,5	54,2
Kalium (K)		77,4	80,9	65,5	67,1	75,1	76,0	74,4
Calcium (Ca)		86,1	85,7	79,6	82,5	89,0	84,8	76,9
Chlorid (Cl ⁻)		21,4	22,6	18,2	18,1	19,3	19,6	19,2
Nitrat (NO ₃ ⁻)		11,2	11,5	8,9	9,9	9,5	10,0	10,4
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		94,4	93,7	72,0	74,3	83,9	75,2	84,2
Antimon (Sb)		1,92	1,82	0,71	0,62	0,66	0,67	0,70
Arsen (As)	2,09	1,95	2,90	3,10	3,10	3,30	3,30	
Barium (Ba)	33,1	34,3	29,1	27,3	32,5	31,4	31,3	
Blei (Pb)	0,17	0,13	0,14	0,07	0,09	0,07	0,08	
Bor (B)	118	101	146	92	87	77	220^{T1)}	
Cadmium (Cd)	0,014	0,056	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07	
Chrom (Cr)	15,7	16,2	9,10	10,7	9,94	9,23	11,6	
Kobalt (Co)	2,19	2,34	1,52	1,43	1,59	1,53	1,72	
Kupfer (Cu)	34,6	36,7	38,0	31,7	35,6	36,8	37,0	
Molybdän (Mo)^{T3)}	22,0	24,3	12,6	10,8	14,1	13,3	12,8	
Nickel (Ni)	8,24	8,61	11,1	8,90	11,2	11,7	10,7	
Quecksilber (Hg)	0,140	0,100	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,08	< 0,08	
Selen (Se)	1,03	1,01	3,30	3,20	3,90	3,80	3,10	
Thallium (Tl)	0,070	0,073	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	
Vanadium (V)	16,9	16,4	16,9	17,4	17,5	17,7	19,8^{T1)}	
Zink (Zn)	2,44	1,80	3,60	2,90	54,10^{T1)}	1,70	13,2^{T1)}	

T1) :Ausreißer Typ 1

T3) :Ausreißer Typ 3

*: Ein Eluat ist aufgrund von Undichtigkeiten der Säule entfallen.

Tab. A51: Kontrolluntersuchung an zwei Eluaten der 7-fach Bestimmung* an RC-b mit 50 % Sandzumischung, Analyse 3 –
 æ [organische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	Probe	
		A	B
Antimon (Sb)	µg/l	< 5	< 5
Arsen (As)		< 5	< 5
Barium (Ba)		26	26
Blei (Pb)		< 5	< 5
Bor (B)		120	110
Cadmium (Cd)		< 0,25	< 0,25
Chrom (Cr)		15	15
Kobalt (Co)		< 2	2,2
Kupfer (Cu)		36	39
Molybdän (Mo)		14	16
Nickel (Ni)		8,8	9,6
Quecksilber (Hg)		< 0,05	< 0,05
Selen (Se)		< 5	< 5
Thallium (Tl)		< 0,8	< 0,8
Vanadium (V)		14	14
Zink (Zn)		< 10	< 10

Tab. A52: Ergebnisse der 7-fach Bestimmung* an RC-b mit 50 % Sandzumischung, Analyse 1 – PAK

PAK	Einheit	Probe						
		A	B	C	D	E	F	G
Naphthalin	µg/l	0,577	0,519	0,236	0,235	0,498	0,531	0,446
Acenaphthylen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,010	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Acenaphthen		0,100	0,092	0,052	0,072	< 0,01	0,103	0,189
Fluoren		0,107	0,101	0,062^{T1)}	0,091	0,093	0,099	0,086
Phenanthren		0,065^{T1)}	0,233	0,153^{T1)}	0,255	0,206	0,224	0,234
Anthracen		0,011	0,066	0,035	0,072	0,058	0,062	0,060
Fluoranthen		0,100	0,080	0,055	0,108	0,084	0,093	0,114
Pyren		0,055	0,048	0,029	0,050	0,042	0,050	0,062
Benzo(a)anthracen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,013	< 0,01	< 0,01	0,017
Chrysen		0,017	0,012	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,016	0,014
Benzo(b)fluoranthen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(k)fluoranthen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(a)pyren		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Dibenz(ah)anthracen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(ghi)perylene		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Indeno(1,2,3-cd)pyren		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Quantifizierbare PAK ₁₅		µg/l	0,455	0,633	0,386	0,671	0,482	0,646
Quantifizierbare PAK ₁₆	1,032		1,152	0,622	0,906	0,980	1,177	1,221

T1) :Ausreißer Typ 1

*: Ein Eluat ist aufgrund von Undichtigkeiten der Säule entfallen.

Tab. A53: Ergebnisse der 7-fach Bestimmung* an RC-b mit 50 % Sandzumischung, Analyse 2 – PAK

PAK	Einheit	Probe						
		A	B	C	D	E	F	G
Naphthalin	µg/l	0,266	0,196	< 0,02	< 0,02	0,259	0,029	0,272
Acenaphthylen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Acenaphthen		0,084	0,091	< 0,02	0,028	0,125	0,103	0,080
Fluoren		0,087	0,095	0,048	0,086	0,150	0,130	0,079
Phenanthren		0,263	0,288	0,284	0,441	0,350	0,322	0,215
Anthracen		0,044	0,052	0,045	0,060	0,069	0,056	< 0,02
Fluoranthren		0,091	0,100	0,120	0,153	0,136	0,130	0,086
Pyren		0,046	0,051	0,056	0,072	0,070	0,064	0,051
Benzo(a)anthracen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Chrysen		0,019	< 0,02	0,038	0,064	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Benzo(b)fluoranthren		< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Benzo(k)fluoranthren		n. b.						
Benzo(a)pyren		< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Dibenz(ah)anthracen		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Benzo(ghi)perylene		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Indeno(1,2,3-cd)pyren		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Quantifizierbare PAK ₁₅	µg/l	0,634	0,677	0,592	0,902	0,900	0,805	0,511
Quantifizierbare PAK ₁₆		0,900	0,873	0,592	0,902	1,16	0,834	0,782

*: Ein Eluat ist aufgrund von Undichtigkeiten der Säule entfallen.

Tab. A54: Kontrolluntersuchung an zwei Eluaten der der 8-fach Bestimmung an RC-b mit 50 % Sandzumischung, Analyse 3 – PAK

PAK	Einheit	Probe	
		A	B
Naphthalin	µg/l	0,83	0,51
Acenaphthylen		0,02	< 0,02
Acenaphthen		0,13	0,09
Fluoren^{T2)}		0,13	0,09
Phenanthren		0,32	0,23
Anthracen		0,08	0,06
Fluoranthren		0,12	0,09
Pyren		0,06	0,05
Benzo(a)anthracen		< 0,02	< 0,02
Chrysen		< 0,02	< 0,02
Benzo(b)fluoranthren		< 0,02	< 0,02
Benzo(k)fluoranthren		< 0,02	< 0,02
Benzo(a)pyren		< 0,02	< 0,02
Dibenz(ah)anthracen		< 0,02	< 0,02
Benzo(ghi)perylene		< 0,02	< 0,02
Indeno(1,2,3-cd)pyren		< 0,02	< 0,02
Quantifizierbare PAK ₁₅	µg/l	0,860	0,610
Quantifizierbare PAK ₁₆		1,69	1,12

T2): Ausreißer Typ 2

Tab. A55: Mittelwerte und Standardabweichungen der 8-fach Bestimmung innerhalb der Labore . RC-a mit und ohne
 Uä ä: ~ { ächung

Parameter / Stoff	Einheit	RC-a ohne Sandzumischung						RC-a mit 50 % Sandzumischung					
		Analyse 1			Analyse 2			Analyse 1			Analyse 2		
		MW	σ	n	MW	σ	n	MW	σ	n	MW	σ	n
pH-Wert	-	11,5	0,07	8	12,4	0,05	8	11,4	0,03	8	12,1	0,43	8
el. Leitfähigkeit	$\mu\text{S/cm}$	1663	178	8	1746	115	8	1816	120	8	1666	155	8
Redoxpotential	mV	195	16	8	175	14	8	179	4	8	199	9	8
Natrium (Na)	mg/l	47,6	4,3	8	49,2	4,7	8	42,1	1,4	8	44,1	1,5	8
Kalium (K)		91,8	10,5	8	96,3	10,9	8	97,8	2,1	8	105,9	2,4	8
Calcium (Ca)		92,3	14,1	8	79,8	14,0	8	91,6	10,4	8	76,6	17,3	8
Chlorid (Cl)		20,9	1,5	8	13,0	1,1	8	18,4	0,7	8	11,7	0,6	8
Nitrat (NO ₃ ⁻)		13,5	1,2	8	15,2	1,4	8	11,8	0,5	8	14,7	3,5	8
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		22,3	1,5	8	29,6	4,9	8	23,6	1,1	8	31,3	2,2	8
Antimon (Sb)		0,96	0,05	8	1,12	0,06	8	1,00	0,07	8	1,18	0,09	8
Arsen (As)	2,34	0,13	8	2,40	0,14	8	2,78	0,29	8	2,81	0,32	8	
Barium (Ba)	46,6	6,9	8	47,7	7,1	8	43,9	4,2	8	46,3	4,9	8	
Blei (Pb)	0,14	0,06	6	0,18	0,09	8	0,16	0,07	7	0,15	0,03	8	
Bor (B)	10,3	1,4	8	8,2	0,7	8	10,3	0,9	8	9,2	0,2	8	
Cadmium (Cd)	< 0,1	-	0	0,028	0,003	8	< 0,1	-	0	0,026	0,002	8	
Chrom (Cr)	24,8	3,97	8	30,5	4,98	8	24,5	1,37	8	30,6	1,31	8	
Kobalt (Co)	3,59	0,32	8	5,15	0,52	8	3,46	0,16	8	5,06	0,18	8	
Kupfer (Cu)	101	17,2	8	120	14,0	8	83,5	4,4	8	104	4,4	8	
Molybdän (Mo)	6,41	1,04	8	6,59	1,10	8	6,51	0,36	8	6,80	0,41	8	
Nickel (Ni)	21,7	2,48	8	31,4	3,70	8	18,1	1,04	8	28,0	1,11	8	
Quecksilber (Hg)	0,016	0,003	7	0,021	0,002	5	0,025	0,004	8	0,026	0,007	8	
Selen (Se)	1,42	0,15	8	1,44	0,22	8	1,77	0,06	8	1,75	0,17	8	
Thallium (Tl)	< 0,1	-	0	0,022	0,001	6	< 0,1	-	0	0,028	0,002	8	
Vanadium (V)	5,34	0,41	8	6,64	0,58	8	7,55	0,23	8	9,53	0,22	8	
Zink (Zn)	29,0	33,9	8	7,93	7,34	8	5,86	5,17	8	14,1	18,2	8	

MW: Mittelwert
 σ : Standardabweichung
 n: Anzahl der Messwerte über der Bestimmungsgrenze

Tab. A56: Mittelwerte und Standardabweichungen der 8-fach Bestimmung innerhalb der Labore . RC-b ohne Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	Analyse 1			Analyse 2			Analyse 3		
		MW	σ	n	MW	σ	n	MW	σ	n
pH-Wert	-	-	-	-	11,8	0,11	8	-	-	-
el. Leitfähigkeit	$\mu\text{S/cm}$	-	-	-	1550	109	8	-	-	-
Redoxpotential	mV	-	-	-	220	45	8	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	-	-	-	56,0	8,4	8	-	-	-
Kalium (K)		-	-	-	69,7	7,0	8	-	-	-
Calcium (Ca)		-	-	-	78,5	10,3	8	-	-	-
Chlorid (Cl ⁻)		-	-	-	23,7	4,3	8	-	-	-
Nitrat (NO ₃)		-	-	-	12,4	2,4	8	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		-	-	-	62,6	8,0	8	-	-	-
Antimon (Sb)		0,65	0,35	8	1,42	0,59	6 ¹⁾	< 5	-	0 ²⁾
Arsen (As)		1,67	0,18	8	1,80	0,40	6 ¹⁾	< 5	-	0 ²⁾
Barium (Ba)	36,6	4,3	8	38,9	3,2	6 ¹⁾	31,0	2,28	6 ²⁾	
Blei (Pb)	0,22	0,31	3	0,14	0,05	6 ¹⁾	< 5	-	0 ²⁾	
Bor (B)	146	95,8	8	136	87,3	6 ¹⁾	131	85,3	6 ²⁾	
Cadmium (Cd)	< 0,1	-	0	0,036	0,027	4 ¹⁾	< 0,25	-	0 ²⁾	
Chrom (Cr)	10,6	3,25	8	13,3	3,73	6 ¹⁾	11,6	3,12	6 ²⁾	
Kobalt (Co)	1,50	0,42	8	1,87	0,41	6 ¹⁾	2,05	0,12	1 ²⁾	
Kupfer (Cu)	32,9	5,2	8	37,7	4,2	6 ¹⁾	40,2	10,1	6 ²⁾	
Molybdän (Mo)	15,1	2,59	8	18,7	6,00	6 ¹⁾	14,5	2,59	6 ²⁾	
Nickel (Ni)	9,31	1,46	8	10,7	1,17	6 ¹⁾	10,7	1,11	6 ²⁾	
Quecksilber (Hg)	0,010	-	1	0,080	0,021	4 ¹⁾	< 0,05	-	0 ²⁾	
Selen (Se)	1,13	0,15	4	1,55	0,97	6 ¹⁾	< 5	-	0 ²⁾	
Thallium (Tl)	< 0,1	-	0	0,054	0,026	4 ¹⁾	< 0,8	-	0 ²⁾	
Vanadium (V)	12,6	0,65	8	14,0	0,74	6 ¹⁾	12,0	0,89	6 ²⁾	
Zink (Zn)	4,28	4,00	8	27,1	23,5	6 ¹⁾	13,0	4,69	2	
Quantifizierbare PAK ₁₅	$\mu\text{g/l}$	0,585	0,0971	8	0,722	0,201	8	0,668	0,340	8
Quantifizierbare PAK ₁₆		1,30	0,5369	8	0,924	0,371	8	1,95	1,46	8

MW: Mittelwert

 σ : Standardabweichung

n: Anzahl der Messwerte über der Bestimmungsgrenze

-: nicht bestimmt

1): Fehler beim Probenversand, daher wurden nur sechs Eluate für Spurenelemente analysiert.

2): Kontrollanalyse für Spurenelemente nur an sechs Eluaten durchgeführt

Tab. A57: Mittelwerte und Standardabweichungen der 7-fach Bestimmung¹⁾ innerhalb den Laboren . An RC-b mit 50 %
 Üa: { ächung

Parameter / Stoff	Einheit	Analyse 1			Analyse 2			Analyse 3 ²⁾		
		MW	σ	n	MW	σ	n	MW	σ	n
pH-Wert	-	-	-	-	11,7	0,10	7	-	-	-
el. Leitfähigkeit	$\mu\text{S/cm}$	-	-	-	1515	62	7	-	-	-
Redoxpotential	mV	-	-	-	194	7	7	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	-	-	-	53,6	3,1	7	-	-	-
Kalium (K)		-	-	-	73,8	5,5	7	-	-	-
Calcium (Ca)		-	-	-	83,5	4,1	7	-	-	-
Chlorid (Cl)		-	-	-	19,8	1,7	7	-	-	-
Nitrat (NO ₃)		-	-	-	10,2	0,9	7	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		-	-	-	82,5	9,2	7	-	-	-
Antimon (Sb)		0,57	0,03	7	1,01	0,59	7	< 5	-	0
Arsen (As)	2,17	0,09	7	2,82	0,56	7	< 5	-	0	
Barium (Ba)	29,8	1,2	7	31,3	2,4	7	26	0	2	
Blei (Pb)	0,12	0,03	2	0,11	0,04	7	< 5	-	0	
Bor (B)	141	95,9	7	120	49,6	7	115	7,07	2	
Cadmium (Cd)	< 0,1	-	0	0,060	0,021	2	< 0,25	-	0	
Chrom (Cr)	10,3	2,59	7	11,8	2,98	7	15	0	2	
Kobalt (Co)	1,53	0,39	7	1,76	0,36	7	2,1	0,14	1	
Kupfer (Cu)	31,2	2,3	7	35,8	2,1	7	37,5	2,12	2	
Molybdän (Mo)	14,1	1,46	7	15,7	5,23	7	15	1,41	2	
Nickel (Ni)	8,49	1,01	7	10,1	1,43	7	9,2	0,57	2	
Quecksilber (Hg)	0,042	0,027	7	0,091	0,023	2	< 0,05	-	0	
Selen (Se)	1,25	0,19	7	2,76	1,23	7	< 5	-	0	
Thallium (Tl)	< 0,1	-	0	0,035	0,025	2	< 0,8	-	0	
Vanadium (V)	15,9	1,01	7	17,5	1,10	7	14	0	2	
Zink (Zn)	3,48	1,55	7	11,4	19,26	7	< 10	-	0	
Quantifizierbare PAK ₁₅	µg/l	0,578	0,139	7	0,717	0,154	7	0,735	0,177	2
Quantifizierbare PAK ₁₆		1,01	0,206	7	0,863	0,169	7	1,41	0,403	2

MW: Mittelwert

σ : Standardabweichung

n: Anzahl der Messwerte über der Bestimmungsgrenze

-: nicht bestimmt

1): Ein Eluat ist aufgrund von Undichtigkeiten der Säule entfallen

2): Kontrollanalyse nur an zwei Eluaten durchgeführt

Tab. A58: Laborvergleichstest – Gegenüberstellung der Analyseverfahren

Parameter	Labor					RWTH
	I	II	III	IV	V	
pH-Wert	Elektrode	Elektrode	Elektrode	Elektrode	Elektrode	Elektrode
Leitfähigkeit						
Redoxpotential	-	-	-	-		
Natrium	ICP-MS	ICP-OES	ICP-MS	ICP-OES	ICP-OES	F-AES
Kalium						
Calcium						
Chlorid	IC	IC	IC	IC	IC	IC
Nitrat						
Sulfat						
Antimon	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
Arsen						
Barium						
Blei						
Cadmium						
Chrom						
Kobalt						
Kupfer						
Molybdän						
Nickel						
Selen						
Thallium						
Vanadium						
Zink						
Bor	ICP-OES					
Quecksilber	AAS	AAS	AAS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
PAKs	GC-MS	GC-MS	GC-MS	GC-MS	HPLC (DAD)	GC-MS

-: nicht bestimmt

ICP-OES: Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (inductively coupled plasma optical emission spectrometry)

ICP-MS: Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma. (inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)

F-AES: Flammenphotometrie

IC: Ionenchromatographie..

AAS: Atomabsorptionsspektrometrie

GC-MS: Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung

HPLC (DAD): Hochdruckflüssigchromatographie mit Diodenarraydetektor

Tab. A59: Laborvergleichstest – Material RC-a ohne Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	Labor I		Labor II		Labor III		Labor IV		Labor V ¹⁾		8-fach Bestimmung ²⁾ MW
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
pH-Wert	-	11,9	11,9	11,6	11,5	11,7	11,7	11,8	11,8	11,2	11,4	12,4
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1980	1970	1160	938	1600	1610	2030	2080	644	1010	1712
Redoxpotential	mV	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	257	249	175
Natrium (Na)	mg/l	50	53	56,0^{T3)}	32,0^{T3)}	42,7	41,7	47,9	52,7	30,0	41,9	47,6
Kalium (K)		81	99	100	61,0	81,6	80,1	105	113	53,7	101	96,3
Calcium (Ca)		77	65	4,3^{T2)}	19,0^{T2)}	82	79,5	95,7	88,1	31,8	46,8	79,8
Chlorid (Cl ⁻)		13	11	11,0	7,4	8	8	9,53	11	< 10	< 10	13,0
Nitrat (NO ₃ ⁻)		16,0	14,0	15,0	10,0	8	8	11	12,2	8,0	9,1	15,2
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		25	31	20,0	14,0	21	21	38,7	24,9	< 20	34,7	29,6
Antimon (Sb)		< 5	< 5	1	< 1	< 1	< 1	0,91	1,08	0,7	0,8	0,958
Arsen (As)	< 5	< 5	4	2	3	3	2,81	3,18	1,3	1,4	2,34	
Barium (Ba)	36,0	30,0	6^{T2)}	9^{T2)}	38,9	38,9	42	42	12,2	16,9	44,4	
Blei (Pb)	21,0^{T3)}	< 5^{T3)}	< 1	< 1	12^{T2)}	12^{T2)}	1,85	1,72	0,2	1,0	0,121	
Bor (B)	22	20	20	10	< 20	< 20	11	11	17,9	11,6	10,3	
Cadmium (Cd)	< 0,25	< 0,25	< 0,2	< 0,2	< 1	< 1	0,026	0,027	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Chrom (Cr)	26,0	30,0	23	14	20	20	23,9	27,6	11,1	16,8	24,8	
Kobalt (Co)	5,4	5,6	6	4	4,3	4,4	5,93	6,63	2,6	2,9	3,49	
Kupfer (Cu)	µg/l	120	110	14	70	89	88	114	130	54,2	63,2	95,5
Molybdän (Mo)		7,0	7,3	8	5	4	4	4,69	5,48	n. b.	n. b.	6,42
Nickel (Ni)		26,0	26,0	35	22	22	22	26,1	30,2	13,7	16,5	20,9
Quecksilber (Hg) ³⁾		< 0,05	< 0,05	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,100	0,097	0,3	0,2	0,0163
Selen (Se)		< 5	< 5	2	1	2	2	1,44	1,62	1,0	1,7	1,43
Thallium (Tl)		< 0,8	< 0,8	< 0,5	< 0,5	< 0,2	< 0,2	0,066	0,063	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Vanadium (V)		6,7	8,6	9	7	8	8	7,92	8,11	4,6	4,9	5,34
Zink (Zn)		16,0	< 10	< 5	< 5	3	3	9,9	20,9	0,6	1,2	5,00

1) Die Ergebnisse von Labor V wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt, da das Volumen der Säule falsch kalibriert wurde und deshalb die Versuche nicht korrekt durchgeführt wurden. Daher betrug die Kontaktzeit anstatt 5 h nur ca. 3 h

2) Mittelwert der 8-fach Bestimmung, Analyse an der RWTH, Ausreißer Typ 1 bereinigt.

3) Quecksilber wurde bei Laboren I, II und III mit AAS und bei den Laboren IV, V sowie bei der RWTH mit ICP-MS bestimmt.

a, b: Einzelmessungen

n. b.: nicht bestimmt

grau hinterlegte Werte: falsch durchgeführte Versuche, wurden bei statistischer Auswertung nicht berücksichtigt

T2): Ausreißer Typ 2

T3): Ausreißer Typ 3

Tab. A60: Laborvergleichstest – Material RC-a mit 50 % Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	Labor I		Labor II		Labor III ¹⁾		Labor IV		Labor V ²⁾		8-fach Bestimmung ³⁾
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	MW
pH-Wert	-	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,6	11,7	11,7	10,2	10,5	12,1
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1270	1280	1060	1160	1310	1290	1696	1705	600	670	1666
Redoxpotential	mV	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	298	289	199
Natrium (Na)	mg/l	24^{T2)}	45^{T2)}	34,0	51,0	25,1	24,1	46,5	42,5	54,1	60,5	44,1
Kalium (K)		75	92	79,0	100	57,6	52,4	88,1	88,0	106	117	106
Calcium (Ca)		56	43	17,0	5,7	94,2	82,5	78,0	81,5	3,27	5,06	76,7
Chlorid (Cl ⁻)		6	9	6,1	8,0	5	5	8,81	8,9	< 10	10,8	11,7
Nitrat (NO ₃ ⁻)		9,2	13,0	8,9	12,0	5	5	10,1	10,6	11,4	13,0	13,5
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		21	27	18,0	21,0	20	21	28,2	31,9	35,0	31,2	30,7
Antimon (Sb)		< 5	< 5	< 1	< 1	< 1	< 1	0,965	0,927	1,2	1,1	0,976
Arsen (As)	< 5	< 5	2	3	2	2	3,34	3,44	2,5	2,6	2,78	
Barium (Ba)	22,0	18,0	9	7	43	24	33,7	38,8	4,6	4,5	43,9	
Blei (Pb)	< 5	< 5	< 1	< 1	< 1	< 1	1,72	1,96	0,1	0,2	0,136	
Bor (B)	18	17	10	10	< 20	< 20	15,7	14,1	23,8	17,5	10,3	
Cadmium (Cd)	< 0,25	< 0,25	< 0,2	< 0,2	< 1	< 1	0,021	0,009	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Chrom (Cr)	15,0	25,0	15	20	15	14	21,7	21,3	23,7	24,8	24,5	
Kobalt (Co)	2,3	5,1	4	5	3	3	6,50	6,06	5,1	5,7	3,46	
Kupfer (Cu)	µg/l	47,0	110	76	10	54	53	110	104	105	113	83,5
Molybdän (Mo)		3,8	6,4	5	7	3	3	4,77	5,19	n. b.	n. b.	6,51
Nickel (Ni)		11,0	24,0	23	30	14	13	26,9	24,4	32,2	28,9	18,1
Quecksilber (Hg) ⁴⁾		< 0,05	< 0,05	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,164	0,138	0,5	0,4	0,0249
Selen (Se)		< 5	< 5	1	2	2	1	1,56	1,85	1,9	1,6	1,77
Thallium (Tl)		< 0,8	< 0,8	< 0,5	< 0,5	< 0,2	< 0,2	0,047	0,046	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Vanadium (V)		5,9	8,2	9	10	9	9	12,0	11,1	8,0	7,7	7,55
Zink (Zn)		< 10	< 10	< 5	< 5	< 2	< 2	14,4	12,6	0,3	0,7	4,16

1) Die Ergebnisse von Labor III wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt, da die Eluate anstatt bei W/F = 2 bei W/F = 4 entnommen wurden.

2) Die Ergebnisse von Labor V wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt, da das Volumen der Säule falsch kalkuliert wurde und deshalb die Versuche nicht korrekt durchgeführt wurden. Daher betrug die Kontaktzeit anstatt 5 h nur ca. 2 h

3) Mittelwert der 8-fach Bestimmung, Analyse an der RWTH, Ausreißer Typ 1 bereinigt.

4) Quecksilber wurde bei Laboren I, II und III mit AAS und bei den Laboren IV, V sowie bei der RWTH mit ICP-MS bestimmt.

a, b: Einzelmessungen

n. b.: nicht bestimmt

grau hinterlegte Werte: falsch durchgeführte Versuche, wurden bei statistischer Auswertung nicht berücksichtigt

T2): Ausreißer Typ 2

Tab. A61: Laborvergleichstest – Material RC-b ohne Sandzumischung, anorganische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	Labor I		Labor II		Labor III		Labor IV		Labor V ¹⁾		8-fach Bestimmung ²⁾
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	MW
pH-Wert	-	11,9	11,9	10,5^{T2)}	10,5^{T2)}	11,5	11,5	11,6	11,6	11,5	11,5	11,8
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1490	1660	463^{T2)}	462^{T2)}	1390	1460	1526	1513	1020	1080	1518
Redoxpotential	mV	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	265	260	220
Natrium (Na)	mg/l	48	54	40	41	52	49,4	54,0	56,3	44,2	40,9	56,0
Kalium (K)		66	73	54^{T2)}	56^{T2)}	66,9	63,5	64,7	67,6	56,1	54,9	69,7
Calcium (Ca)		78	83	4,7^{T2)}	4,8^{T2)}	77,9	83,4	79,6	79,5	60,3	65,4	78,5
Chlorid (Cl ⁻)		18	19	15,0	15,0	17	17	21,2	22,8	15,3	13,7	23,7
Nitrat (NO ₃ ⁻)		8,8	10,0	8,7	8,7	8	8	10,5	11,9	7,87	6,41	11,7
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		51	56	52	52	69	64	79,4	92,6	64,1	57,0	62,6
Antimon (Sb)		< 5	< 5	< 1	< 1	< 1	< 1	0,730	0,654	3,1	2,0	0,523
Arsen (As)	< 5	< 5	2	2	3	3	3,10	2,63	1,2	0,9	1,67	
Barium (Ba)	32,0	31,0	3^{T2)}	3^{T2)}	25,4	25,1	27,4	28,9	23,1	27,5	35,2	
Blei (Pb)	< 5	< 5	< 1	< 1	175^{T2)}	86^{T2)}	1,79	1,75	1,3	0,3	0,102	
Bor (B)	54	82	9	9	170	90	95,5	104	118	264	114	
Cadmium (Cd)	< 0,25	< 0,25	< 0,2	< 0,2	< 1	< 1	0,023	0,021	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Chrom (Cr)	10,0	12,0	9	9	10	10	9,62	11,6	9,1	7,9	10,6	
Kobalt (Co)	2,0	2,2	2	2	2,6	2,5	2,68	3,32	1,8	1,1	1,50	
Kupfer (Cu)	38,0	43,0	35	34	42	43	53,2	57,1	31,6	20,6	32,9	
Molybdän (Mo)	13,0	14,0	12	12	12,3	11,6	15,1	18,5	11,3	7,8	15,1	
Nickel (Ni)	8,7	9,7	7^{T2)}	7^{T2)}	10	9	15,1^{T2)}	14,5^{T2)}	16,8	39,2	9,3	
Quecksilber (Hg) ³⁾	< 0,05	< 0,05	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,467^{T2)}	0,484^{T2)}	< 0,1	< 0,1	0,0103	
Selen (Se)	< 5	< 5	< 1	< 1	< 1	< 1	1,23	1,06	1,8	0,9	1,13	
Thallium (Tl)	< 0,8	< 0,8	< 0,5	< 0,5	< 0,2	< 0,2	0,086	0,085	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Vanadium (V)	12,0	11,0	15	15	17	17	16,0	17,8	14,4	11,8	12,6	
Zink (Zn)	< 10	< 10	< 5	< 5	2	< 2	34,3^{T2)}	12,3^{T2)}	1,1	2,2	2,91	

1) Die Ergebnisse von Labor V wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt, da das Volumen der Säule falsch kalibriert wurde und deshalb die Versuche nicht korrekt durchgeführt wurden. Daher betrug die Kontaktzeit anstatt 5 h nur ca. 3 h

2) Mittelwert der 8-fach Bestimmung, Analyse an der RWTH, Ausreißer Typ 1 bereinigt.

3) Quecksilber wurde bei Laboren I, II und III mit AAS und bei den Laboren IV, V sowie bei der RWTH mit ICP-MS bestimmt.

a, b: Einzelmessungen

n. b.: nicht bestimmt

grau hinterlegte Werte: falsch durchgeführte Versuche, wurden bei statistischer Auswertung nicht berücksichtigt

T2): Ausreißer Typ 2

Tab. A62: Laborvergleichstest – Material RC-b ohne Sandzumischung, PAK

Parameter / Stoff	Labor I		Labor II		Labor III		Labor IV		Labor V ¹⁾		8-fach Bestimmung ²⁾
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	MW
	µg/l		µg/l		µg/l		µg/l		µg/l		µg/l
Naphthalin	0,29	0,37	0,13	0,11	1,1	1,3	0,52	0,61	0,88	0,50	0,575
Acenaphthylen	< 0,02	< 0,02	0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	0,01	< 0,01	0,0104
Acenaphthen	0,05	0,06	0,05	0,05	0,25^{T2)}	0,2^{T2)}	0,08	0,07	0,11	0,08	0,109
Fluoren	0,05	0,06	0,05	0,04	0,19	0,16	0,14	0,11	0,12	0,08	0,100
Phenanthren	0,11	0,15	0,12	0,13	0,34	0,29	0,23	0,21	0,27	0,22	0,213
Anthracen	0,03	0,04	0,05	0,05	0,067	0,065	0,04	0,04	0,07	0,05	0,0549
Fluoranthren	0,04	0,06	0,04	0,05	0,13	0,086	0,09	0,08	0,08	0,06	0,0784
Pyren	0,02	0,04	0,03	0,03	0,075	< 0,050	0,05	0,04	0,05	0,04	0,0418
Benzo(a)anthracen	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Chrysen	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	0,012
Benzo(b)fluoranthren	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(k)fluoranthren	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(a)pyren	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Dibenz(ah)anthracen	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(ghi)perylene	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Indeno(1,2,3-cd)pyren	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Quantifizierbare PAK ₁₅	0,30	0,41	0,35	0,35	1,05	0,80	0,635	0,546	0,71	0,53	0,585
Quantifizierbare PAK ₁₆	0,59	0,78	0,48	0,46	2,15	2,10	1,15	1,15	1,59	1,03	1,30

1) Die Ergebnisse von Labor V wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt, da das Volumen der Säule falsch kalkuliert wurde und deshalb die Versuche nicht korrekt durchgeführt wurden. Daher betrug die Kontaktzeit anstatt 5 h nur ca. 3 h

2) Mittelwert der 8-fach Bestimmung, Analyse an der RWTH, Ausreißer Typ 1 bereinigt.

a, b: Einzelmessungen

grau hinterlegte Werte: falsch durchgeführte Versuche, wurden bei statistischer Auswertung nicht berücksichtigt

T2): Ausreißer Typ 2

Tab. A63: Laborvergleichstest – Material RC-b mit 50 % Sandzumischung, anorganische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	Labor I		Labor II		Labor III ¹⁾		Labor IV		Labor V ²⁾		7-fach Bestimmung ³⁾ MW
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
pH-Wert	-	11,9	11,9	9,9^{T2)}	9,9^{T2)}	11,4	11,5	11,5	11,6	11,1	11,2	11,7
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1370	1400	502^{T2)}	503^{T2)}	1030	1170	1326	1442	724	711	1536
Redoxpotential	mV	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	264	261	194
Natrium (Na)	mg/l	47	48	49	49	27,2	30,2	52,6	52,6	51,8	43,4	53,6
Kalium (K)		64	69	74	75	44,5	49,5	69,0	70,3	65,2	59,0	73,8
Calcium (Ca)		67	62	3,8^{T2)}	4,4^{T2)}	83,6	85,9	73,6	83,6	32,8	36,9	83,5
Chlorid (Cl ⁻)		16	18	18,0	17,0	9	10	16,2	19,7	14,3	13,8	19,8
Nitrat (NO ₃ ⁻)		8,2	8,7	9,4	9,4	4	5	8,9	10,5	7,27	7,14	10,2
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		63	66	75	76	78	62	115	108	85,0	75,4	82,5
Antimon (Sb)		< 5	< 5	< 1	< 1	< 1	< 1	0,76	0,75	1,6	1,3	0,570
Arsen (As)	< 5	< 5	3	3	2	2	2,93	3,31	1,4	1,2	2,17	
Barium (Ba)	23,0	23,0	3^{T2)}	3^{T2)}	19	23	24,0	29,3	14,5	19,0	29,4	
Blei (Pb)	< 5	< 5	< 1	< 1	71	99	1,82	1,91	1,0	2,1	0,116	
Bor (B)	44	54	16	16	70	100	140	304	138	123	141	
Cadmium (Cd)	< 0,25	< 0,25	< 0,2	< 0,2	< 1	< 1	0,01	0,04	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Chrom (Cr)	10,0	11,0	15^{T2)}	15^{T2)}	7	7	10,6	11,8	11,0	11,0	10,3	
Kobalt (Co)	2,0	2,2	2	2	2	2	3,30	3,37	2,3	1,9	1,53	
Kupfer (Cu)	µg/l	36,0	38,0	34	34	22	24	49,1	49,5	37,5	32,5	31,2
Molybdän (Mo)	13,0	13,0	16	16	7	7	15,6	16,3	14,3	10,8	14,2	
Nickel (Ni)	7,4	7,6	8	9	5	5	9,63	9,54	8,9	8,3	8,48	
Quecksilber (Hg) ⁴⁾	< 0,05	< 0,05	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,296^{T2)}	0,292^{T2)}	< 0,1	< 0,1	0,0423	
Selen (Se)	< 5	< 5	< 1	1	< 1	< 1	1,17	1,11	2,8	1,9	1,25	
Thallium (Tl)	< 0,8	< 0,8	< 0,5	< 0,5	< 0,2	< 0,2	0,08	0,08	< 0,1	< 0,1	< 0,1	
Vanadium (V)	15,0	16,0	23	23	19	21	24,6	21,9	20,5	17,7	15,6	
Zink (Zn)	< 10	< 10	< 5	< 5	< 2	< 2	8,15	14,7	1,6	4,3	2,92	

1) Die Ergebnisse von Labor III wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt, da die Eluate anstatt bei W/F = 2 bei W/F = 4 entnommen wurden

2) Die Ergebnisse von Labor V wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt, da das Volumen der Säule falsch kalkuliert wurde und deshalb die Versuche nicht korrekt durchgeführt wurden. Daher betrug die Kontaktzeit anstatt 5 h nur ca. 2 h

3) Mittelwert der 7-fach Bestimmung (Ein Eluat ist aufgrund von Undichtigkeiten der Säule entfallen), Analyse an der RWTH, Ausreißer Typ 1 bereinigt.

4) Quecksilber wurde bei Laboren I, II und III mit AAS und bei den Laboren IV, V sowie bei der RWTH mit ICP-MS bestimmt.

a, b: Einzelmessungen

n. b.: nicht bestimmt

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert

grau hinterlegte Werte: falsch durchgeführte Versuche, wurden bei statistischer Auswertung nicht berücksichtigt

T2): Ausreißer Typ 2

Tab. A64: Laborvergleichstest – Material RC-b mit 50 % Sandzumischung, PAK

Parameter / Stoff	Labor I		Labor II		Labor III ¹⁾		Labor IV ²⁾		Labor V ³⁾		7-fach Bestimmung ⁴⁾
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	MW
	µg/l		µg/l		µg/l		µg/l		µg/l		µg/l
Naphthalin	0,36	0,51	0,06^{T2)}	0,07^{T2)}	1,3	0,94	0,58	0,15	0,28	0,23	0,435
Acenaphthylen	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	0,0100
Acenaphthen	0,05	0,08	0,04	0,05	0,28	0,18	0,08	0,05	0,05	0,06	0,088
Fluoren	0,06	0,08	0,03	0,04	0,22	0,16	0,11	0,13	0,05	0,05	0,0962
Phenanthren	0,13	0,19	0,10	0,11	0,35	0,34	0,23	0,24	0,18	0,17	0,230
Anthracen	0,05	0,06	0,05	0,05	0,068	0,064	0,04	0,04	0,05	0,05	0,0520
Fluoranthren	0,07	0,07	0,04	0,05	0,1	0,13	0,09	0,12	0,06	0,06	0,0906
Pyren	0,03	0,04	0,03	0,03	0,053	0,08	0,04	0,08	0,04	0,04	0,0480
Benzo(a)anthracen	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	0,0114
Chrysen	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	0,0127
Benzo(b)fluoranthren	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(k)fluoranthren	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(a)pyren	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Dibenz(ah)anthracen	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Benzo(ghi)perylene	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Indeno(1,2,3-cd)pyren	< 0,02	< 0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,050	< 0,050	<0,05	<0,05	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Quantifizierbare PAK ₁₅	0,39	0,52	0,29	0,33	1,07	0,95	0,585	0,653	0,43	0,43	0,578
Quantifizierbare PAK ₁₆	0,75	1,03	0,35^{T2)}	0,40^{T2)}	2,37	1,89	1,164	0,807	0,71	0,66	1,01

1) Die Ergebnisse von Labor III wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt, da die Eluate anstatt bei W/F = 2 bei W/F = 4 entnommen wurden

2) PAKs wurden beim Labor IV mit HPLC-DAD bestimmt und bei anderen Laboren mit GC-MS bestimmt.

3) Die Ergebnisse von Labor V wurden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt, da das Volumen der Säule falsch kalkuliert wurde und deshalb die Versuche nicht korrekt durchgeführt wurden. Daher betrug die Kontaktzeit anstatt 5 h nur ca. 2 h

4) Mittelwert der 7-fach Bestimmung (Ein Eluat ist aufgrund von Undichtigkeiten der Säule entfallen.), Analyse an der RWTH, Ausreißer Typ 1 bereinigt.

a, b: Einzelmessungen

grau hinterlegte Werte: falsch durchgeführte Versuche, wurden bei statistischer Auswertung nicht berücksichtigt

T2): Ausreißer Typ 2

Tab. A65: Laborvergleichstest – Kontrollprüfung der Messungen an Eluaten von 100 % RC-b

Versuch	Parameter	Prüflabor I, Analyse bei		Prüflabor II, Analyse bei		Prüflabor IV, Analyse bei		Prüflabor V, Analyse bei	
		Lab. I	RWTH	Lab. II	RWTH	Lab. IV	RWTH	Lab. V	RWTH
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Probe a	Antimon (Sb)	< 5	0,499	< 1	0,605	0,73	0,701	3,1	0,666
	Arsen (As)	< 5	1,55	2	1,45	3,10	3,17	1,2	1,02
	Barium (Ba)	32,0	39,1	3	4,61	27,4	30,7	23,1	20,9
	Blei (Pb)	< 5	0,490	< 1	0,302	1,79	< 0,1	1,3	< 0,1
	Bor (B)	54	64,4	9	112	95,5	99,1	118	113
	Cadmium (Cd)	< 0,25	< 0,1	< 0,2	< 0,1	0,023	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	Chrom (Cr)	10,0	11,5	9	10,1	9,62	10,2	9,1	7,81
	Kobalt (Co)	2,0	2,28	2	1,62	2,68	2,48	1,8	1,55
	Kupfer (Cu)	38,0	40,3	35	40,1	53,2	52,6	31,6	30,4
	Molybdän (Mo)	13,0	14,0	12	11,5	15,1	17,3	11,3	11,2
	Nickel (Ni)	8,7	9,53	7	5,25	15,1	14,0	16,8	7,31
	Quecksilber (Hg) ¹⁾	< 0,05	< 0,01	< 0,2	0,0127	0,467	0,0212	< 0,1	< 0,01
	Selen (Se)	< 5	< 1	< 1	< 1	1,23	1,11	1,8	1,06
	Thallium (Tl)	< 0,8	< 0,1	< 0,5	< 0,1	0,086	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	Vanadium (V)	12,0	13,8	15	13,7	16,0	16,8	14,4	13,6
	Zink (Zn)	< 10	< 1	< 5	2,40	34,3	2,91	1,1	6,47
Probe b	Antimon (Sb)	< 5	0,476	< 1	0,568	0,654	0,676	2,0	0,712
	Arsen (As)	< 5	1,40	2	1,48	2,63	2,65	0,9	1,05
	Barium (Ba)	31,0	38,3	3	5,42	28,9	32,8	27,5	23,9
	Blei (Pb)	< 5	0,269	< 1	0,209	1,75	0,165	0,3	< 0,1
	Bor (B)	82	103	9	106	104	111	264	222
	Cadmium (Cd)	< 0,25	< 0,1	< 0,2	< 0,1	0,021	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	Chrom (Cr)	12,0	12,8	9	10,1	11,6	12,0	7,9	10,5
	Kobalt (Co)	2,2	2,48	2	1,65	3,32	3,15	1,1	2,07
	Kupfer (Cu)	43,0	43,3	34	39,4	57,1	59,1	20,6	43,4
	Molybdän (Mo)	14,0	15,0	12	11,5	18,5	20,8	7,8	14,4
	Nickel (Ni)	9,7	10,4	7	5,63	14,5	14,0	39,2	10,1
	Quecksilber (Hg) ¹⁾	< 0,05	< 0,01	< 0,2	0,0104	0,484	0,0197	< 0,1	0,0101
	Selen (Se)	< 5	< 1	< 1	< 1	1,06	1,32	0,9	1,11
	Thallium (Tl)	< 0,8	< 0,1	< 0,5	< 0,1	0,085	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	Vanadium (V)	11,0	12,2	15	13,5	17,8	18,6	11,8	12,5
	Zink (Zn)	< 10	< 1	< 5	2,63	12,3	7,55	2,2	1,84

grau hinterlegte Werte: Unterschied zwischen Messung und Kontrollanalyse größer als Faktor 3, hinterlegt ist der vermutlich falsche Wert

fettgedruckt: ausreißerverdächtiges Eluat

1) Quecksilber wurde bei Laboren I, II und III mit AAS und bei den Laboren IV, V sowie bei der RWTH mit ICP-MS bestimmt.

Tab. A66: Laborvergleichstest – Kontrollprüfung der -Messungen, an Eluaten von 50 % RC-b

Versuch	Parameter	Prüflabor I, Analyse bei		Prüflabor IV, Analyse bei		Prüflabor V, Analyse bei	
		Lab. I	RWTH	Lab. IV	RWTH	Lab. V	RWTH
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Probe a	Antimon (Sb)	< 5	0,494	0,76	0,724	1,6	0,713
	Arsen (As)	< 5	1,56	2,93	3,05	1,4	1,85
	Barium (Ba)	23,0	27,2	24,0	26,9	14,5	7,99
	Blei (Pb)	< 5	0,155	1,82	< 0,1	1,0	< 0,1
	Bor (B)	44	47,9	140	152	138	130
	Cadmium (Cd)	< 0,25	< 0,1	0,01	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	Chrom (Cr)	10,0	10,5	10,6	11,4	11,0	9,73
	Kobalt (Co)	2,0	2,24	3,30	3,06	2,3	2,00
	Kupfer (Cu)	36,0	36,3	49,1	49,0	37,5	36,0
	Molybdän (Mo)	13,0	13,3	15,6	17,7	14,3	14,3
	Nickel (Ni)	7,4	7,87	9,63	10,0	8,9	7,48
	Quecksilber (Hg) ¹⁾	< 0,05	< 0,01	0,296	0,0272	< 0,1	0,0115
	Selen (Se)	< 5	< 1	1,17	1,34	2,8	1,23
	Thallium (Tl)	< 0,8	< 0,1	0,075	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	Vanadium (V)	15,0	17,4	24,6	24,8	20,5	20,0
Zink (Zn)	< 10	< 1	8,15	3,82	1,6	1,78	
Probe b	Antimon (Sb)	< 5	0,478	0,75	0,695	1,3	0,678
	Arsen (As)	< 5	1,40	3,31	3,56	1,2	1,56
	Barium (Ba)	23,0	29,2	29,3	32,8	19,0	8,68
	Blei (Pb)	< 5	0,193	1,91	< 0,1	2,1	< 0,1
	Bor (B)	54	64,4	304	318	123	112
	Cadmium (Cd)	< 0,25	< 0,1	0,035	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	Chrom (Cr)	11,0	12,3	11,9	12,3	11,0	8,68
	Kobalt (Co)	2,2	2,44	3,37	3,16	1,9	1,74
	Kupfer (Cu)	38,0	39,3	49,5	49,5	32,5	31,3
	Molybdän (Mo)	13,0	14,6	16,3	18,5	10,8	11,2
	Nickel (Ni)	7,6	8,19	9,54	10,2	8,3	6,40
	Quecksilber (Hg) ¹⁾	< 0,05	0,0117	0,292	0,0256	< 0,1	< 0,01
	Selen (Se)	< 5	< 1	1,11	1,48	1,9	1,00
	Thallium (Tl)	< 0,8	< 0,1	0,082	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	Vanadium (V)	16,0	18,1	21,9	23,0	17,7	17,4
Zink (Zn)	< 10	< 1	14,7	3,67	4,3	2,70	

grau hinterlegte Werte: Unterschied zwischen Messung und Kontrollanalyse größer als Faktor 3, hinterlegt ist der vermutlich falsche Wert

1) Quecksilber wurde bei Laboren I, II und III mit AAS und bei den Laboren IV, V sowie bei der RWTH mit ICP-MS bestimmt.

Tab. A67: Validierung des Verfahrens – BM-a ohne und mit Sandzumischung, anorganische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	100 % BM-a				50 % BM-a				Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/			
		a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	BM-0	BM-1	BM-2	BM-3
pH-Wert	-	8,1	7,7	-	-	8,1	8,1	-	-	6,5-9,5 ²⁾	6,5-9,5 ²⁾	6,5-9,5 ²⁾	5,5-12,0 ²⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1392	675	-	-	981	658	-	-	350 ²⁾	500 ²⁾	500 ²⁾	2000 ²⁾
Redoxpotential	mV	393	428	-	-	421	446	-	-	-	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	10,6	10,8	-	-	10,8	9,9	-	-	-	-	-	-
Kalium (K)		10,5	10,5	-	-	9,8	9,7	-	-	-	-	-	-
Calcium (Ca)		99,7	103	-	-	98,2	104	-	-	-	-	-	-
Chlorid (Cl ⁻)		7,8	8,0	-	-	9,1	9,4	-	-	-	-	-	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		175	190	-	-	176	187	-	-	-	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		117	119	-	-	108	118	-	-	250	450	450	1000
Cyanid (CN ⁻)		<0,002	<0,002	-	-	<0,002	<0,002	-	-	-	-	-	-
Fluorid (F ⁻)		0,48	0,39	-	-	0,45	0,46	-	-	-	-	-	-
Antimon (Sb)	µg/l	1,37	1,41	1,56	1,42	1,23	1,16	1,24	1,27	10	10	10	15
Arsen (As)		1,93	2,05	6,41	5,84	1,74	1,74	3,45	3,45	15	15	15	30
Barium (Ba)		40,2	42,7	40,6	41,1	39,0	38,4	41,9	42,0	-	-	-	-
Blei (Pb)		0,353	0,191	0,406	0,334	0,426	0,357	0,483	0,719	35	91	250	470
Bor (B)		76,4	71,4	106	95,4	43,1	45,7	82,9	65,9	-	-	-	-
Cadmium (Cd)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	3	3	10	15
Chrom (Cr)		20,4	19,5	38,1	32,7	17,4	19,7	30,3	32,8	15	150	290	530
Kobalt (Co)		0,203	0,188	0,226	0,209	0,153	0,174	< 0,25	< 0,25	-	-	-	-
Kupfer (Cu)		5,49	5,86	6,80	6,96	5,87	6,17	7,30	11,3	30	110	170	320
Molybdän (Mo)		17,1	10,8	19,5	12,8	8,89	9,35	9,55	9,79	55	55	55	110
Nickel (Ni)		0,636	0,522	6,11	5,77	0,607	0,420	6,20	6,39	30	30	150	280
Quecksilber (Hg)		< 0,01	< 0,01	0,0224	< 0,01	< 0,01	0,0103	<0,025	0,0526	-	-	-	-
Selen (Se)		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 2,5	< 2,5	-	-	-	-
Thallium (Tl)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	-	-	-	-
Vanadium (V)		0,997	1,13	6,33	6,05	0,635	0,714	4,98	4,93	30	65	450	840
Zink (Zn)		6,80	6,76	13,2	7,96	9,49	12,2	9,98	24,7	150	160	840	1600

a, b: Einzelmessungen

1) mit Königwasser-Aufschluss mit Mikrowellenbehandlung

2) Stoffspezifischer Orientierungswert

fettgedruckt: wahrscheinlich Kontamination

grau hinterlegte Werte: erhöhte Konzentrationen nach dem Königwasseraufschluss

Tab. A68: Validierung des Verfahrens – BM-a ohne und mit Sandzumischung, PAK und DOC

Parameter / Stoff	Einheit	100 % BM-a		50 % BM-a		Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/			
		a	b	a	b	BM-0	BM-1	BM-2	BM-3
Naphthalin	µg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-	-	-	-
Acenaphthylen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-	-	-	-
Acenaphthen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-	-	-	-
Fluoren		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-	-	-	-
Phenanthren		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-	-	-	-
Anthracen		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-	-	-	-
Fluoranthen		0,0122	0,011	0,0176	0,0304	-	-	-	-
Pyren		< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,0194	-	-	-	-
Benzo(a)anthracen		0,0134	0,0108	0,0125	0,0306	-	-	-	-
Chrysen		< 0,01	< 0,01	0,0122	0,0236	-	-	-	-
Benzo(b)fluoranthen		0,0173	0,0171	0,0259	0,0584	-	-	-	-
Benzo(k)fluoranthen		< 0,01	< 0,01	0,0105	0,0207	-	-	-	-
Benzo(a)pyren		< 0,01	0,0109	< 0,01	0,0259	-	-	-	-
Dibenz(a,h)anthracen		0,0104	0,0115	0,0122	0,0317	-	-	-	-
Benzo(g,h,i)perylene		< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,0137	-	-	-	-
Indeno(1,2,3,c,d)pyren		0,0145	< 0,01	0,0128	0,0392	-	-	-	-
Quantifizierbare PAK ₁₅		0,0678	0,0613	0,1037	0,2936	0,3	2,3	6,8	20
Quantifizierbare PAK ₁₆		0,0678	0,0613	0,1037	0,2936	-	-	-	-
DOC	mg/l	3,3	3,2	4,8	5,1	-	-	-	-

Tab. A69: Validierung des Verfahrens – BM-b ohne und mit Sandzumischung, anorganische Parameter

Parameter / Stoff	Einheit	100 % BM-b				50 % BM-b				Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/			
		a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	BM-0	BM-1	BM-2	BM-3
pH-Wert	-	8,2	8,0	-	-	8,2	8,3	-	-	6,5-9,5 ²⁾	6,5-9,5 ²⁾	6,5-9,5 ²⁾	5,5-12,0 ²⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	502	506	-	-	806	611	-	-	350 ²⁾	500 ²⁾	500 ²⁾	2000 ²⁾
Redoxpotential	mV	383	396	-	-	363	383	-	-	-	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	5,7	5,3	-	-	8,7	8,4	-	-	-	-	-	-
Kalium (K)		24,3	19,9	-	-	29,7	28,9	-	-	-	-	-	-
Calcium (Ca)		73,3	81,9	-	-	85,1	86,8	-	-	-	-	-	-
Chlorid (Cl)		3,3	3,5	-	-	5,6	5,5	-	-	-	-	-	-
Nitrat (NO ₃)		1,5	< 0,1	-	-	12,9	14,1	-	-	-	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		37,1	37,2	-	-	57,9	56,4	-	-	250	450	450	1000
Cyanid (CN)		<0,002	<0,002	-	-	0,002	<0,002	-	-	-	-	-	-
Fluorid (F)		0,91	0,79	-	-	0,72	0,71	-	-	-	-	-	-
Antimon (Sb)		µg/l	3,12	2,51	3,22	2,51	3,08	2,93	2,77	3,05	10	10	10
Arsen (As)	1,08		< 1	< 2,5	< 2,5	2,71	2,52	3,09	3,34	15	15	15	30
Barium (Ba)	105		111	127	115	136	137	125	143	-	-	-	-
Blei (Pb)	0,490		0,647	0,843	1,07	0,275	0,284	0,392	0,536	35	91	250	470
Bor (B)	122		114	134	139	82	82	78,0	89	-	-	-	-
Cadmium (Cd)	< 0,1		< 0,1	< 0,25	< 0,25	<0,1	<0,1	<0,25	<0,25	3	3	10	15
Chrom (Cr)	1,07		0,782	7,49	7,44	1,4	1,4	7,79	8,7	15	150	290	530
Kobalt (Co)	0,181		0,125	< 0,25	< 0,25	0,126	0,144	<0,25	0,212	-	-	-	-
Kupfer (Cu)	10,5		7,60	12,0	10,3	10,3	10,0	10,5	12,4	30	110	170	320
Molybdän (Mo)	4,68		3,94	4,52	4,06	4,38	4,17	3,96	4,37	55	55	55	110
Nickel (Ni)	3,18		2,42	14,9	12,6	1,7	1,6	4,86	4,7	30	30	150	280
Quecksilber (Hg)	0,0138		0,0115	0,0548	<0,025	0,0124	0,0117	<0,025	0,0236	-	-	-	-
Selen (Se)	< 1		< 1	< 2,5	< 2,5	<1	<1	<2,5	<2,5	-	-	-	-
Thallium (Tl)	0,122		< 0,1	< 0,25	< 0,25	<0,1	<0,1	<0,25	<0,25	-	-	-	-
Vanadium (V)	1,70		1,49	4,20	4,13	4,81	4,57	7,50	6,82	30	65	450	840
Zink (Zn)	11,3		12,2	10,8	15,3	6,74	50,4	8,90	14,0	150	160	840	1600

a, b: Einzelmessungen

1) mit Königwasser-Aufschluss mit Mikrowellenbehandlung

2) Stoffspezifischer Orientierungswert

fettgedruckt: wahrscheinlich Kontamination

grau hinterlegte Werte: erhöhte Konzentrationen nach dem Königswasseraufschluss

Tab. A70: Validierung des Verfahrens – BM-b ohne und mit Sandzumischung, PAK und DOC

Parameter / Stoff	Einheit	100 % BM-b		50 % BM-b		Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/			
		a	b	a	b	BM-0	BM-1	BM-2	BM-3
Naphthalin	µg/l	< 0,01	< 0,01	<0.025	<0.025	-	-	-	-
Acenaphthylen		0,0229	0,0481	0,0316	0,0313	-	-	-	-
Acenaphthen		< 0,01	< 0,01	<0.025	<0.025	-	-	-	-
Fluoren		< 0,01	< 0,01	0,0277	0,0296	-	-	-	-
Phenanthren		0,0426	0,0897	0,0639	0,0683	-	-	-	-
Anthracen		0,224	0,249	0,0460	0,0499	-	-	-	-
Fluoranthren		0,200	0,475	0,0738	0,0875	-	-	-	-
Pyren		0,191	0,451	0,0718	0,0742	-	-	-	-
Benzo(a)anthracen		0,147	0,385	0,109	0,117	-	-	-	-
Chrysen		0,168	0,378	0,0720	0,0784	-	-	-	-
Benzo(b)fluoranthren		0,695	1,62	0,219	0,244	-	-	-	-
Benzo(k)fluoranthren		0,208	0,490	0,0796	0,0838	-	-	-	-
Benzo(a)pyren		0,283	0,776	0,121	0,129	-	-	-	-
Dibenz(a,h)anthracen		0,429	1,10	0,152	0,164	-	-	-	-
Benzo(g,h,i)perylen		0,0946	0,239	0,0898	0,0909	-	-	-	-
Indeno(1,2,3,c,d)pyren		0,536	1,21	0,141	0,145	-	-	-	-
Quantifizierbare PAK ₁₅		3,24	7,51	1,30	1,39	0,3	2,3	6,8	20
Quantifizierbare PAK ₁₆		3,24	7,51	1,30	1,39	-	-	-	-
DOC	mg/l	11,1	9,9	11,0	12,3	-	-	-	-

Tab. A71: Validierung des Verfahrens – BM-c ohne und mit Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	100 % BM-c				50 % BM-c				Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/			
		a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	BM-0	BM-1	BM-2	BM-3
pH-Wert	-	8,0	8,4	-	-	8,2	8,0	-	-	6,5-9,5 ²⁾	6,5-9,5 ²⁾	6,5-9,5 ²⁾	5,5-12,0 ²⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	647	296	-	-	811	770	-	-	350 ²⁾	500 ²⁾	500 ²⁾	2000 ²⁾
Redoxpotential	mV	382	339	-	-	308	313	-	-	-	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	25,5	31,2	-	-	25,5	26,2	-	-	-	-	-	-
Kalium (K)		21,7	9,7	-	-	24,6	22,4	-	-	-	-	-	-
Calcium (Ca)		71,2	23,2	-	-	90,1	85,9	-	-	-	-	-	-
Chlorid (Cl)		34,6	4,8	-	-	49,5	46,4	-	-	-	-	-	-
Nitrat (NO ₃)		176	167	-	-	204	191	-	-	-	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		75,8	33,1	-	-	99,0	98,9	-	-	250	450	450	1000
Cyanid (CN)		0,002	0,005	-	-	0,007	0,008	-	-	-	-	-	-
Fluorid (F)		1,51	1,78	-	-	1,27	1,33	-	-	-	-	-	-
Antimon (Sb)		µg/l	193	179	168	162	172	170	147	150	10	10	10
Arsen (As)	5,18		4,86	4,51	6,03	6,21	6,07	6,66	7,74	15	15	15	30
Barium (Ba)	1800		2050	1930	2020	729	1180	638	1220	-	-	-	-
Blei (Pb)	92,6		86,1	78,4	75,4	119,6	151,4	113	137	35	91	250	470
Bor (B)	687		1170	447	837	187	204	143	183	-	-	-	-
Cadmium (Cd)	0,783		0,345	0,477	0,303	0,682	0,580	0,513	0,443	3	3	10	15
Chrom (Cr)	1,51		1,75	6,98	10,1	2,15	1,42	9,10	10,8	15	150	290	530
Kobalt (Co)	0,59		0,54	0,436	0,565	0,55	0,56	0,498	0,573	-	-	-	-
Kupfer (Cu)	88,9		78,1	61,4	74,3	83,21	82,29	72,8	76,7	30	110	170	320
Molybdän (Mo)	7,80		8,24	5,22	7,53	7,67	7,27	6,67	7,39	55	55	55	110
Nickel (Ni)	5,21		4,88	15,1	20,1	4,84	4,83	18,4	17,9	30	30	150	280
Quecksilber (Hg)	0,183		0,267	0,242	0,314	0,268	0,328	0,282	0,321	-	-	-	-
Selen (Se)	4,82		3,79	4,41	3,65	4,64	4,46	4,64	4,90	-	-	-	-
Thallium (Tl)	0,101		< 0,1	< 0,25	< 0,25	0,123	< 0,1	< 0,25	< 0,25	-	-	-	-
Vanadium (V)	2,26		1,64	3,87	5,56	3,63	2,39	6,39	7,65	30	65	450	840
Zink (Zn)	294		185	242	168	80,2	91,0	77,1	83,7	150	160	840	1600

a, b: Einzelmessungen

1) mit Königwasser-Aufschluss mit Mikrowellenbehandlung

2) Stoffspezifischer Orientierungswert

grau hinterlegte Werte: erhöhte Konzentrationen nach dem Königswasseraufschluss

Tab. A72: Validierung des Verfahrens – Ziegelbruch ohne und mit Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	100 % ZM		50 % ZM		Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/		
		a	b	a	b	RC-1	RC-2	RC-3
pH-Wert	-	10,3	10,3	10,2	10,1	6-13 ¹⁾	6-13 ¹⁾	6-13 ¹⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	672	507	647	725	2500 ¹⁾	3200 ¹⁾	10000 ¹⁾
Redoxpotential	mV	257	278	268	281	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	20,4	14,9	18,8	22,3	-	-	-
Kalium (K)		18,4	12,8	16,8	19,4	-	-	-
Calcium (Ca)		92,9	68,0	88,7	105	-	-	-
Chlorid (Cl ⁻)		7,0	5,1	6,0	6,7	-	-	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		< 0,1	0,9	n. b.	n. b.	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		281	197	275	321	600	1000	3500
Cyanid (CN ⁻)		< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	-	-	-
Fluorid (F ⁻)		4,0	2,8	6,4	1,7	-	-	-
Antimon (Sb)		0,48	0,33	0,55	0,66	-	-	-
Arsen (As)		14,9	14,6	16,5	17,7	-	-	-
Barium (Ba)	18	16	15	22	-	-	-	
Blei (Pb)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-	
Bor (B)	1160	688	928	1320	-	-	-	
Cadmium (Cd)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-	
Chrom (Cr)	220	164	218	257	150	440	900	
Kobalt (Co)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-	
Kupfer (Cu)	0,35	0,42	1,00	1,38	110	180	500	
Molybdän (Mo)	180	137	181	210	-	-	-	
Nickel (Ni)	< 0,1	< 0,1	0,13	0,67	-	-	-	
Quecksilber (Hg)	0,032	0,023	0,049	0,070	-	-	-	
Selen (Se)	21,3	14,8	22,8	28,3	-	-	-	
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-	
Vanadium (V)	1550	1000	1710	2470	140	700	1400	
Zink (Zn)	2,7	2,2	2,8	6,2	-	-	-	
DOC	mg/l	2,5	1,1	5,8	6,3	-	-	-

a, b: Einzelmessungen

1): stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A73: Validierung des Verfahrens – Hausmüllverbrennungsasche ohne und mit Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	100 % HMVA		50 % HMVA		Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/	
		a	b	a	b	HMVA-1	HMVA-2
pH-Wert	-	11,5	11,4	10,8	10,9	7-13 ¹⁾	7-13 ¹⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	4750	6040	5610	5470	10000 ¹⁾	10000 ¹⁾
Redoxpotential	mV	226	228	259	230	-	-
Natrium (Na)	mg/l	640	792	635	714	-	-
Kalium (K)		282	360	247	301	-	-
Calcium (Ca)		89,1	65,0	73,9	83,4	-	-
Chlorid (Cl)		1314	1863	1467	1699	3000	3000
Nitrat (NO ₃)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		314	296	264	329	2000	2000
Cyanid (CN)		0,010	0,022	0,015	0,025	-	-
Fluorid (F)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-
Antimon (Sb)		20,5	19,9	20,6	22,4	57	150
Arsen (As)		6,07	6,51	7,15	7,86	-	-
Barium (Ba)	94	120	106	109	-	-	
Blei (Pb)	0,48	0,22	< 0,1	< 0,1	-	-	
Bor (B)	56	63	77	66	-	-	
Cadmium (Cd)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	
Chrom (Cr)	45,3	32,6	50,3	52,9	460	600	
Kobalt (Co)	0,85	0,87	0,83	0,95	-	-	
Kupfer (Cu)	1400	1760	1040	1450	1000	2000	
Molybdän (Mo)	154	187	121	157	400	1000	
Nickel (Ni)	17,4	24,2	16,6	23,4	-	-	
Quecksilber (Hg)	0,050	0,049	0,037	0,045	-	-	
Selen (Se)	1,47	1,78	1,56	1,84	-	-	
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	
Vanadium (V)	17,0	16,7	18,6	20,3	150	200	
Zink (Zn)	12,1	5,6	6,2	25,9	-	-	
DOC	mg/l	3	242	5	172	-	-

a, b: Einzelmessungen

1) Stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A74: Validierung des Verfahrens – Kesselsand mit und ohne Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	100 % SKA		50 % SKA		Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/ SKA
		a	b	a	b	
pH-Wert	-	8,8	8,8	8,3	8,3	7-12 ¹⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	355	278	914	341	2100 ¹⁾
Redoxpotential	mV	362	370	357	750	-
Natrium (Na)	mg/l	3,6	3,6	14,4	13,0	-
Kalium (K)		2,6	2,5	7,0	6,0	-
Calcium (Ca)		55,4	41,3	122	105	-
Chlorid (Cl ⁻)		3,2	1,4	9,0	6,9	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		0,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		150	107	390	345	600
Cyanid (CN ⁻)		0,002	< 0,002	< 0,002	0,002	-
Fluorid (F ⁻)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-
Antimon (Sb)		1,18	0,87	1,34	1,04	-
Arsen (As)		14,9	10,9	11,2	9,12	-
Barium (Ba)	38	18	71	56	-	
Blei (Pb)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	
Bor (B)	1990	1400	2910	2440	-	
Cadmium (Cd)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	
Chrom (Cr)	1,48	1,36	2,65	2,29	-	
Kobalt (Co)	< 0,1	< 0,1	0,17	0,20	-	
Kupfer (Cu)	0,20	0,20	0,35	0,33	-	
Molybdän (Mo)	21,3	16,9	47,6	41,1	350	
Nickel (Ni)	< 0,1	0,18	0,45	0,40	-	
Quecksilber (Hg)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-	
Selen (Se)	1,84	1,58	2,79	2,42	-	
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	
Vanadium (V)	23,8	16,8	14,8	12,8	230	
Zink (Zn)	2,3	2,2	4,4	8,7	-	
DOC	mg/l	5,3	2,3	4,3	5,1	-

a, b: Einzelmessungen

1) Stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A75: Validierung des Verfahrens – Steinkohlenflugasche mit 50 % und 80 % Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	50 % SFA				20 % SFA				Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/
		a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	SFA
pH-Wert	-	12,5	12,6	-	-	13,1	13,2	-	-	8-13 ²⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	10390	10620	-	-	6970	8250	-	-	10000 ²⁾
Redoxpotential	mV	155	146	-	-	150	157	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	90,1	104	-	-	73,1	98,7	-	-	-
Kalium (K)		42,9	48,3	-	-	31,5	39,3	-	-	-
Calcium (Ca)		1311	1311	-	-	864	1109	-	-	-
Chlorid (Cl ⁻)		1,0	1,0	-	-	1,4	1,5	-	-	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		0,1	< 0,1	-	-	< 0,1	0,2	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		1672	1771	-	-	771,1	946,2	-	-	4500
Cyanid (CN ⁻)		0,002	<0,002	-	-	<0,002	<0,002	-	-	-
Fluorid (F ⁻)		0,43	0,41	-	-	0,36	0,38	-	-	-
Antimon (Sb)		< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	-
Arsen (As)	1,57	1,53	4,28	4,11	1,82	1,63	3,26	3,05	-	
Barium (Ba)	431	397	385	441	517	579	520	658	-	
Blei (Pb)	2,21	2,32	2,49	2,50	5,27	2,71	5,92	3,04	-	
Bor (B)	1370	1370	1290	1450	1130	1150	1150	1150	-	
Cadmium (Cd)	0,598	0,662	0,640	0,690	0,508	0,630	0,502	0,650	-	
Chrom (Cr)	843	918	939	974	557	714	603	843	1000	
Kobalt (Co)	0,757	0,839	0,773	0,824	0,434	0,545	0,513	0,554	-	
Kupfer (Cu)	0,134	0,246	3,93	2,35	1,29	1,07	2,97	4,10	-	
Molybdän (Mo)	1900	2050	1960	2140	1440	1850	1480	2600	7000	
Nickel (Ni)	0,590	0,611	7,61	11,8	0,119	0,126	4,40	4,43	-	
Quecksilber (Hg)	0,0831	0,0884	0,0925	0,106	0,0516	0,0711	0,0857	0,0620	-	
Selen (Se)	55,2	63,5	52,4	59,9	27,1	35,8	27,2	36,7	-	
Thallium (Tl)	< 0,1	0,106	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	-	
Vanadium (V)	5,91	6,47	10,1	10,6	7,15	4,08	11,6	7,06	300	
Zink (Zn)	4,92	16,3	9,52	7,52	8,04	5,11	9,75	10,2	-	

a, b: Einzelmessungen

1) mit Königwasser-Aufschluss mit Mikrowellenbehandlung

2) Stoffspezifischer Orientierungswert

grau hinterlegte Werte: erhöhte Konzentrationen nach dem Königwasseraufschluss

Tab. A76: Validierung des Verfahrens – Braunkohlenflugasche mit 50 % und 80 % Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	50 % BFA				20 % BFA				Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/
		a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	BFA
pH-Wert	-	12,5	12,5	-	-	12,5	12,6	-	-	11-13 ²⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	11010	10860	-	-	9360	10790	-	-	15000 ²⁾
Redoxpotential	mV	-122	-116	-	-	60	29	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	43,1	44	-	-	23,5	29,8	-	-	-
Kalium (K)		55,6	57,1	-	-	28,4	36,2	-	-	-
Calcium (Ca)		1353	1341	-	-	1180	2615	-	-	-
Chlorid (Cl ⁻)		1,2	1,4	-	-	1,2	1,5	-	-	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		0,1	< 0,1	-	-	< 0,1	< 0,1	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		1955	1963	-	-	1396	1997	-	-	2500
Cyanid (CN ⁻)		<0,002	<0,002	-	-	<0,002	<0,002	-	-	-
Fluorid (F ⁻)		< 0,1	< 0,1	-	-	0,10	0,21	-	-	-
Antimon (Sb)		< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	-
Arsen (As)	< 1	< 1	< 2,5	2,82	< 1	< 1	4,09	5,16	-	
Barium (Ba)	393	328	372	404	557	538	425	423	-	
Blei (Pb)	< 0,1	< 0,1	0,252	< 0,25	1,40	4,44	1,67	0,804	-	
Bor (B)	68,7	72,1	76,3	105	59,3	59,7	89,6	99,0	-	
Cadmium (Cd)	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	-	
Chrom (Cr)	1,49	1,42	9,31	11,1	40,13	38,71	56,1	74,6	150	
Kobalt (Co)	0,667	0,716	0,636	0,745	0,711	0,873	0,785	1,04	-	
Kupfer (Cu)	< 0,1	< 0,1	2,09	2,18	0,420	0,192	5,44	4,32	-	
Molybdän (Mo)	2,28	2,66	75,5	103	73,8	28,8	73,5	38,7	400	
Nickel (Ni)	0,846	0,979	10,4	9,17	0,222	0,240	5,63	8,95	-	
Quecksilber (Hg)	0,0292	0,0364	0,301	0,615	0,0345	0,0281	0,0357	<0,025	-	
Selen (Se)	3,83	3,97	7,48	8,23	3,40	2,86	2,56	2,59	-	
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	-	
Vanadium (V)	1,39	1,60	4,20	5,43	1,05	1,04	5,50	6,20	-	
Zink (Zn)	9,74	4,63	7,55	8,09	6,19	4,31	9,79	8,43	-	

a, b: Einzelmessungen

1) mit Königswasser-Aufschluss mit Mikrowellenbehandlung

2) Stoffspezifischer Orientierungswert

fettgedruckt: wahrscheinlich Kontamination bzw. Fehler

grau hinterlegte Werte: erhöhte Konzentrationen nach dem Königswasseraufschluss

Tab. A77: Validierung des Verfahrens – Hochofenstückschlacke mit und ohne Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	100 % HOS		50 % HOS		Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/		
		a	b	a	b	HOS-1	HOS-2	
pH-Wert	-	10,5	10,8	10,2	10,0	9-12 ¹⁾	9-12 ¹⁾	
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1308	1511	1276	1250	5000 ¹⁾	7000 ¹⁾	
Redoxpotential	mV	247	231	250	257	-	-	
Natrium (Na)	mg/l	2,2	2,6	2,4	2,7	-	-	
Kalium (K)		40,0	44,1	37,0	38,5	-	-	
Calcium (Ca)		255	297	261	256	-	-	
Chlorid (Cl)		2,6	2,9	2,4	3,7	-	-	
Nitrat (NO ₃)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		646	754	649	651	1300 ²⁾	3800 ²⁾	
Cyanid (CN)		< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	-	-	
Fluorid (F)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	
Antimon (Sb)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	
Arsen (As)		< 1	< 1	< 1	1,09	-	-	
Barium (Ba)	µg/l	87	93	69	71	-	-	
Blei (Pb)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	
Bor (B)		22	16	35	23	-	-	
Cadmium (Cd)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	
Chrom (Cr)		1,83	1,98	2,19	2,06	-	-	
Kobalt (Co)		< 0,1	< 0,1	0,13	0,18	-	-	
Kupfer (Cu)		0,99	1,01	1,65	1,80	-	-	
Molybdän (Mo)		7,67	9,22	7,58	8,32	-	-	
Nickel (Ni)		< 0,1	3,48	< 0,1	2,05	-	-	
Quecksilber (Hg)		0,014	0,012	0,024	0,029	-	-	
Selen (Se)		< 1	< 1	< 1	< 1	-	-	
Thallium (Tl)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	
Vanadium (V)		70,1	75,6	75,5	69,2	-	-	
Zink (Zn)		2,4	7,4	3,6	5,7	-	-	
DOC		mg/l	< 1	2,7	3,7	4,2	-	-

a, b: Einzelmessungen

1) Stoffspezifischer Orientierungswert

2) Summe aus Sulfat- und Thiosulfatschwefel; bestimmt als Gesamtschwefel, umgerechnet in Sulfat

Tab. A78: Validierung des Verfahrens – Hüttensandmehl mit 50 % und 80 % Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	50 % HSM				20 % HSM				Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/
		a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	HS
pH-Wert	-	11,1	11,07	-	-	11,4	11,18	-	-	8-12 ²⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	385	333	-	-	526	585	-	-	4000 ²⁾
Redoxpotential	mV	66,6	68	-	-	-43	-77	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	5,4	5,4	-	-	8,3	10	-	-	-
Kalium (K)		3,0	2,6	-	-	4,8	5,6	-	-	-
Calcium (Ca)		54,4	46,4	-	-	82,1	86,3	-	-	-
Chlorid (Cl ⁻)		4,3	4,6	-	-	4,5	5,4	-	-	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		1,3	1,3	-	-	0,5	0,3	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		55,5	47,6	-	-	111,1	131,9	-	-	350
Cyanid (CN ⁻)		0,014	0,015	-	-	0,029	0,056	-	-	-
Fluorid (F ⁻)		< 0,1	< 0,1	-	-	< 0,1	0,13	-	-	-
Antimon (Sb)		< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	0,308	< 0,25	-
Arsen (As)	< 1	< 1	< 2,5	< 2,5	1,81	2,22	2,69	3,07	-	
Barium (Ba)	48,5	28,6	50,8	30,3	22,7	19,5	25,1	20,3	-	
Blei (Pb)	< 0,1	< 0,1	0,327	0,263	0,100	< 0,1	0,487	0,364	-	
Bor (B)	21,7	16,0	24,6	18,6	67,4	78,6	97,3	96,3	-	
Cadmium (Cd)	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	-	
Chrom (Cr)	0,874	0,791	9,66	7,78	1,63	1,81	11,8	48,2	-	
Kobalt (Co)	< 0,1	< 0,1	0,144	0,124	0,167	0,211	< 0,25	0,373	-	
Kupfer (Cu)	0,496	0,509	2,81	2,17	3,49	3,52	5,77	5,49	-	
Molybdän (Mo)	4,89	4,64	5,08	4,95	6,63	8,22	7,62	9,80	-	
Nickel (Ni)	0,289	0,256	3,24	2,65	0,206	0,389	< 0,25	5,51	-	
Quecksilber (Hg)	0,0947	0,0761	0,108	0,0860	0,134	0,183	0,162	0,219	-	
Selen (Se)	< 1	< 1	< 2,5	< 2,5	< 1	< 1	< 2,5	< 2,5	-	
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	-	
Vanadium (V)	4,38	4,35	6,71	6,71	12,9	14,6	17,4	19,1	65	
Zink (Zn)	2,97	5,52	3,73	2,94	7,33	7,68	165	20,3	-	

a, b: Einzelmessungen

1) mit Königwasser-Aufschluss mit Mikrowellenbehandlung

2) Stoffspezifischer Orientierungswert

fettgedruckt: wahrscheinlich Kontamination

grau hinterlegte Werte: erhöhte Konzentrationen nach dem Königwasseraufschluss

Tab. A79: Validierung des Verfahrens – Gießereirestsand mit und ohne Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	100 % GRS		50 % GRS		Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/		
		a	b	a	b	GRS-1	GRS-2	
pH-Wert	-	4,6	4,6	4,9	4,9	> 9	> 6	
el. Leitfähigkeit	µS/cm	1345	1410	1339	1309	2700 ¹⁾	4200 ¹⁾	
Redoxpotential	mV	480	473	440	444	-	-	
Natrium (Na)	mg/l	63,7	66,6	65,2	66	-	-	
Kalium (K)		12,1	12,8	12,5	13,0	-	-	
Calcium (Ca)		43,1	45,3	63,7	64,7	-	-	
Chlorid (Cl)		38,5	40,0	41,2	39,6	-	-	
Nitrat (NO ₃)		9,8	10,0	< 0,1	< 0,1	-	-	
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		619	650	614	617	-	-	
Cyanid (CN)		0,008	0,008	0,006	0,007	-	-	
Fluorid (F)		1,7	1,82	2,65	1,81	9,0	80	
Antimon (Sb)		3,12	4,08	2,79	3,09	-	-	
Arsen (As)		< 1	< 1	1,09	1,00	63	100	
Barium (Ba)	µg/l	48	55	65	64	-	-	
Blei (Pb)		27,5	39,6	17,1	16,5	92	600	
Bor (B)		357	372	546	516	-	-	
Cadmium (Cd)		17,3	18,7	19,2	19,3	-	-	
Chrom (Cr)		72,4	82,4	46,8	41,2	100	120	
Kobalt (Co)		558	562	562	554	-	-	
Kupfer (Cu)		6160	6240	5580	6450	110	150	
Molybdän (Mo)		< 0,1	< 0,1	0,10	0,14	55	350	
Nickel (Ni)		2730	2930	2680	2610	30	230	
Quecksilber (Hg)		< 0,01	< 0,01	0,013	< 0,01	-	-	
Selen (Se)		< 1	< 1	2,80	2,64	-	-	
Thallium (Tl)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	
Vanadium (V)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	230	250	
Zink (Zn)		8320	8970	8359	8097	160	650	
DOC		mg/l	511	508	400	398	30	200

a, b: Einzelmessungen

1) Stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A80: Validierung des Verfahrens – Stahlwerksschlacke mit und ohne Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	100 % SWS		50 % SWS		Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/		
		a	b	a	b	SWS-1	SWS-2	SWS-3
pH-Wert	-	12,5	12,4	12,4	12,4	9-13 ¹⁾	9-13 ¹⁾	9-13 ¹⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	9330	9130	8330	8490	10000 ¹⁾	10000 ¹⁾	10000 ¹⁾
Redoxpotential	mV	156	149	140	141	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	28,1	26,1	23,4	19	-	-	-
Kalium (K)		6,7	6,0	5,2	4,5	-	-	-
Calcium (Ca)		1012	1122	992	1071	-	-	-
Chlorid (Cl ⁻)		4,4	4,0	2,1	2,0	-	-	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		0,5	0,3	0,2	0,2	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		8,8	8,5	6,3	7,5	-	-	-
Cyanid (CN ⁻)		< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	-	-	-
Fluorid (F ⁻)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,1	2,0	4,0
Antimon (Sb)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-
Arsen (As)		< 1	< 1	< 1	< 1	-	-	-
Barium (Ba)	µg/l	742	713	211	212	-	-	-
Blei (Pb)		1,16	1,13	6,19	1,22	-	-	-
Bor (B)		226	221	156	143	-	-	-
Cadmium (Cd)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-
Chrom (Cr)		1,15	1,33	1,61	1,82	110	190	250
Kobalt (Co)		0,45	0,45	0,42	0,48	-	-	-
Kupfer (Cu)		0,64	0,61	0,90	0,93	-	-	-
Molybdän (Mo)		1,93	1,91	1,77	1,62	55	220	1000
Nickel (Ni)		0,34	0,35	0,30	0,35	-	-	-
Quecksilber (Hg)		< 0,01	< 0,01	0,025	0,016	-	-	-
Selen (Se)		3,26	3,02	2,04	2,20	-	-	-
Thallium (Tl)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-
Vanadium (V)		0,19	0,25	0,39	0,40	180	360	1000
Zink (Zn)		3,0	3,0	3,3	5,1	-	-	-

a, b: Einzelmessungen

1) Stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A81: Validierung des Verfahrens – Edelstahlschlacke mit und ohne Sandzumischung

Parameter / Stoff	Einheit	100 % EDS		50 % EDS		Vorgeschlagene Grenzwerte aus /Bun15/		
		a	b	a	b	EDS-1	EDS-2	EDS-3
pH-Wert	-	12,5	12,5	12,4	12,4	11-13 ¹⁾	11-13 ¹⁾	11-13 ¹⁾
el. Leitfähigkeit	µS/cm	7360	7430	7140	7160	10000 ¹⁾	10000 ¹⁾	10000 ¹⁾
Redoxpotential	mV	115	117	118	119	-	-	-
Natrium (Na)	mg/l	18,4	19,9	20,4	19,4	-	-	-
Kalium (K)		9,8	11,1	11,3	10,8	-	-	-
Calcium (Ca)		741	749	724	723	-	-	-
Chlorid (Cl ⁻)		21,1	24,4	22,7	24,7	-	-	-
Nitrat (NO ₃ ⁻)		2,2	2,4	2,2	2,6	-	-	-
Sulfat (SO ₄ ²⁻)		14,0	13,7	13,4	14,4	900	900	1000
Cyanid (CN ⁻)		0,002	<0,002	< 0,002	< 0,002	-	-	-
Fluorid (F ⁻)		2,7	3,0	2,8	3,2	1,1	4,7	8,7
Antimon (Sb)		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-
Arsen (As)	< 1	< 1	< 1	< 1	-	-	-	
Barium (Ba)	374	398	257	260	-	-	-	
Blei (Pb)	1,51	1,38	1,19	1,20	-	-	-	
Bor (B)	25	14	14	2	-	-	-	
Cadmium (Cd)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-	
Chrom (Cr)	87,7	87,5	88,4	86,2	110	110	250	
Kobalt (Co)	0,64	0,67	0,63	0,63	-	-	-	
Kupfer (Cu)	11,8	12,3	13,6	12,3	-	-	-	
Molybdän (Mo)	110	119	110	107	55	220	2000	
Nickel (Ni)	5,12	5,49	5,73	5,38	-	-	-	
Quecksilber (Hg)	0,026	0,028	0,091	0,041	-	-	-	
Selen (Se)	1,52	1,93	1,87	1,99	-	-	-	
Thallium (Tl)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-	-	-	
Vanadium (V)	0,23	0,17	0,36	0,40	-	-	-	
Zink (Zn)	1,4	1,8	2,7	4,5	-	-	-	

a, b: Einzelmessungen

1) Stoffspezifischer Orientierungswert

Tab. A82: ICP-MS-Messung mit und ohne Königswasseraufschluss an Bodenmaterialien mit Schütteltest nach DIN 19529

Parameter / Stoff	Einheit	BM-a				BM-b				BM-c			
		a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	a	b	a ¹⁾	b ¹⁾
Antimon (Sb)	µg/l	1,36	1,39	1,45	1,46	4,49	5,07	4,75	5,02	194	180	206	174
Arsen (As)		1,83	1,73	2,62	< 2,5	3,31	3,45	4,00	4,12	6,91	8,49	8,01	8,32
Barium (Ba)		56,6	56,6	56,1	57,1	120	121	120	117	153	153	162	140
Blei (Pb)		0,229	0,417	0,575	0,814	3,39	4,37	2,43	2,78	189	197	196	179
Bor (B)		52,2	49,0	51,2	48,5	59,8	60,0	72,0	70,5	95,1	91,8	95,6	93,7
Cadmium (Cd)		< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	0,795	0,766	0,854	0,778
Chrom (Cr)		31,0	30,1	44,9	41,5	3,39	3,40	21,9	15,7	1,64	2,30	12,0	11,4
Kobalt (Co)		0,181	0,201	0,306	0,316	0,158	0,166	< 0,25	< 0,25	0,533	0,572	0,630	0,624
Kupfer (Cu)		5,38	5,56	7,70	7,89	10,0	8,78	10,7	9,43	66,5	62,8	72,8	67,2
Molybdän (Mo)		11,3	11,1	12,5	12,2	5,93	6,09	6,94	6,83	7,63	8,70	8,59	9,37
Nickel (Ni)		0,569	0,658	7,22	3,75	1,33	1,42	5,97	2,82	3,84	3,68	8,52	6,87
Quecksilber (Hg)		< 0,01	< 0,01	< 0,025	< 0,025	0,0173	0,0137	0,0433	0,0368	0,335	0,420	0,349	0,330
Selen (Se)		< 1	< 1	< 2,5	< 2,5	< 1	< 1	< 2,5	< 2,5	6,48	6,77	6,79	6,60
Thallium (Tl)		< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	0,140	0,140	0,153	0,164
Vanadium (V)		0,777	0,744	3,40	3,39	4,67	4,75	8,55	8,64	2,65	4,32	5,60	6,26
Zink (Zn)		16,1	19,5	20,0	23,5	39,3	30,1	33,9	25,0	60,0	49,5	76,9	49,3

1) mit Königwasser-Aufschluss mit Mikrowellenbehandlung

grau hinterlegte Werte: erhöhte Konzentrationen nach dem Königswasseraufschluss

Tab. A83: ICP-MS-Messung mit und ohne Königwasseraufschluss an Flugaschen und Hüttensandmehl mit Schütteltest nach DIN 19529

Parameter / Stoff	Einheit	SFA				BFA				HSM			
		a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	a	b	a ¹⁾	b ¹⁾	a	b	a ¹⁾	b ¹⁾
Antimon (Sb)	µg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25
Arsen (As)		1,78	1,87	3,5	3,47	1,67	1,85	3,86	3,72	< 1	< 1	< 2,5	< 2,5
Barium (Ba)		370	349	383	359	464	484	499	483	176	180	194	189
Blei (Pb)		1,1	1,11	1,29	1,93	0,505	0,446	0,68	0,561	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25
Bor (B)		420	426	493	504	84,7	85,3	110	113	79,9	82	95,8	99,2
Cadmium (Cd)		0,775	0,851	0,697	0,722	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25
Chrom (Cr)		1250	1250	1260	1230	308	317	337	321	1,41	1,56	7,79	9,34
Kobalt (Co)		0,381	0,396	0,395	0,419	0,557	0,579	0,578	0,567	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25
Kupfer (Cu)		0,898	0,76	1,89	1,71	0,169	0,191	0,956	0,903	0,225	0,222	0,92	0,976
Molybdän (Mo)		2220	2220	2260	2280	227	230	235	229	11,1	11,4	11,3	11,6
Nickel (Ni)		0,435	0,45	4,78	6,15	0,687	0,644	5,7	5,55	0,25	0,279	4,56	5,93
Quecksilber (Hg)		0,044	0,0442	0,0593	0,0603	0,0262	0,0344	0,0374	0,0274	0,526	0,534	0,539	0,532
Selen (Se)		54,9	45,6	53,7	43,7	4,19	4,3	4,31	3,74	< 1	< 1	< 2,5	< 2,5
Thallium (Tl)		< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,25	< 0,25
Vanadium (V)		5,87	5,8	7,96	7,76	3,02	3,12	5,39	5,4	4,97	4,9	6,7	6,85
Zink (Zn)		2,46	2,46	9,41	5,22	6,23	5,24	35,4	6,61	1,09	1,21	3,55	34,1

1) mit Königwasser-Aufschluss mit Mikrowellenbehandlung

fettgedruckt: ausreißerverdächtiger Wert bzw. wahrscheinlich Kontamination

grau hinterlegte Werte: erhöhte Konzentrationen nach dem Königwasseraufschluss

Anhang B – Bild



Bild B1: Fotos der Bodenmaterialien



Bild B2: Fotos von Bauabfällen und Straßenaufbrüchen

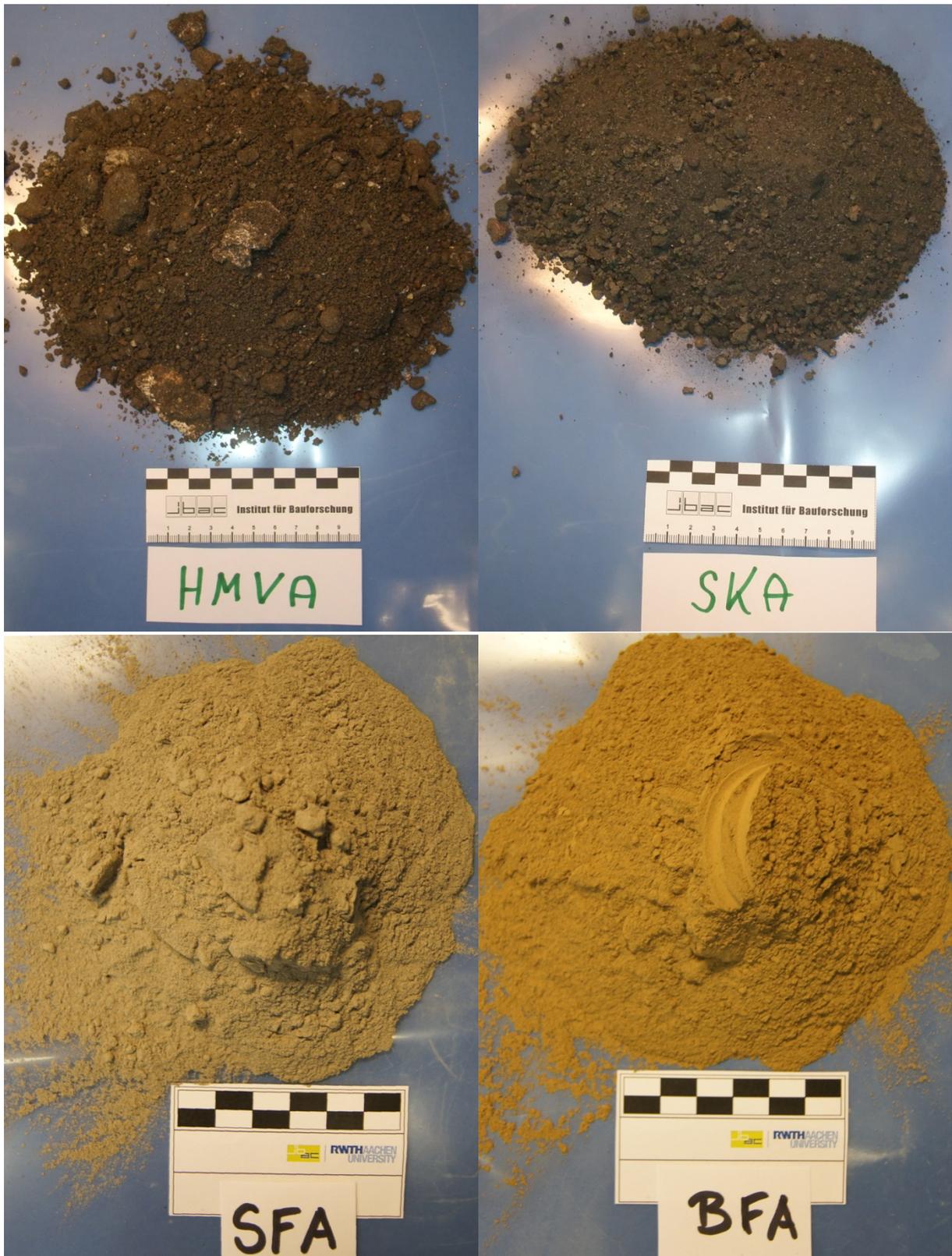


Bild B3: Fotos von Aschen und Schlacken aus Verbrennungsprozessen

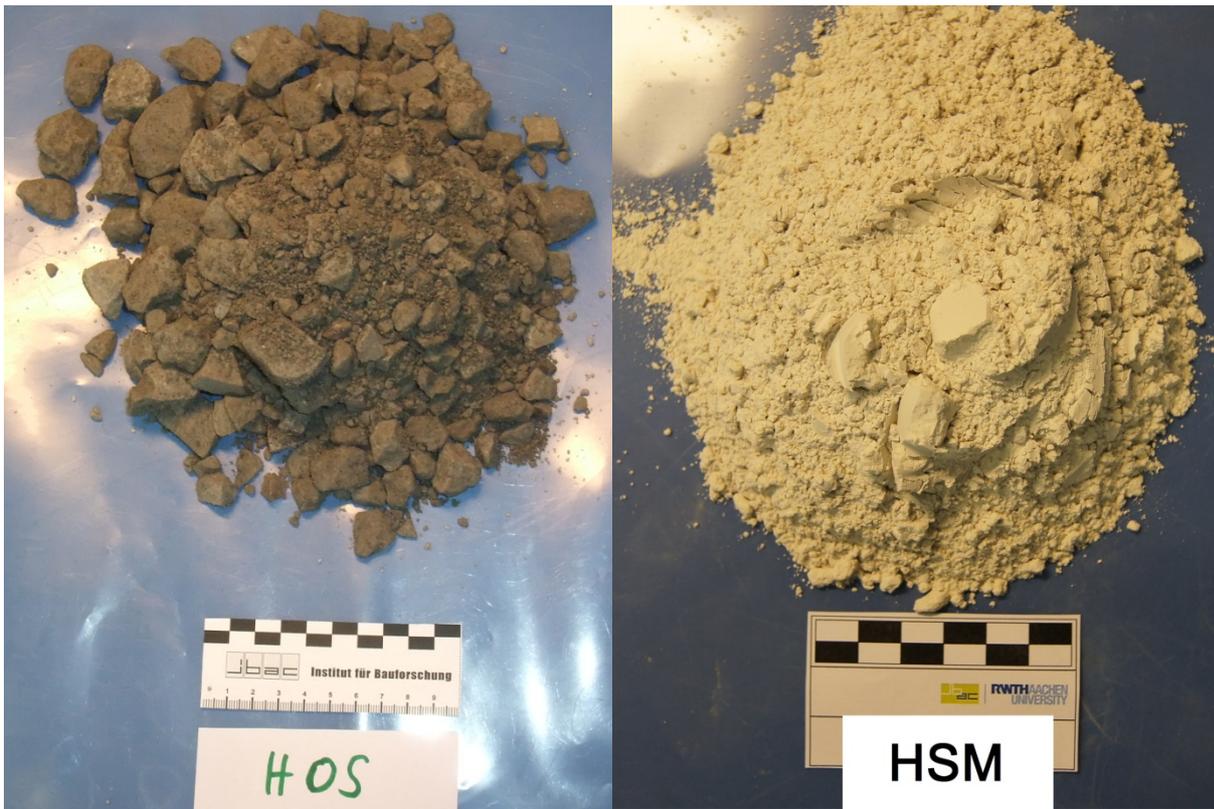


Bild B4: Fotos der Hochofenschlacke und des Hüttensandmehls



Bild B5: Fotos des Gießereirestsands



Bild B6: Fotos der Stahlwerksschlacke und der Edelstahlschlacke

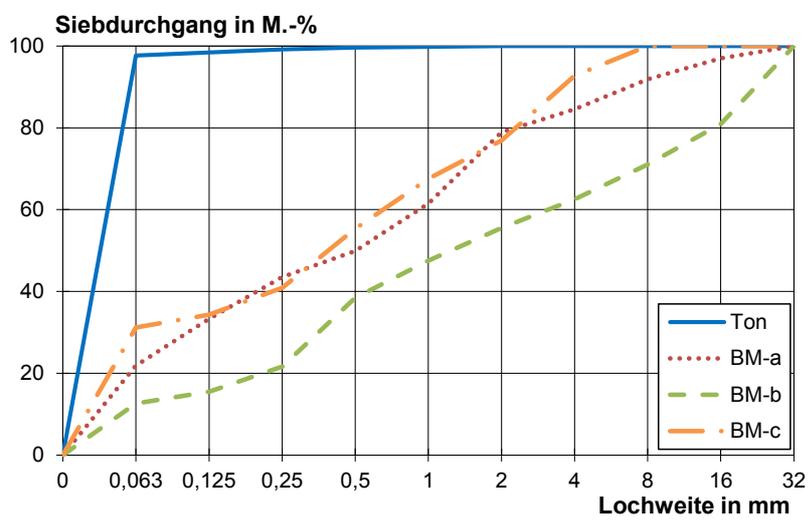


Bild B7: Sieblinie der Ausgangsstoffe analog DIN ISO 11277 – Siebdurchgang von Böden

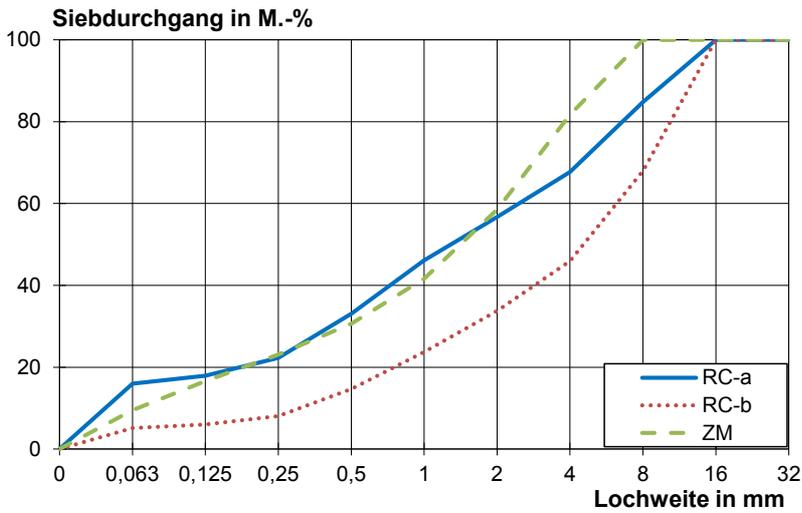


Bild B8: Sieblinie der Ausgangsstoffe analog DIN ISO 11277 – Siebdurchgang von Bauabfall und Straßenaufbruch

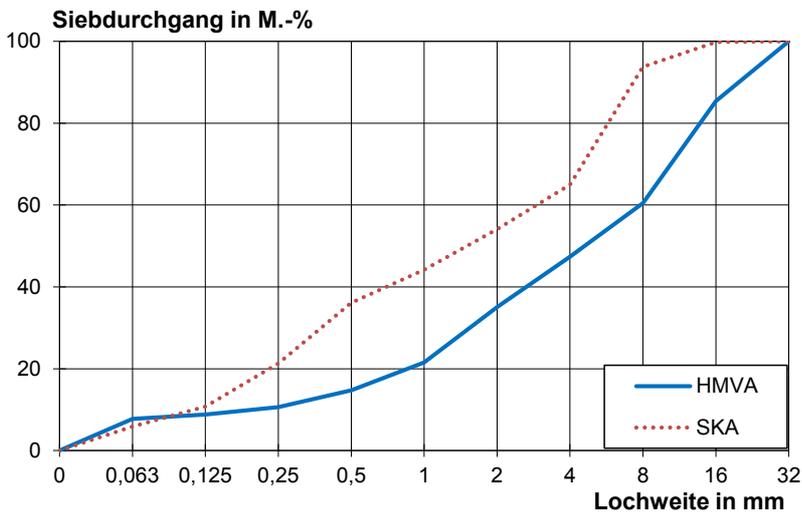


Bild B9: Sieblinie der Ausgangsstoffe analog DIN ISO 11277 – Siebdurchgang von Bodenaschen aus Verbrennungsprozessen

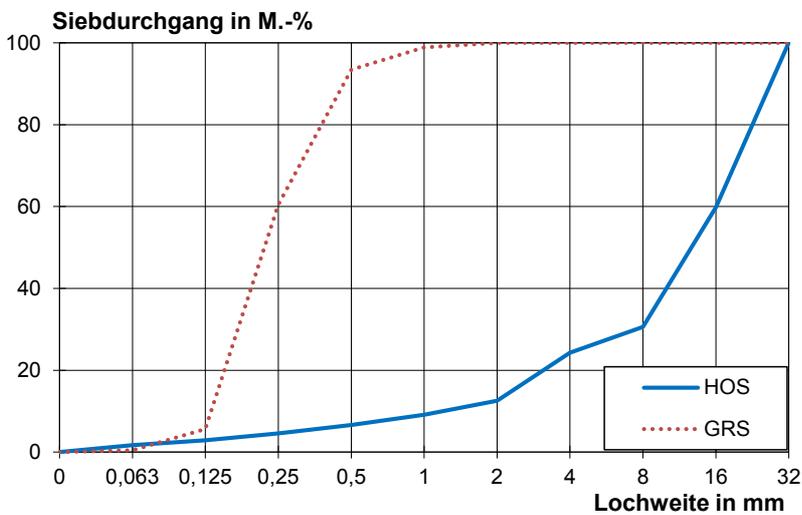


Bild B10: Sieblinie der Ausgangsstoffe analog DIN ISO 11277 – Siebdurchgang von Hochofenstückschlacke und Gießereireistsand

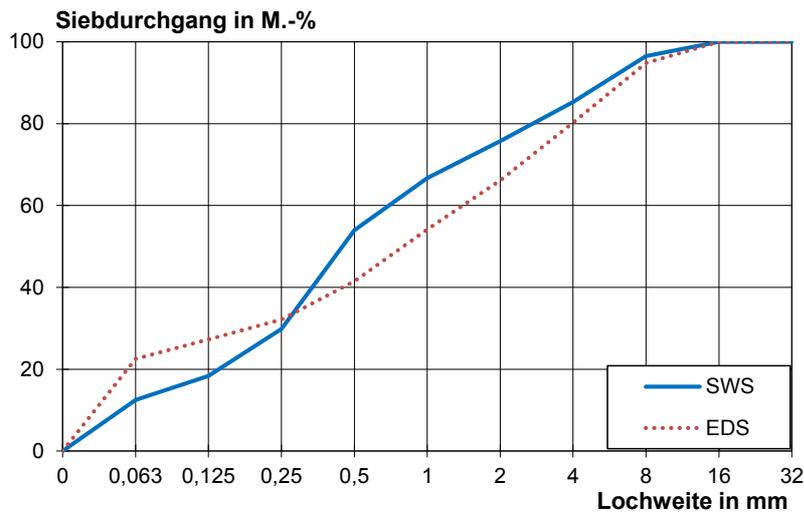


Bild B11: Sieblinie der Ausgangsstoffe analog DIN ISO 11277 – Siebdurchgang von Stahlwerksschlacke und Edelstahlschlacke

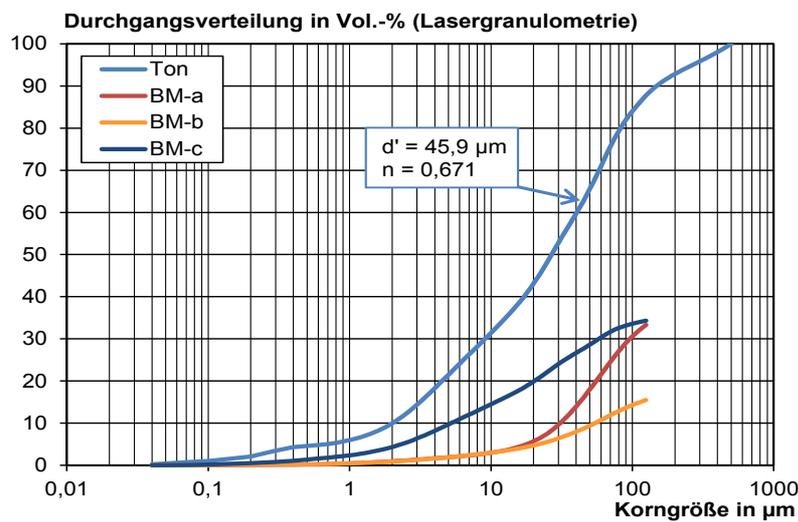


Bild B12: Teilchengrößenverteilung des feinen Anteils der Ausgangsstoffe mittels Lasergranulometrie – Siebdurchgang von Böden

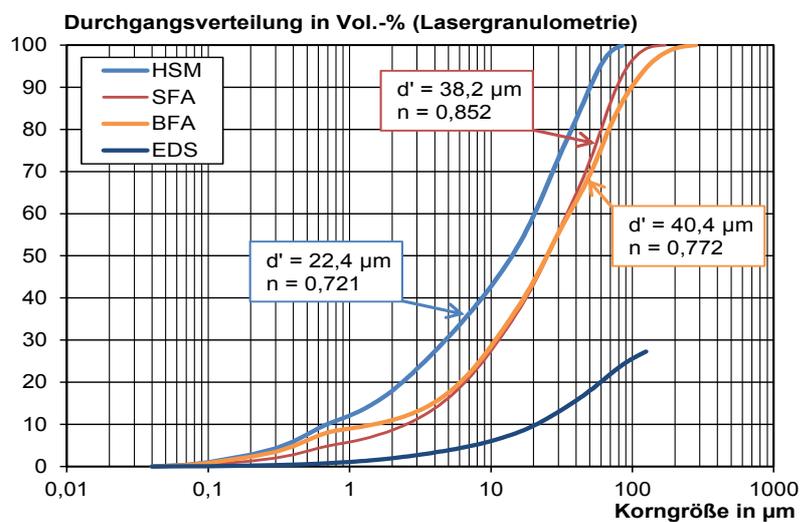


Bild B13: Teilchengrößenverteilung der Ausgangsstoffe analog DIN ISO 11277 – Siebdurchgang von Flugaschen, Hüttensandmehl und Edelstahlschlacke

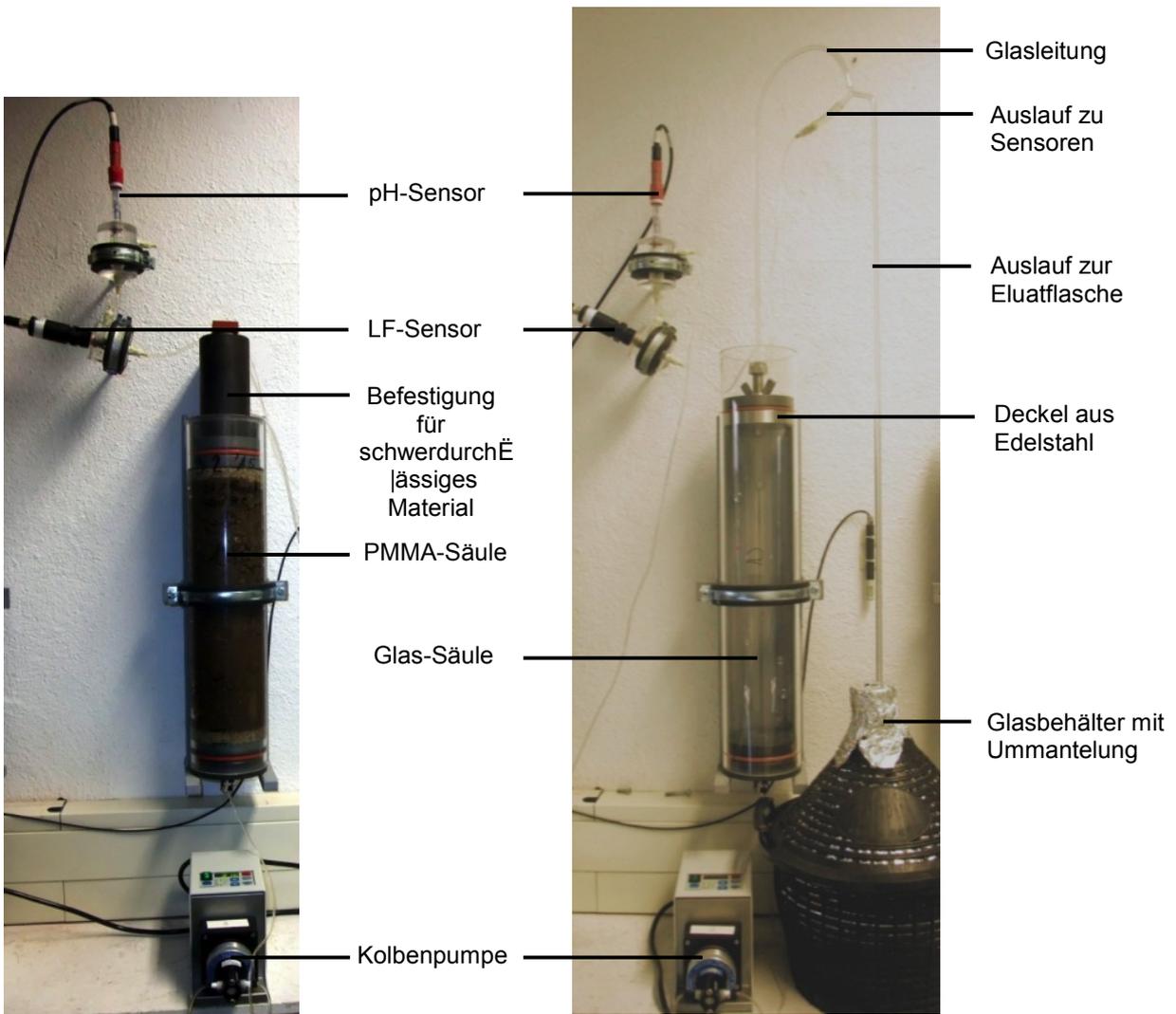


Bild B14: Aufbau der Säuleneinrichtungen. Links: PMMA-Säule mit Material und Befestigung; Rechts: Glas-Säule mit Glasleitung

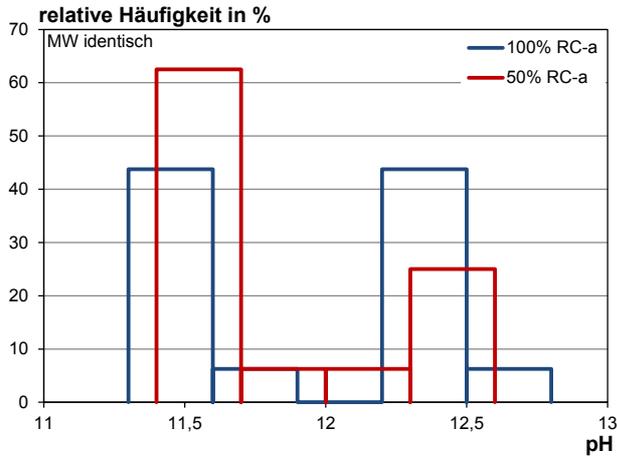


Bild B15: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): pH-Werte und Leitfähigkeiten (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren)

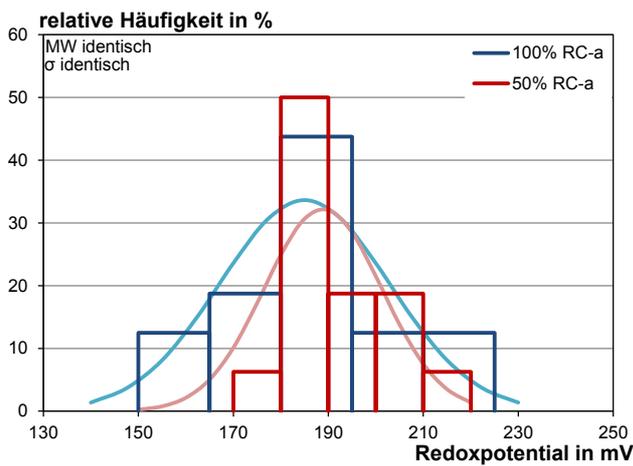


Bild B16: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Redoxpotentiale bei (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren)

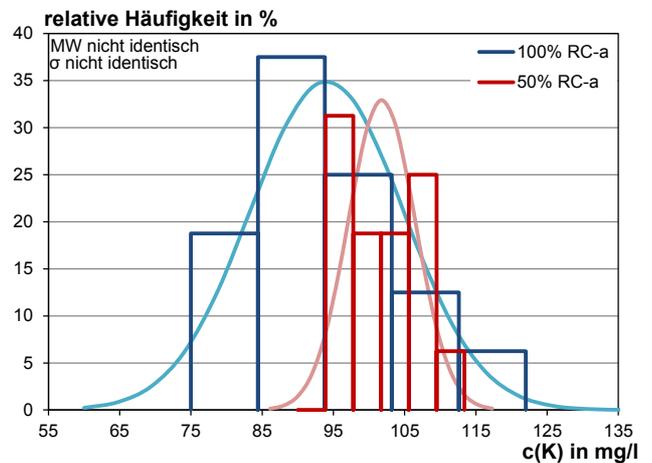
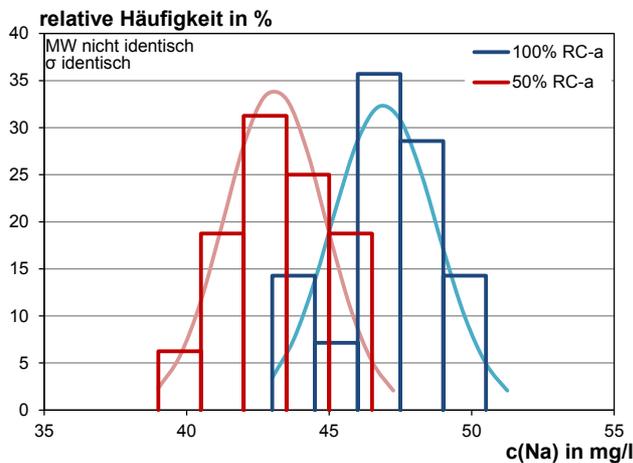


Bild B17: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Natrium- und Kaliumkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren)

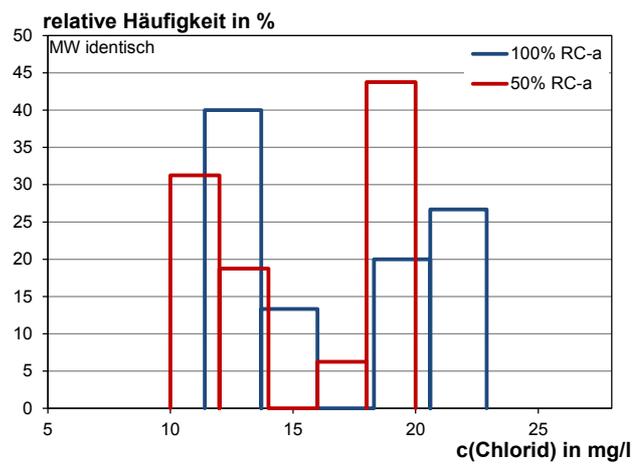
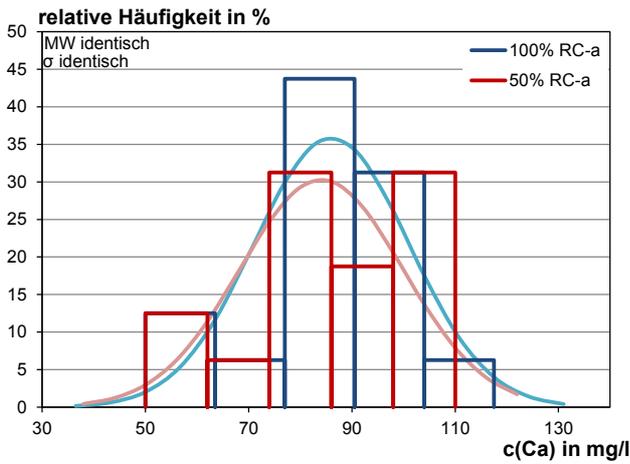


Bild B18: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Calcium- und Chloridkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren)

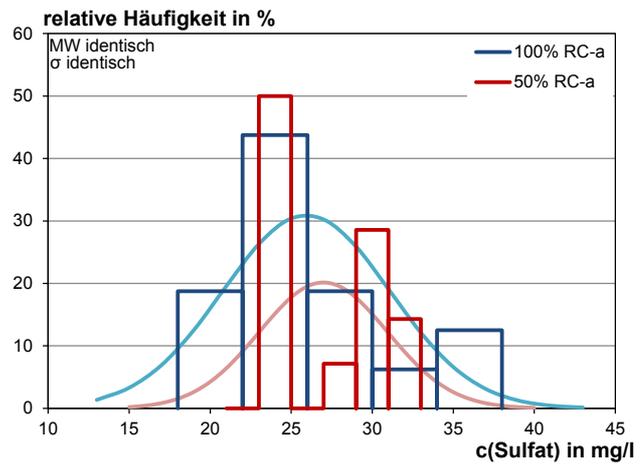
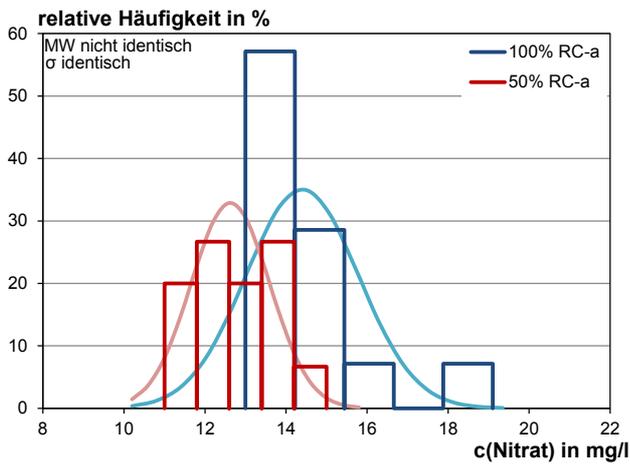


Bild B19: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Nitrat- und Sulfatkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren)

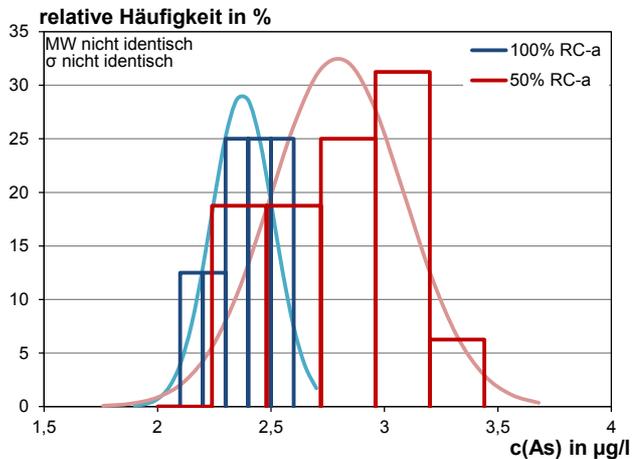
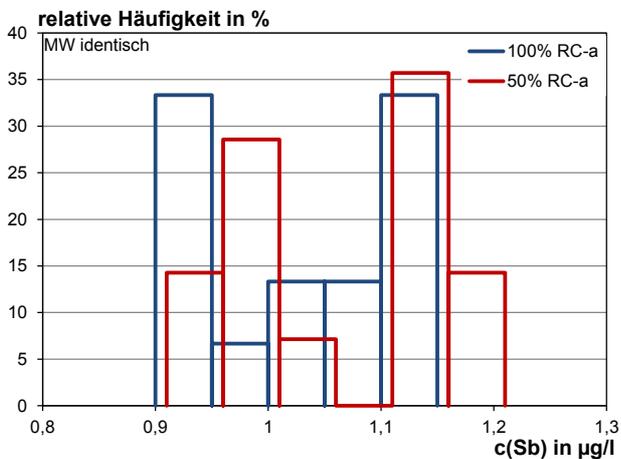


Bild B20: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Antimon- und Arsenkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren)

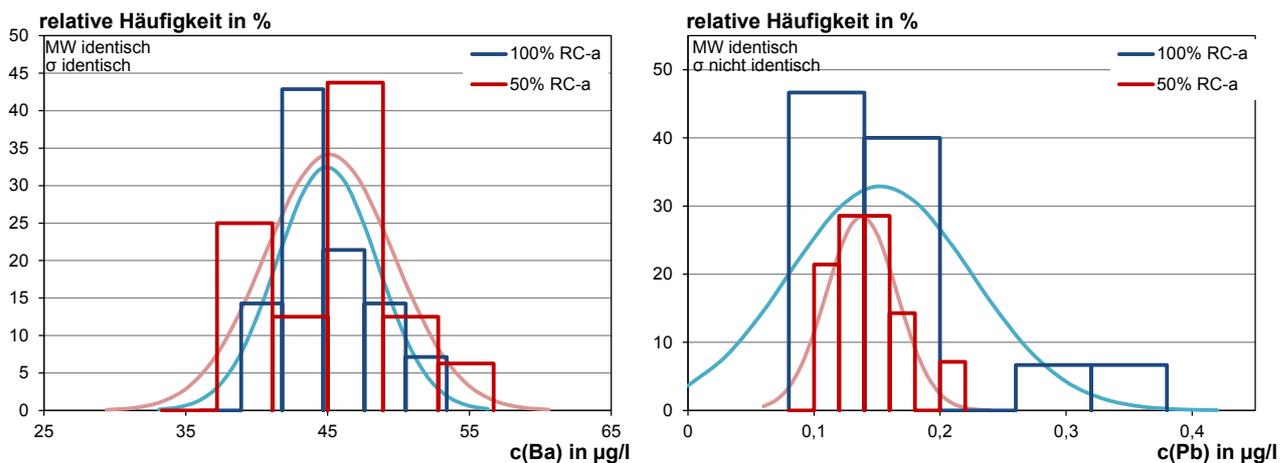


Bild B21: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Barium- und Bleikonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren)

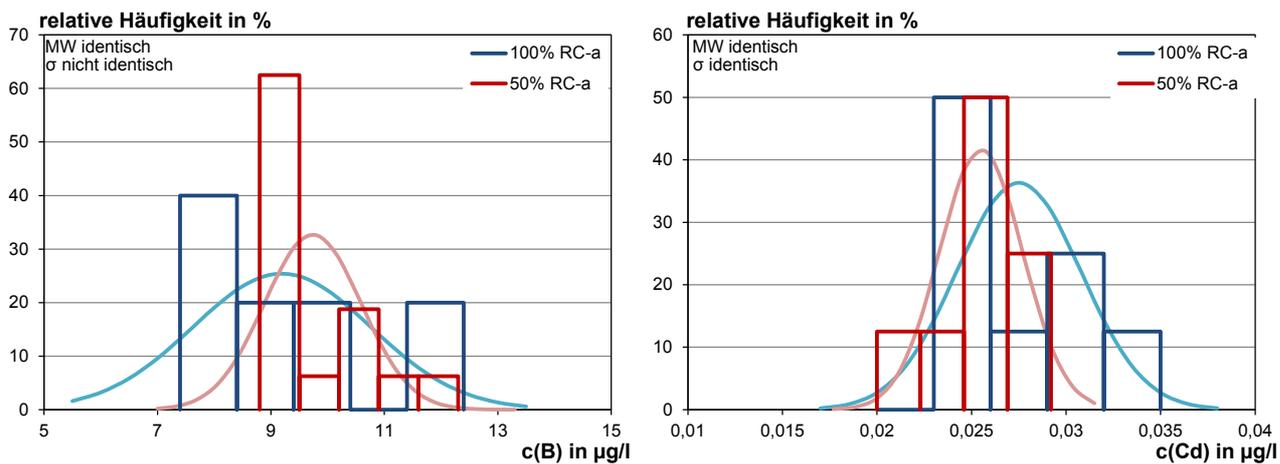


Bild B22: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Bor- und Cadmiumkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren; Cd nur beim Analyselabor 2 quantifizierbar)

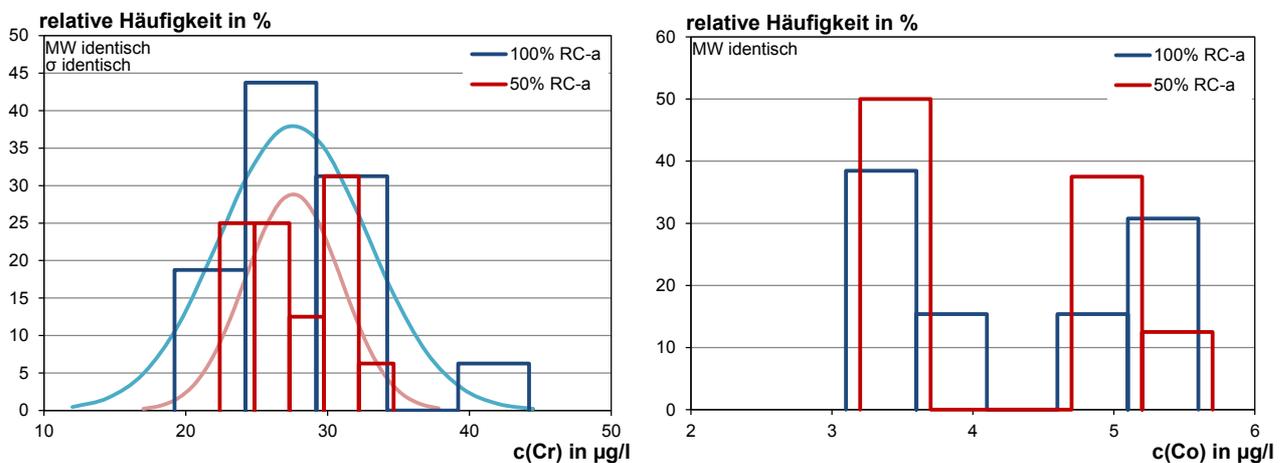


Bild B23: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Chrom- und Kobaltkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren)

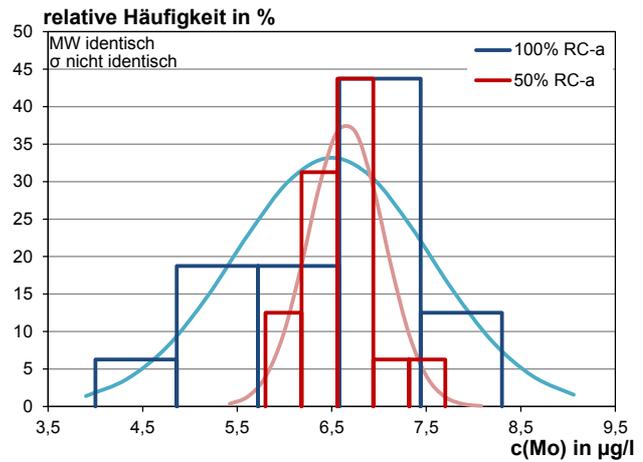
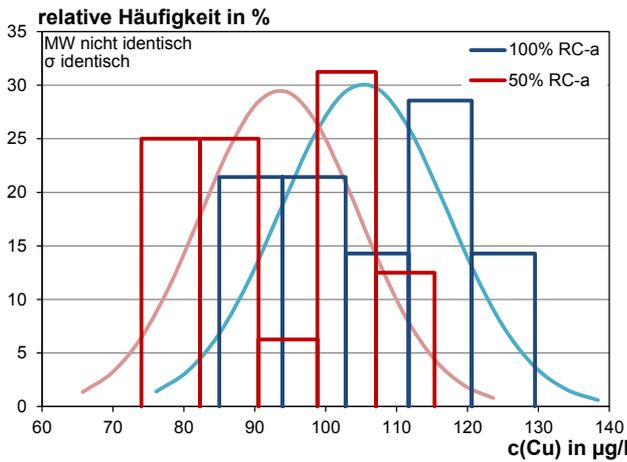


Bild B24: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Kupfer- und Molybdänkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren)

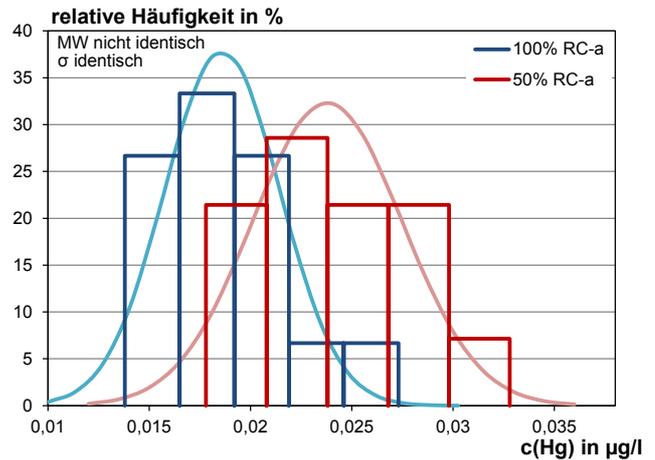
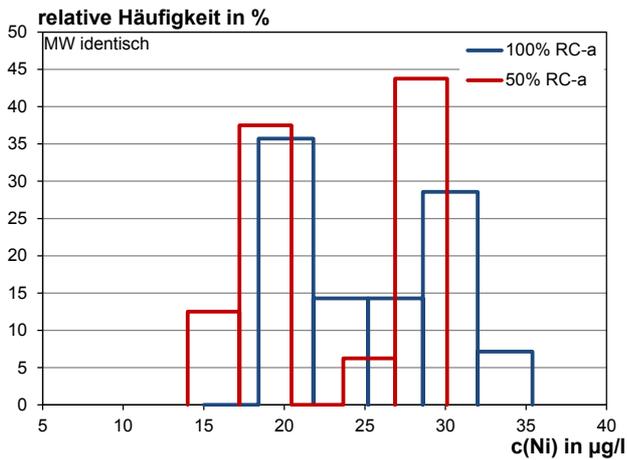


Bild B25: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Nickel- und Quecksilberkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren)

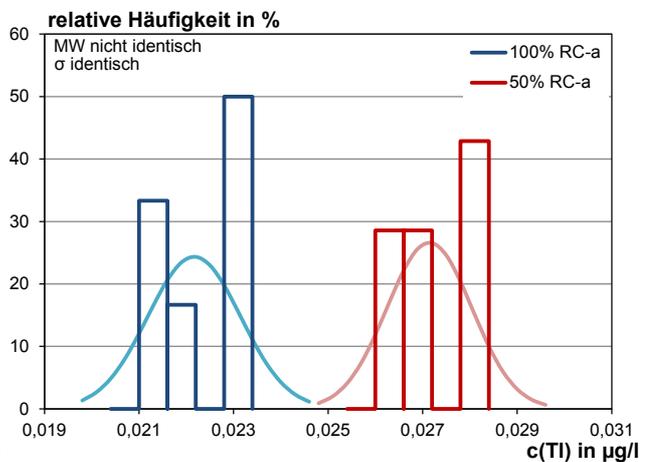
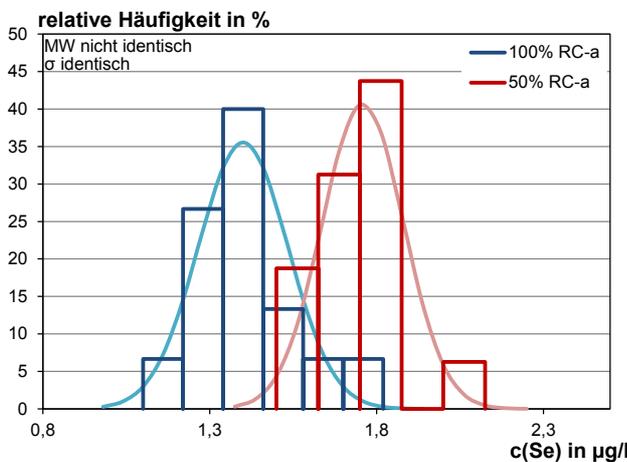


Bild B26: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Selen- und Thalliumkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren; Tl nur beim Analyselabor 2 quantifizierbar)

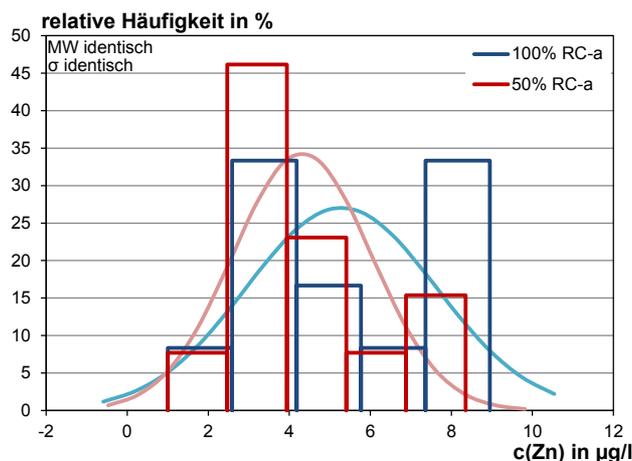
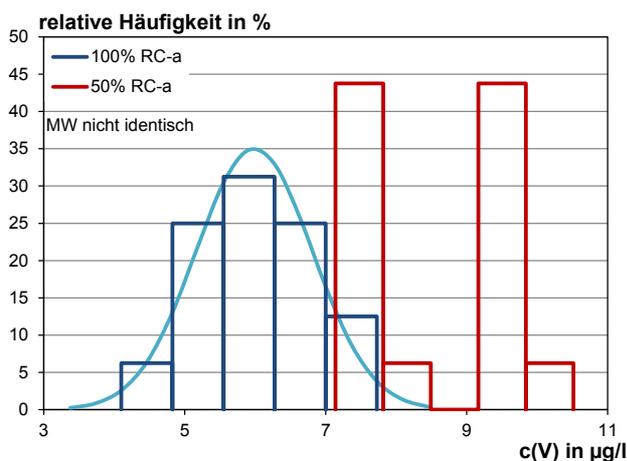


Bild B27: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-a** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Vanadium- und Zinkkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren)

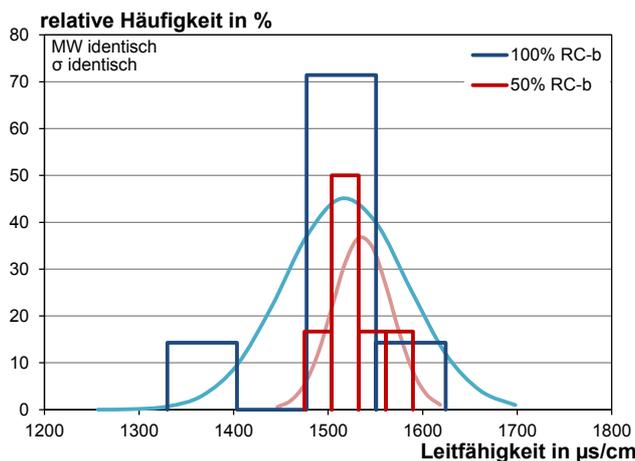
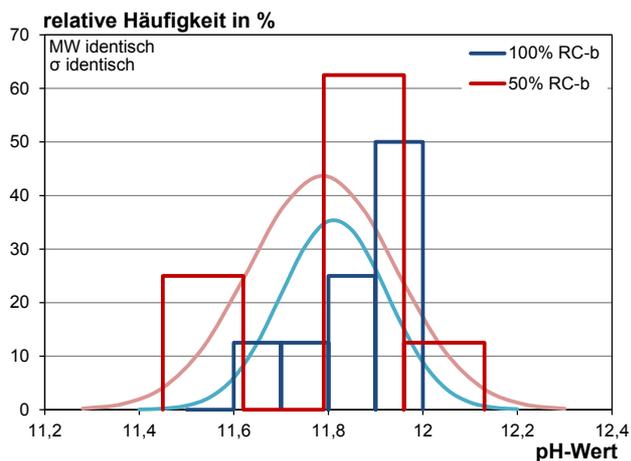


Bild B28: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): pH-Werte und Leitfähigkeiten (8-Fachbestimmungen an einem Analyselabor)

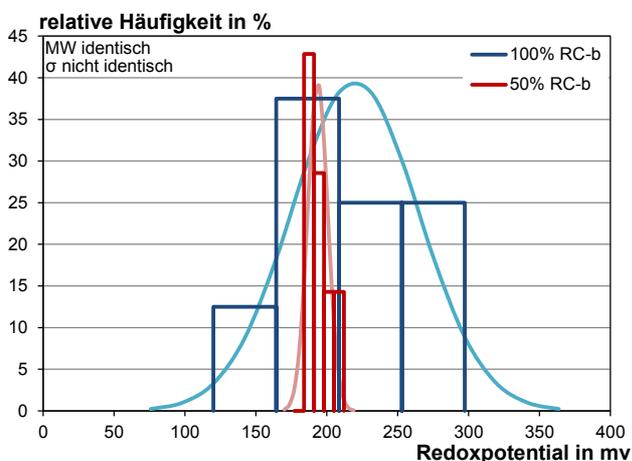


Bild B29: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Redoxpotentiale (8-Fachbestimmungen an einem Analyselabor)

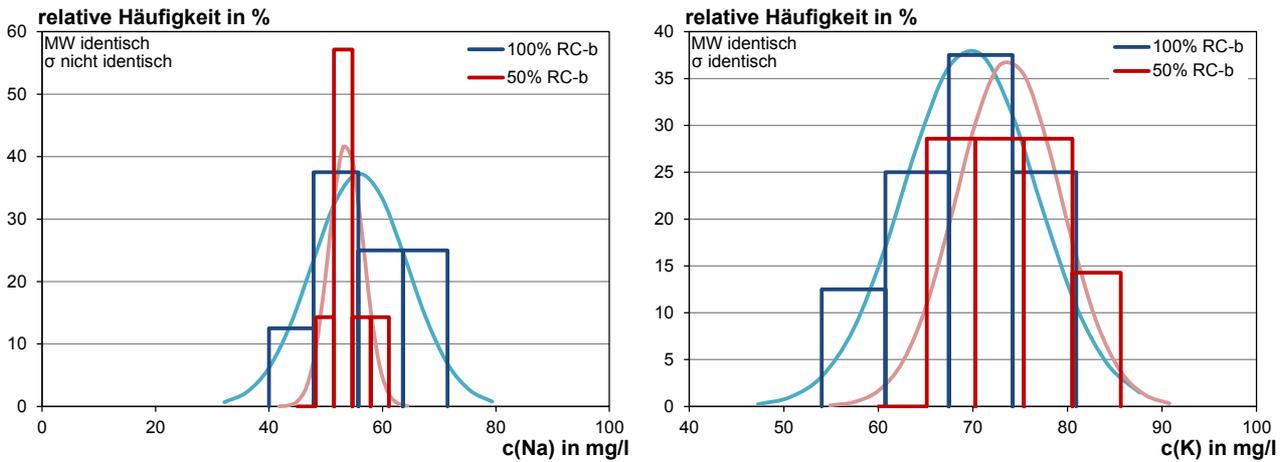


Bild B30: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Natrium- und Kaliumkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an einem Analyselabor)

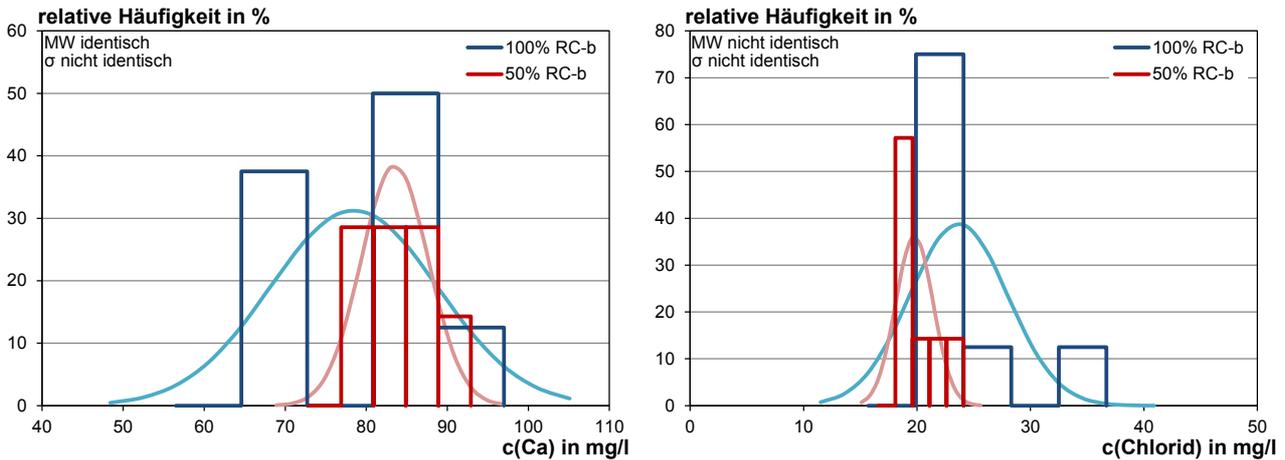


Bild B31: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Calcium- und Chloridkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an einem Analyselabor)

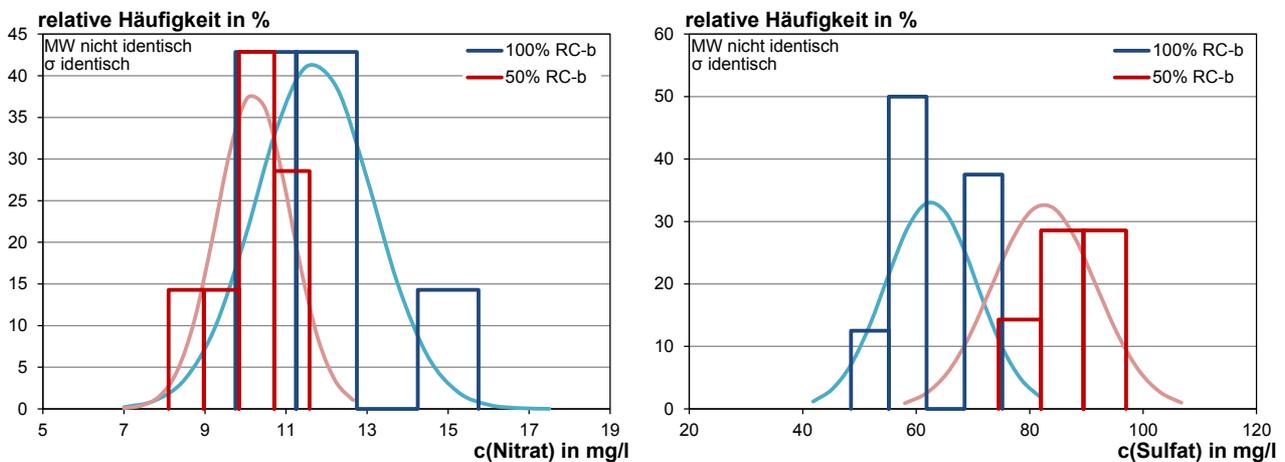


Bild B32: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Nitrat- und Sulfatkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an einem Analyselabor)

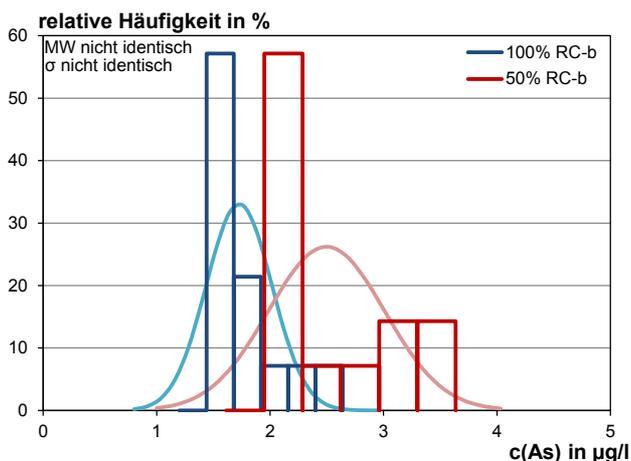
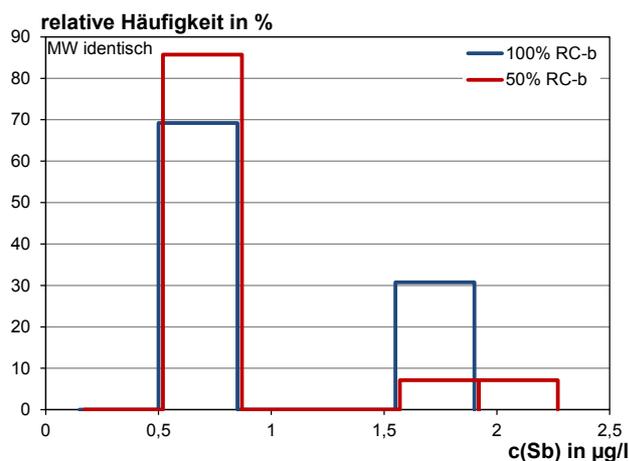


Bild B33: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Antimon- und Arsenkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 2 Analyselaboren, da nur bei den Analyselaboren 1 und 2 quantifizierbar)

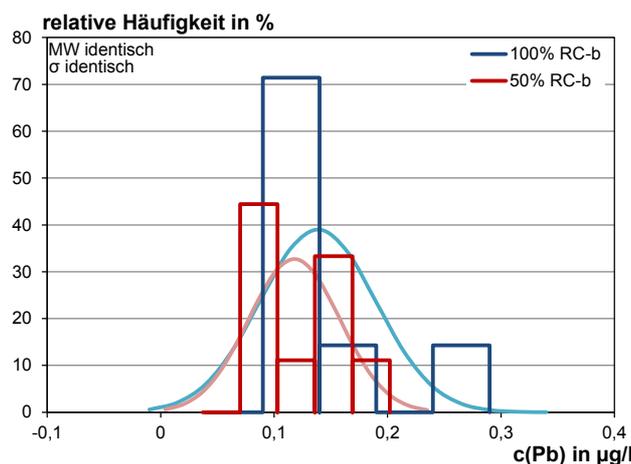
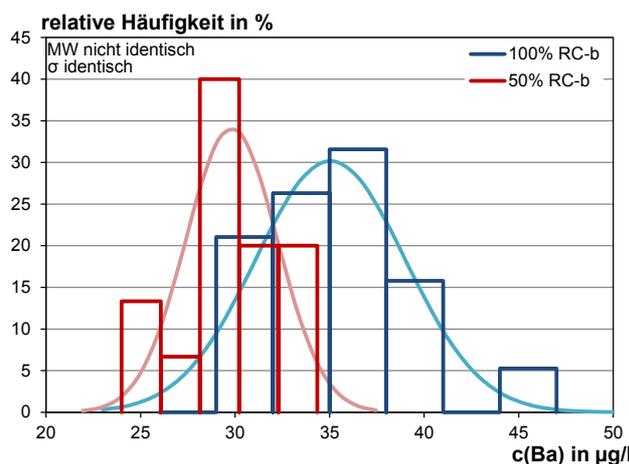


Bild B34: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Barium- und Bleikonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 3 Analyselaboren; Pb nur beim Analyselabor 2 quantifizierbar)

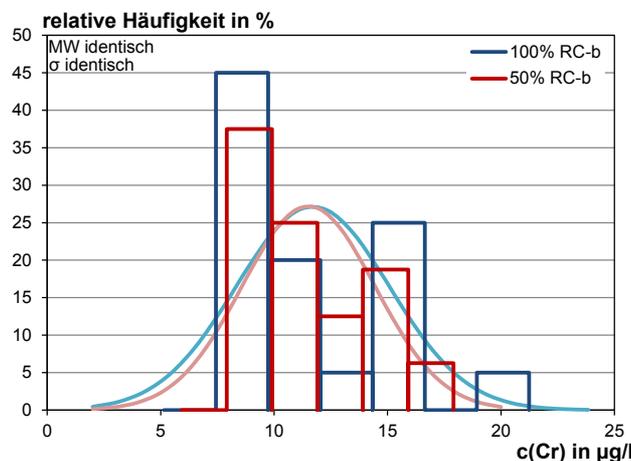
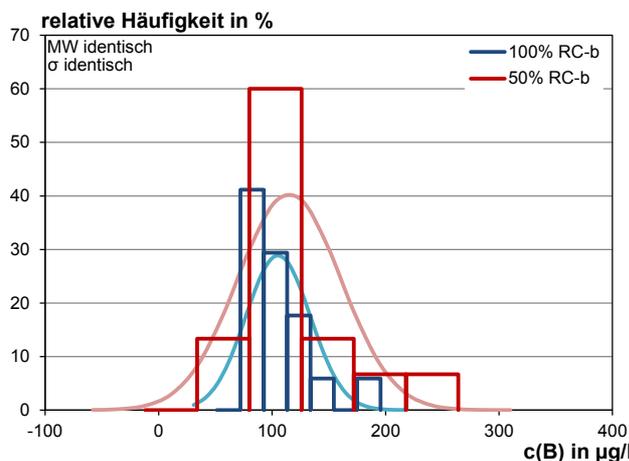


Bild B35: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Bor- und Chromkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 3 Analyselaboren)

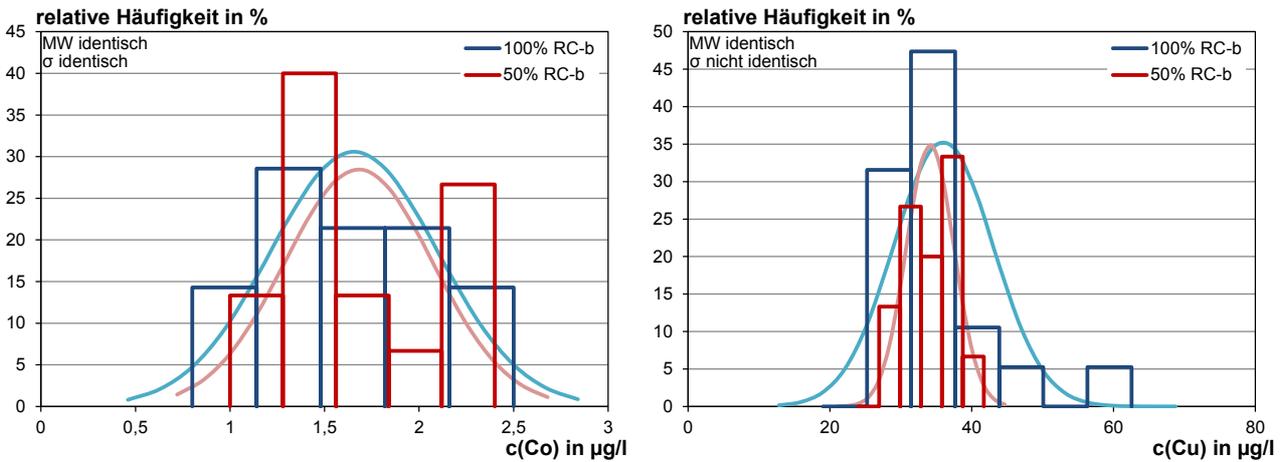


Bild B36: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Kobalt- und Kupferkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 3 Analyselaboren)

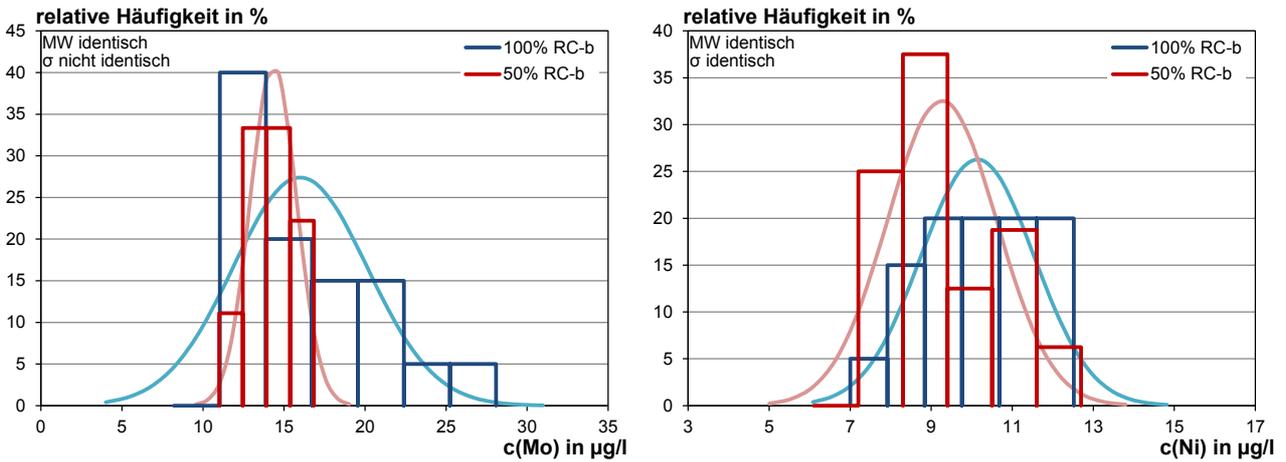


Bild B37: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Molybdän- und Nickelkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 3 Analyselaboren)

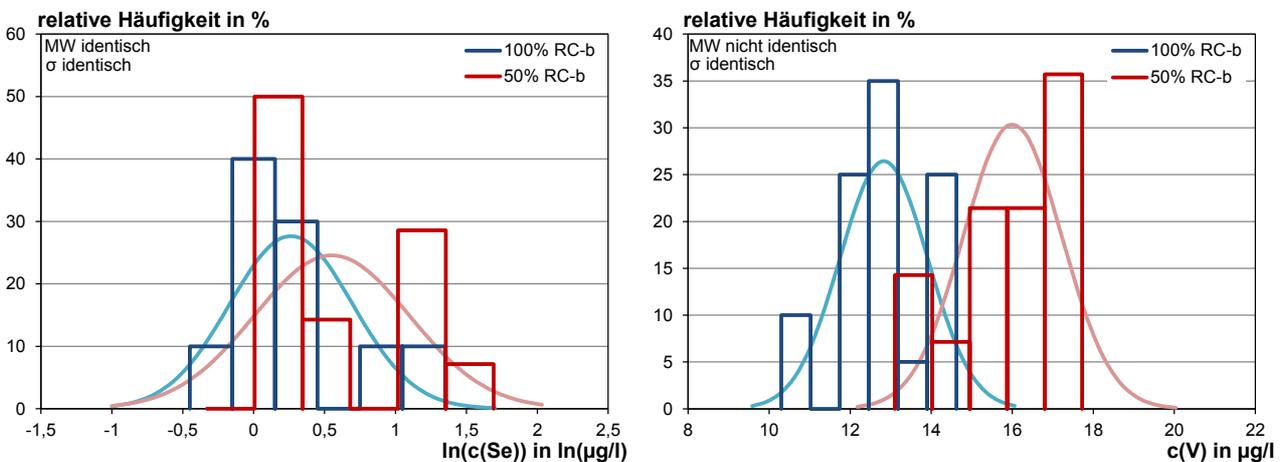


Bild B38: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Selen- und Vanadiumkonzentrationen (8-Fachbestimmungen an 3 Analyselaboren; Se nur beim Analyselabor 2 quantifizierbar)

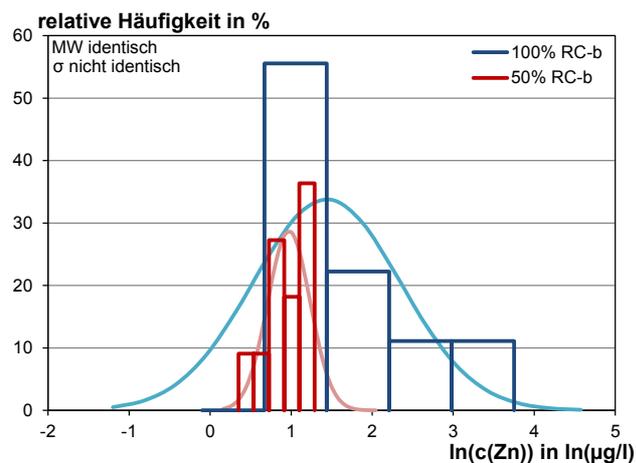


Bild B39: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Zink-Konzentrationen (8-Fachbestimmungen an 3 Analyselaboren)

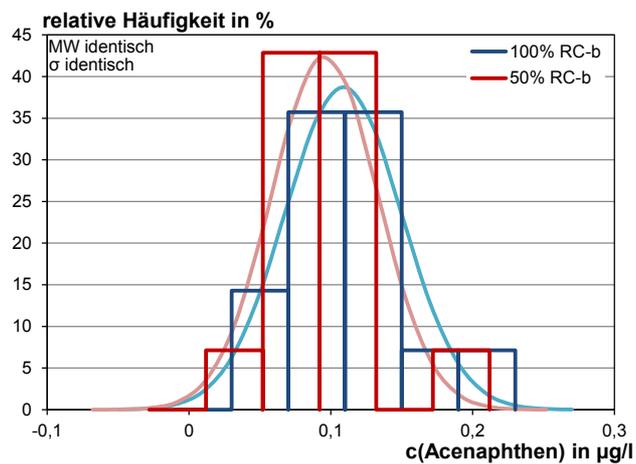
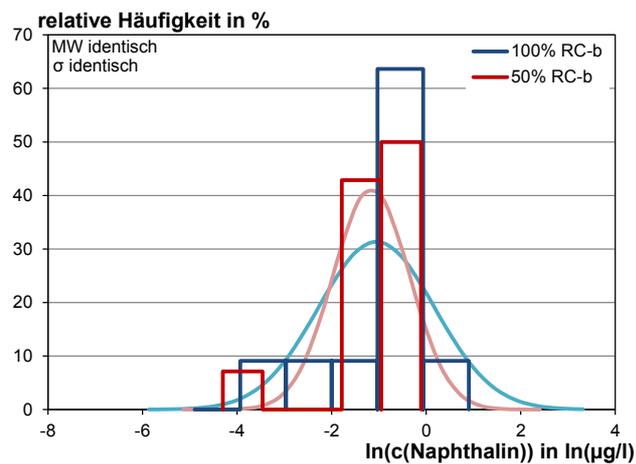


Bild B40: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Naphthalin- und Acenaphthen-Konzentrationen (8-Fachbestimmungen an 3 Analyselaboren)

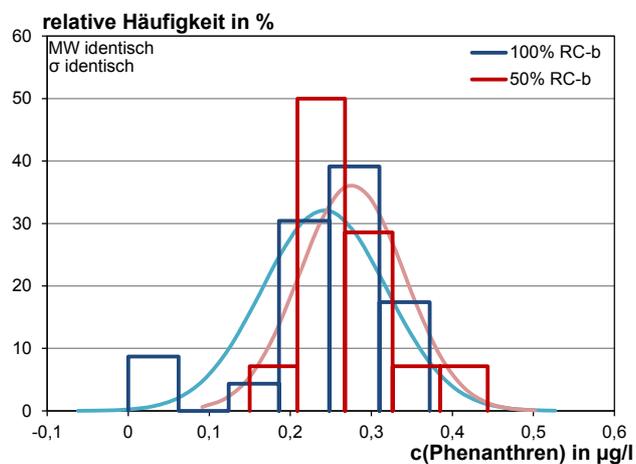
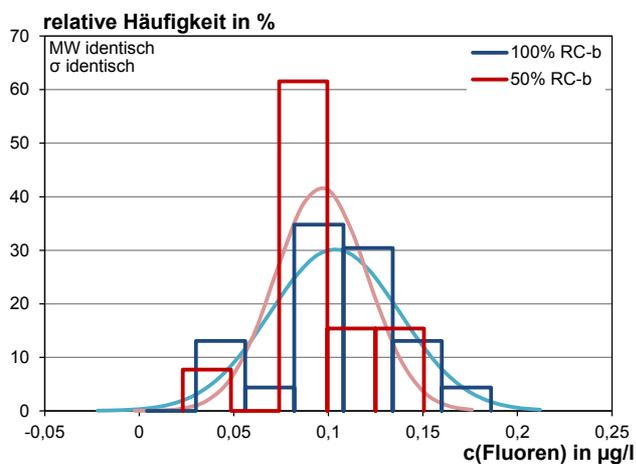


Bild B41: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Fluoren- und Phenanthren-Konzentrationen (8-Fachbestimmungen an 3 Analyselaboren)

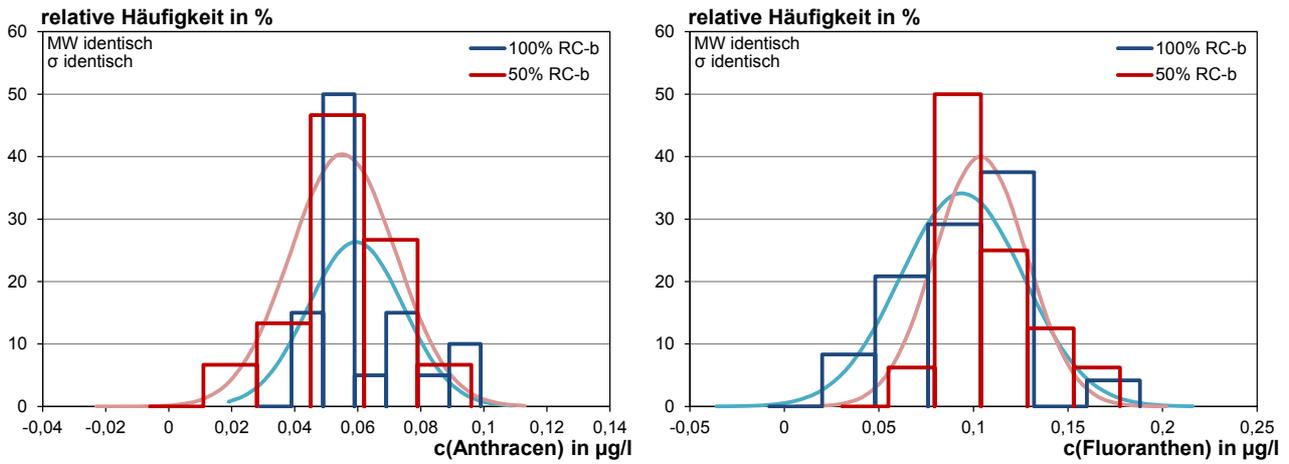


Bild B42: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Anthracen- und Fluoranthene-Konzentrationen (8-Fachbestimmungen an 3 Analyzelaboren)

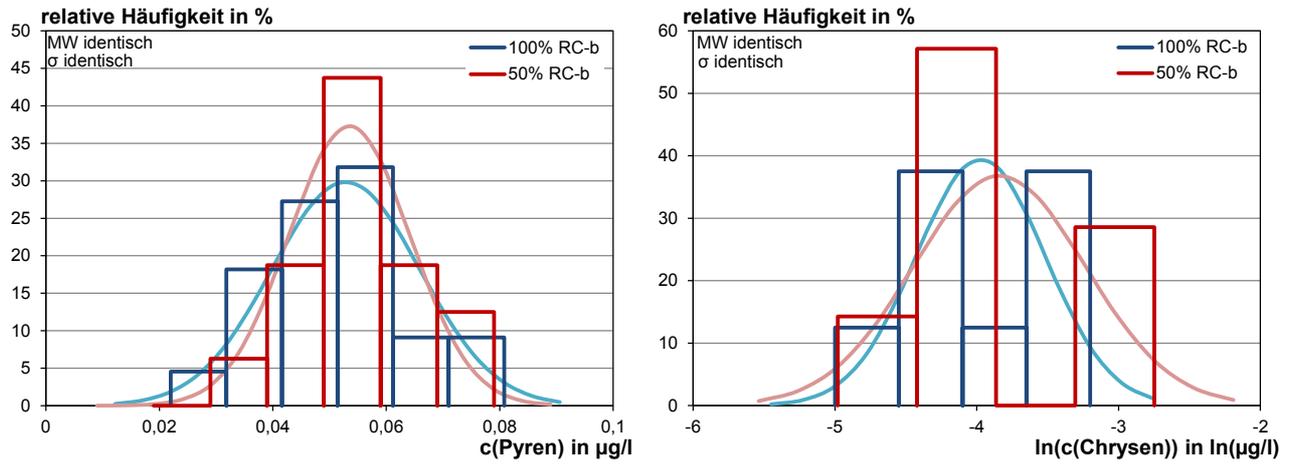


Bild B43: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Pyren- und Chrysen-Konzentrationen (8-Fachbestimmungen an 3 Analyzelaboren)

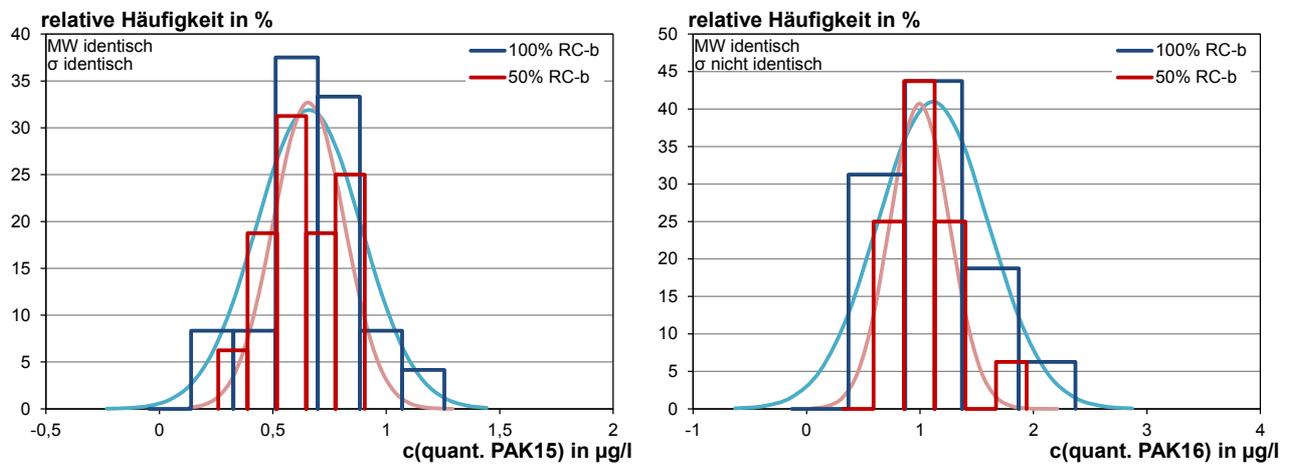


Bild B44: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Quantifizierbare PAK₁₅- und PAK₁₆-Konzentrationen (8-Fachbestimmungen an 3 Analyzelaboren)

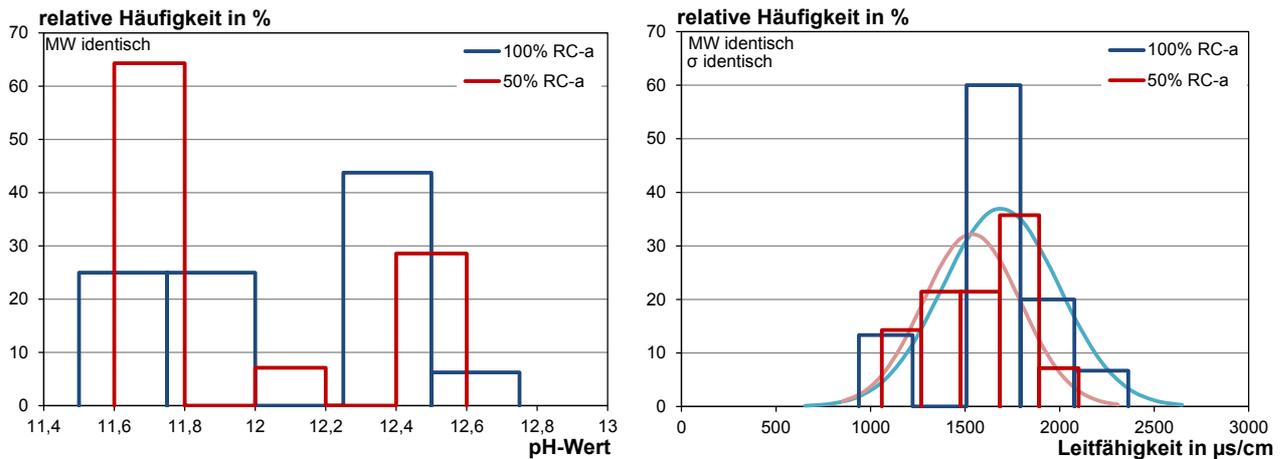


Bild B45: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): pH-Wert und Leitfähigkeiten (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

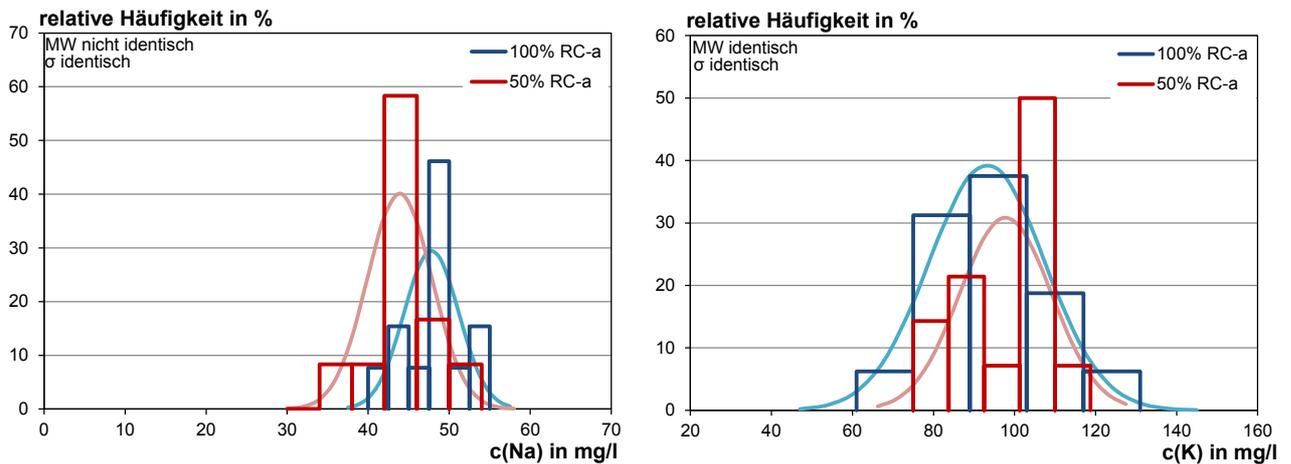


Bild B46: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Natrium- und Kaliumkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

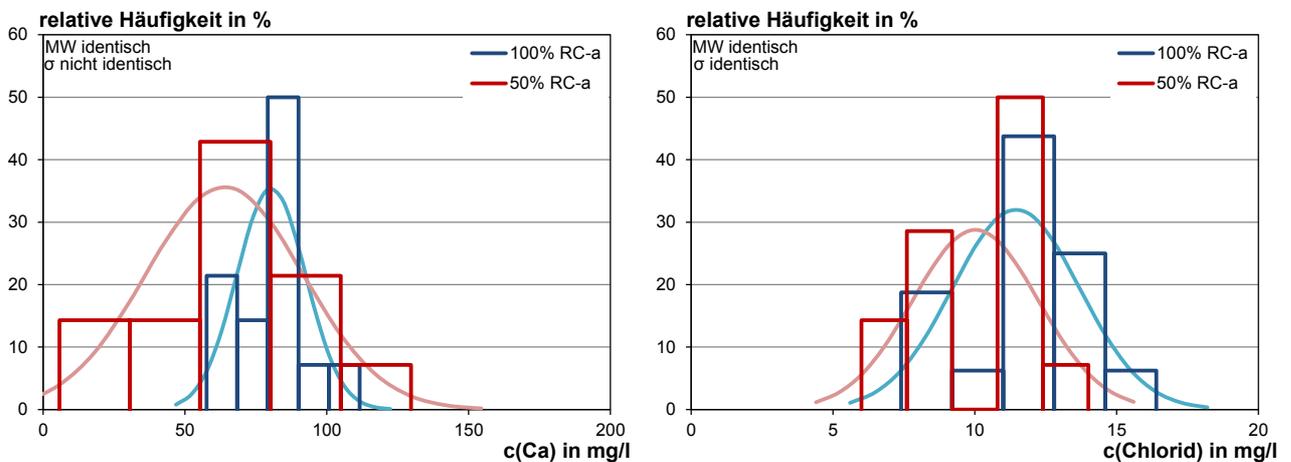


Bild B47: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Calcium- und Chloridkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

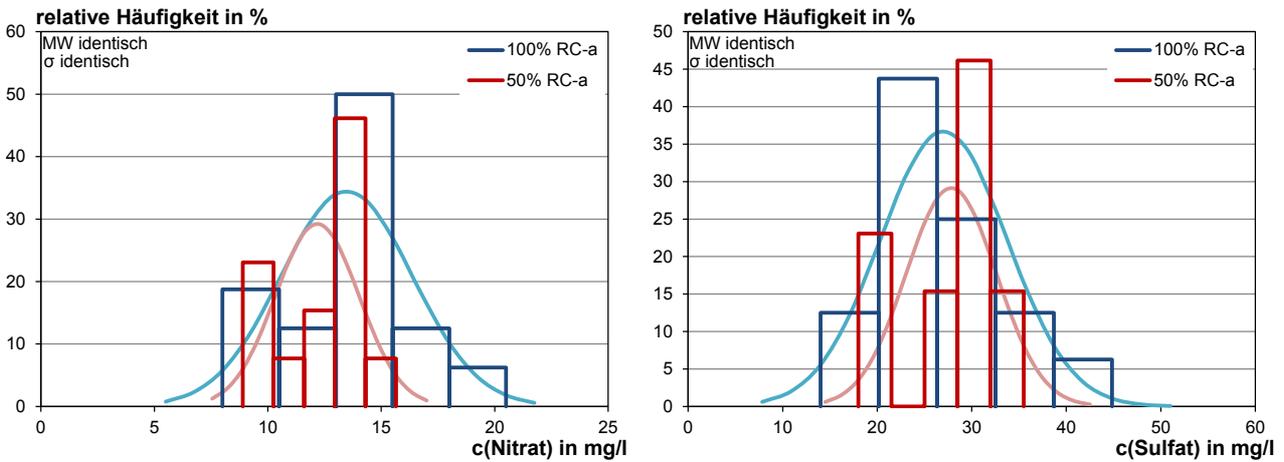


Bild B48: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-a** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Nitrat- und Sulfatkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

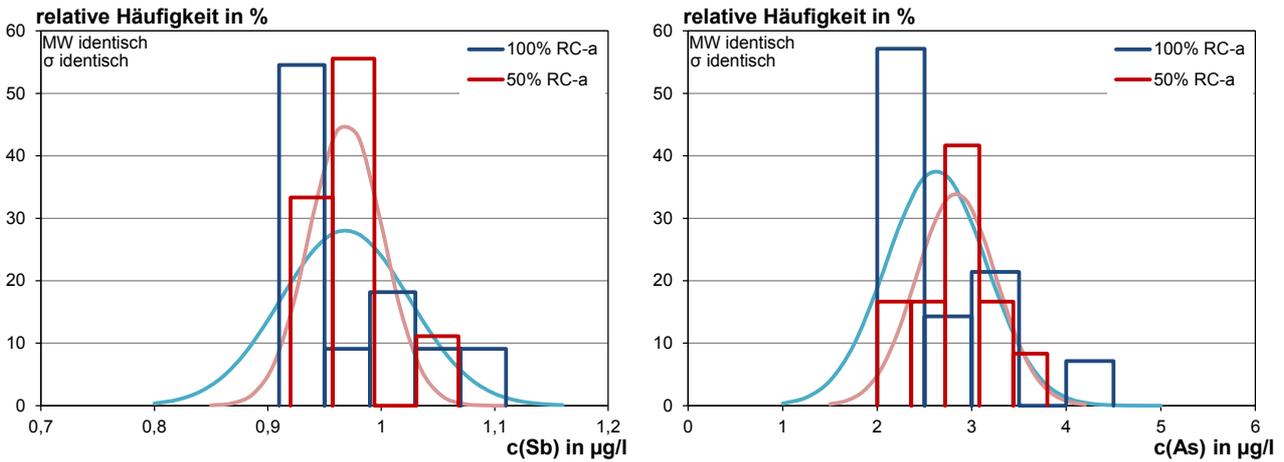


Bild B49: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-a** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Antimon- und Arsenkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

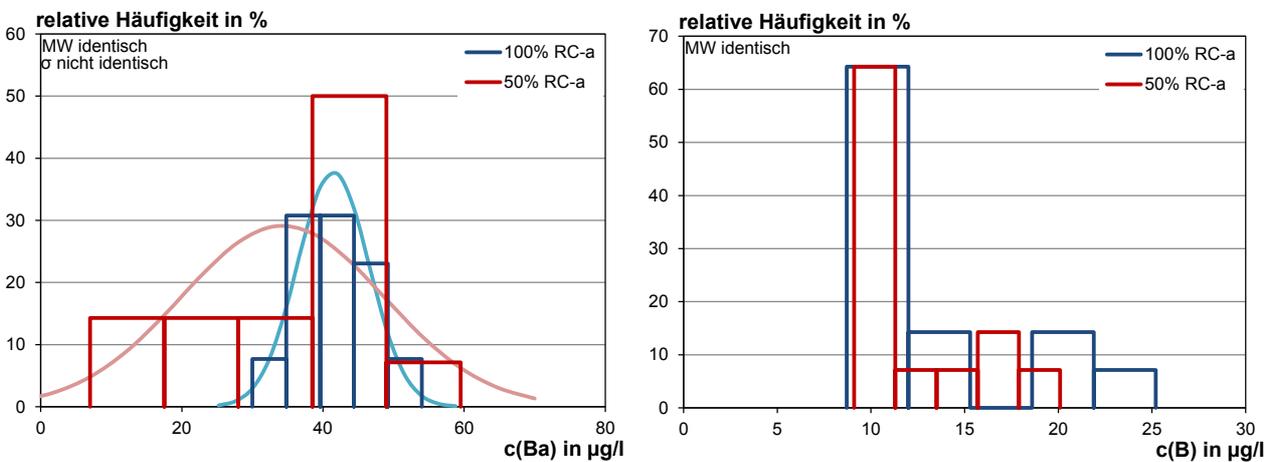


Bild B50: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-a** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Barium- und Borkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

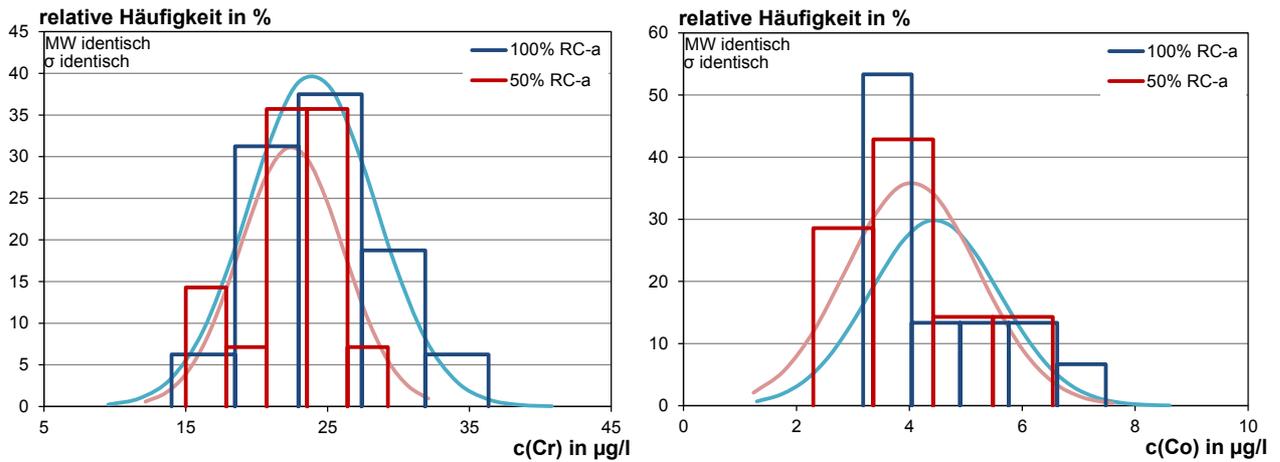


Bild B51: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Chrom- und Kobaltkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

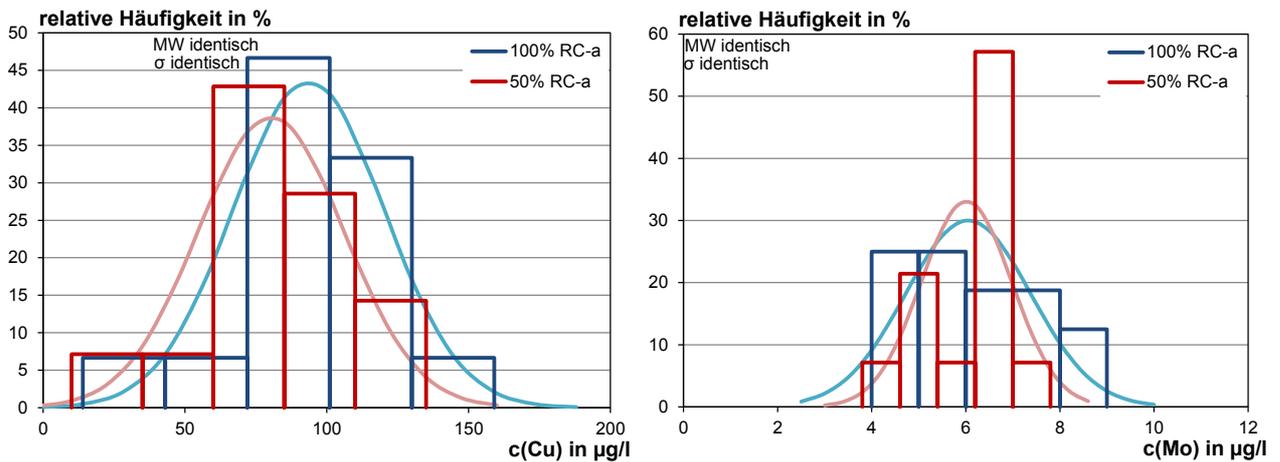


Bild B52: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Kupfer- und Molybdänkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

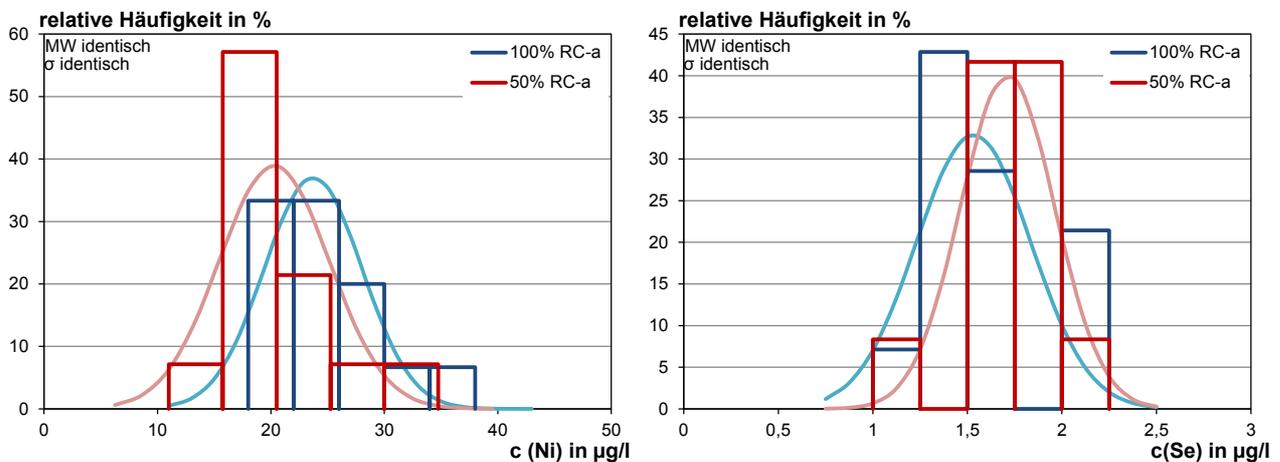


Bild B53: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-a mit und ohne Sandzumischung (50 %): Nickel- und Selenkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

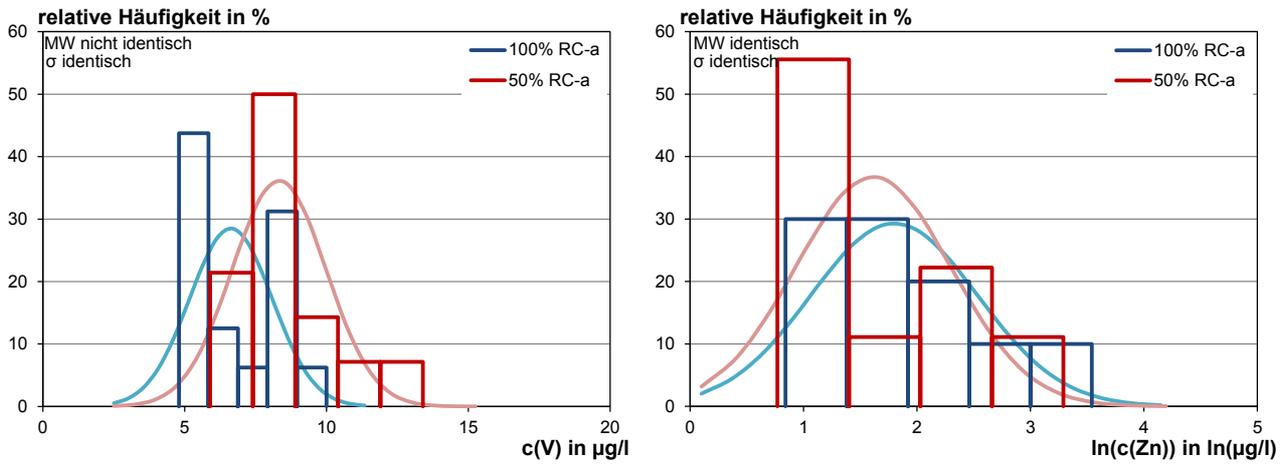


Bild B54: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-a** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Vanadium- und Zinkkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

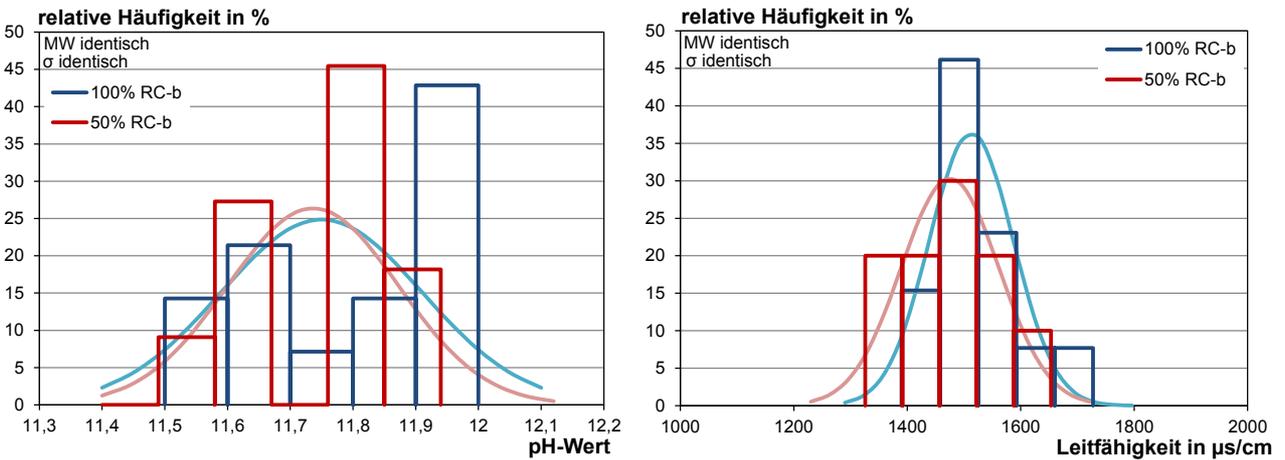


Bild B55: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): pH-Werte und Leitfähigkeiten (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

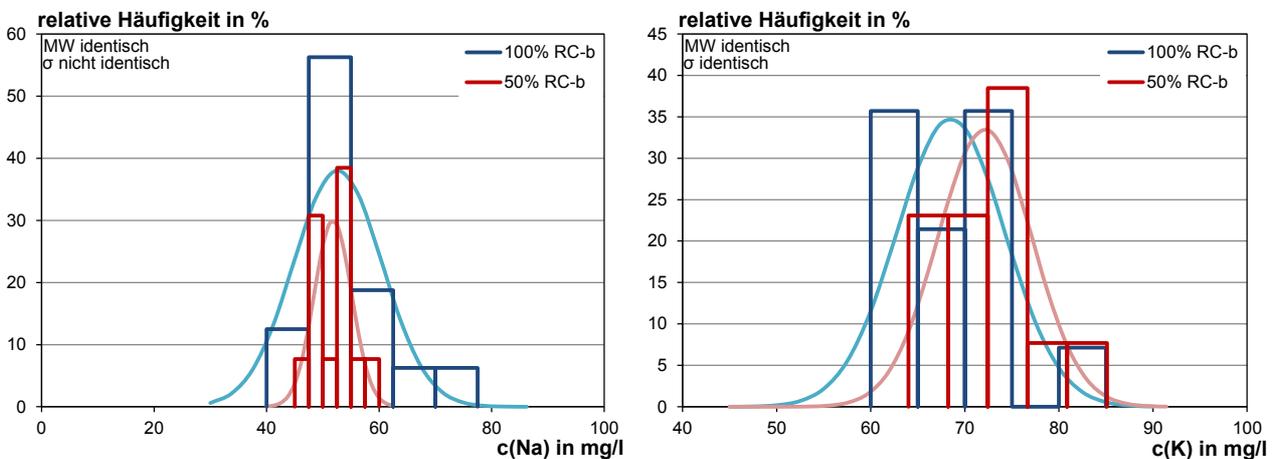


Bild B56: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Natrium- und Kaliumkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

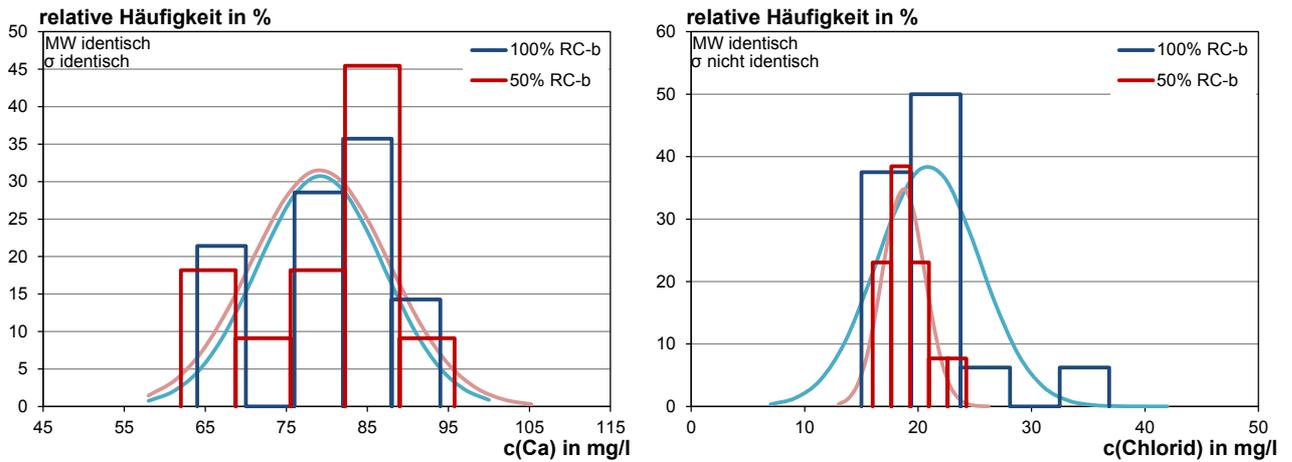


Bild B57: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Calcium- und Chloridkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

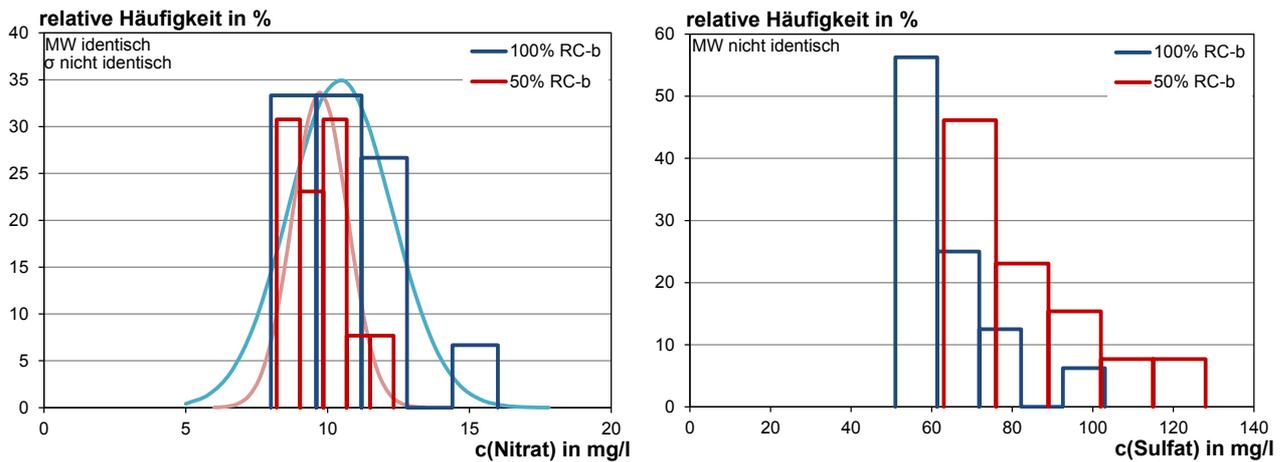


Bild B58: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Nitrat- und Sulfatkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

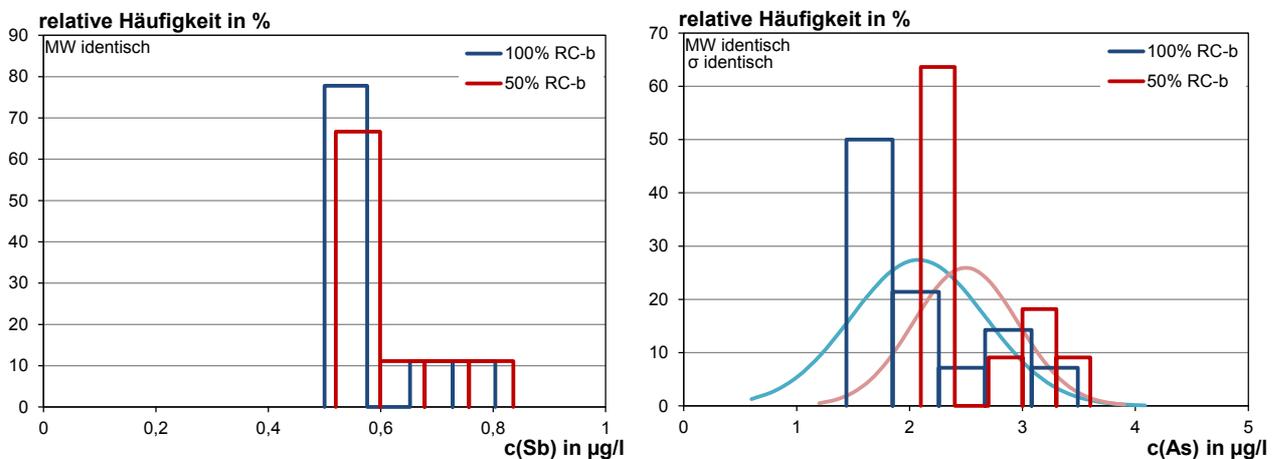


Bild B59: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Antimon- und Arsenkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

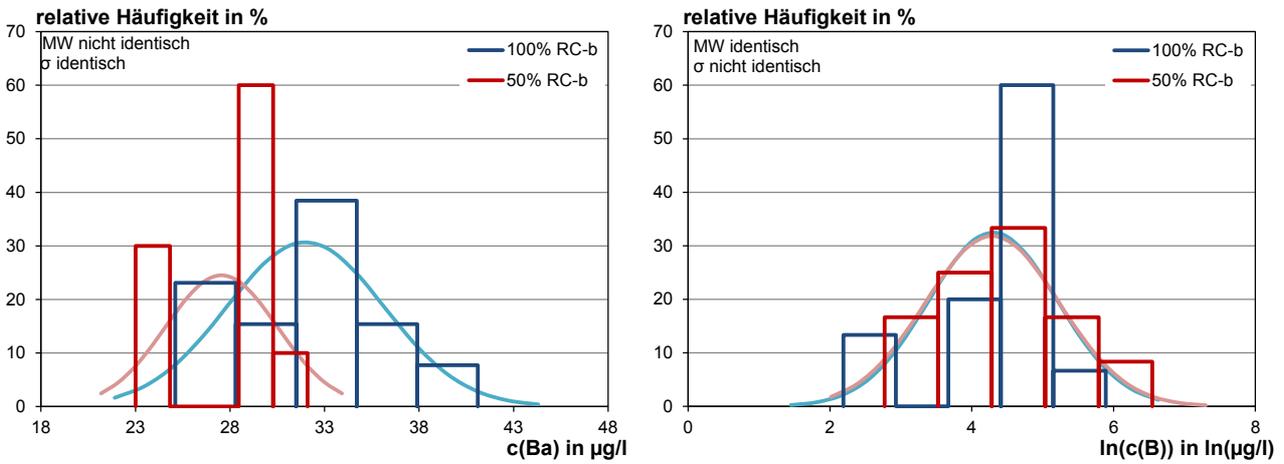


Bild B60: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Barium- und Borkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

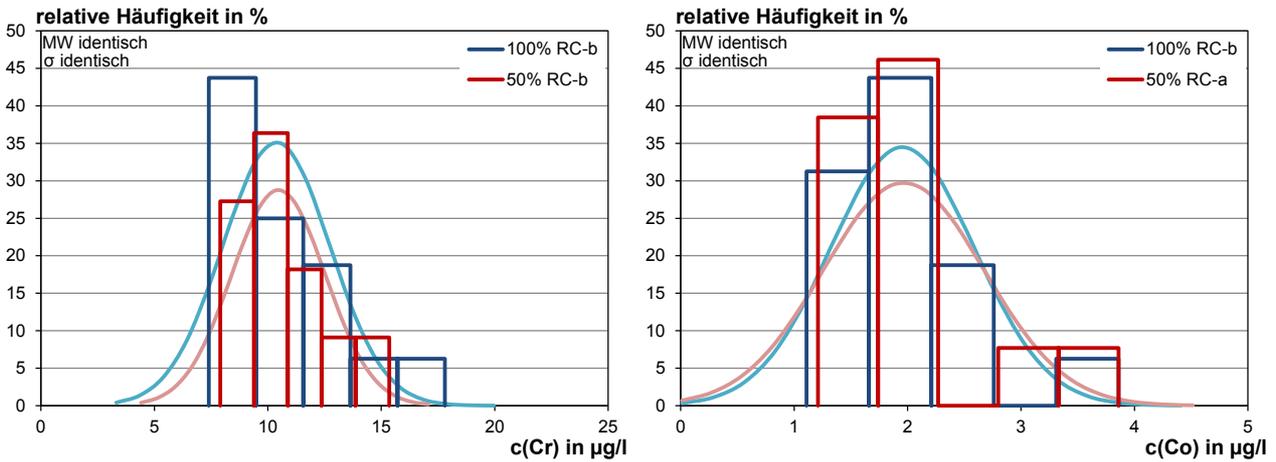


Bild B61: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Chrom- und Kobaltkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

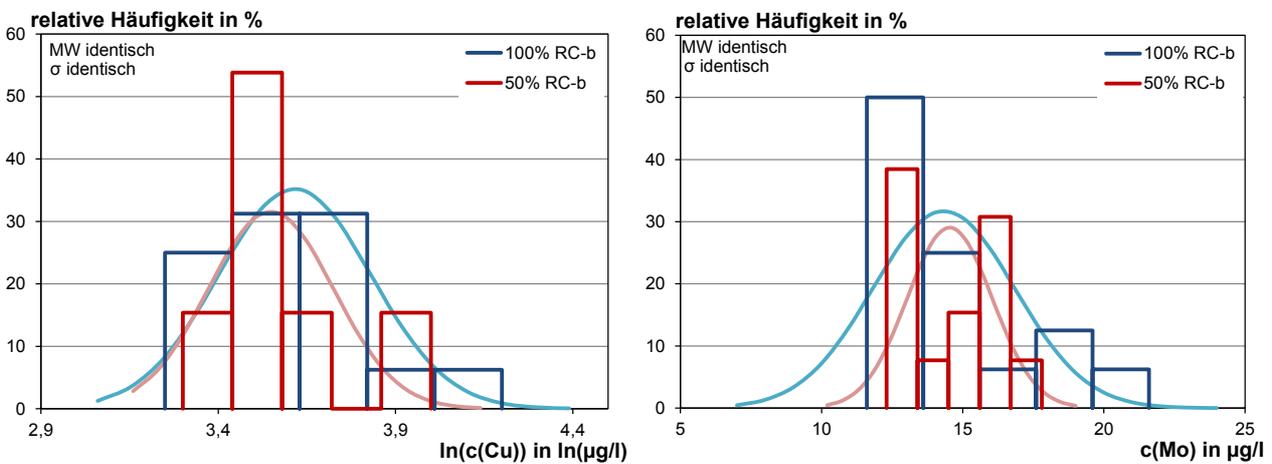


Bild B62: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Kupfer- und Molybdänkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

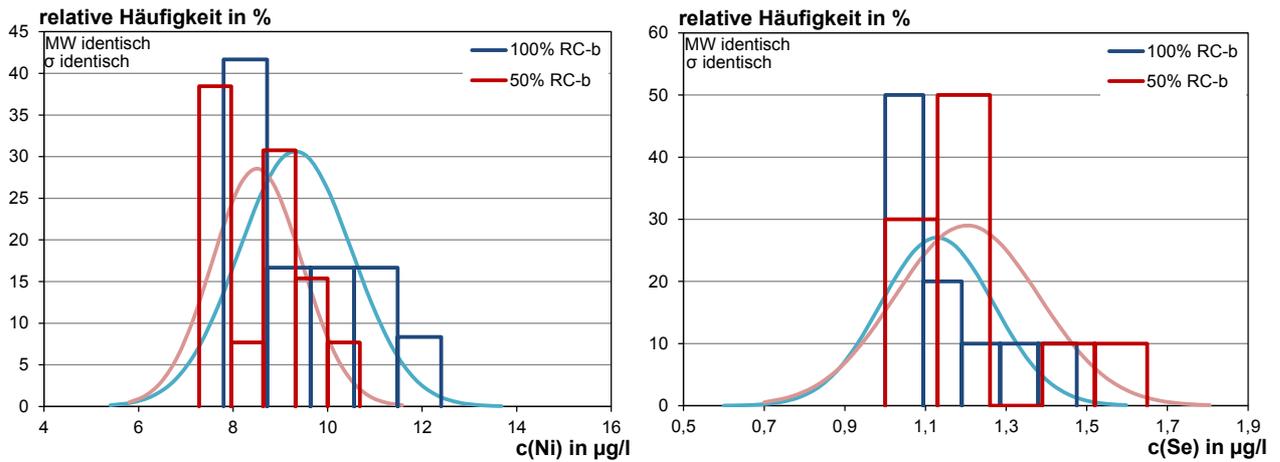


Bild B63: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Nickel- und Selenkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

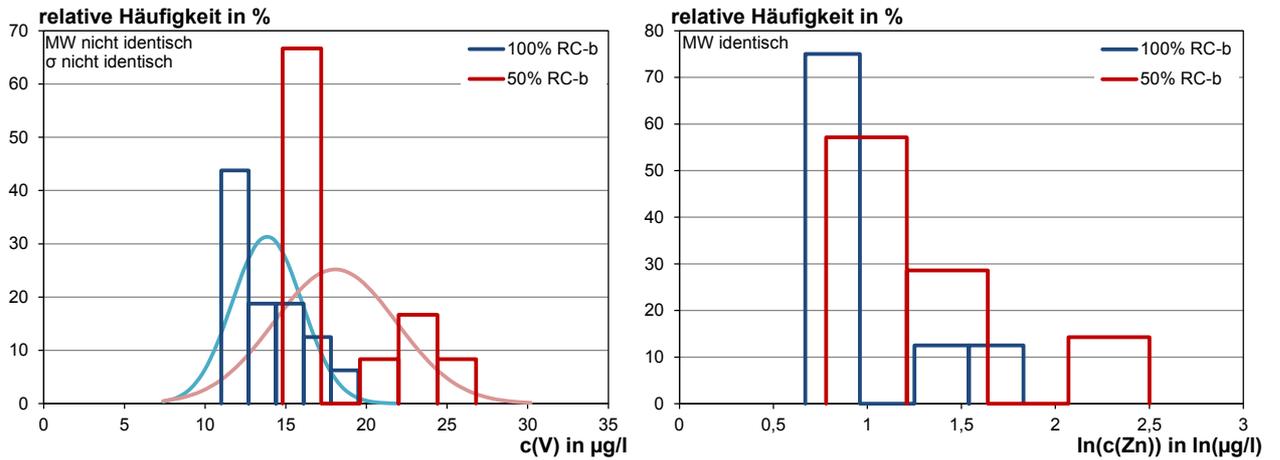


Bild B64: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Vanadium- und Zinkkonzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

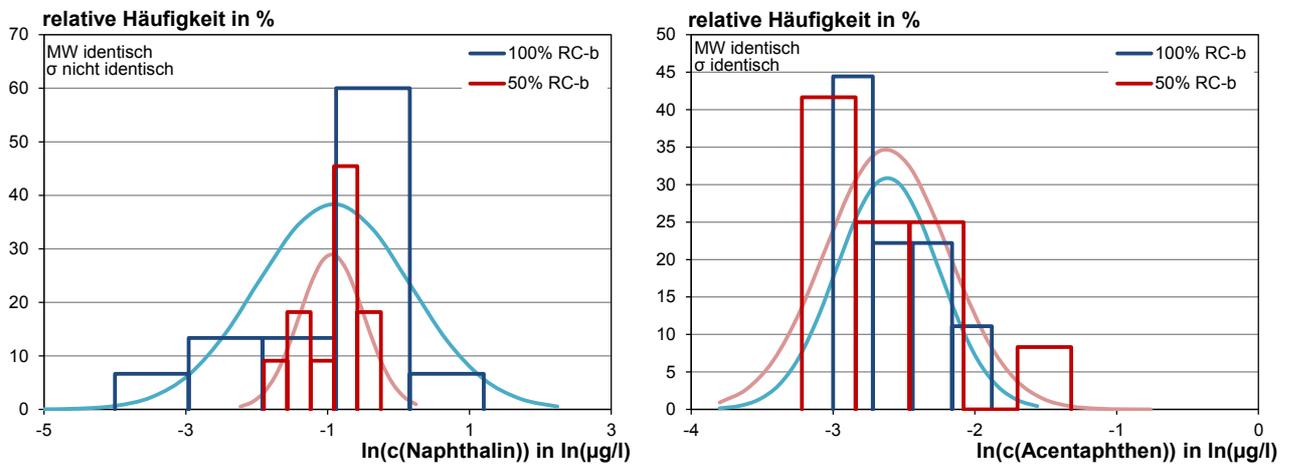


Bild B65: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Naphthalin- und Acenaphthen-Konzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

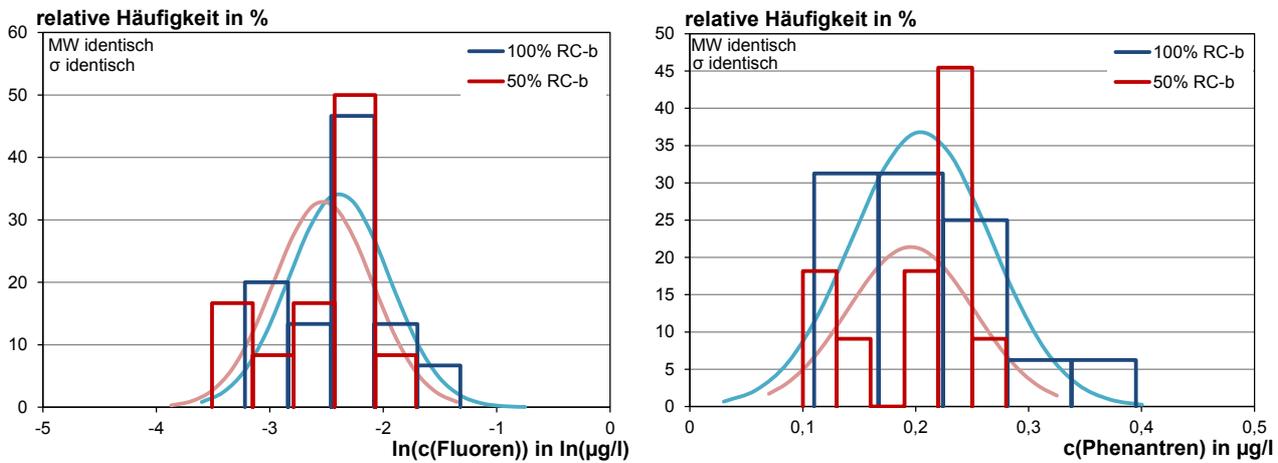


Bild B66: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Fluoren- und Phenanthren-Konzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

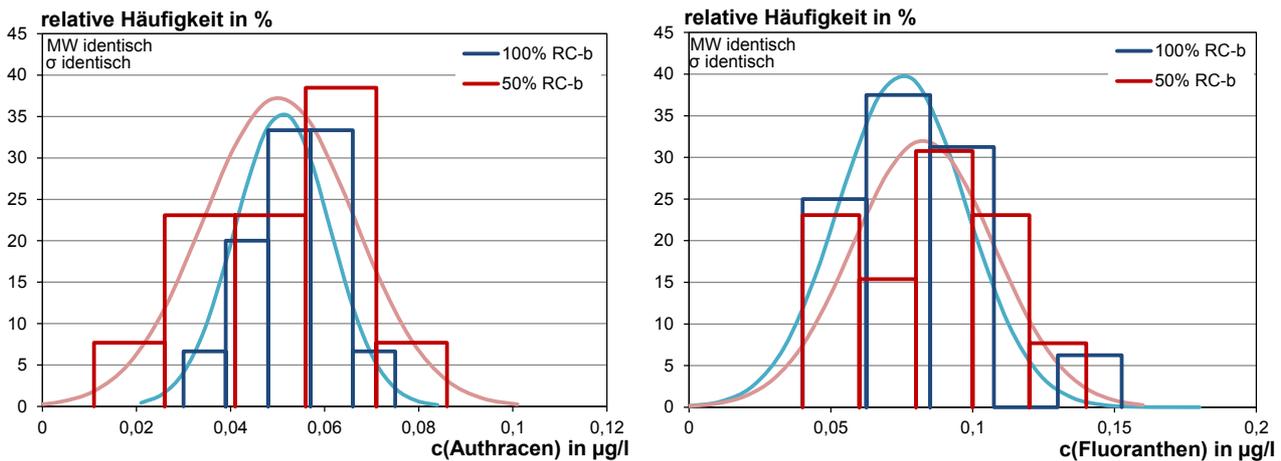


Bild B67: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von **RC-b** mit und ohne Sandzumischung (50 %): Anthracen- und Fluoranthen-Konzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

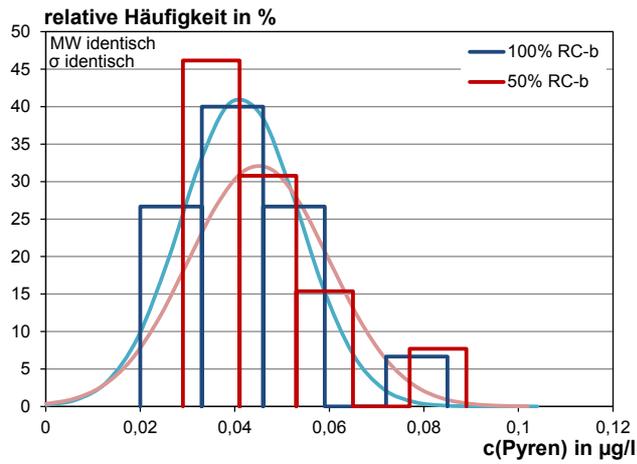


Bild B68: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Pyren-Konzentrationen (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

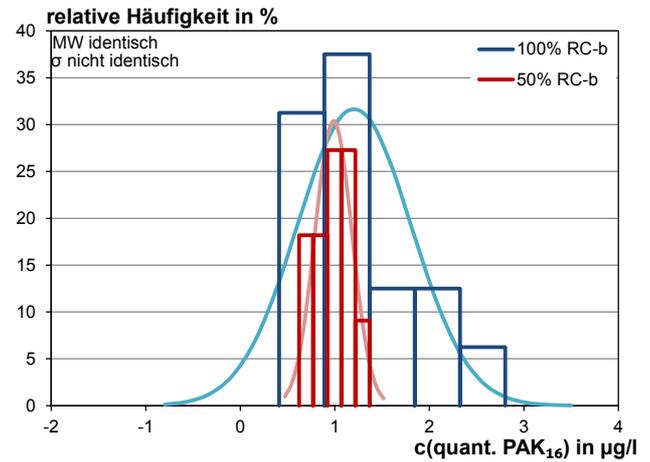
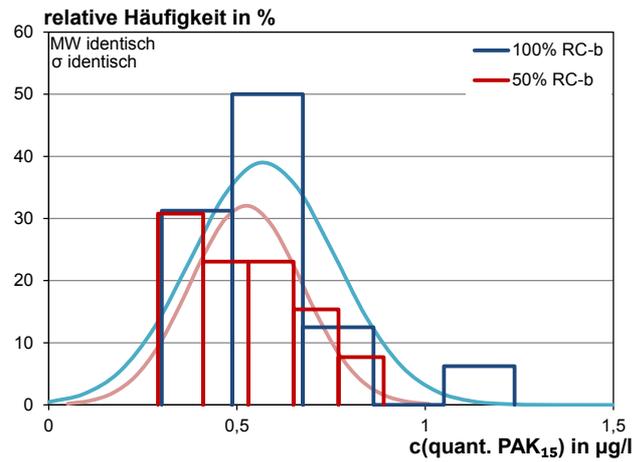


Bild B69: Gegenüberstellung der statistischen Verteilung der Analyseergebnisse der Eluate von RC-b mit und ohne Sandzumischung (50 %): Quantifizierbare PAK₁₅- und PAK₁₆-Konzentrationen, (Ergebnisse aus Laborvergleichstests und 8-fach-Bestimmung der RWTH)

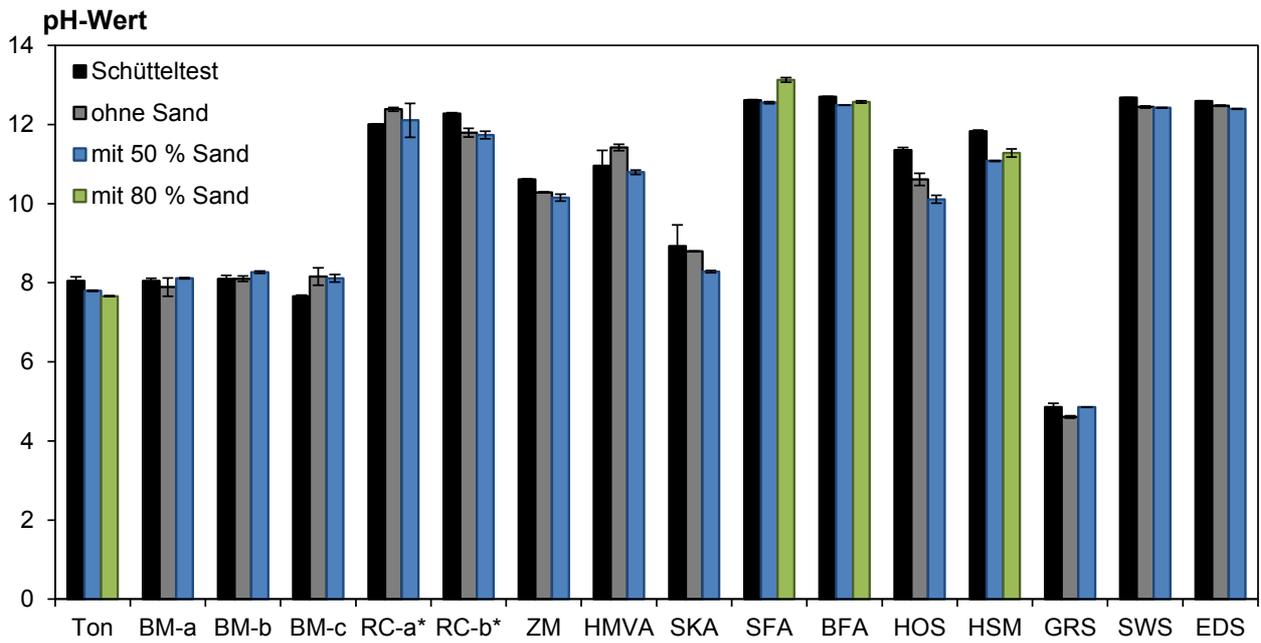


Bild B70: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: pH-Wert aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

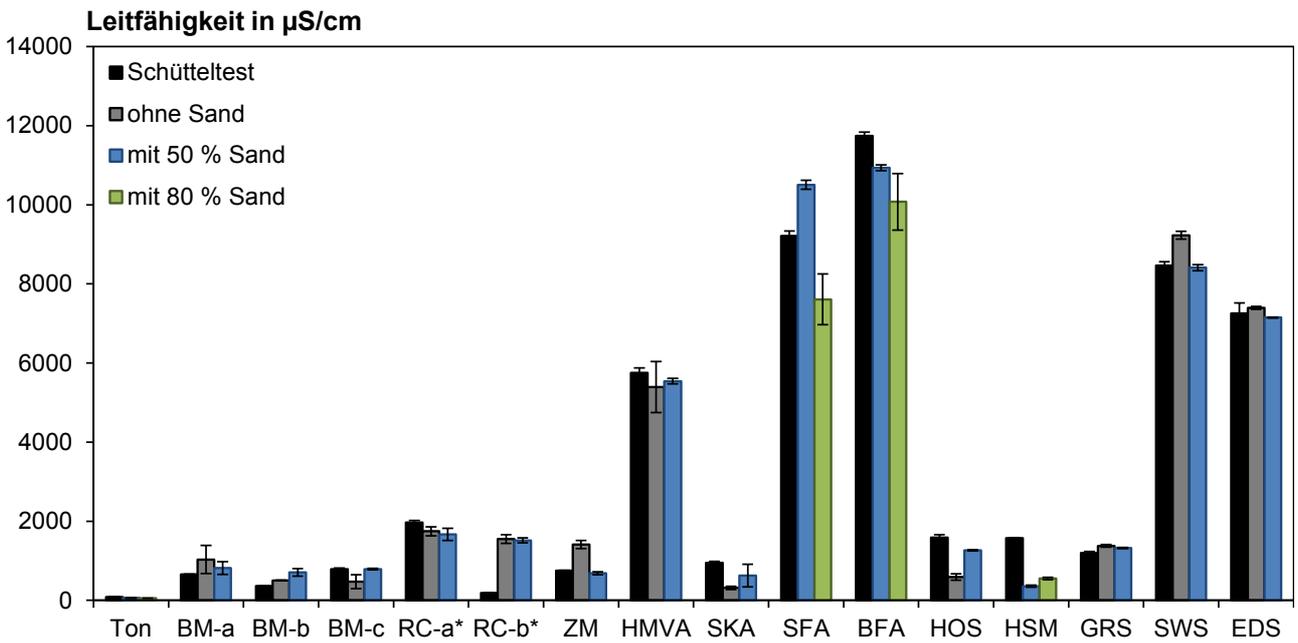


Bild B71: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Leitfähigkeit aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

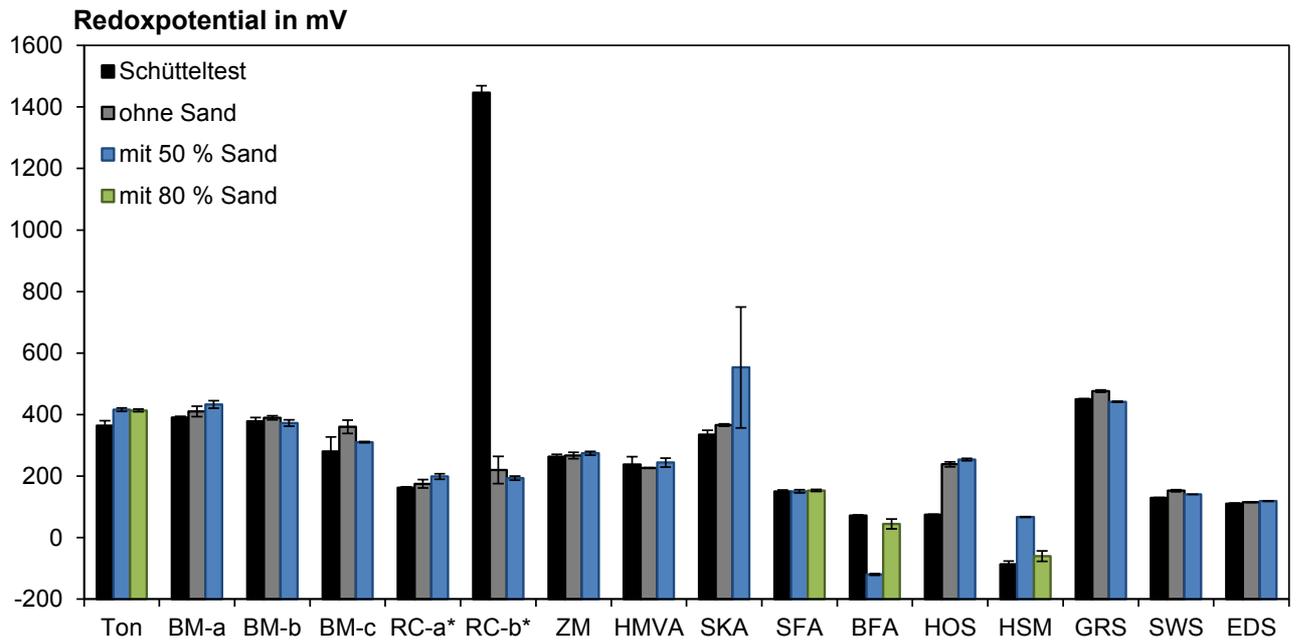


Bild B72: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Redoxpotential aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

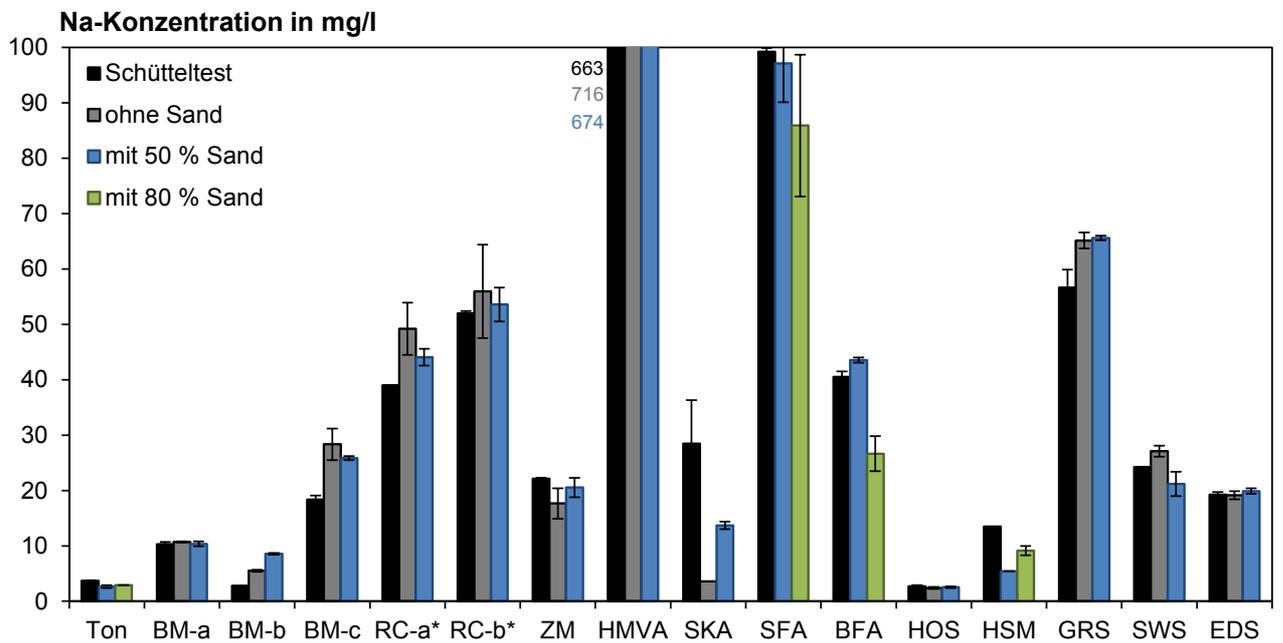


Bild B73: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Natrium-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

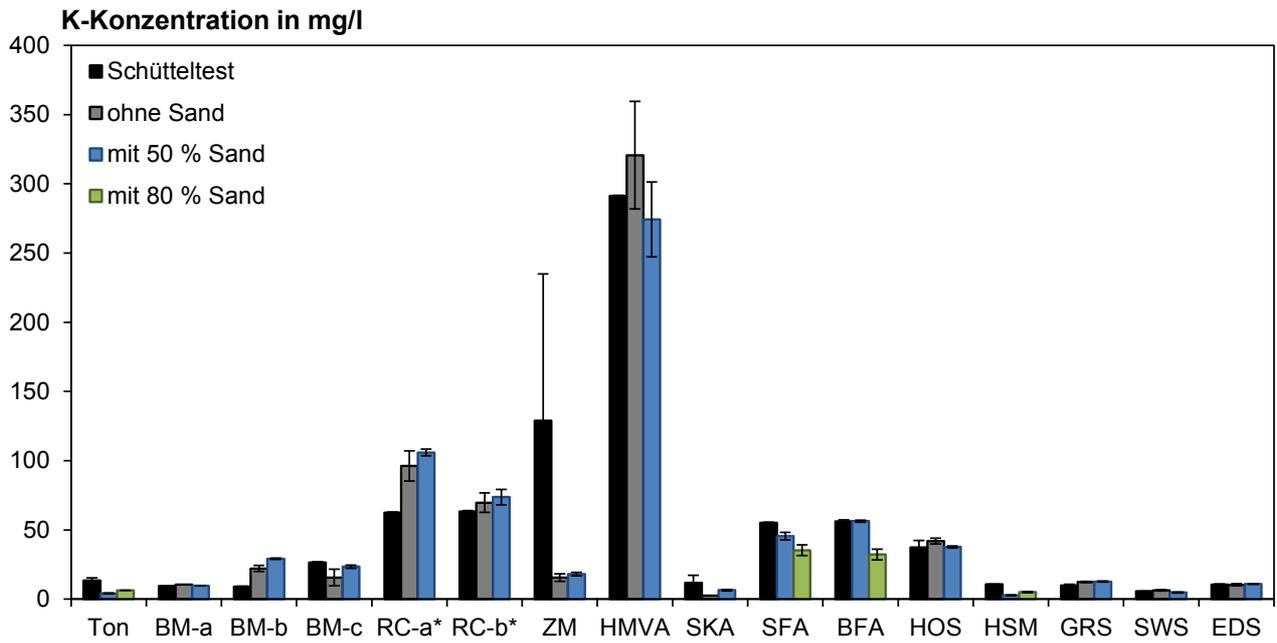


Bild B74: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Kalium-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

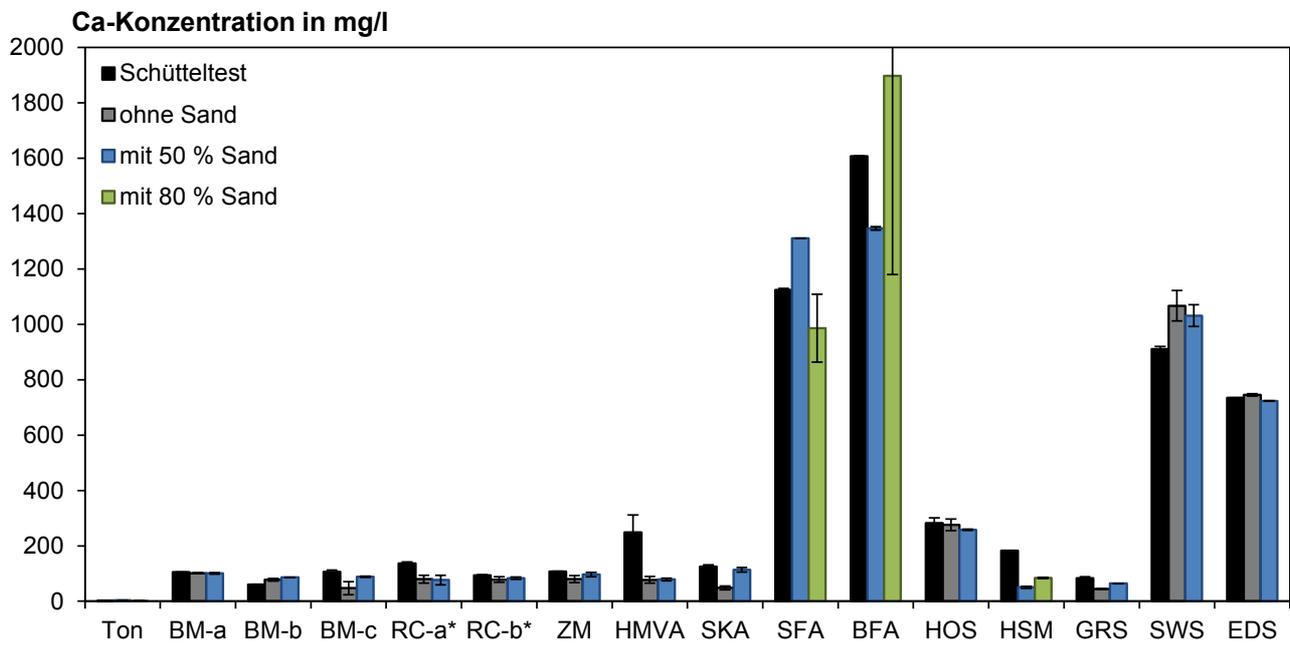


Bild B75: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Calcium-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

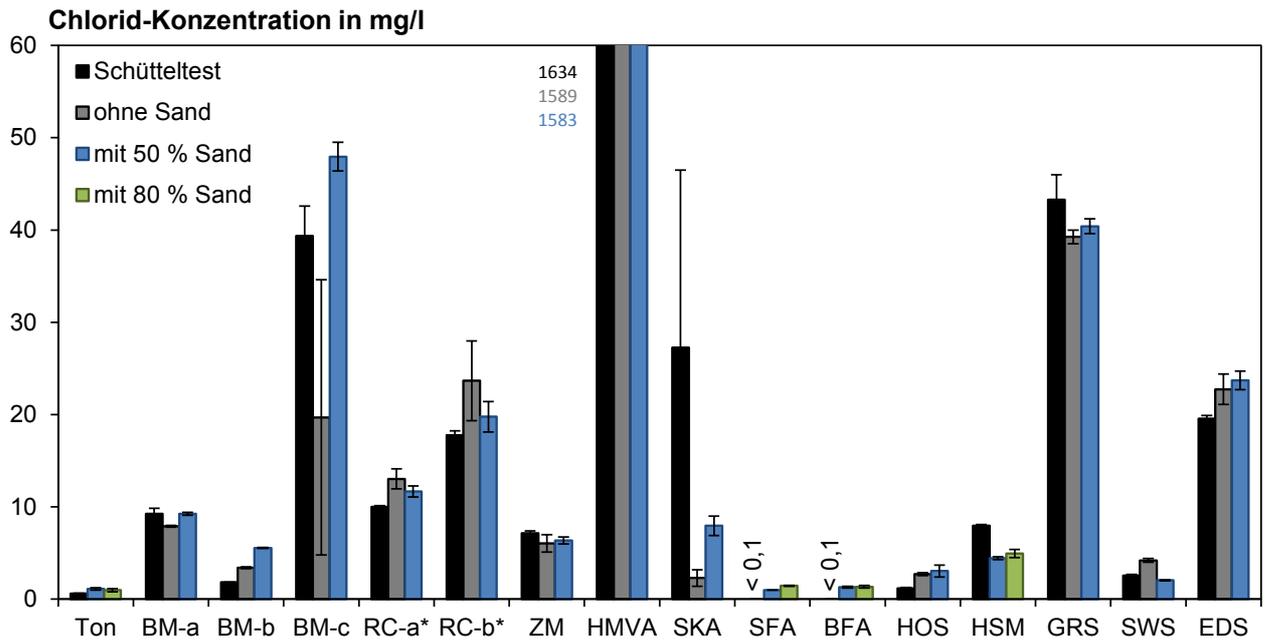


Bild B76: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Chlorid-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

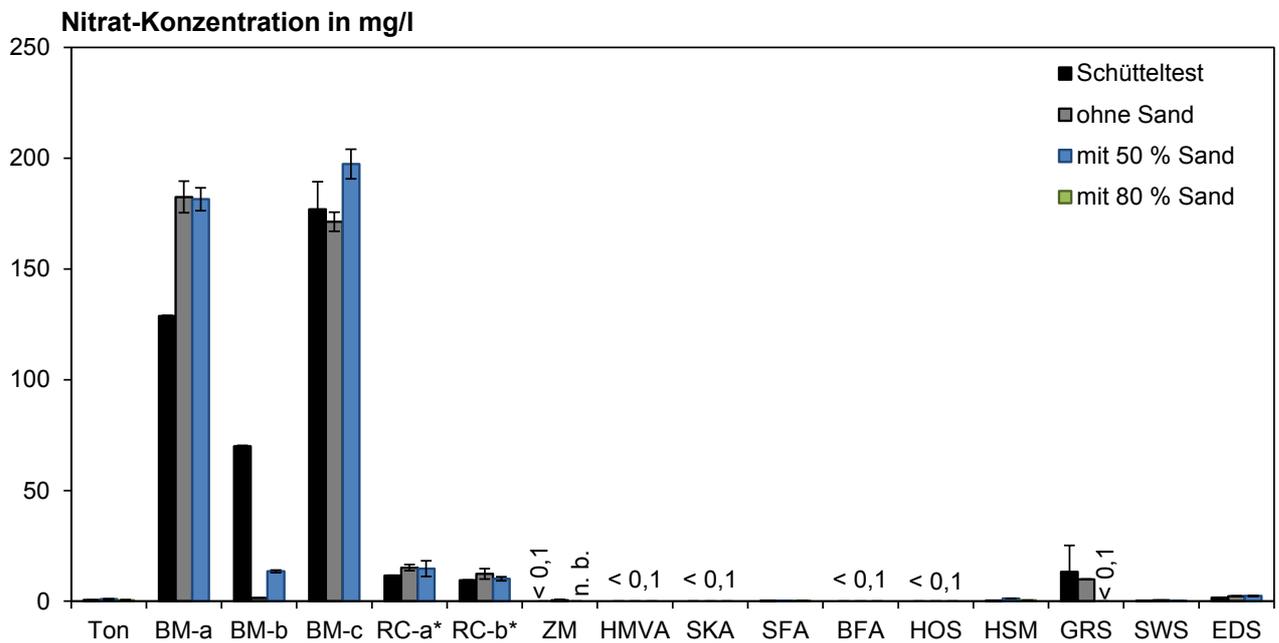


Bild B77: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Nitrat-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

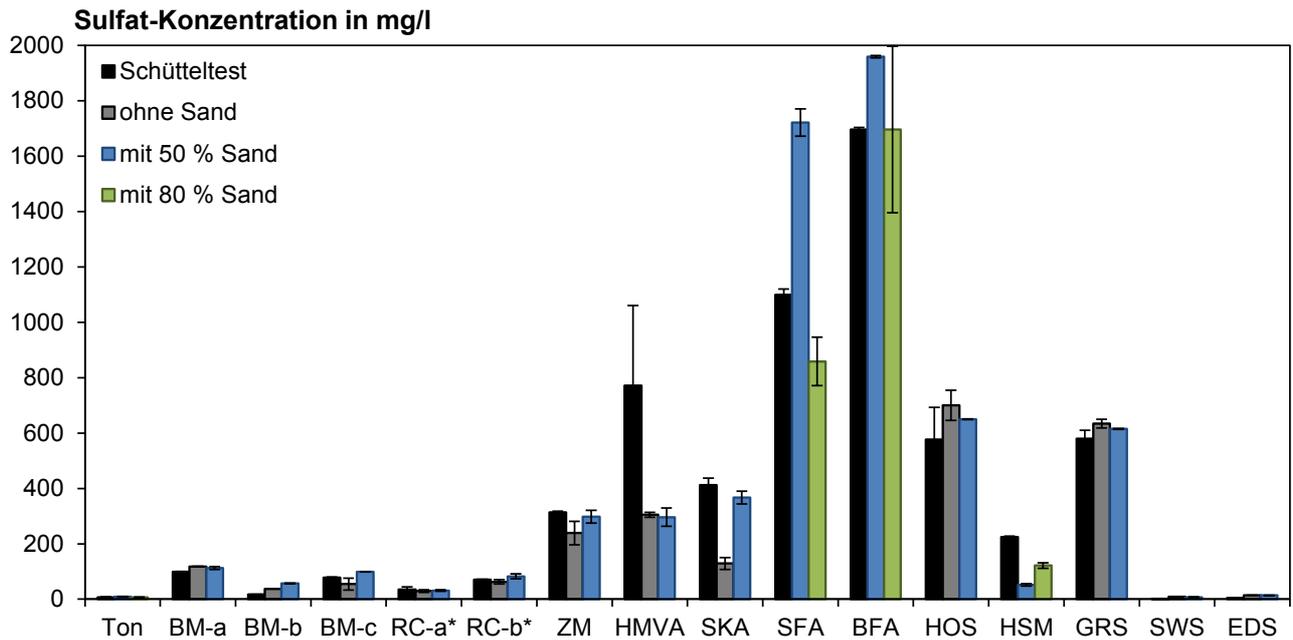


Bild B78: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Sulfat-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

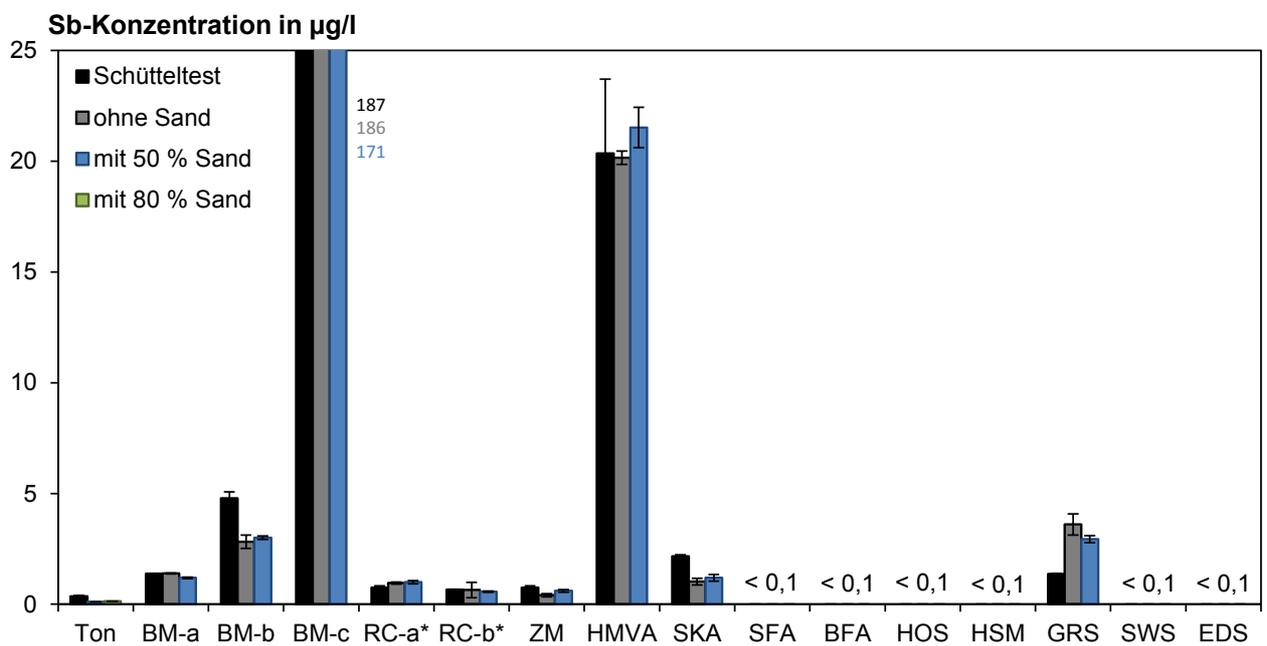


Bild B79: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Antimon-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

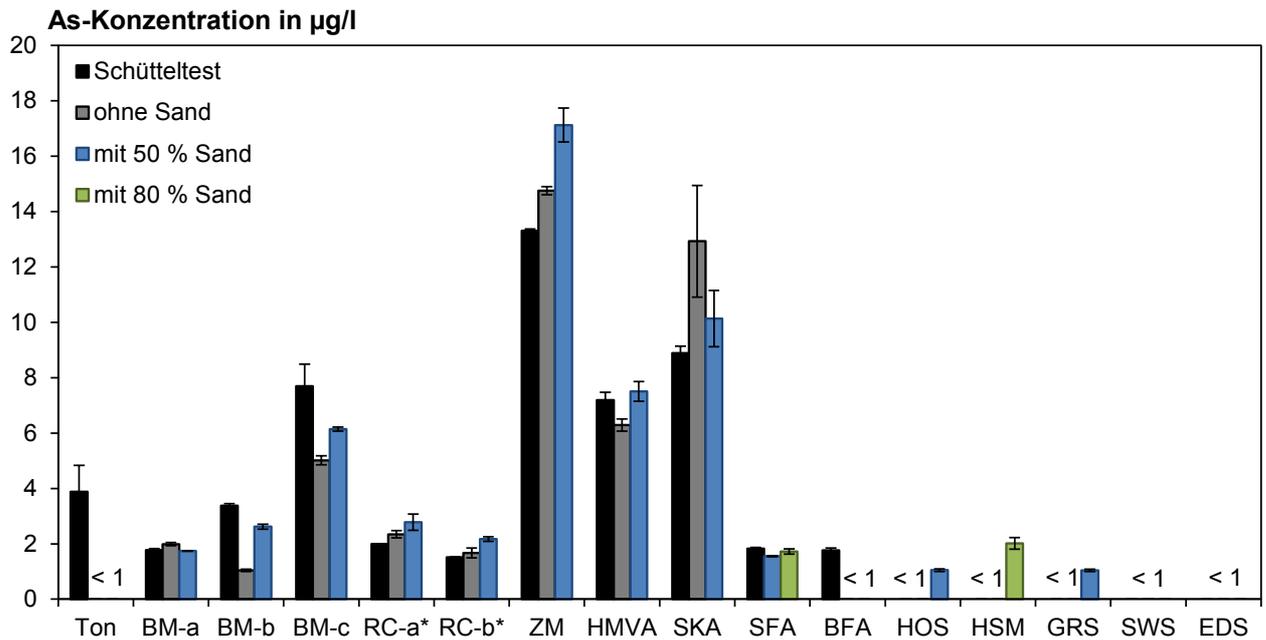


Bild B80: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Arsen-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

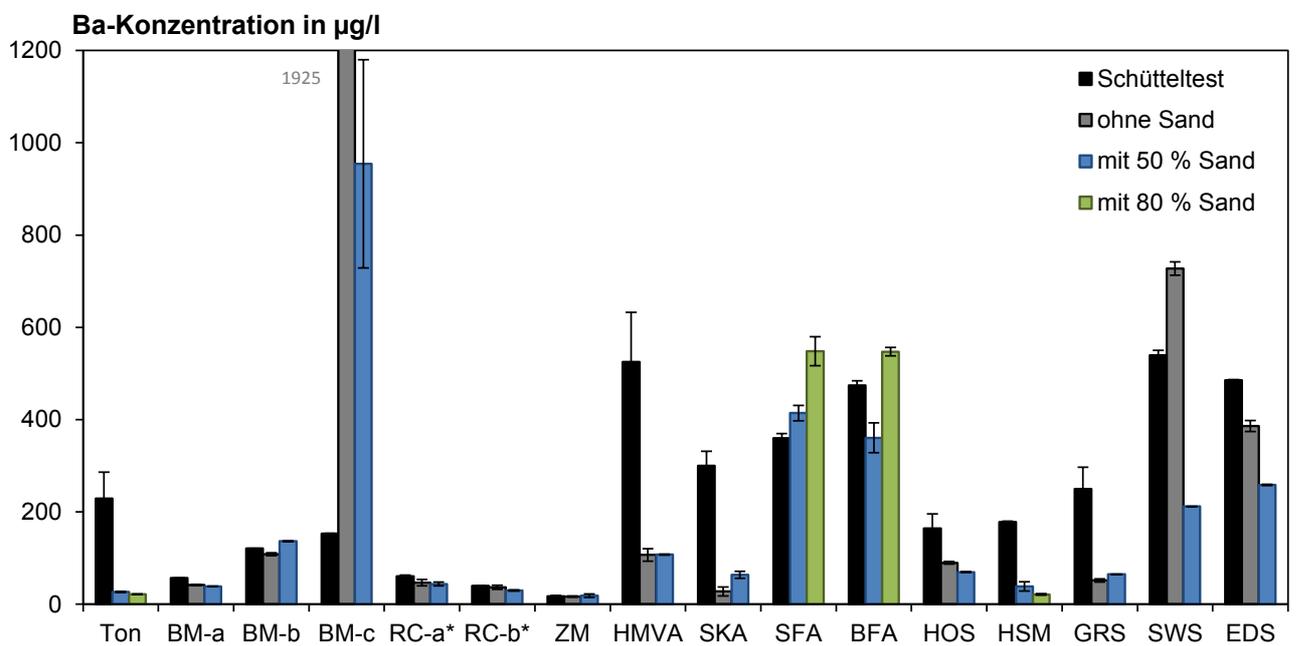


Bild B81: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Barium-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

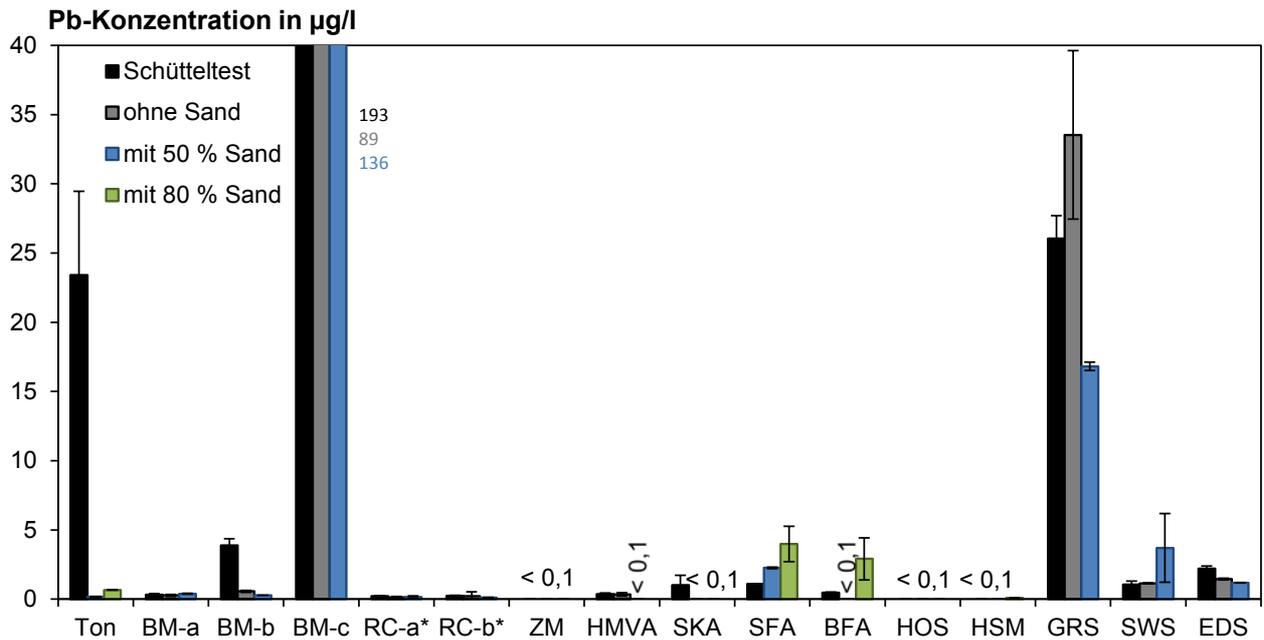


Bild B82: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Blei-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

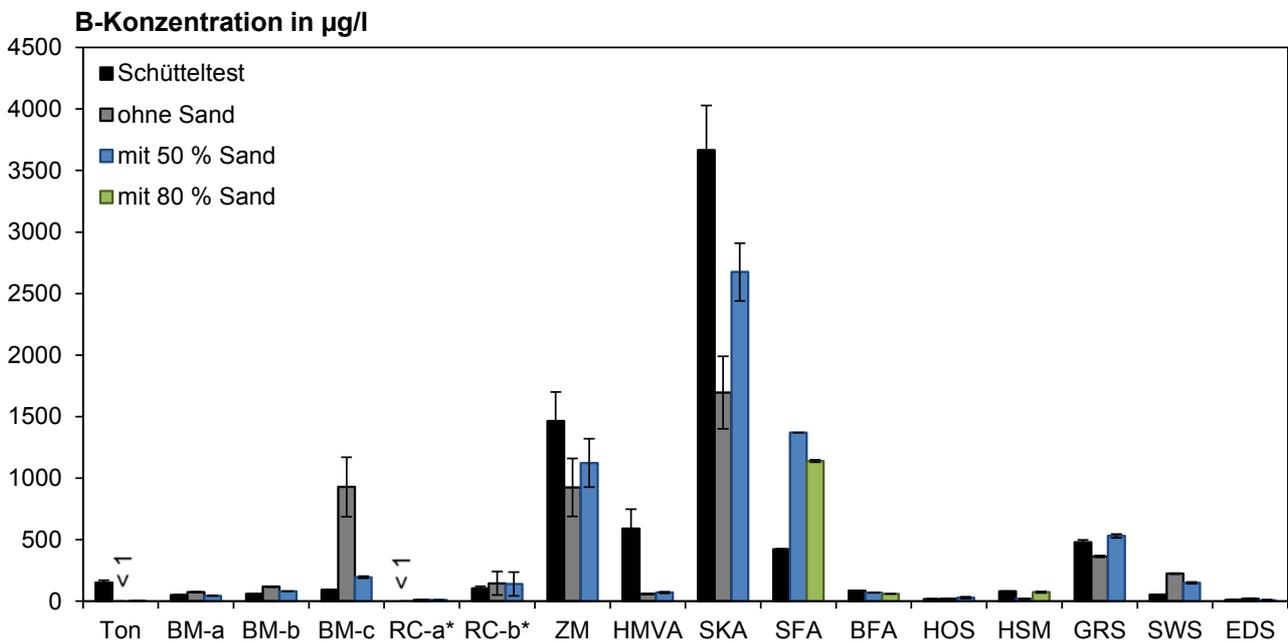


Bild B83: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Bor-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

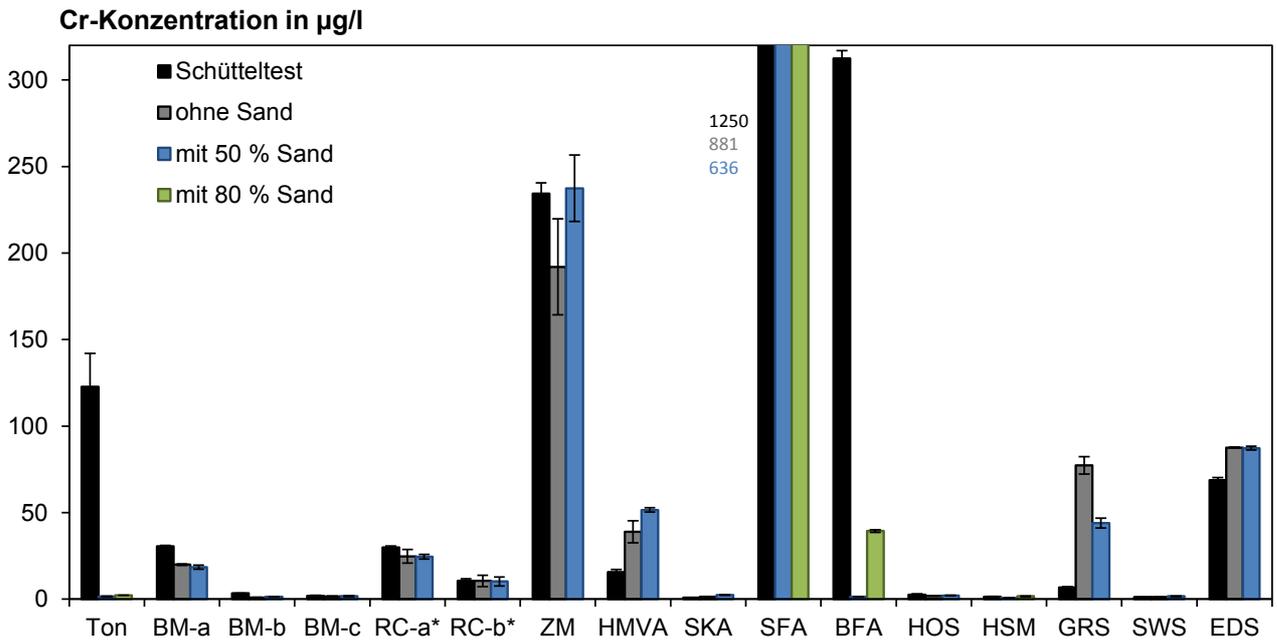


Bild B84: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Chrom-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

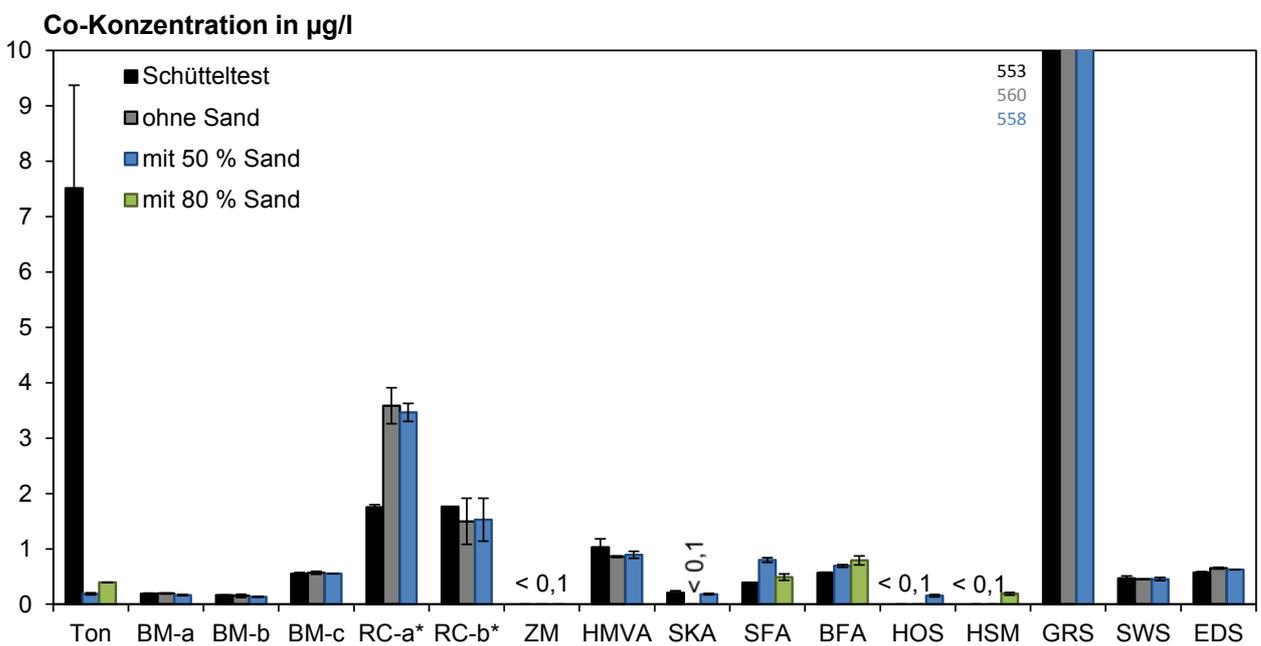


Bild B85: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Kobalt-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

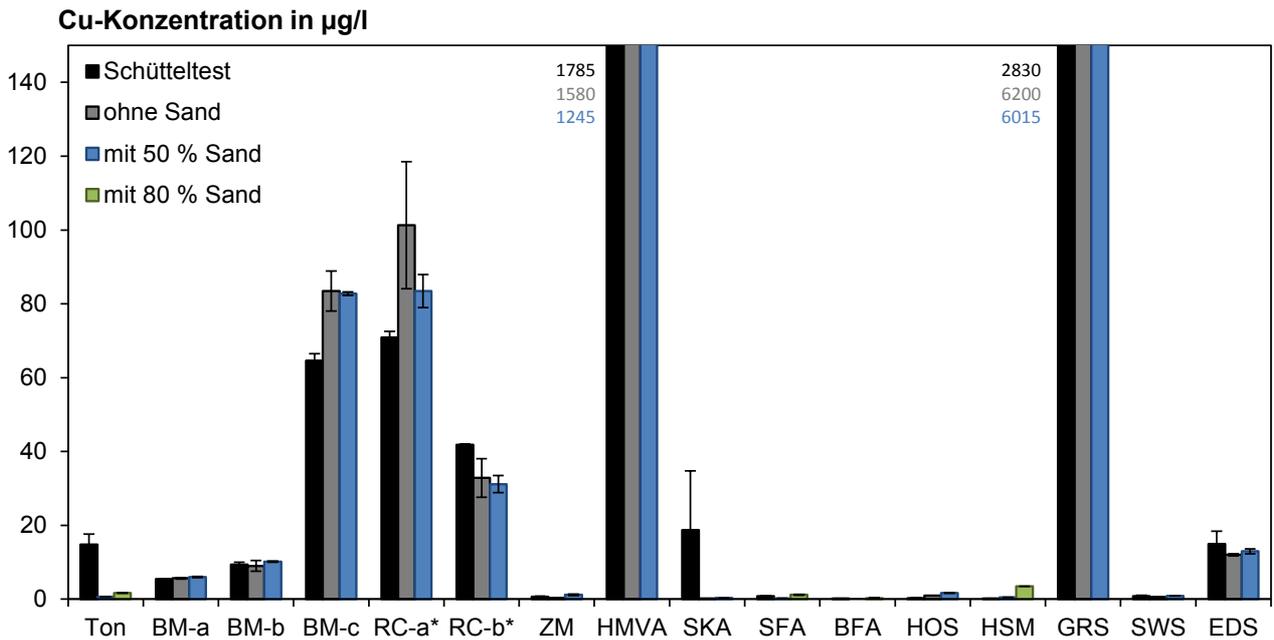


Bild B86: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Kupfer-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

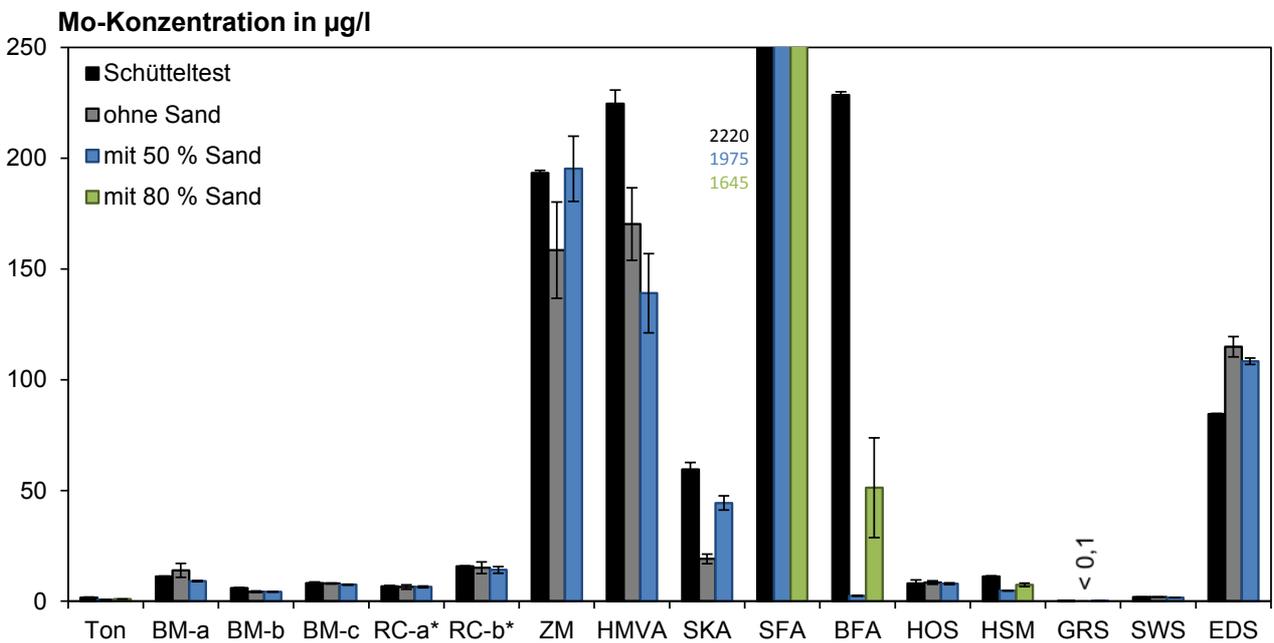


Bild B87: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Molybdän-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

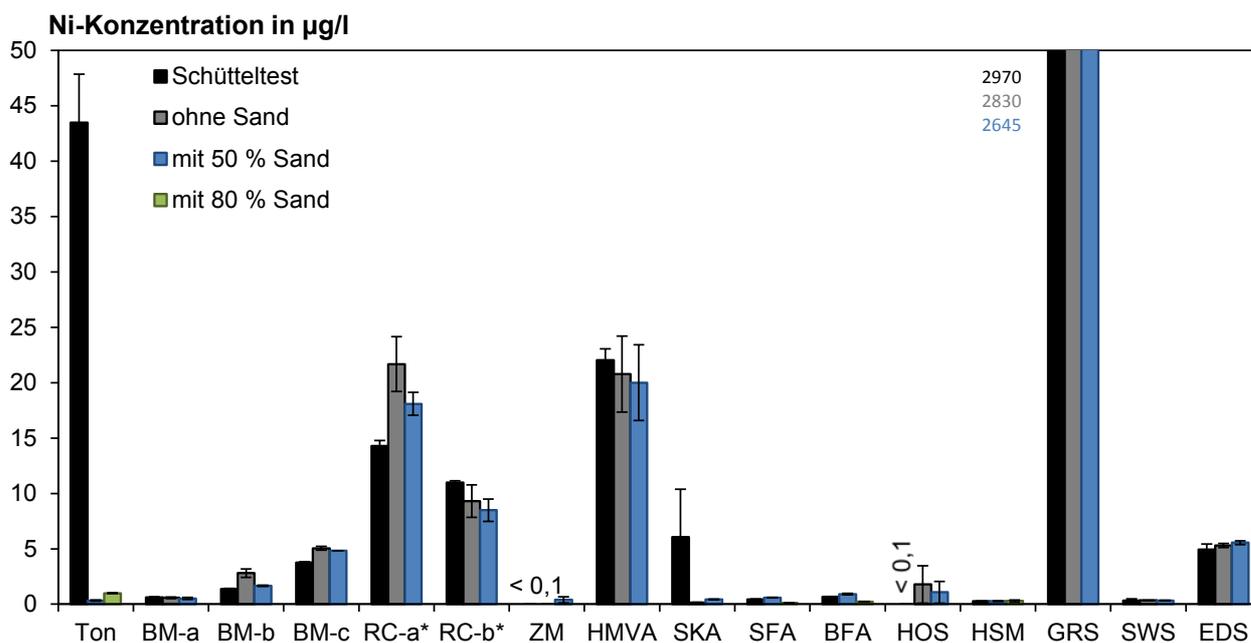


Bild B88: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Nickel-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

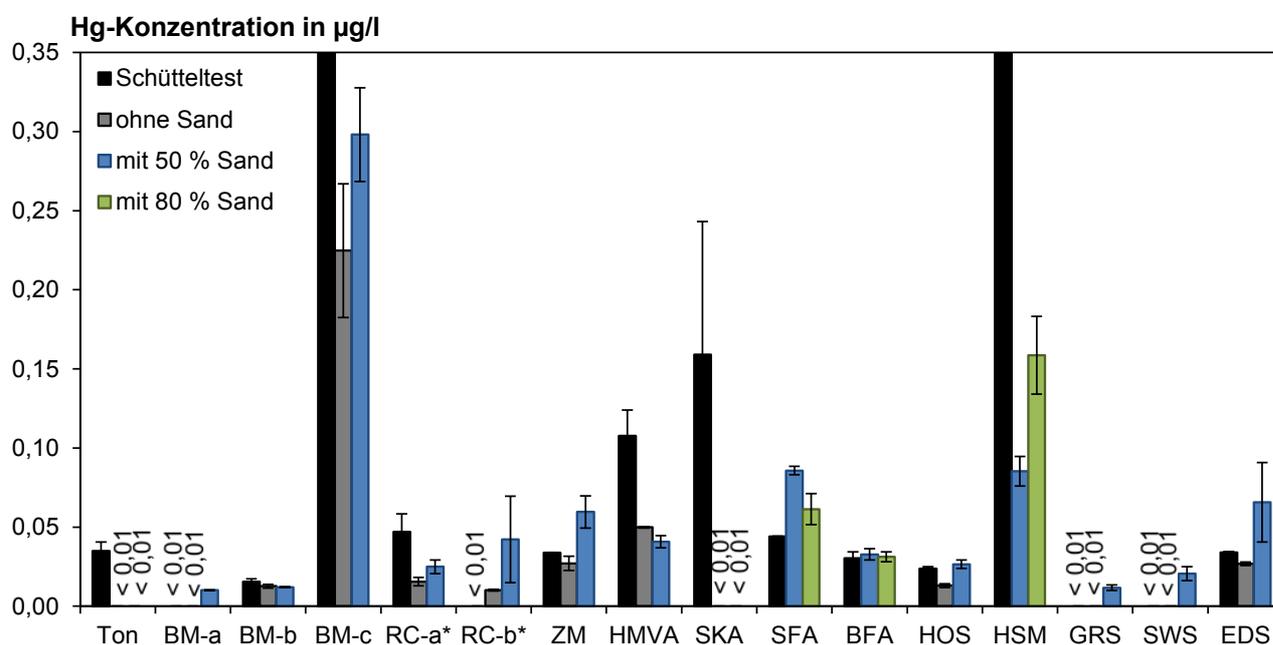


Bild B89: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Quecksilber-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

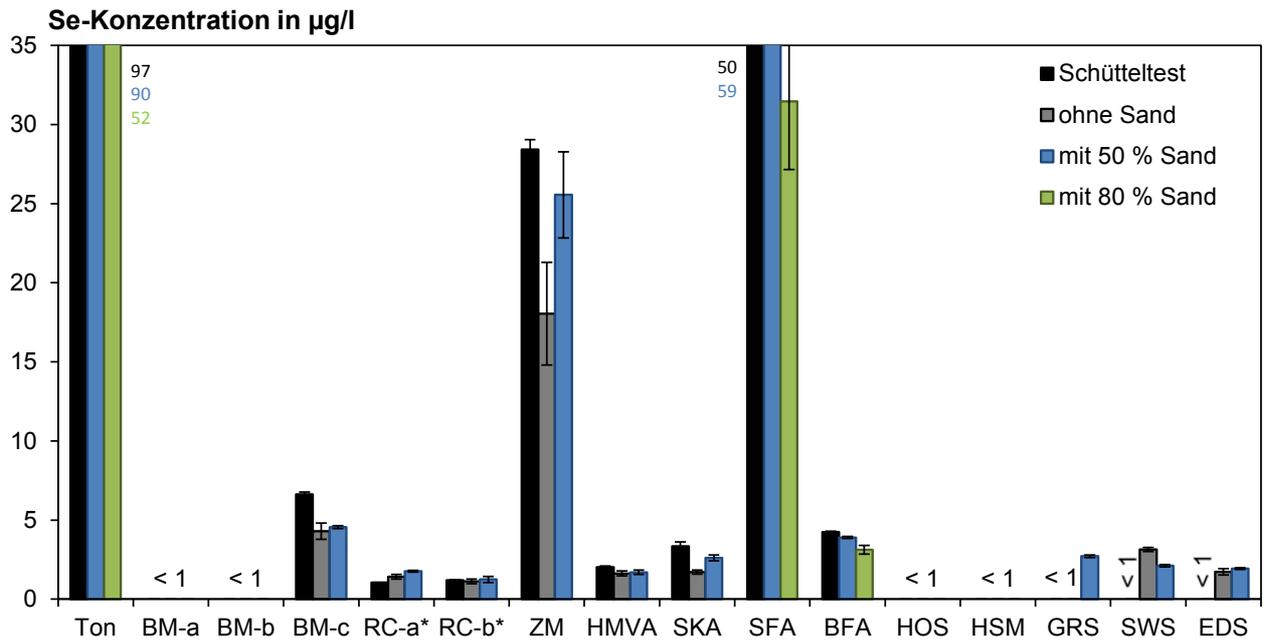


Bild B90: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Selen-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

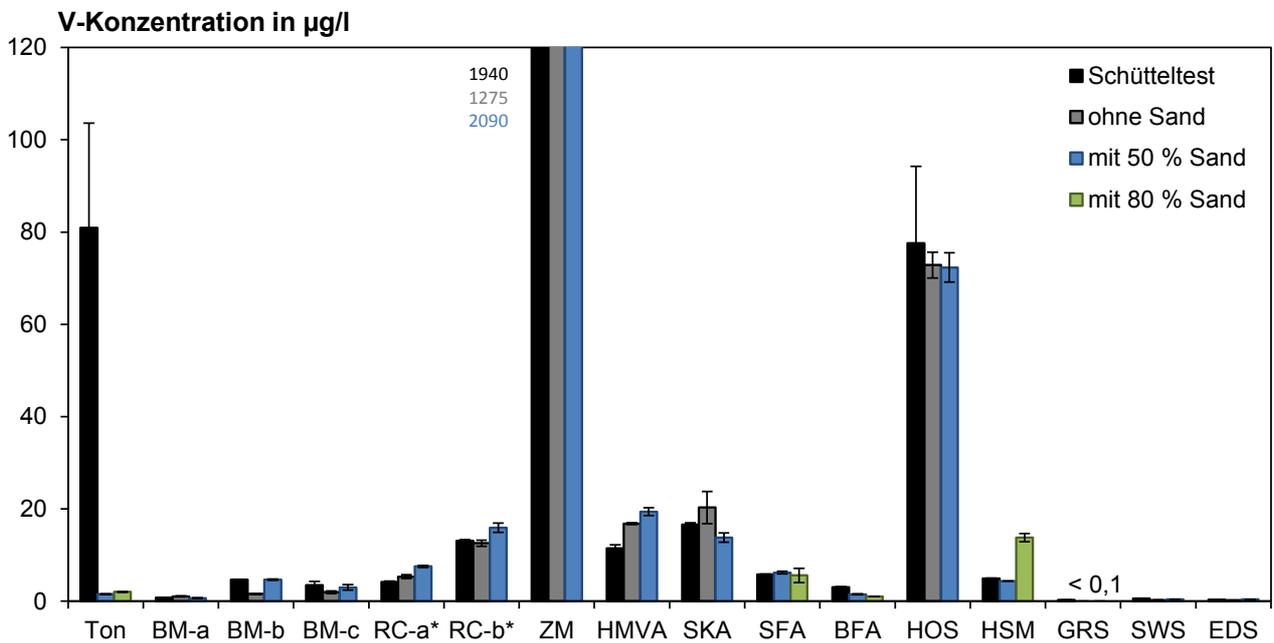


Bild B91: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Vanadium-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

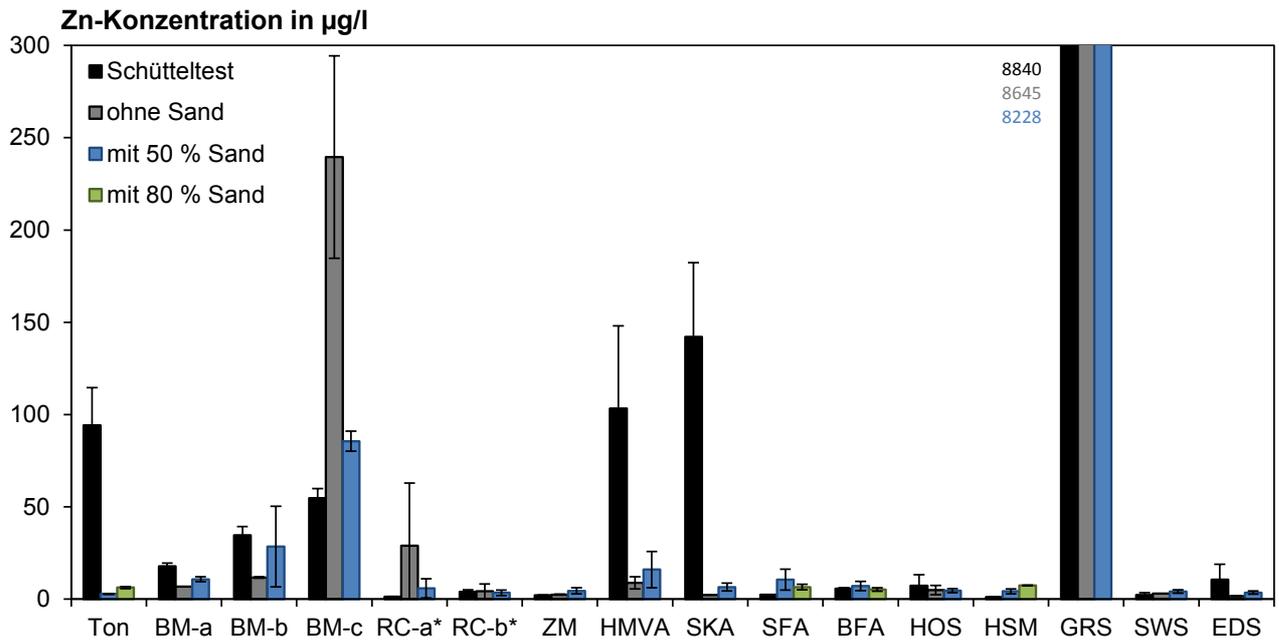


Bild B92: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: Zink-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

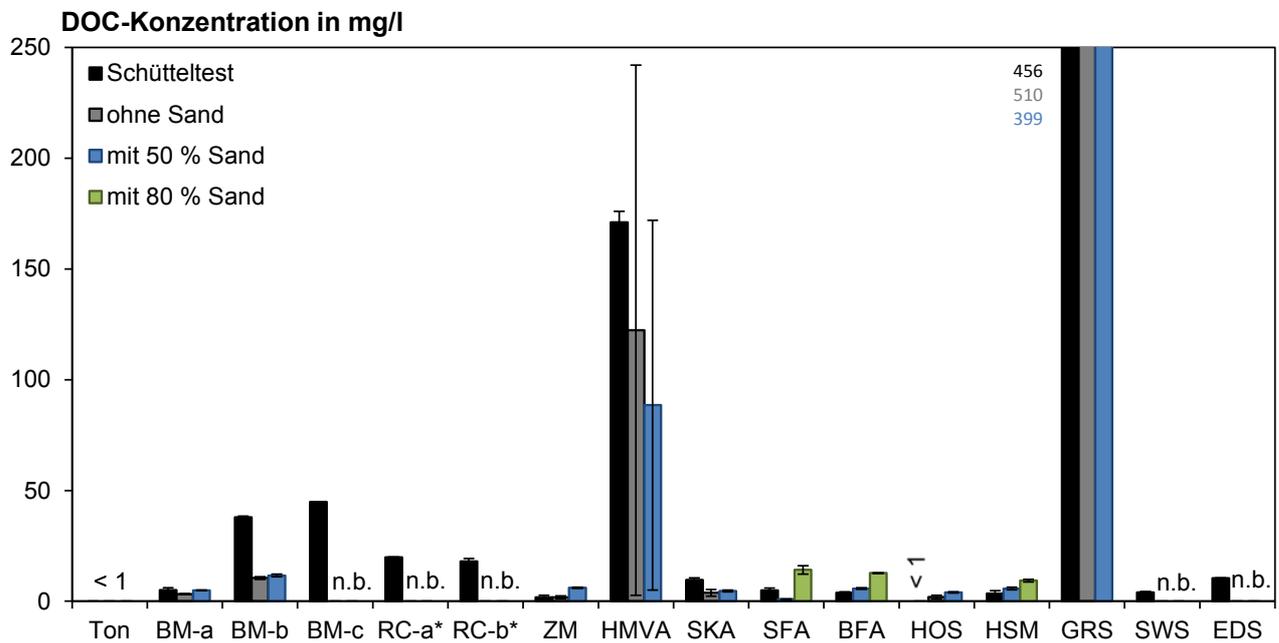


Bild B93: Validierung des Verfahrens an unterschiedlichen Materialien: DOC-Konzentration aus den Säulenversuchen (Fehlerindikator: einzelne Messung der Doppelbestimmung); *: Datensatz aus der 8-fach-Bestimmung bei RWTH, (Fehlerindikator: Standardabweichung)

Anhang C - Erläuterung

Beschreibung der Analysemethode ICP-MS

Die ICP-MS ist ein Verfahren zur Multielementbestimmung. ICP steht für *inductively coupled plasma*, d. h. die in der Probe enthaltenen Stoffe werden im Plasma ionisiert. Die flüssige Probe wird über einen Zerstäuber in Form feinsten Tröpfchen in ein Trägergas (Argon) eingesprüht. Dabei entsteht ein Aerosol. Das Trägergas mit dem Aerosol wird dann durch ein Injektionsrohr in die sog. Fackel der ICP geleitet (s. Bild C1). Die Fackel besteht i. d. R. aus Quarzglas und setzt sich aus drei konzentrischen Rohren zusammen. Das innerste Rohr ist das Injektionsrohr, das mittlere Rohr enthält das Plasmagas (ebenfalls Argon). Zur Kühlung der Fackel wird außen ein weiterer Argon-Strom zugeführt. Gleichzeitig trägt der Kühlgasstrom dazu bei, die Position des Plasmas zu stabilisieren. Am hinteren Ende der Fackel befindet sich die Spule eines Hochfrequenzgenerators. Sie besteht aus Kupfer, ist hohl und wird innen mit Wasser oder Argon gekühlt.

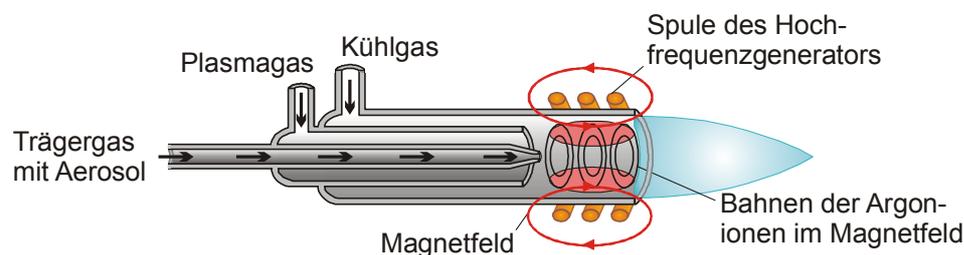


Bild C1: Detailskizze der Fackel der ICP (Vol12/, s. auch /Bec07/)

Beim Starten des ICP wird durch einen Zündfunken ein kleiner Teil des Plasmagases ionisiert, d. h. in positiv geladene Argon-Ionen und Elektronen zerlegt. Dadurch kann aus dem oszillierenden Magnetfeld der Spule ein Strom in das Gas induziert werden, der dieses aufheizt und zur Ionisation weiterer Argon-Atome führt. Das Plasma wird durch die induzierte Energie auf 5.000 bis 8.000 °C aufgeheizt. Es stellt sich ein stabiler Zustand ein, in dem das vorbeiströmende Plasmagas im Bereich der Spule aufgeheizt und ionisiert wird. Es entsteht eine ortsstabile Plasmawolke. In der Plasmawolke bewegen sich die Argon-Ionen auf kreisförmigen Bahnen innerhalb des ringförmigen Magnetfeldes der Spule. Üblicherweise wird die Induktionsspule zur Erzeugung des oszillierenden Magnetfeldes mit einer Wechselspannung der Frequenz von 27,12 MHz oder 40 MHz betrieben /Wie01/. Die Temperatur des Plasmas hängt von dem Abstand zur Spule, der Leistung des Hochfrequenzgenerators (i. d. R. 1200 bis 1300 W) und der Geschwindigkeit des Gasstroms ab.

Der Argonstrom des Trägergases wird mit einer Geschwindigkeit von 0,5 bis 1,2 l/min in das Plasma eingeblasen /Bec07/. Durch die hohen Temperaturen verdampft die zerstäubte Probe und wird ionisiert. Elemente mit einer Ionisierungsenergie von ≤ 8 eV werden fast zu 100 % ionisiert, danach fällt der Ionisierungsgrad deutlich ab (s. Bild C2).

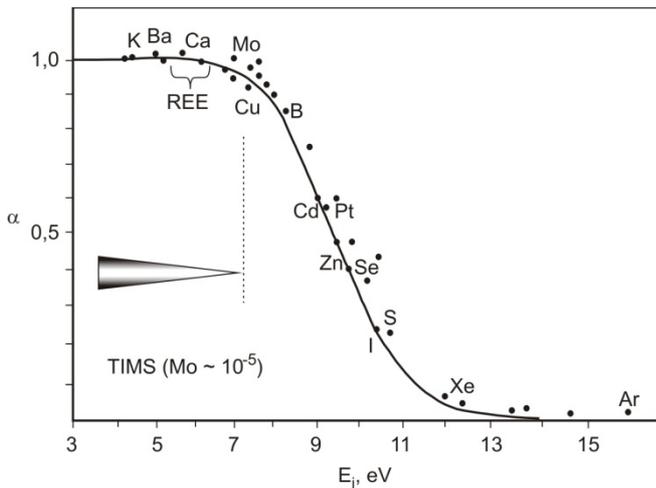


Bild C2: Ionisierungsgrad α der ersten Ionisierung in der ICP in Abhängigkeit von der Ionisierungsenergie E_i der Elemente, /Bec07/

In Tabelle C1 sind die ersten und zweiten Ionisierungsenergien für die Elemente angegeben, für die in /LAW04/ eine Geringfügigkeitsschwelle abgeleitet wurde. Nicht enthalten sind Fluor und Chlor. Die Ionisierungsenergien für diese Elemente sind sehr hoch (17,42 eV bzw. 12,967 eV) und sie werden daher nur zu einem sehr geringen Anteil ionisiert. Die Analyse erfolgt hier mit anderen Methoden.

Aus Tabelle C1 ist ersichtlich, dass einige der relevanten Elemente höhere Ionisierungsenergien als 8 eV für die erste Ionisierung aufweisen. Der Ionisierungsgrad wird bei der Auswertung berücksichtigt. Desweiteren ist zu beachten, dass die zweite Ionisierung bei Barium bereits bei 10 eV auftritt, d. h. es ist mit einem nicht zu vernachlässigenden Anteil an Ba^{2+} zu rechnen. Neben den einfach und zweifach geladenen atomaren Ionen bilden sich auch Molekülionen in der ICP (vgl. Tab. A1 im Anhang A).

Tabelle C1: Isotopenverteilung und Ionisierungsenergien der in /LAW04/ reglementierten Elemente, /Bec07/

Parameter	Massenzahl	Häufigkeit	Atomare Masse	Ionisierungsenergie	
				1. E_i	2. E_i
-	-	%	u	eV	eV
Antimon (Sb)	121	57,21	120,904	8,641	16,53
	123	42,79	122,904		
Arsen (As)	75	100	74,922	9,81	18,633
Barium (Ba)	130	0,106	129,906	5,212	10,004
	132	0,101	131,905		
	134	2,417	133,905		
	135	6,592	134,906		
	136	7,854	135,905		
	137	11,232	136,906		
Blei (Pb)	204	1,4	203,973	7,416	15,028
	206	24,1	205,974		
	207	22,1	206,976		
	208	52,4	207,977		

Tabelle C1: Fortsetzung (1)

Parameter	Massenzahl	Häufigkeit	Atomare Masse	Ionisierungsenergie	
				1. Ei	2. Ei
-	-	%	u	eV	eV
Cadmium (Cd)	106	1,25	105,906	8,993	16,908
	108	0,89	107,904		
	110	12,49	109,903		
	111	12,80	110,904		
	112	24,13	111,902		
	113	12,22	112,904		
	114	28,73	113,903		
	116	7,49	115,905		
Chrom (Cr)	50	4,345	49,946	6,766	16,60
	52	83,789	51,941		
	53	9,501	52,941		
	54	2,365	53,939		
Kobalt (Co)	59	100	58,933	7,86	17,06
Kupfer (Cu)	63	69,15	62,930	7,726	20,292
	65	30,85	64,928		
Molybdän (Mo)	92	14,77	91,907	7,099	16,15
	94	9,23	93,905		
	95	15,90	94,906		
	96	16,68	95,905		
	97	9,56	96,906		
	98	24,19	97,905		
	100	9,67	99,907		
Nickel (Ni)	58	68,077	57,935	7,653	18,168
	60	26,223	59,931		
	61	1,140	60,931		
	62	3,635	61,928		
	64	0,926	63,928		
Quecksilber (Hg)	196	0,15	195,966	10,437	18,756
	198	9,97	197,967		
	199	16,87	198,968		
	200	23,10	199,968		
	201	13,18	200,970		
	202	29,86	201,971		
	204	6,87	203,973		

Tabelle C1: Fortsetzung (2)

Parameter	Massenzahl	Häufigkeit	Atomare Masse	Ionisierungsenergie	
				1. Ei	2. Ei
-	-	%	u	eV	eV
Selen (Se)	74	0,89	73,922	9,752	21,19
	76	9,37	75,919		
	77	7,63	76,920		
	78	23,77	77,917		
	80	49,61	79,917		
Thallium (Tl)	203	29,52	202,972	6,108	20,428
	205	70,48	204,974		
Vanadium (V)	50	0,25	49,947	6,74	14,65
	51	99,75	50,944		
Zink (Zn)	64	48,268	63,929	9,394	17,964
	66	27,975	65,926		
	67	4,102	66,927		
	68	19,024	67,925		
	70	0,631	69,925		

Bei der ICP-MS gelangen die im Plasma gebildeten Ionen über zwei Blenden (Sampler und Skimmer) und die Ionenoptik in das Massenspektrometer (s. z. B. /Wie01, Bec07/). Sampler und Skimmer bilden das Interface zum Hochvakuum. Dazwischen liegt ein Vorvakuum mit ca. 133 Pa /Bec07/, (s. Bild C3). Beim Durchtritt durch die beiden Blenden expandiert jeweils der Ionenstrahl aufgrund der Druckabfälle. Die Ionenoptik fokussiert anschließend den Ionenstrahl und blendet zudem neutrale Teilchen und einfallendes Licht weitgehend aus (Photonenstopp). Bei einigen Geräten liegt die Ionenoptik außerhalb des Hochvakuums.

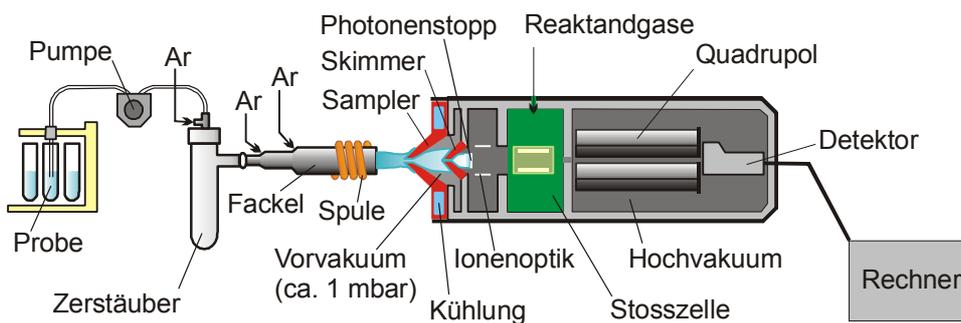


Bild C3: Prinzipskizze der ICP-MS mit Stoßzelle (/Vol12/, s. auch /Bec07/), ein Beispiel

Wie bereits erläutert bilden sich im Plasma geringe Anteile an zweifach positiv geladenen Ionen und einfache, positiv geladene Moleküle. Die Molekülionen können aus dem Plasmagas, Luft und / oder Bestandteilen der Probe gebildet werden. Nicht zu vernachlässigen sind Säuren, die der flüssigen Probe zur Stabilisation zugesetzt werden, oder die zum Aufschluss von Feststoffen verwendet werden (HNO_3 , HCl , HF). Diese Molekülionen und zweifach positiv geladene Ionen führen bei der Massenspektrometrie zu Interferenzen mit den zu detektierenden einwertigen Ionen. Auch einfach geladene Ionen können sich gegenseitig überlagern. Einige Beispiele für diese spektralen Störungen werden in Tab. A1 im Anhang A gezeigt. Es ist ersichtlich, dass z. B. Bor an der Bildung einer ganzen Reihe von Molekülionen beteiligt ist. Dies kann zu Minderbefunden bei der Analyse dieses Elements führen.

Die Menge der für die MS-Analytik nicht erwünschten Moleküle und mehrfach geladenen Ionen ist abhängig von den Eigenschaften des Plasmas. Wenn z. B. die ins Plasma induzierte Leistung des Generators erhöht wird, steigt die Temperatur und es werden weniger Moleküle aber mehr 1+- und auch 2+-Ionen gebildet. Eine Erhöhung des Trägergasflusses bewirkt einen verstärkten Eintrag von Probenmaterial ins Plasma, dabei sinkt jedoch die Temperatur und die Menge der gebildeten Moleküle nimmt zu. Auch die Konzentrationen von Haupt- und Nebenelementen in der Probe beeinflussen die Bildung der unerwünschten Moleküle. Die Entstehung von Molekülen und die daraus resultierenden Interferenzen sind grundsätzlich unvermeidbar, sie können durch die Optimierung von Plasma und Trägergasfluss nur verringert werden.

Zur Vermeidung der Interferenzen werden bei vielen Geräten sog. Stoßzellen vor dem Massenspektrometer eingesetzt (s. Bild C3). Die Stoßzelle steht unter Vakuum und wird über Gaseinlässe mit kleinen Mengen eines Reaktandgases befüllt. Einige schwach gebundene Moleküle (z. B. $^{40}\text{Ar}^{23}\text{Na}^+$) können durch Kollision mit den Gasmolekülen dissoziiert werden, in der Regel reicht die Energie hierfür jedoch nicht aus. Weitaus effektiver sind chemische Reaktionen des Gases mit den interferierenden Molekülen (Bsp.: $\text{ArO}^+ + \text{NH}_3 \rightarrow \text{ArO} + \text{NH}_3^+$). Für verschiedene Interferenzen sind unterschiedliche Gase geeignet. Problematisch für die Multielementanalyse ist, dass die Gase mit zu analysierenden Ionen reagieren können oder dass Produkte entstehen, die mit anderen Ionen interferieren. Besonders kritisch ist hier NH_3 , /Wie04/. Einige Systeme setzen daher bevorzugt weniger reaktive Gase ein und versuchen, die Moleküle durch ein Spannungsgitter am Ausgang der Stoßzelle auszusortieren. Die größeren Moleküle kollidieren in der Stoßzelle häufiger und werden stärker abgebremst als einatomige Ionen. Auch durch Reaktionen entstehende Moleküle haben eine geringere kinetische Energie. Durch die sog. KED (Kinetic Energy Discrimination) können die langsamen Teilchen die Stoßzelle nicht passieren.

Von der Stoßzelle gelangen die zu analysierenden Ionen in das Quadrupol-Stabsystem, das aus vier gleichen Metallstäben (i. d. R. Molybdän) besteht (s. Bild C4). Die Stäbe sind im Quadrat angeordnet, und an den diagonal gegenüberliegenden Stäben liegt jeweils eine Gleichspannung gleichen Vorzeichens an. Der Gleichspannung wird eine Wechselspannung mit 2,5 MHz überlagert. Auf diese Weise können nur Ionen mit einem bestimmten Masse/Ladungsverhältnis in einer stabilen Bahn das Quadrupol passieren und detektiert werden /Wie01/. Alle anderen Ionen treffen auf einen Stab auf und werden entladen.

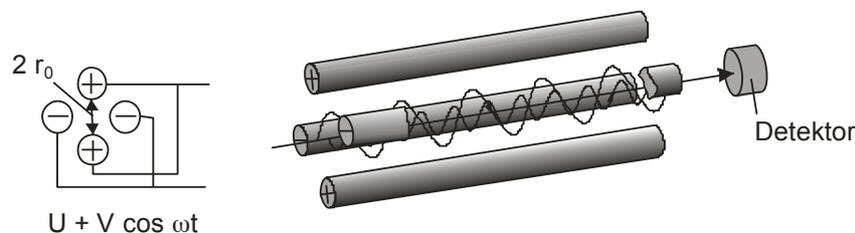


Bild C4: Skizze eines Quadrupol Massenspektrometers (s. /Bec07, Wie01/)

Bei einem Massenscan wird schrittweise die Amplitude der Wechselspannung variiert, so dass die unterschiedlich schweren Ionen nacheinander erfasst werden können. Ein Schritt dauert dabei weniger als 20 ms. Das Auflösungsvermögen wird vom Scheitelabstand der Stäbe und dem Verhältnis von Gleichspannung zu Hochfrequenzwechselspannung bestimmt. Im Allgemeinen wird mit einer Auflösung von rd. 1 u gearbeitet (u: atomic mass unit; $1 \text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$) /Wie01/. Im Detektor werden die Ionen erfasst, die das Quadrupol passiert haben. Die Signalintensität hängt dabei unmittelbar von der Anzahl der auftreffenden Ionen ab. Um das Auftreffen von Photonen und beschleunigten Neutralteilchen zu verhindern, werden die Detektoren vielfach um 90° gedreht angebracht und die Ionen über Deflektoren zum Detektor gelenkt /Wie01/.

Zur Kalibrierung der ICP-MS werden ein interner Standard (z. B. Rhodium) sowie externe Standardlösungen verwendet. Gegenüber der Optische Emissionsspektrometrie (OES) ist die Massenspektrometrie deutlich nachweisstärker (> Faktor 1000).

Neben den bereits erwähnten spektralen Interferenzen können bei der ICP-MS weitere Störungen durch Matrixeffekte entstehen. Dies ist bei Lösungen mit einem erhöhten gelösten Feststoffanteil der Fall. Folgende Beeinträchtigungen können durch hohe Ionenfrachten entstehen /Wie01/:

- Beeinträchtigung der Zerstäubung durch veränderte Dichte, Viskosität und Oberflächenspannung der Lösung
- Ablagerungen im Injektionsrohr der ICP und daraus resultierend ein verändertes Strömungsverhalten des Zerstäubergases
- Ablagerungen an den Öffnungen von Sampler und Skimmer mit einer Beeinträchtigung des Strömungsverhaltens bis zur Verstopfung der Öffnungen (besonders kritisch: Al und Si, die sich als Oxide am Sampler ablagern)
- Raumladungseffekte im Interface und in der Ionenoptik, die bei hoher Ladungsdichte durch Abstoßung der positiv geladenen Ionen entstehen. Dabei werden leichte Teilchen stärker von der Flugbahn abgelenkt als schwere; es kommt zu Minderbefunden bei den leichten Teilchen (Massendiskriminierung).