

---

# PROBENAHE- UND ANALYSENKAMPAGNE ZUR VERIFIZIERUNG DER AUSWIRKUNGEN DER ERSATZBAUSTOFFVERORDNUNG AUF DEN EINSATZ VON RC-BAUSTOFFEN IN BADEN-WÜRTTEMBERG

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG

Anzahl der Seiten: 39  
Anlagen: 1  
Datum: 25. November 2015

---



**INSTITUT  
FRESENIUS**

**SGS**

# INHALT

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNGEN</b>	<b>7</b>
<b>3.1</b>	<b>AUSWAHL DER PROBEN UND PROBENAHEME</b>	<b>7</b>
<b>3.2</b>	<b>PROBENAUFBEREITUNG, KÖRNUNG UND STOFFLICHE ZUSAMMENSETZUNG</b>	<b>7</b>
<b>3.3</b>	<b>CHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN</b>	<b>8</b>
3.3.1	Probenvorbereitung, Probenvorbehandlung	9
3.3.2	Kurzbeschreibung der Elutionen/Perkolationen	9
<b>3.4</b>	<b>ANWENDUNG DER ELUTIONEN/PERKOLATIONEN IN DER EBV 2012</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE BISHERIGER UNTERSUCHUNGEN</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN</b>	<b>13</b>
<b>5.1</b>	<b>ERGEBNISSE KORNGRÖSSENVERTEILUNG</b>	<b>13</b>
<b>5.2</b>	<b>ERGEBNISSE STOFFLICHE ZUSAMMENSETZUNG</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>ERGEBNISSE CHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN</b>	<b>16</b>
<b>6.1</b>	<b>PAK</b>	<b>16</b>
<b>6.2</b>	<b>MEHRFACHBESTIMMUNG PAK IM FESTSTOFF</b>	<b>16</b>
<b>6.3</b>	<b>SULFAT</b>	<b>19</b>
<b>6.4</b>	<b>PHENOLINDEX UND SUMME DER PHENOLE</b>	<b>19</b>
<b>6.5</b>	<b>SCHWERMETALLE UND ARSEN</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>DISKUSSION DER ERGEBNISSE</b>	<b>22</b>
<b>7.1</b>	<b>VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT DEM UVM-ERLASS</b>	<b>22</b>
<b>7.2</b>	<b>VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT DER EBV 2012</b>	<b>24</b>
7.2.1	Parameter im Feststoff: Metalle und PAK	24
7.2.2	Vergleich PAK-Feststoff mit PAK-Eluat-/Perkolat	25
7.2.3	Sulfat	26
7.2.4	Vergleich PAK und Sulfat bzgl. ihrer Relevanz für die Einstufung	27
<b>7.3</b>	<b>VERGLEICH ZUORDNUNGEN UVM-ERLASS VS. EBV 2012</b>	<b>29</b>
<b>7.4</b>	<b>VERGLEICH DER AUFSCHLUSSVERFAHREN</b>	<b>30</b>
7.4.1	Sulfat	30
7.4.2	PAK	33
7.4.3	Chrom	35
<b>8</b>	<b>SCHLUSSBEMERKUNG</b>	<b>36</b>
	<b>QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>38</b>
	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>38</b>

**TABELLEN:**

Tabelle 1:	Charakteristische Merkmale von Elutionen/Perkolationen	11
Tabelle 2:	Mittelwert der stofflichen Bestandteile aller Proben	15
Tabelle 3:	Statistische Auswertung für PAK (mg/kg Feststoff, µg/l Eluat bzw. Perkolate)	16
Tabelle 4:	Statistische Auswertung der PAK-Dreifach- und -Doppelbestimmungen (mg/kg Feststoff)	18
Tabelle 5:	Statistische Auswertung für Sulfat (mg/l Eluat bzw. Perkolate)	19
Tabelle 6:	Statistische Auswertung für Phenolindex und Summe der Phenole (µg/l Eluat bzw. Perkolate)	20
Tabelle 7:	Statistische Auswertung für Metalle (mg/kg Feststoff)	20
Tabelle 8:	Statistische Auswertung für Chrom (gesamt) (mg/kg Feststoff, mg/l Eluat bzw. Perkolate)	21
Tabelle 9:	Statistische Auswertung für Vanadium (mg/l Eluat bzw. Perkolate)	21
Tabelle 10:	Statistische Auswertung aller Analysen nach UVM-Erlass	22
Tabelle 11:	Anteil der Zuordnungen nach UVM-Erlass (KW C10–C40 und elektr. Leitfähigkeit nicht berücksichtigt)	24
Tabelle 12:	Gehalte und hier verwendete Zuordnungswerte für Metalle im Feststoff	25
Tabelle 13:	Zuordnungen durch PAK im Feststoff nach EBV 2012	25
Tabelle 14:	Anteile der Zuordnung nach EBV 2012	28
Tabelle 15:	Zuordnungen nach UVM-Erlass und EBV 2012	29
Tabelle 16:	Geschätzte Kosten der Aufschlussmethoden (Laborkosten Einzelprobe)	36

**ABBILDUNGEN:**

Abbildung 1:	Säulenversuch nach DIN 19528 – schematischer Versuchsaufbau	10
Abbildung 2:	Korngrößenverteilung aller Proben nach DIN EN 933-1	13
Abbildung 3:	Stoffliche Zusammensetzung der Proben, nach Betonanteilen sortiert	14
Abbildung 4:	PAK-Ergebnisse der Doppelbestimmungen (mg/kg Feststoff)	17
Abbildung 5:	PAK-Ergebnisse der Dreifachbestimmungen (mg/kg Feststoff)	18
Abbildung 6:	Anzahl der Proben für PAK- und Sulfat-Einstufung nach UVM-Erlass	23
Abbildung 7:	Vergleich PAK-Feststoff- mit PAK-Eluat- und -Perkolat-Werten	26
Abbildung 8:	Histogramm Sulfat	27
Abbildung 9:	Einstufung nach EBV für PAK und Sulfat im Säulenkurztest	29
Abbildung 10:	Vergleich der Aufschlussverfahren für Sulfat	31
Abbildung 11:	Häufigkeitsverteilung Sulfat DIN 38414-4	31
Abbildung 12:	Häufigkeitsverteilung Sulfat W/F 2:1-Säulenkurztest	32
Abbildung 13:	Häufigkeitsverteilung Sulfat W/F 2:1-Schüttel-Eluat	32
Abbildung 14:	Häufigkeitsverteilung Sulfat Berechnung DIN 19528, 9.4.3	33
Abbildung 15:	Vergleich der Aufschlussverfahren für PAK-15	34
Abbildung 16:	Vergleich der Aufschlussverfahren für Chrom (gesamt)	34

**ANLAGEN:**

1	Ergebnistabellen
1.1	Probenliste, stoffliche Zusammensetzung und Korngrößenverteilung
1.2	Ergebnistabelle Doppelproben PAK (EPA) im Feststoff
1.3	Ergebnistabelle gesamt DIN A0

# 1 ZUSAMMENFASSUNG

---

Das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg beabsichtigt mit der vorliegenden Studie zu untersuchen, wie sich die Ersatzbaustoffverordnung der Bundesrepublik Deutschland (Entwurf 31.10.2012) auf die Einsetzbarkeit von mineralischen Recyclingbaustoffen im Vergleich zum in Baden-Württemberg geltenden Regelwerk auswirkt.

Dazu wurden von Dezember 2014 bis Februar 2015 über Baden-Württemberg verteilt insgesamt 50 Proben von gebrochenem Bauschutt entnommen. Neben stationären Anlagen wurden auch mobile Anlagen auf Baustellen angefahren und vor Ort aufbereitete Materialien beprobt. Die Probenahme erfolgte gemäß EBV, Stand 2012, nach DIN EN 932-1 und unter Mitberücksichtigung des QRB-Leitfadens „Probenbehandlung“.

Anschließend erfolgten im Labor Untersuchungen bzgl. Korngrößenverteilung und stofflicher Zusammensetzung sowie chemische Untersuchungen im Feststoff und in den Aufschlussverfahren:

- DIN 38414-4: W/F-10:1-Schüttel-Eluat,
- DIN 19527: W/F-2:1-Schüttel-Eluat (organische Parameter),
- DIN 19529: W/F-2:1-Schüttel-Eluat (anorganische Parameter),
- DIN 19528: Perkolat aus dem W/F-2:1-Säulenkurztest,
- DIN 19528: Perkolate aus dem ausführlichen Säulenversuch.

Chemische Analysen wurden auf die Parameter des UVM-Erlasses sowie der EBV 2012 durchgeführt, ergänzend wurden weitere Parameter wie z. B. DOC und Gesamtgehalt gelöster Stoffe analysiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass für die Einstufung nach EBV wie nach UVM-Erlass in erster Linie Sulfat und PAK (EPA) limitierend sind, bezogen auf den UVM-Erlass außerdem Chrom (gesamt) und der Phenolindex. Die übrigen Schwermetalle sowie Arsen sind weder nach UVM-Erlass noch nach der EBV relevant.

Nach UVM-Erlass können 44 % der Proben in die Klasse Z1.1 eingestuft werden (elektrische Leitfähigkeit und KW C10–C40 wegen Bitumenanteilen nicht berücksichtigt). In die Klassen Z1.2 bzw. Z2 sind 30 % bzw. 6 % der Proben einzustufen und für 20 % der Proben ist eine Verwertung nach UVM-Erlass ausgeschlossen, da Gehalte > Z2 festgestellt wurden. Betrachtet man die Einstufung jeder Probe und den jeweils für die Einstufung > Z1.1 relevanten Parameter, so ist bei 32 % der Proben Sulfat (mit)verantwortlich für die höhere Einstufung. Die PAK sind beim Vergleich mit den Zuordnungswerten des UVM-Erlasses für lediglich 10 % der Proben der relevante Parameter. Zwei Proben weisen sowohl für PAK als auch für Sulfat eine Überschreitung des Z1.1-Wertes auf. Der Chrom-Z1.1-Wert von 0,03 mg/l ist bei neun Proben überschritten. Der Phenolindex zeigt bei acht der 50 Proben eine Überschreitung des Z1.1-Wertes, der Z1.2-Wert wird jedoch in keiner Probe überschritten.

Bezogen auf die EBV sind in Abhängigkeit vom Aufschlussverfahren 58 bis 62 % der Proben in RC-1 einzustufen. Wird nur Sulfat betrachtet, sind es zwischen 68 und 72 % der Proben. Lediglich bei 8 bis 12 % der Proben führt das PAK-Eluat bzw. -Perkolat zu einer höheren Einstufung. Bei 10 % der Proben führt das PAK-Ergebnis im Feststoff zu einer höheren Einstufung. Die übrigen Parameter bleiben durchweg unter den jeweiligen RC-1-Werten.

Im Vergleich der Aufschlussverfahren nach EBV miteinander liegen die Befunde im W/F-2:1-Schüttel eluat tendenziell höher als die im W/F-2:1-Säulenkurztest und die nach DIN 19528, 9.4.3 berechneten.

Werden nur die Parameter Sulfat und PAK (Feststoff) betrachtet, sind nach beiden Regelwerken gleich viel Proben in die „Produkt-Kategorien“ Z1.1 bzw. RC-1 einzustufen. Die geringere „Produktquote“ bei Bewertung nach UVM-Erlass (44 %) im Vergleich zur EBV 2012 (58 bis 62 %) ist allein auf die beiden Parameter Chrom (Feststoff) bzw. Phenolindex zurückzuführen, für die die EBV höhere bzw. keine Materialwerte nennt.

## 2 AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

---

Nach vorausgegangener Ausschreibung beauftragte das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Referat 25 „Siedlungsabfallwirtschaft, Abfalltechnik“, D-70182 Stuttgart, am 19.11.2014 das SGS Institut Fresenius GmbH, Niederlassung D-78315 Radolfzell (nachfolgend „SGS“), in Bietergemeinschaft mit der HPC AG, Standort Stuttgart (nachfolgend „HPC“), und dem Institut Dr. Haag GmbH, D-70806 Kornwestheim (nachfolgend „Dr. Haag“), mit dem Forschungsprojekt „Probenahme- und Analysenkampagne zur Verifizierung der Auswirkungen der Ersatzbaustoffverordnung auf den Einsatz von RC-Baustoffen in Baden-Württemberg“

Ziel des Projekts ist, durch die Untersuchung von 50 Bauschuttproben zu bewerten, wie sich die Ersatzbaustoffverordnung der Bundesrepublik Deutschland (Entwurf 31.10.2012, nachfolgend „EBV 2012“<sup>[1]</sup>) auf die Einsetzbarkeit von mineralischen Recyclingbaustoffen („RC-Baustoffe“) auswirkt.

Dabei wurden bewusst nicht Materialien ausgewählt, die z. B. für eine Verwertung als Produkt vorgesehen waren, sondern angestrebt, die ganze Bandbreite der anfallenden Materialien zu erfassen. Vorgaben waren: „maximal 20 % der Proben Produktstatus“ und maximal 1/3 der Anlagen QRB-Betriebe.

Dazu waren Bauschuttproben in Recyclinganlagen Baden-Württembergs zu entnehmen, bzgl. Körnung, stofflicher Zusammensetzung und chemischer Parameter in Feststoff, Eluaten und Perkolaten nach bestehendem und geplantem Regelwerk zu analysieren sowie die Untersuchungen statistisch und systematisch auszuwerten und vergleichend zwischen bestehendem und geplantem Regelwerk Aussagen zu treffen über die Unter- bzw. Überschreitung von Grenzwerten.

Als „bestehendes Regelwerk“ gelten derzeit in Baden-Württemberg die „Vorläufigen Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial“, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, 2004 („UVM-Erlass“<sup>[2]</sup>).

Das hier berichtete Projekt baut auf den Untersuchungen der LUBW Karlsruhe von 09/2008<sup>[3]</sup>, 08/2010<sup>[4]</sup> und 08/2014<sup>[5]</sup>, dem UBA-Forschungsbericht Grathwohl/Susset 2011<sup>[6]</sup> und dem LUWG-Bericht 2012<sup>[7]</sup> auf und ergänzt diese.

## 3 DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNGEN

### 3.1 AUSWAHL DER PROBEN UND PROBENAHEME

50 Bauschuttproben wurden von Mitte Dezember 2014 bis Mitte Februar 2015 in 31 Recyclinganlagen entnommen. Zur Erreichung der beauftragten Ziele „maximal 20 % der Proben Produktstatus“ und „maximal sieben der 20 Anlagen QRB-Betriebe“ wurden neben stationären Anlagen vor allem mobile Anlagen angefahren. Damit sollten auch frühere Untersuchungen ergänzt werden, die durch die Einschränkung auf stationäre Anlagen vor allem Proben mit Produktstatus mit geringen Schadstoffgehalten behandelten und somit jenen großen Teil des Stoffstroms ausklammerten, der nach mobilem Brechen an der Anfallstelle direkt verwertet oder entsorgt wird.

Die Probenahmestandorte befinden sich in allen vier Regierungsbezirken Baden-Württembergs. Der leichte Schwerpunkt der Probenahmestellen auf dem Regierungsbezirk Stuttgart und dem Raum Mittlerer Neckar dürfte dem Massenaufkommen der RC-Baustoffe in Baden-Württemberg entsprechen.

Die Probenahme erfolgte gemäß EBV, Stand 2012, § 10<sup>[11]</sup> nach DIN EN 932-1<sup>[17]</sup> unter Mitberücksichtigung des QRB-Leitfadens „Probenbehandlung“<sup>[8]</sup>.

Wegen des umfangreichen Programms chemischer Untersuchungen und vor allem der Anforderungen an die Materialmenge bei der Perkolation von grobkörnigem Material (Minstdurchmesser und damit -volumen der Perkolationssäule in Abhängigkeit von der Materialkorngröße) wurden je Probe mindestens 40 kg Material entnommen, 30 kg zusätzliches Probenmaterial für ein weiteres, hier nicht berichtetes Forschungsvorhaben.

Für fünf Proben wurden zusätzlich je 20 kg Probenmaterial gewonnen, um zur geforderten „Bestimmung der laborinternen Reproduzierbarkeit“ einen Dreifachansatz der chemischen Parameter durchzuführen.

Die Proben wurden in 10-l-PE-Eimern mit Deckel abgefüllt, anonymisiert beschriftet und mit Pkw jeweils innerhalb maximal vier Tagen zur Probenaufbereitung spedit.

### 3.2 PROBENAUFBEREITUNG, KÖRNUMG UND STOFFLICHE ZUSAMMENSETZUNG

Im Institut Dr. Haag erfolgte im Januar/Februar 2015 die Probenaufbereitung durch Homogenisierung des Inhalts der sechs 10-l-Eimer je Probe auf einer sauberen Unterlage mittels Schaufeln. Anschließend wurden die Proben nach DIN EN 932-2<sup>[9]</sup> wegen der großen Probenmenge in mehreren Durchgängen im Riffelteiler in drei Teilproben geteilt, für die Bestimmung der Korngrößenverteilung und der stofflichen Zusammensetzung sowie die chemischen Untersuchungen.

Anschließend wurden die Korngrößenverteilung nach nassem Abtrennen der Feianteile gemäß DIN EN 933-1<sup>[10]</sup> und die stoffliche Zusammensetzung gemäß TP Gestein-StB, Teil 3.1.5.<sup>[11]</sup> bestimmt. Hierbei bemisst sich die Größe der Laborprobe nach dem Größtkorn der Probe (z. B. ca. 20 kg bei Korngemisch mit Größtkorn 45 mm).

Für jede Probe wurden dreizehn Korngrößenklassen (0,063 → 125 mm) und neun Stoffgruppen bzgl. der stofflichen Zusammensetzung, also insgesamt 1.100 Messergebnisse, ermittelt.

### 3.3 CHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die chemischen Untersuchungen inkl. methodenspezifischer Probenvorbereitung und Probenvorbehandlung erfolgten nach Versand per Spedition im Routineumweltlabor SGS Institut Fresenius, Herten, von Januar bis März 2015. Der Untersuchungsumfang war folgender:

#### FESTSTOFFPARAMETER:

- Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink; EOX, Kohlenwasserstoffindex (MKW, C10–C22 und C10–C40), PAK (Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe, 16 Verbindungen nach EPA), PCB (Polychlorierte Biphenyle, 7 Kongenere nach DepV bzw. EBV 2012), TOC (Total Organic Carbon)

#### PARAMETER IN DEN WÄSSRIGEN AUFSCHLÜSSEN:

- pH-Wert, elektr. Leitfähigkeit, Chlorid, Sulfat, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink, DOC, Gesamtgehalt gelöster Stoffe, Antimon, Molybdän, Vanadium, Phenolindex (gesamt), Phenol (Einzelparameter mit GC), Phenole (26 Einzelverbindungen mit GC: Chlor-, Methyl-, Phenyl-, Nitrophenole)

#### AUFSCHLUSSVERFAHREN:

- DIN 38414-4: W/F-10:1-Schüttel-Eluat<sup>[12]</sup>,
- DIN 19527: W/F-2:1-Schüttel-Eluat (organische Parameter)<sup>[13]</sup>,
- DIN 19529: W/F-2:1-Schüttel-Eluat (anorganische Parameter)<sup>[15]</sup>,
- DIN 19528: Perkolat aus dem W/F-2:1-Säulenkurztest<sup>[14]</sup>,
- DIN 19528: Perkolate aus dem ausführlichen Säulenversuch.

Zusätzlich wurde eine Berechnung der 2:1-Säulenperkolatwerte nach DIN 19528, 9.4.3 durchgeführt, hier je Probe für die anorganischen Parameter (außer dem logarithmischen pH-Wert), den Phenolindex (gesamt) und Naphthalin, Benzo(a)pyren, Summe PAK-15 und Summe PAK-16. Lag ein Messwert unter der analytischen Bestimmungsgrenze, ging er mit dem Wert 0 in die Berechnung ein. Für die Phenole wurde wegen der geringen festgestellten Konzentrationen auf diese Berechnung verzichtet.

Die Labormethoden der chemischen Untersuchungen entsprechen den methodischen Vorgaben des UVM-Erlasses und der EBV 2012.

Die Liste der untersuchten chemischen Verbindungen ergibt sich aus den nach EBV 2012 (§ 6 (2) und § 9 (1) – Erstprüfung, erweiterte Fremdüberwachung: grundlegende Charakterisierung – und Anlage 4, Tabelle 2) in Recyclingbaustoffen „zu untersuchenden Parametern“. Dies geht über die Parameter hinaus, für die in Anlage 1, Tabelle 1 der EBV 2012 Materialwerte genannt sind.

Dies wird im Projekt dadurch erweitert,

- dass die PAK im Feststoff wegen der erfahrungsgemäß hohen probeninternen Schwankungen doppelt bestimmt werden, mit eigener Barcode-Nummer in separatem Aliquot,
- dass die „Phenole“ in allen Eluaten und Perkolaten sowohl als Index (gesamt) als auch die Einzelverbindungen mittels GC bestimmt werden.

Für jede Probe liegen damit an chemischen Daten vor:

- 36 Messwerte im Feststoff (plus 2 Summenbildungen PAK-16 und 3 Summen PCB [DIN, LAGA, nachgewiesene]),
- 126 Messwerte anorganische Parameter, DOC, Phenolindex und gelöste Stoffe in den Eluaten/Perkolaten nach DIN 38414-4/19727/19528/19529 (18 Parameter x 7 Eluate/Perkolate),
- 329 Messwerte PAK und Phenole (43 Einzelverbindungen x 7 Eluate/Perkolate) plus 2 x 7 Summenbildungen PAK-15 und 2 x 7 Summenbildungen Phenole,
- 21 nach EBV 2012, 9.4.3 berechnete 2:1-Säulenperkolatwerte für anorganische Parameter, DOC, Phenolindex, gelöste Stoffe und PAK,
- zusätzlich 2 vollständige Datensätze für 5 Proben („Dreifachansatz“),

also gesamt 31.020 Daten (517 Werte x 60 Analysenproben).

Für die doppelbestimmten PAK-Gehalte im Feststoff wurden für die weitere Auswertung die arithmetischen Mittelwerte bzgl. Naphthalin, Benzo(a)pyren und Summe PAK-16 (EPA) verwendet. Hierbei wurden Messwerte kleiner der Bestimmungsgrenze mit 0 angesetzt.

Bei den für die „Bestimmung der laborinternen Reproduzierbarkeit“ durchgeführten Dreifachansätzen wurde für die weitere Auswertung je Parameter ebenso verfahren.

### 3.3.1 Probenvorbereitung, Probenvorbehandlung

Im Zusammenhang mit der Untersuchung von Bauschuttproben ist der Hinweis wichtig, dass die DIN 19527, 19528 und 19529 vorschreiben, dass die Probe „grundsätzlich unverändert im Original zu untersuchen“ ist. Allerdings ist bei „einem Größtkorn > 32 mm der Anteil > 32 mm abzutrennen, zu brechen und anschließend daraus die Körnung 16/32 mm dem Gemisch 0/32 mm in dem Mengenanteil zuzufügen, in dem der Anteil > 32 mm in der Ausgangskörnung vorlag“.

Für das Eluat nach DIN 38414-4 „ist das Material in dem Zustand zu untersuchen, in dem es deponiert wird. Eine Zerkleinerung ist nur insoweit vorzunehmen, wie sie für die Untersuchung notwendig ist“. Die DIN nennt hierfür die Korngröße „10 mm“, was im Labor SGS Institut Fresenius so umgesetzt wird.

### 3.3.2 Kurzbeschreibung der Elutionen/Perkolationen

Der grundsätzliche Unterschied zwischen einem „Eluat“ und einem „Perkolat“ liegt darin, dass nach der vorgenannten Probenvorbereitung/-vorbehandlung (vgl. Tabelle 1)

- für ein „Eluat“ ein wässriger Auszug durch 24-stündiges Überkopfschütteln der Probe hergestellt und das gewonnene Eluat dekantiert (DIN 19527: organische Stoffe) bzw. filtriert (DIN 19529: anorganische Stoffe) wird. Beim Eluat nach DIN 38414-4 geschieht dies im Wasser-Feststoff-Verhältnis (W/F) 10:1, bei den DIN 19527 und 19529 im W/F 2:1,
- für ein „Perkolat“ eine Säule (DIN 19528: Innendurchmesser  $\geq 2x$  Proben-Größtkorn, Säulenhöhe  $\geq 4x$  Innendurchmesser) mit dem Probenmaterial gefüllt, von unten nach oben über 2 h mit Wasser gesättigt und danach im Aufwärtsstrom durchströmt („perkoliert“) wird, bei der DIN 19528 ohne zusätzliche Ruhezeit zur

Gleichgewichtseinstellung. Die Perkulationsrate und damit die Dauer der Perkolation ergeben sich aus der vorgeschriebenen Kontaktzeit (eines theoretischen Wassertropfens mit der Probe) von fünf Stunden, dem Säulenvolumen und der Porosität der Probe. Daraus ergeben sich unter Umständen mehrere Tage Perkulationsdauer.

Im ausführlichen Säulenversuch nach DIN 19528 werden vier Perkolate gewonnen, also vier Laborproben analysiert, die jeweils nach Erreichen der Wasser-Feststoff-Verhältnisse (W/F) von 0,3, 1, 2 und 4 gewonnen werden. Die Perkolation läuft jeweils weiter, so dass z. B. bei 5 kg Probenmenge Volumina von 1,5 Liter (= 0,3 x 5 kg), 3,5 Liter (= 0,7 x 5 kg), 5 Liter (= 1,0 x 5 kg) und 10 Liter (= 2 x 5 kg) gewonnen werden. Die Aufsummierung der Wasser- und Feststofffaktoren ergibt letztlich das gesamte Wasser-Feststoff-Verhältnis von 4.

Die Berechnung der 2:1-Säulenperkolatwerte nach DIN 19528, 9.4.3 erfolgt bei den hier angewendeten W/F-Verhältnissen nach der Formel  $(0,3 \times C_1 + 0,7 \times C_2 + 1,0 \times C_3) / 2$ ; siehe hierzu auch Abb.1.

Im 2:1-Säulenkurztest nach DIN 19528 wird das perkolierte Wasser kumuliert bis zum Erreichen des W/F 2 gewonnen. Es wird eine Laborprobe analysiert.

Eine weitere Perkulationsmethode ist die CEN/TS 14405<sup>[16]</sup>. Nach ihr wird im vorliegenden Projekt nicht untersucht, jedoch sind ihre charakteristischen Merkmale der Vollständigkeit halber in Tabelle 1 aufgenommen.

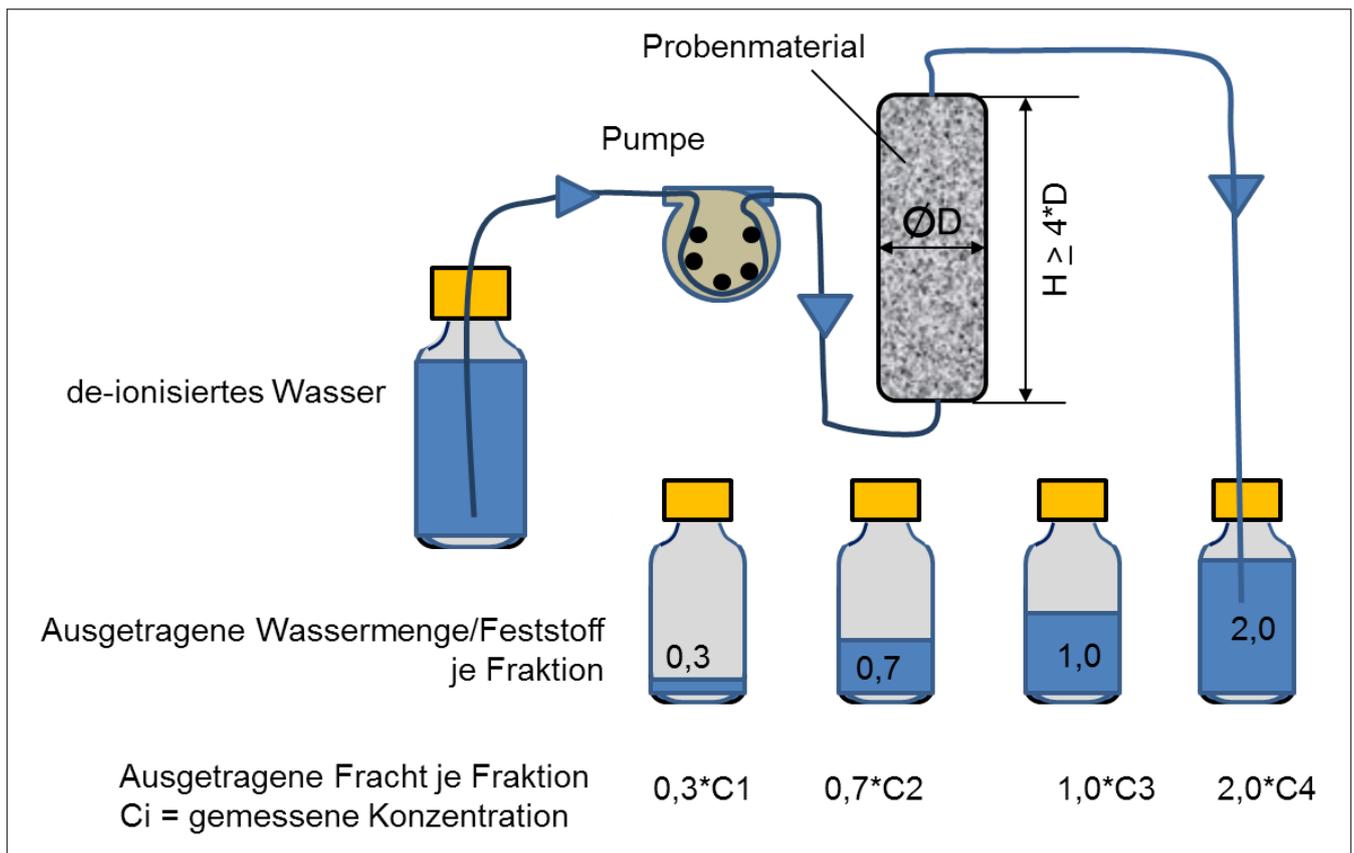


Abbildung 1: Säulenversuch nach DIN 19528 – schematischer Versuchsaufbau

	DIN 38414-4, DIN EN 12457-4	DIN 19527, DIN 19529	DIN 19528	CEN/TS 14405
Probenmenge (RC)	ca. 100 g	bis 2,5 kg	2 bis ca. 10 kg	mind. 10 kg
Zerkleinerung	< 10 mm	Fraktion > 32 mm brechen, daraus Körnung 16/32 wieder zugeben		< 10 mm
Aufschluss	Elution: Überkopfschütteln		Perkolation: Durchströmen einer Säule	
Wasser-Feststoff- Verhältnis W/F	10	2	0,3 bis 4	0,1 bis 10
Dauer (netto)	24 h		Aufsättigung: 2 h W/F 2:1: 1 bis 2 d ausführlich: 2 bis 4 d	Aufsättigung: 3 d ca. 30 d
Proben/Fraktionen	1		W/F 2:1: 1 Stk. ausführlich: 4 Stk.	bis zu 7 Stk.

Tabelle 1: Charakteristische Merkmale von Elutionen/Perkolationen

In der Praxis muss nach DIN 19528 z. B. für ein RC-Material 0/32 die Perkolationssäule mindestens einen Innendurchmesser von 6,4 cm und eine befüllbare Höhe von 25,6 cm aufweisen. Das ergibt ein Mindestprobenvolumen von 0,824 l bzw. bei einer angenommenen Dichte von 2 kg/l ca. 1,6 kg Mindestprobenmasse. Bei einem Wasser-Feststoff-Verhältnis (W/F) 2:1 ergeben sich daraus ca. 3 l Perkolat, was i. A. für die chemischen Laboruntersuchungen ausreicht. Ist jedoch der umfangreiche Parametersatz der Erstprüfung oder der erweiterten Fremdüberwachung der EBV 2012 auch im Perkolat des W/F 0,3 zu analysieren, benötigt das Labor 10 kg Probentrockenmasse zur Gewinnung der analytisch erforderlichen 3,0 l Perkolat.

Im berichteten Projekt wurden handelsübliche Säulen mit Innendurchmesser 10 cm verwendet. Bei ihren Höhen von 60 oder 65 cm ergibt sich durch Abzug der Filterschichten über und unter dem eingebauten Probenmaterial von mind. 6 cm eine maximale Befüllhöhe von 50 bis 60 cm. Für den 2:1-Säulenkurztest DIN 19528 wurden zur Reduktion der Perkulationsdauer die Säulen nur so hoch befüllt, dass genügend Perkolat für die Analytik zur Verfügung stand. Das restliche Säulenvolumen wurde mit Filtermaterial aufgefüllt. Für den ausführlichen Säulenversuch mussten zwei Säulen parallel angesetzt werden, um beim W/F 0,3 die für die Analytik erforderliche Perkolatmenge zu erhalten.

### 3.4 ANWENDUNG DER ELUTIONEN/PERKOLATIONEN IN DER EBV 2012

Laut EBV 2012, Anlage 4, Tabelle 1, ist der ausführliche Säulenversuch nach DIN 19528 durchzuführen im Rahmen des „Eignungsnachweises“ (§ 6) als Erstprüfung vor Aufnahme des regelmäßigen Betriebs (bei mobilen Anlagen einmalig je Aufstellung) und bei der zweijährlichen „erweiterten Fremdüberwachung (eFÜ)“:

Für die routinemäßigen „werkseigenen Produktionskontrollen (WPK)“ und die „Fremdüberwachungen (FÜ)“ können gleichwertig das 2:1-Schüttel-Eluat nach DIN 19527 bzw. DIN 19529 und der 2:1-Säulenkurztest nach DIN 19528 verwendet werden. Mit den so ermittelten Konzentrationen erfolgt der Vergleich mit den Materialwerten der Tabelle 1 der EBV 2012.

Damit auch mit den vier Analysedatensätzen aus der Erstprüfung und der eFÜ ein Vergleich mit den Materialwerten der EBV 2012 möglich ist, können aus den mit dem ausführlichen Säulenversuch ermittelten Konzentrationen 2:1-Säulenperkolatwerte nach DIN 19528, 9.4.3 als theoretische Konzentrationen berechnet werden (vgl. Kap. 3.3.2). Sie werden dann mit den Materialwerten der Tabelle 1 der EBV 2012 verglichen.

## 4 ERGEBNISSE BISHERIGER UNTERSUCHUNGEN

---

Die LUBW führte seit 2003 mehrere Untersuchungen durch, die das Ziel verfolgten, die Qualität von Recyclingbaustoffen zu dokumentieren<sup>[3], [4], [5]</sup>. Die letzten Untersuchungen von 2009<sup>[4]</sup> beschränkten sich auf Recyclingbetriebe, welche nicht dem QRB angehören.

In den Beprobungskampagnen wurde ersichtlich, dass in erster Linie die beiden Parameter PAK und Sulfat relevant sind, wenn es um Einschränkungen bei der Verwertung von RC-Baustoffen bzw. Bauschuttrecyclingmaterial geht.

Beim Vergleich der vier Untersuchungsverfahren Schüttel-Eluate im W/F 10:1 und W/F 2:1 sowie der beiden Perkolatverfahren nach DIN 19528 ergaben sich die höchsten Schadstoffkonzentrationen beim W/F 2:1-Schüttelverfahren nach DIN 19529/19527, die geringsten Werte im Eluat nach DIN 38414-4. Die Befunde der Perkolate lagen tendenziell zwischen denen der beiden Eluatverfahren.

Nach den Ergebnissen der LUBW-Studie von 2009<sup>[4]</sup> wurden 50 % der Proben in die Klasse RC-1 nach damaligem Entwurf der EBV (erster Arbeitsentwurf von 2007) eingestuft. Entscheidend waren dabei die Parameter Vanadium und Sulfat.

## 5 ERGEBNISSE PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN

### 5.1 ERGEBNISSE KORNGRÖSSENVERTEILUNG

Die durch Siebung ermittelte Korngrößenverteilung der Proben kann der Anlage 1.1 entnommen werden. Überwiegend handelt es sich um ein gut abgestuftes Korngemisch, welches meist auf die Sollkörnung 0/56 mm gebrochen wurde. 28 Proben wiesen beim Siebdurchgang 0,063 mm einen Wert < 5 Massenprozent auf und können somit als feinkornarm bezeichnet werden. Sechs Proben haben bei der Maschenweite 63 mm einen Massenanteil über 10 %.

Bei der Siebung mit 125 mm Maschenweite erreichten alle Proben 100 % Durchgang, beim Sieb der Maschenweite 63 mm wiesen jedoch fünf Proben bis zu fünf Massenprozent > 63 mm auf. Eine Probe bestand sogar zu ca. 25 % aus groben Bestandteilen größer als 63 mm (Probe P16). Die Sieblinien sind nachfolgend dargestellt.

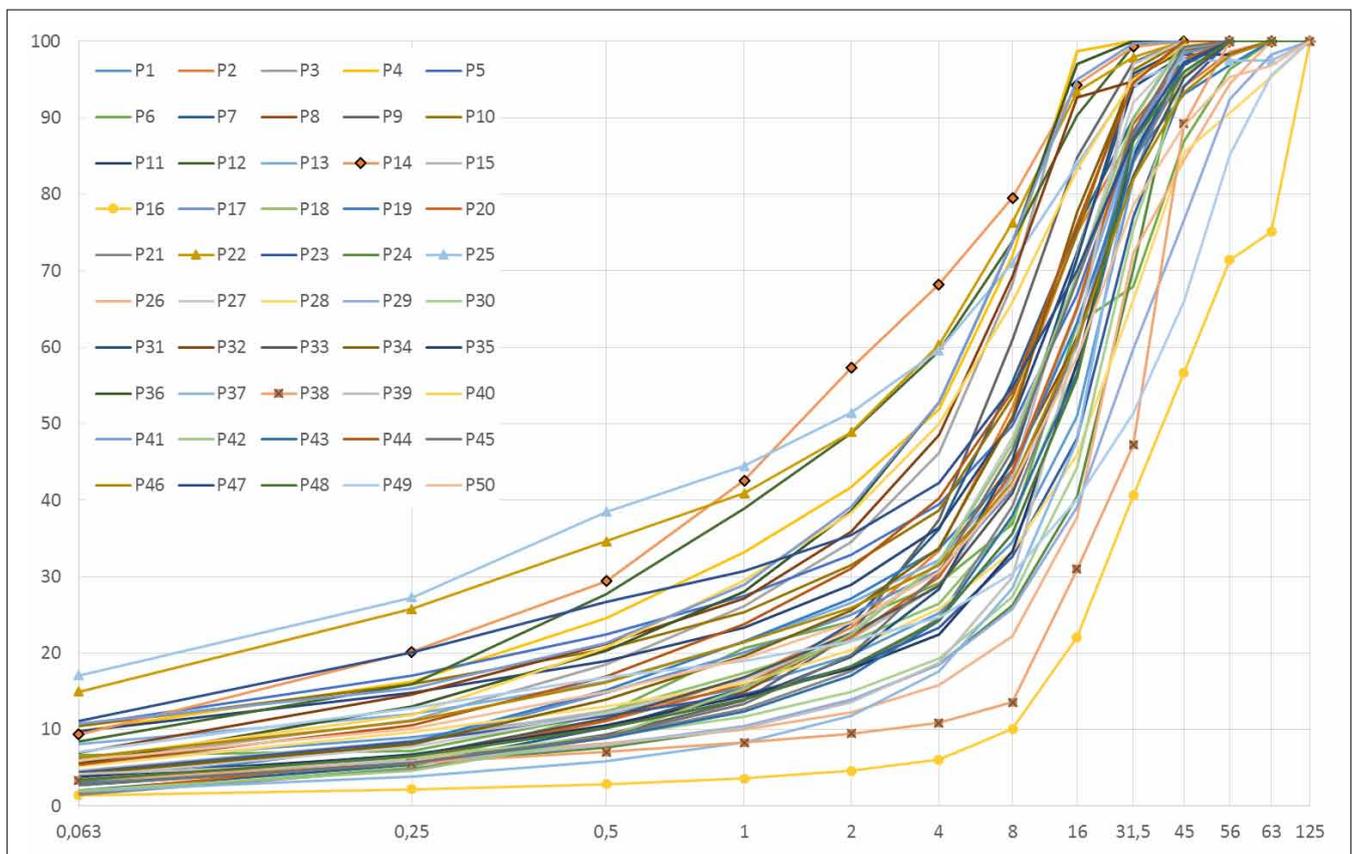


Abbildung 2: Korngrößenverteilung aller Proben nach DIN EN 933-1

## 5.2 ERGEBNISSE STOFFLICHE ZUSAMMENSETZUNG

In nachfolgender Abbildung 3 sind die Proben nach ihrer stofflichen Zusammensetzung dargestellt. Die Sortierung in der Darstellung erfolgt nach den Anteilen an Beton und anderen hydraulisch gebundenen Stoffen. Es zeigt sich, dass bezüglich der Betonanteile ein sehr breites Spektrum beprobt wurde. Die Anteile reichen von 3 bis 99 %. Weitere wesentliche Bestandteile der Proben sind natürliche Festgesteine und Kiese sowie Klinker, Ziegel und Steinzeug. In sehr unterschiedlichen Anteilen vorhanden ist zudem Asphalt. In den meisten Proben nachrangig enthalten sind „mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe wie Poren- und Bimsbeton“, „Holz, Gummi, Kunststoffe, Textilien“ sowie „Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe“

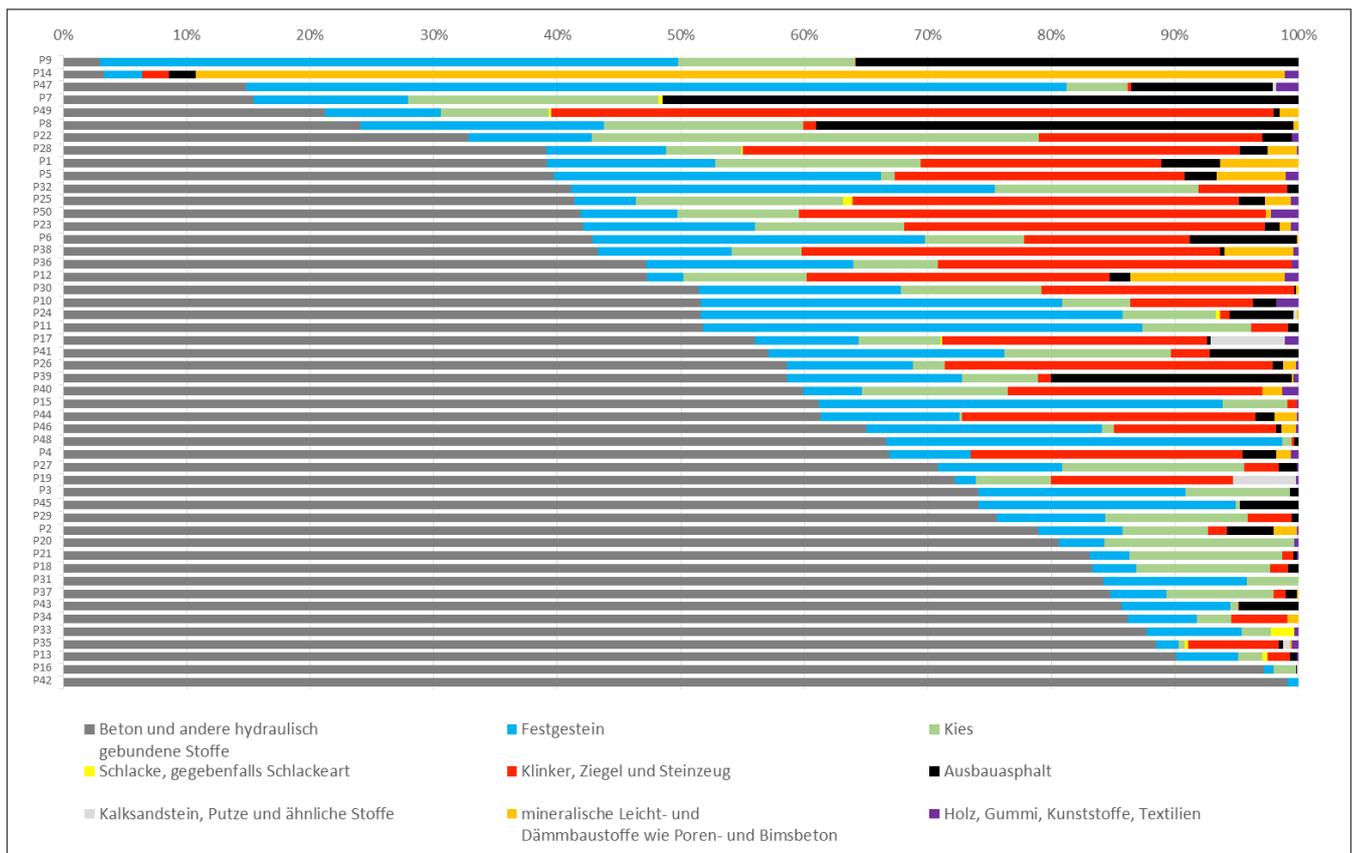


Abbildung 3: Stoffliche Zusammensetzung der Proben, nach Betonanteilen sortiert

Besonderheiten weisen die Probe P14 mit einem Anteil von 88 % Porenbauweise sowie die Proben P9, P7 und P8 mit einem überdurchschnittlichen Anteil an Asphalt von 35 bis 51 % auf.

Generell gering sind die Anteile an nicht mineralischen Fremdbestandteilen (Holz, Gummi, Kunststoffe, Textilien) sowie an Schlacken.

Im Mittelwert aller Proben liegen die in Tabelle 2 genannten Zusammensetzungen nach stofflicher Kennzeichnung gem. TP Gestein-StB, Teil 3.1.5 vor:

Stoffliche Kennzeichnung nach TP Gestein-StB, Teil 3.1.5	Mittelwert (Massenprozent )
Beton und andere hydraulisch gebundene Stoffe	57,9
Festgestein	14,6
Klinker, Ziegel und Steinzeug	11,5
Kies	8,0
Ausbauasphalt	4,5
Mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe wie Poren- und Bimsbeton	2,7
Holz, Gummi, Kunststoffe, Textilien	0,3
Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe	0,2
Schlacken	0,1

Tabelle 2: Mittelwert der stofflichen Bestandteile aller Proben

## 6 ERGEBNISSE CHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die Ergebnisse der chemischen Untersuchungen sind nachfolgend als statistische Auswertung der wichtigsten Parameter PAK, Sulfat, Phenole, Chrom (gesamt) und Vanadium zusammengefasst dargestellt. Die ausführlichen Datengrundlagen finden sich in den Anlagen 1.2 bis 1.3.

### 6.1 PAK

PAK im Feststoff (Summe 16 n. EPA) liegen mit einem Mittelwert von 4,3 mg/kg im gering beaufschlagten Bereich. Das 50. Perzentil (Median) liegt bei 1,6 mg/kg, was die Häufung der Proben im Bereich nahe der Bestimmungsgrenze belegt. Die Analysenergebnisse von fünf Proben (n = 50) überschreiten 10 mg/kg. Maximal wurden 49,8 mg/kg PAK gemessen.

Die Häufung der Werte im unteren Bereich findet sich auch in den Eluaten und Perkolaten wieder. Im Eluat DIN 38414-4 werden maximal 19,3 µg/l gemessen, im 2:1-Schüttel-Eluat nach DIN 19527 maximal 33,6 µg/l. Die Maxima der Perkolate lagen bei 17,3 µg/l (2:1-Säulenkurztest) und 22,4 µg/l (Berechnung nach DIN 19528, 9.4.3).

Methode	Mittelwert	Median 50. Perz.	75. Perz.	90. Perz.	Max.
Feststoff	4,3	1,6	3,6	9,2	49,8
Eluat DIN 38414-4	2,7	0,8	2,4	9,0	19,3
DIN 19527 2:1-Schüttel-Eluat	2,9	0,6	2,3	6,3	33,6
DIN 19528 Säulenkurztest 2:1	1,6	0,4	1,3	5,1	17,3
Berechnung 2:1 n. DIN 19528, 9.4.3	2,4	0,7	2,0	5,0	22,4
Perkolat DIN 19528 1. Fraktion	2,3	0,6	1,6	6,5	21,7
Perkolat DIN 19528 2. Fraktion	2,6	0,8	2,2	4,3	24,7
Perkolat DIN 19528 3. Fraktion	2,3	0,9	1,9	4,8	21,0
Perkolat DIN 19528 4. Fraktion	2,0	0,7	1,5	5,5	14,2

Tabelle 3: Statistische Auswertung für PAK (mg/kg Feststoff, µg/l Eluat bzw. Perkolate)

Beim ausführlichen Perkolat nach DIN 19528 sind die Befunde in der zweiten oder dritten Fraktion am höchsten. In der vierten Fraktion liegen die niedrigsten Werte vor. Dies unterscheidet die verhältnismäßig schlecht wasserlöslichen PAK von besser löslichen Stoffen wie z. B. Sulfat (s. u.).

Ein detaillierter Vergleich zwischen den Aufschlussverfahren nach EBV 2012 findet sich in Kapitel 7.4. Eine Auswertung bezüglich der PAK-Einzelparameter erfolgt im Rahmen vorliegender Studie nicht.

### 6.2 MEHRFACHBESTIMMUNG PAK IM FESTSTOFF

Aufgrund der bekannten uneinheitlichen Verteilung von PAK in Feststoffen wurden sämtliche Proben dahingehend zweifach angesetzt und analysiert. In folgendem Diagramm sind die beiden Analysen gegeneinander aufgetragen. Die Werte finden sich in Anlage 1.2. In allen weiterführenden Auswertungen wurde der Mittelwert aus den beiden Ergebnissen verwendet.

Die statistische Betrachtung des Vergleichs zeigt, dass die mittlere Abweichung der Messwerte vom jeweiligen Mittelwert (= Standardabweichung bei  $n = 2$ ) absolut bei 0,43 mg/kg bzw. bei ca. 10 % liegt. Allerdings können in Einzelfällen die Konzentrationsunterschiede beträchtlich sein (hier in vier von neun Proben mit bedeutsamen PAK-Gehalten [ $> 10$  mg/kg Summe 16 nach EPA]).

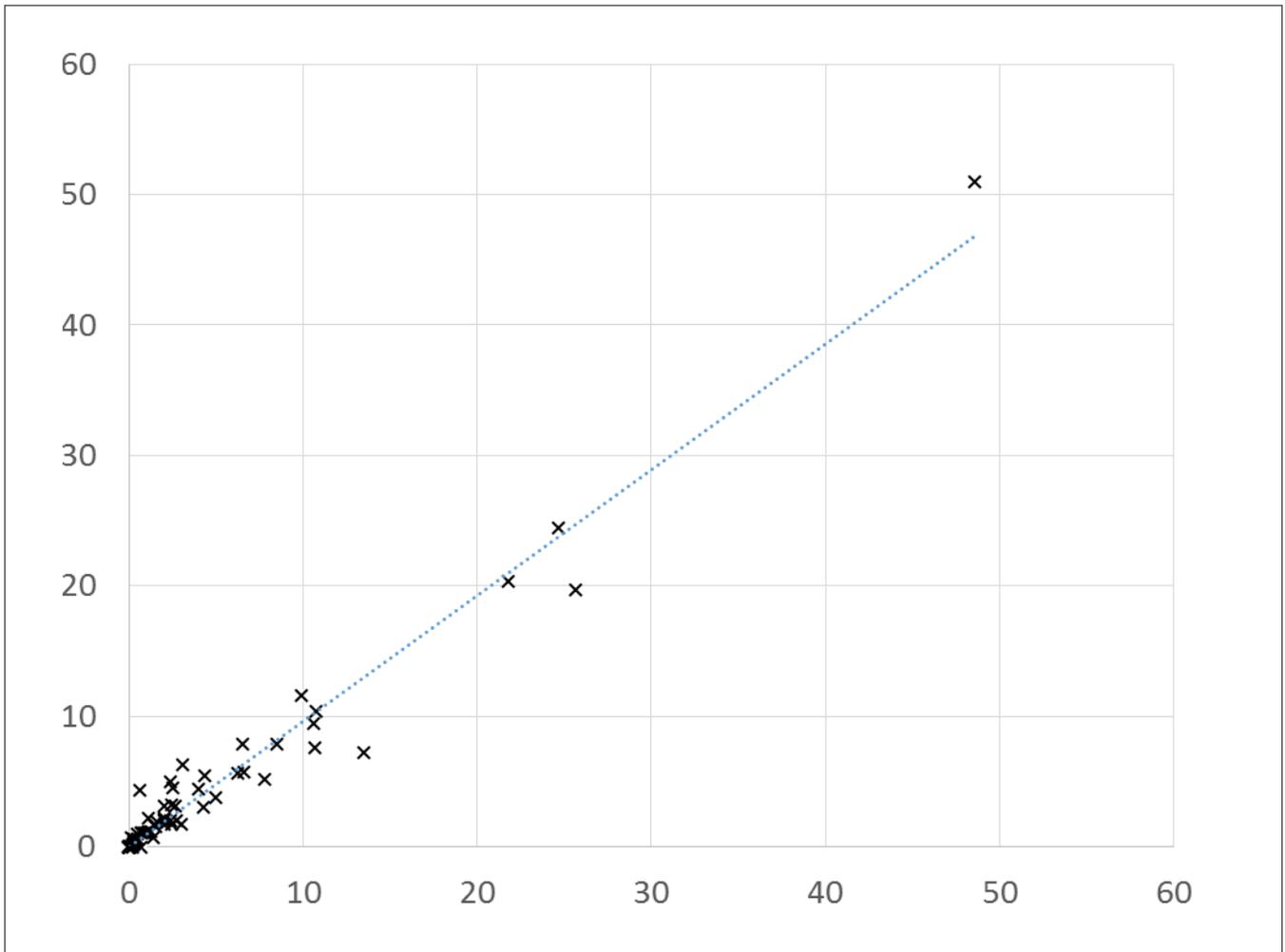


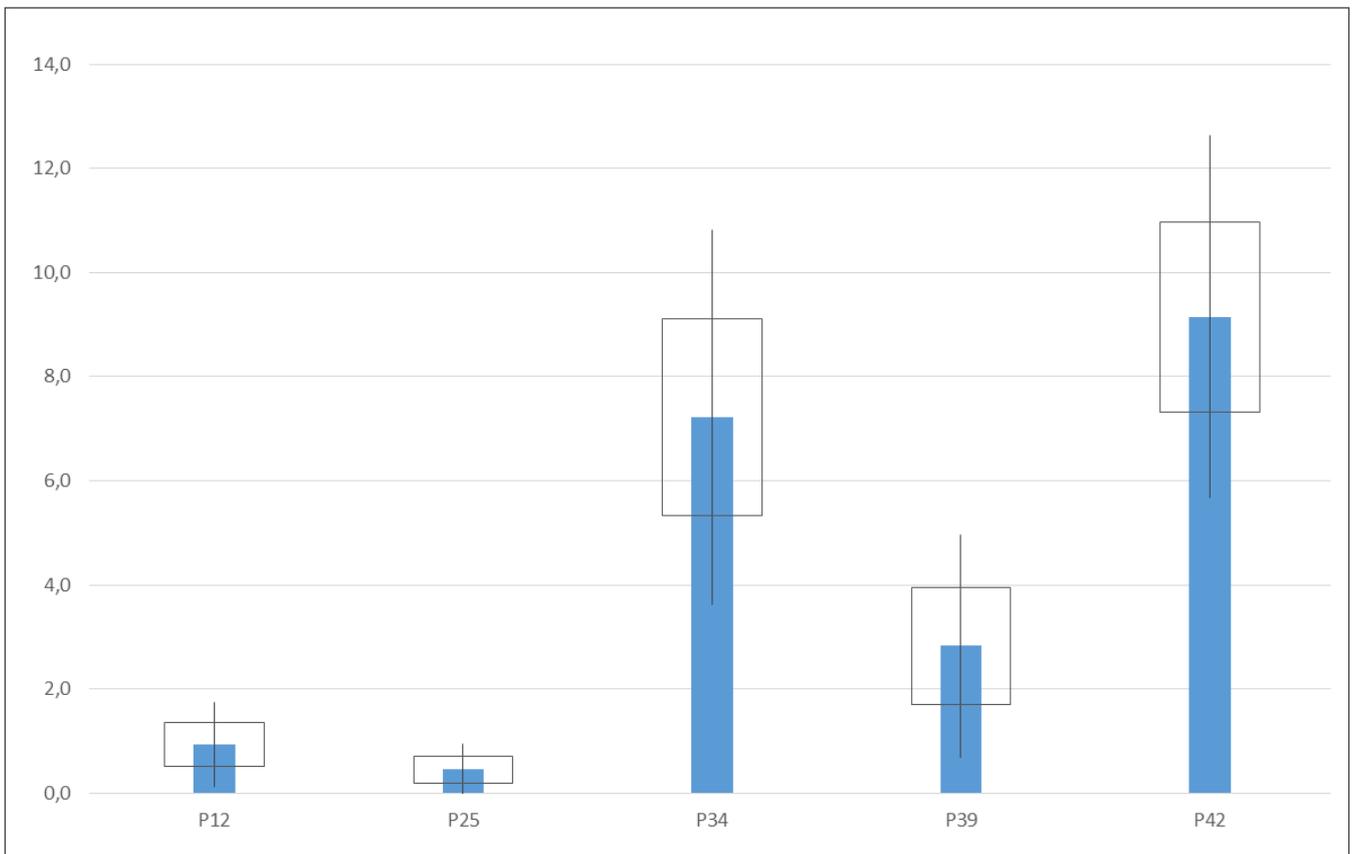
Abbildung 4: PAK-Ergebnisse der Doppelbestimmungen (mg/kg Feststoff)

Zusätzlich wurden bei fünf Proben zur „Bestimmung der laborinternen Reproduzierbarkeit“ sämtliche chemischen Untersuchungen dreifach durchgeführt. Für diese fünf Proben liegen also jeweils sechs PAK-Analysen vor. Die Ergebnisse enthält die nachfolgende Tabelle.

Probe	P12	P25	P34	P39	P42
PAK (Summe 16 nach EPA)	1,60	0,68	9,91	2,00	10,73
	1,91	1,07	11,65	3,14	10,44
	0,27	0,13	6,58	0,99	7,75
	0,35	0,70	5,79	1,02	5,20
	0,47	0,06	3,09	4,34	13,49
	1,00	0,07	6,30	5,48	7,25
Mittelwert	0,93	0,45	7,22	2,83	9,14
St.-Abw.	0,63	0,39	2,81	1,67	2,71

Tablle 4: Statistische Auswertung der PAK-Dreifach- und -Doppelbestimmungen (mg/kg Feststoff)

Ergänzend zu den Tabellenwerten sind in der nachfolgenden Abbildung die jeweiligen Perzentil-Werte der 5 sechsfach auf PAK untersuchten Proben dargestellt.



Erläuterung: Median (Säule), 10. und 90. Perzentil (Linie), 25. und 75. Perzentil (Box), n = 6

Abbildung 5: PAK-Ergebnisse der Dreifachbestimmungen (mg/kg Feststoff)

Drei der fünf Proben zeigen PAK-Feststoff-Werte im Bereich 0 bis 5 mg/kg. Die beiden Proben mit bedeutsamen PAK-Gehalten P34 und P42 bestehen aus RC-Beton, welcher teerhaltige Beschichtungen hatte und nicht für eine Verwertung vorgesehen war. Das Material wurde extra für die vorliegende Studie gebrochen.

Das Verhältnis Standardabweichung zu Mittelwert liegt bei allen fünf Proben in vergleichbarer Größenordnung (ca. 0,3 bis ca. 0,9). Es nimmt allerdings mit den Absolutkonzentrationen ab: Höhere Konzentrationen werden also genauer bestimmt als niedrigere Konzentrationen.

Die Einzelwerte reichen von ca. 1/8 bis zu ca. dem 2-fachen des Mittelwerts. In den beiden Proben mit relevanten PAK-Gehalten (P34 bzw. P42) beträgt das höchste Messergebnis etwa das 4-fache bzw. das 3-fache des niedrigsten Messergebnisses.

Im Abgleich der Werte mit den Zuordnungswerten des UVM-Erlasses oder der EBV 2012 wird ersichtlich, dass insbesondere bei PAK-Analysen im Feststoff durchaus für eine Einstufung relevante Streuungen auftreten können.

### 6.3 SULFAT

Alle Sulfat-Befunde liegen über der Bestimmungsgrenze in einem Bereich zwischen 4 und 1.800 mg/l. Im Eluat nach DIN 38414-4 (W/F 10:1) wurde mit 258 mg/l ein arithmetischer Mittelwert festgestellt, welcher im Vergleich mit dem 50. Perzentil von 72 mg/l den Schwerpunkt der Gehalte bei niedrigeren Werten anzeigt. Derselbe Sachverhalt ist bei den anderen Aufschlussverfahren auch gegeben.

Im Vergleich der Aufschlussverfahren liegen die Befunde nach DIN 38414-4 auf dem niedrigsten Niveau, gefolgt von dem Berechnungsverfahren nach DIN 19528, dem Säulenkurztest (W/F 2:1) und dem 2:1-Schüttel-Eluat nach DIN 19529. Letzteres zeigt im Mittel ungefähr den doppelten Wert wie das alte W/F-10:1-Schüttel-Eluat. Im Median ist das Verhältnis mit einem Faktor > 3 noch deutlicher ausgeprägt. Ein detaillierter Vergleich zwischen den Aufschlussverfahren nach EBV 2012 findet sich in Kapitel 7.4.

Methode	Mittelwert	Median 50. Perz.	75. Perz.	90. Perz.	Max.
Eluat DIN 38414-4	258	72	375	807	1.300
DIN 19529 2:1-Schüttel-Eluat	551	225	1.200	1.670	1.800
DIN 19528 Säulenkurztest 2:1	461	180	813	1.440	1.800
Berechnung 2:1 n. DIN 19528, 9.4.3	410	150	689	1.261	1.665
Perkolat nach DIN 19528 1. Fraktion	621	315	1.300	1.710	2.100
Perkolat nach DIN 19528 2. Fraktion	467	165	833	1.510	1.800
Perkolat nach DIN 19528 3. Fraktion	306	67	430	942	1.500
Perkolat nach DIN 19528 4. Fraktion	267	71	333	792	1.600

Tabelle 5: Statistische Auswertung für Sulfat (mg/l Eluat bzw. Perkolate)

### 6.4 PHENOLINDEX UND SUMME DER PHENOLE

Die Stoffgruppe der Phenole wurde bestimmt als Phenolindex, wie er im UVM-Erlass relevant ist, sowie mittels GC. Letzteres ist nach EBV 2012 beim Eignungsnachweis und bei der erweiterten Fremdüberwachung zu verwenden (Tabelle 2 der EBV 2012), jedoch werden für RC-Baustoffe keine Zuordnungswerte definiert.

Die statistischen Kenngrößen der Bestimmung der Summe der nachgewiesenen GC-Phenole und des Phenolindex je nach Aufschlussmethode sind in Tabelle 6 aufgeführt. Wegen der häufigen GC-Befunde unter den Bestimmungsgrenzen wurde hier auf eine Berechnung nach DIN 19528, 9.4.3 verzichtet.

Auffällig ist, dass bei allen Aufschlussverfahren die Phenolindex-Gehalte etwa das 7- bis 15-fache der GC-Summenwerte betragen.

Im Vergleich zwischen den Aufschlussverfahren fällt auf, dass die Befunde im 10:1-Schüttel-Eluat nach DIN 38414-4 deutlich unter denen der neuen Verfahren liegen (ca. Faktor 2 bis 4). Bei den W/F-2:1-Verfahren nach DIN 19527 und DIN 19528 sind zwischen der Schüttel- und der Säulenmethode keine nennenswerten Unterschiede festzustellen.

Methode	Parameter	Mittelwert	Median 50. Perz.	75. Perz.	90. Perz.	Max.
Eluat DIN 38414-4	Phenolindex, ges.	11	8,5	14	26	47
	Summe nachgewies. Phenole	0,35	< BG	< BG	1,7	3,0
DIN 19527 2:1-Schüttel-Eluat	Phenolindex, ges.	21	14	27	46	120
	Summe nachgewies. Phenole	1,5	< BG	1,8	5,0	18
DIN 19528 Säulenkurztest 2:1	Phenolindex, ges.	19	10	21	46	160
	Summe nachgewies. Phenole	1,9	< BG	2,0	4,4	22

Tabelle 6: Statistische Auswertung für Phenolindex und Summe der Phenole ( $\mu\text{g/l}$  Eluat bzw. Perkolate)

## 6.5 SCHWERMETALLE UND ARSEN

Die statistische Betrachtung von Schwermetallen und Arsen im Feststoff ist nachfolgend dargestellt. Allgemein ist festzuhalten, dass die Befunde in niedrigen Konzentrationsbereichen liegen. Der Vergleich mit dem UVM-Erlass und der EBV 2012 findet im folgenden Kapitel 7 statt.

Parameter	Mittelwert	Median 50. Perz.	75. Perz.	90. Perz.	Max.
Arsen	5,7	5,0	6,8	8,0	11
Blei	14	11	17	25	42
Cadmium	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	0,4
Chrom	20	18	21	25	43
Kupfer	14	12	14	19	49
Nickel	14	13	15	19	30
Quecksilber	< 0,1	< 0,1	0,1	0,2	0,9
Zink	54	43	64	87	150

Tabelle 7: Statistische Auswertung für Metalle ( $\text{mg/kg}$  Feststoff)

Für die untersuchte Probenauswahl sind lediglich Chrom (gesamt) und Vanadium relevant. Deshalb sollen sie hier eingehender betrachtet werden.

Chrom (gesamt) wurde in der vorliegenden Studie in den wässrigen Aufschlüssen nach EBV 2012 mit einer maximalen Konzentration von 0,12  $\text{mg/l}$  (im Säulenkurztest W/F 2:1) gemessen. Bezüglich der Aufschlussverfahren ergibt das W/F-10:1-Eluat für alle statistischen Kenngrößen die geringsten Konzentrationen (siehe Tabelle 8).

Methode	Mittelwert	Median 50. Perz.	75. Perz.	90. Perz.	Max.
Feststoff	20	18	21	25	43
Eluat DIN 38414-4	0,020	0,019	0,026	0,033	0,075
DIN 19529 2:1-Schüttel-Eluat	0,034	0,028	0,040	0,059	0,11
DIN 19528-Säulenkurztest 2:1	0,035	0,025	0,039	0,077	0,12
Berechnung 2:1 n. DIN 19528, 9.4.3	0,027	0,020	0,036	0,063	0,083

Tabelle 8: Statistische Auswertung für Chrom (gesamt) (mg/kg Feststoff, mg/l Eluat bzw. Perkolate)

Für Vanadium ergeben die vorliegenden Ergebnisse im Vergleich zu den früheren LUBW-Studien<sup>[4]</sup> ein deutlich geringeres Wertenniveau. Der höchste gemessene Wert beträgt 0,05 mg/l. Nennenswerte Unterschiede zwischen den Aufschlussverfahren sind nicht zu erkennen, vgl. Tabelle 9. Bemerkenswert ist, dass auch Proben mit einem hohen Ziegelanteil (z. B. Nr. 49 bzw. Nr. 28 mit ca. 60 % bzw. ca. 40 % Ziegel) hinsichtlich Vanadium hier unauffällig sind.

Methode	Mittelwert	Median 50. Perz.	75. Perz.	90. Perz.	Max.
Eluat DIN 38414-4	0,009	0,009	0,015	0,022	0,038
DIN 19529 2:1-Schüttel-Eluat	0,015	0,010	0,028	0,038	0,053
DIN 19528-Säulenkurztest 2:1	0,016	0,012	0,029	0,037	0,052
Berechnung 2:1 n. DIN 19528, 9.4.3	0,017	0,013	0,030	0,042	0,060

Tabelle 9: Statistische Auswertung für Vanadium (mg/l Eluat bzw. Perkolate)

## 7 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

### 7.1 VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT DEM UVM-ERLASS

In den vorläufigen Hinweisen zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial des Umweltministeriums Baden-Württemberg (UVM-Erlass) <sup>[2]</sup> sind die drei Kategorien Z1.1, Z1.2 und Z2 für 17 Parameter im Feststoff und im Eluat definiert. Die Elution erfolgt nach DIN 38414-4. In vorliegender Studie wurden sämtliche Proben entsprechend analysiert. Der direkte Vergleich der Zuordnungswerte nach UVM-Erlass mit der EBV 2012 ist aufgrund der abweichenden Elutionsverfahren nicht möglich.

Tabelle 10 zeigt bei folgenden Parametern, dass mindestens 90 % der Werte den Zuordnungswert für Z1.1 deutlich unterschreiten: EOX, KW C10–C22, PCB-6, Chlorid, Arsen, Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink. Diese Parameter sind also insgesamt nicht relevant für die Einstufung nach UVM-Erlass und werden deshalb im Weiteren nicht betrachtet.

Bei den Parametern elektrische Leitfähigkeit, KW C10–C40, Phenolindex und Chrom (gesamt) wird der Z1.1-Wert im 90. Perzentil überschritten. Bei PAK (im Feststoff nach EPA) liegt das 90. Perzentil nur wenig unter dem Z1.1-Wert. Daraus lässt sich eine mittlere Relevanz dieser Parameter für die Einstufung nach UVM-Erlass ableiten.

Eine auffällige elektrische Leitfähigkeit dürfte bei einigen Proben auf die bekannte Ionen-Freisetzungs-Problematik bei frisch gebrochenem Beton zurückgeführt werden können. Den Z1.1-Wert von 2.500 µS/cm überschreiten neun Proben. Der Chrom-Z1.1-Wert von 0,03 mg/l wird bei neun Proben überschritten. Der Phenolindex zeigt bei acht der 50 Proben eine Überschreitung des Z1.1-Werts. Der Z1.2-Wert für Chrom und Phenolindex wurde jedoch in keiner Probe überschritten.

Parameter	Mittelwert	Median 50. Perz.	75. Perz.	90. Perz.	Max.	Zuordnungswerte UVM-Erlass		
						Z1.1	Z1.2	Z2
Elektr. Leitfähigkeit (µS/cm)	1.645	1.460	1.993	<b>2.809</b>	<b>4.660</b>	<b>2.500</b>	<b>3.000</b>	<b>5.000</b>
EOX (mg/kg)	0,06	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,1	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
KW-Index C10-C40 (mg/kg)	482	265	560	<b>1.148</b>	<b>3.900</b>	<b>600</b>	<b>600</b>	<b>2.000</b>
KW-Index C10-C22 (mg/kg)	48	24	47	100	<b>420</b>	<b>300</b>	<b>300</b>	<b>1.000</b>
Summe PAK (EPA) (mg/kg)	4,3	1,6	3,6	9,2	<b>49,8</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>35</b>
Summe 6 PCB (DIN) (mg/kg)	0,01	< BG	< BG	< BG	<b>0,45</b>	<b>0,15</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>
Chlorid (mg/l)	7	4	10	13	44	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>
Sulfat (mg/l)	258	72	<b>375</b>	<b>807</b>	<b>1.300</b>	<b>250</b>	<b>400</b>	<b>600</b>
Phenolindex, ges. (µg/l)	11	9	14	<b>26</b>	<b>47</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
Arsen (mg/l)	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,009	<b>0,015</b>	<b>0,03</b>	<b>0,06</b>
Blei (mg/l)	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,04	0,1	0,2
Cadmium (mg/l)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	<b>0,002</b>	<b>0,005</b>	<b>0,006</b>
Chrom, ges. (mg/l)	0,020	0,019	0,026	<b>0,033</b>	<b>0,075</b>	<b>0,03</b>	<b>0,075</b>	<b>0,1</b>
Kupfer (mg/l)	0,006	0,006	0,010	0,016	0,036	<b>0,05</b>	<b>0,15</b>	<b>0,2</b>
Nickel (mg/l)	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,010	<b>0,05</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>
Quecksilber (mg/l)	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	< 0,0002	<b>0,0005</b>	<b>0,001</b>	<b>0,002</b>
Zink (mg/l)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	<b>0,15</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>

fett: Überschreitung des jeweiligen Z1.1-Werts BG: Bestimmungsgrenze der Einzelsubstanzen

Tabelle 10: Statistische Auswertung aller Analysen nach UVM-Erlass

Die statistische Auswertung der PAK im Feststoff ergibt, dass 10 % der Proben im Bereich über dem Z1.1-Wert von 10 mg/kg liegen (= 5 Stück). Davon sind vier Proben (insgesamt 8 %) als Z2-Material und darüber einzustufen. Der Mittelwert aller Proben liegt mit 4,3 mg/kg (Summe 16 PAK nach EPA) deutlich über dem Median bzw. 50. Perzentil, was ähnlich wie bei den Sulfat-Werten die große Anzahl niedriger Befunde veranschaulicht.

In der vorliegenden Studie zeigt sich – wie in den Voruntersuchungen –, dass Sulfat für die Einstufung maßgeblich ist: Bereits der arithmetische Mittelwert überschreitet den Z1.1-Wert von 250 mg/l. Dagegen liegt der Median mit 72 mg/l auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Dies zeigt den großen Anteil an Proben mit geringen Sulfat-Werten, wozu insbesondere Proben aus RC-Beton zählen.

Wird nur nach dem Parameter Sulfat bewertet, können 68 % (34 Proben) als Z1.1-Material eingestuft werden, 8 % als Z1.2- und 6 % als Z2-Material. Bei 9 Proben (= 18 %) wird der Z2-Zuordnungswert für Sulfat von 600 mg/l überschritten.

Werden die Parameter Sulfat und PAK gemeinsam betrachtet, erreichen 31 Proben (62 %) Z1.1-Qualität. Dies veranschaulicht nachfolgende Abbildung:

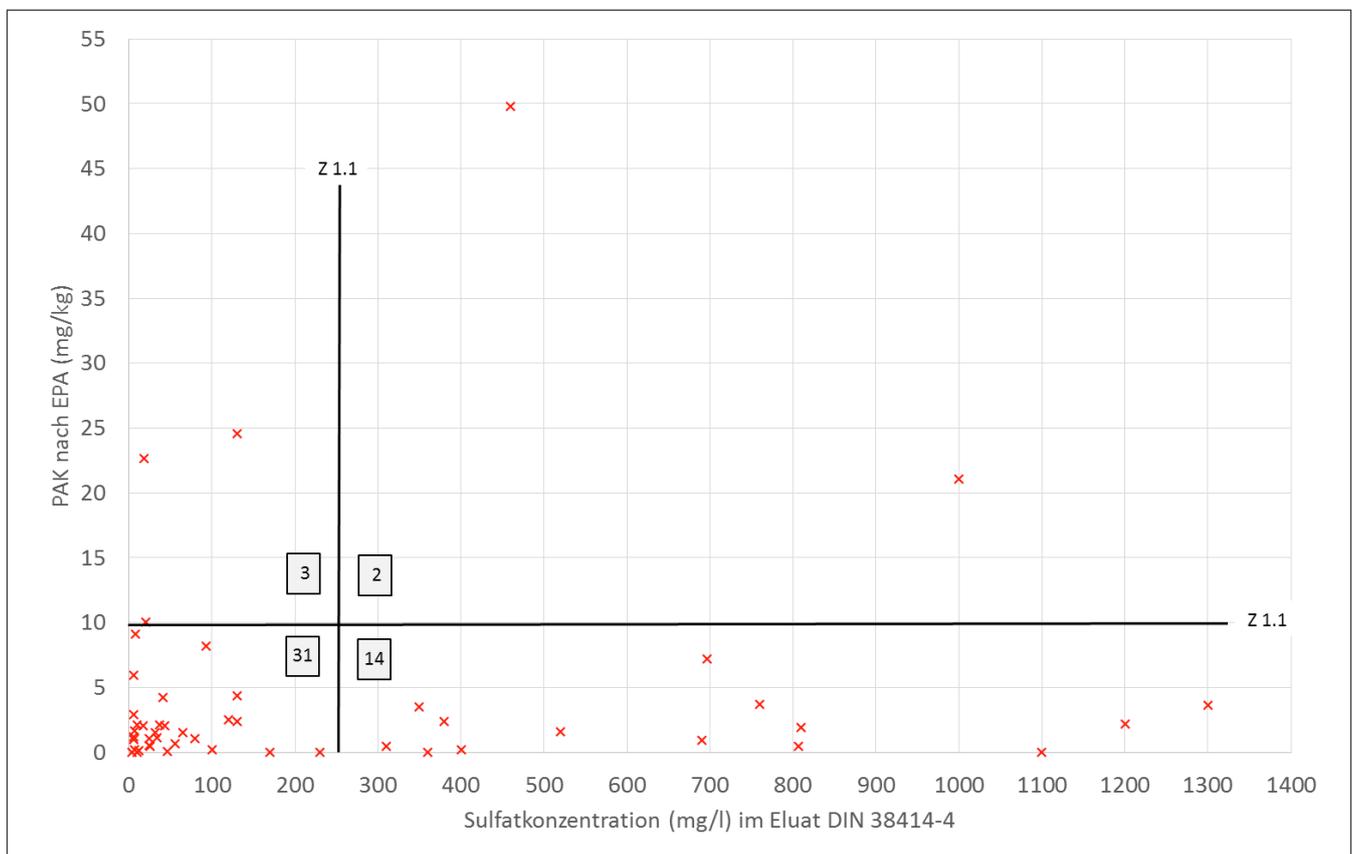


Abbildung 6: Anzahl der Proben für PAK- und Sulfat-Einstufung nach UVM-Erlass

Betrachtet man die Einstufung jeder Probe und den jeweils für die Einstufung > Z1.1 relevanten Parameter, so ist bei 16 Proben Sulfat (mit)verantwortlich für die höhere Einstufung. Die PAK sind beim Vergleich mit den Zuordnungswerten des UVM-Erlasses für lediglich fünf Proben der relevante Parameter. Zwei Proben weisen sowohl für PAK als auch für Sulfat eine Überschreitung des Z1.1-Wertes auf.

Bei Berücksichtigung aller Parameter ohne die elektrische Leitfähigkeit kann etwa jede dritte Probe in die Klasse Z1.1 eingestuft werden. In die Klassen Z1.2 und Z2 sind 40 % der Proben einzustufen und für 26 % der Proben ist eine Verwertung nach UVM-Erlass ausgeschlossen. Dabei sind die Parameter Sulfat, PAK (Feststoff), Chrom und Phenolindex ausschlaggebend.

Werden Analysen mit einem erhöhten KW C10–C40-Gehalt wegen Bitumen-Anteilen nicht berücksichtigt, erhöht sich der Z1.1-Anteil auf 22 Proben (44 %).

Eine Einstufung der Proben in die Zuordnungsklassen des UVM-Erlasses bei Berücksichtigung aller Untersuchungsparameter außer der elektrischen Leitfähigkeit und KW C10–C40 ergibt das in Tabelle 11 dargestellte Bild:

Zuordnungsklasse	Z1.1	Z1.2	Z2	> Z2
Probenanzahl absolut	22	15	3	10
Anteil bei 50 Proben	44 %	30 %	6 %	20 %

Tabelle 11: Anteil der Zuordnungen nach UVM-Erlass (KW C10–C40 und elektr. Leitfähigkeit nicht berücksichtigt)

Aus dem geringen Anteil an Z1.1-Material (relativ zu z. B. LUBW 2009<sup>[41]</sup>) sollte nicht geschlossen werden, dass die realen Verwertungsquoten in derselben Größenordnung liegen, da bei der Beprobung bewusst keine Beschränkung auf zertifizierte RC-Produkte angestrebt war. Vielmehr wurden RC-Baustoffe unterschiedlicher Qualität und Güte, teils direkt aus mobilen Anlagen auf den Baustellen, beprobt.

## 7.2 VERGLEICH DER ERGEBNISSE MIT DER EBV 2012

Die in Kapitel 6 beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass in der vorliegenden Studie für die weitere Betrachtung bzgl. EBV 2012 im Wesentlichen PAK und Sulfat relevant sind (neben der elektr. Leitfähigkeit, für die Tabelle 1 der EBV 2012 nur Orientierungswerte nennt und nach der deshalb hier nicht weiter ausgewertet wird). Folglich werden hier im Weiteren nur diese beiden Parameter betrachtet und zusätzlich auf Wunsch des Auftraggebers die Schwermetalle im Feststoff.

### 7.2.1 Parameter im Feststoff: Metalle und PAK

Die EBV 2012 nennt für Schwermetalle und Arsen keine Feststoff-Materialwerte für RC-Material. Deshalb werden hier die Gehalte der relevanten Metalle mit den Werten der Bund-Länder-Arbeitsgruppe „Ersatzbaustoff“<sup>[18]</sup> verglichen:

(„RC-1“ = „RC-2“) = (BM-0 = BM-1 = BM-2)

„RC-3“ = BM-3

Nach dieser Festlegung halten alle Feststoffbefunde mit einer Ausnahme (0,90 mg/kg Quecksilber in Probe P25) den „RC-1“-Wert ein. Die 90. Perzentile aller Metalle unterschreiten den „RC-1“-Wert deutlich.

Stoff	Einheit	90. Perz.	Max.	„RC-1“ = „RC-2“	„RC-3“
Arsen	mg/kg TR	8,0	11	40	150
Blei	mg/kg TR	25	42	140	700
Cadmium	mg/kg TR	< 0,2	0,40	2	10
Chrom, ges.	mg/kg TR	25	43	120	600
Kupfer	mg/kg TR	19	49	80	320
Nickel	mg/kg TR	19	30	100	350
Quecksilber	mg/kg TR	0,21	0,90	0,6	5
Zink	mg/kg TR	87	150	300	1.200

Tabelle 12: Gehalte und hier verwendete Zuordnungswerte für Metalle im Feststoff

Als wesentlicher Parameter der Untersuchungen im Feststoff ist PAK anzusehen. Nachfolgende Tabelle veranschaulicht, dass nach dahingehender Einstufung die Proben zu 90 % mit < 10 mg/kg PAK (Summe 16 nach EPA) der Klasse RC-1 zuzuordnen sind. Lediglich eine Probe ist in RC-2 (< 15 mg/kg PAK) einzustufen und vier Proben überschreiten den RC-3-Wert von 20 mg/kg.

Zuordnungsklasse	RC-1	RC-2	RC-3	> RC-3
Probenanzahl absolut	45	1	0	4
Anteil bei 50 Proben	90 %	2 %	0 %	8 %

Tabelle 13: Zuordnungen durch PAK im Feststoff nach EBV 2012

### 7.2.2 Vergleich PAK-Feststoff mit PAK-Eluat/-Perkolat

Im Vergleich der Ergebnisse der PAK-Feststoffanalysen mit denen der PAK-Untersuchungen im Eluat bzw. Perkolat ergibt sich das in Abbildung 7 dargestellte Bild. Auf der x-Achse ist der Feststoffwert, auf der y-Achse sind die zugehörigen vier Eluat- bzw. Perkolatwerte dargestellt.

Der Großteil der Ergebnisse befindet sich im Bereich kleiner 10 mg/kg im Feststoff. Hier liegen die Eluat- bzw. Perkolatergebnisse meist im Bereich kleiner 6 µg/l und halten somit einheitlich die Einstufung RC-1 nach EBV 2012 ein. Lediglich die Probe P33 ist in Abhängigkeit vom Analyseverfahren in unterschiedliche Klassen einzustufen: Mit einem Feststoffwert von 2,37 mg/kg sowie dem Säulenkurztest-Befund befindet sich die Probe im Bereich RC-1. Dagegen führen die Werte des W/F-2:1-Schüttel-Eluats sowie der Berechnung nach DIN 19528 zu einer Einstufung in RC-2.

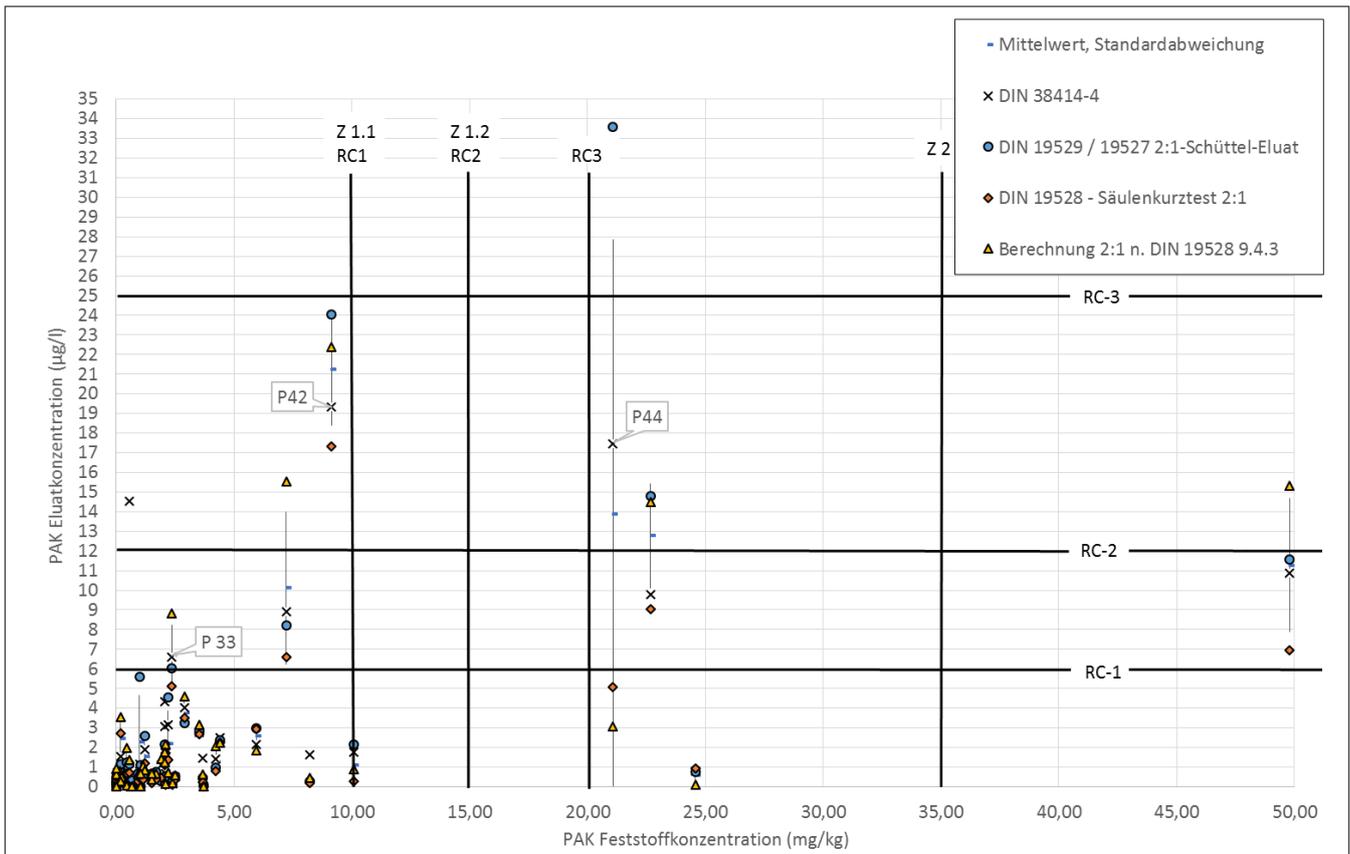


Abbildung 7: Vergleich PAK-Feststoff- mit PAK-Eluat- und -Perkolatwerten

Interessant ist zudem die Probe P42 (vgl. Kapitel 6.2) mit einem Mittelwert von 9,14 mg/kg, deren Material nach der FeststoffEinstufung den Klassen RC-1 bzw. Z1.1 nach UVM-Erlass zuzuordnen wäre, nach den wässrigen Aufschlüssen jedoch nur als RC-3-Material verwertet werden kann. Angesichts der Tatsache, dass es sich hierbei um Beton handelt, der mit einer stark teerhaltigen Beschichtung versehen war, ist hier das Feststoffverfahren als ungeeignet zu bezeichnen. Die Eluat- bzw. Perkolatverfahren zeigen dagegen ein vergleichsweise einheitliches Bild bezüglich der Zuordnungsklassen.

Abbildung 7 verdeutlicht außerdem, dass insbesondere bei Proben mit bedeutsamen PAK-Feststoffwerten (z. B. > 5 mg/kg) kein Zusammenhang zwischen den Befunden im Feststoff und denen in den Eluaten und Perkolaten erkennbar ist.

### 7.2.3 Sulfat

Die bisher gezeigten Ergebnisse deuten bereits die hohe Relevanz des Sulfats für die Einstufung der Proben an. Das nachfolgende Histogramm zeigt für alle vier Aufschlussverfahren die Anzahl der Proben (y-Achse) in homogenen Klassen zu 100 mg/l Sulfat (x-Achse). Es zeigt eine starke Häufung der Werte kleiner 100 mg/l und oberhalb dessen einen vergleichsweise ebenen Verlauf. In den Klassen bis 500 mg/l sind noch bis zu fünf Proben je Klasse anzutreffen, oberhalb davon meist nur ein bis zwei Proben.

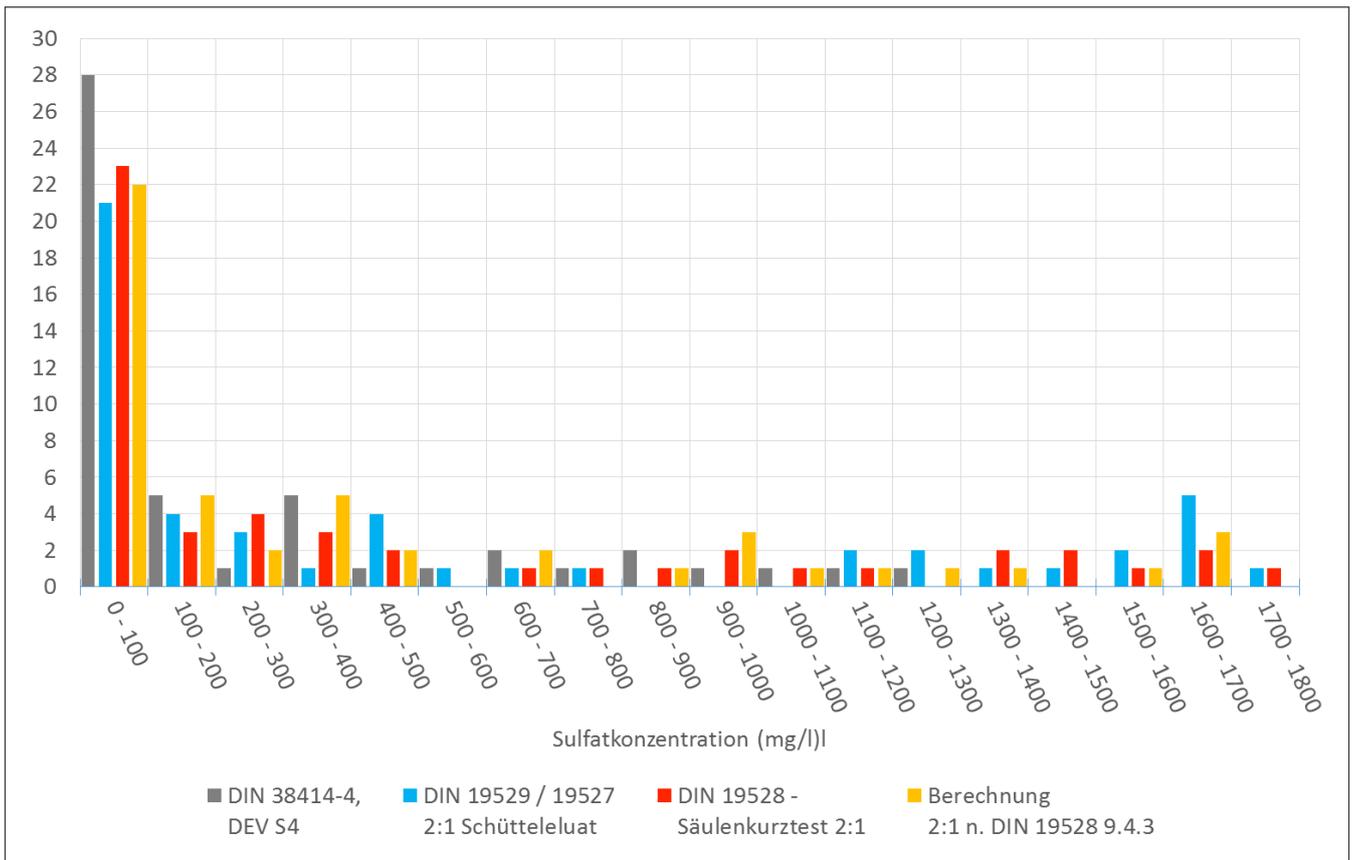


Abbildung 8: Histogramm Sulfat

Im Vergleich der Verfahren ist auffällig, dass das W/F-2:1-Schüttel-Eluat bei den Konzentrationen bis 100 mg/l die geringste Häufigkeit aufweist und zwischen 1.500 und 1.800 mg/l am häufigsten repräsentiert ist.

Zudem zeigt sich, dass das W/F-10:1-Eluat nach DIN 38414-4 bei den geringeren Konzentrationen häufiger vertreten ist.

#### 7.2.4 Vergleich PAK und Sulfat bzgl. ihrer Relevanz für die Einstufung

Werden die Ergebnisse aller 50 Proben nach den Eluat- bzw. Perkolat-Zuordnungswerten der EBV 2012 ausgewertet, sind lediglich PAK und Sulfat für die Einstufungen verantwortlich. Werden zudem die Feststoffwerte betrachtet, ist bei insgesamt fünf Proben (bzw. 10 %) eine Einstufung in eine höhere Klasse aufgrund der Feststoff-PAK gegeben.

Nachfolgende Tabelle zeigt die Einstufung der Proben in EBV-Zuordnungsclassen in Abhängigkeit von den PAK-Gehalten im Feststoff sowie nach PAK und Sulfat mit den jeweiligen Aufschlussverfahren.

Für die Einstufung der Sulfat-Werte wurden die Materialwerte des neuesten Arbeitsentwurfs vom Juli 2015<sup>[19]</sup> auf Wunsch des Auftraggebers bereits berücksichtigt (RC-1-Wert 600 mg/l, RC-2-Wert 1.000 mg/l). Dies weicht von den Werten der EBV 2012 ab (RC-1 = 450 mg/l, RC-2 = 800 mg/l).

Es zeigt sich, dass je nach Verfahren 58 % bis 62 % der Proben in RC-1 eingestuft werden können. Wird nur Sulfat betrachtet, sind es zwischen 68 und 72 % der Proben. Lediglich bei 8 bis 12 % der Proben führt das PAK-Eluat bzw. -Perkolat zu einer höheren Einstufung.

Zuordnungsklasse	RC-1	RC-2	RC-3	> RC-3
<b>EBV 2012 DIN 19529 / 19527 2:1-Schüttel-Eluat</b>				
<b>alle Parameter</b>	<b>58 %</b>	<b>8 %</b>	<b>26 %</b>	<b>8 %</b>
nur Sulfat	68 %	4 %	28 %	0 %
nur PAK-Eluat/-Perkolat	88 %	6 %	4 %	2 %
<b>EBV 2012 DIN 19528 – Säulenkurztest 2:1</b>				
<b>alle Parameter</b>	<b>62 %</b>	<b>10 %</b>	<b>20 %</b>	<b>8 %</b>
nur Sulfat	70 %	10 %	20 %	0 %
nur PAK-Eluat/-Perkolat	92 %	6 %	2 %	0 %
<b>EBV 2012 Berechnung 2:1 n. DIN 19528, 9.4.3</b>				
<b>alle Parameter</b>	<b>60 %</b>	<b>16 %</b>	<b>16 %</b>	<b>8 %</b>
nur Sulfat	72 %	12 %	16 %	0 %
nur PAK-Eluat/-Perkolat	90 %	2 %	8 %	0 %
<b>Feststoffanalysen</b>				
nur PAK (EPA)	90 %	2 %	0 %	8 %

Tabelle 14: Anteile der Zuordnung nach EBV 2012

Das oben numerisch dargestellte Ergebnis ist in nachfolgender Abbildung für den mittleren Block „Säulenkurztest 2:1“ graphisch aufgetragen. Die Ziffern stellen die absolute Anzahl der Proben dar.

Es wird ersichtlich, dass für die Einstufung der Proben > RC-1 meist entweder Sulfat oder PAK allein verantwortlich ist. In dreizehn Fällen ist dies Sulfat, in zwei Fällen PAK. Nur zwei Proben weisen für beide Parameter Gehalte auf, welche RC-2-Einstufungen nach sich ziehen.

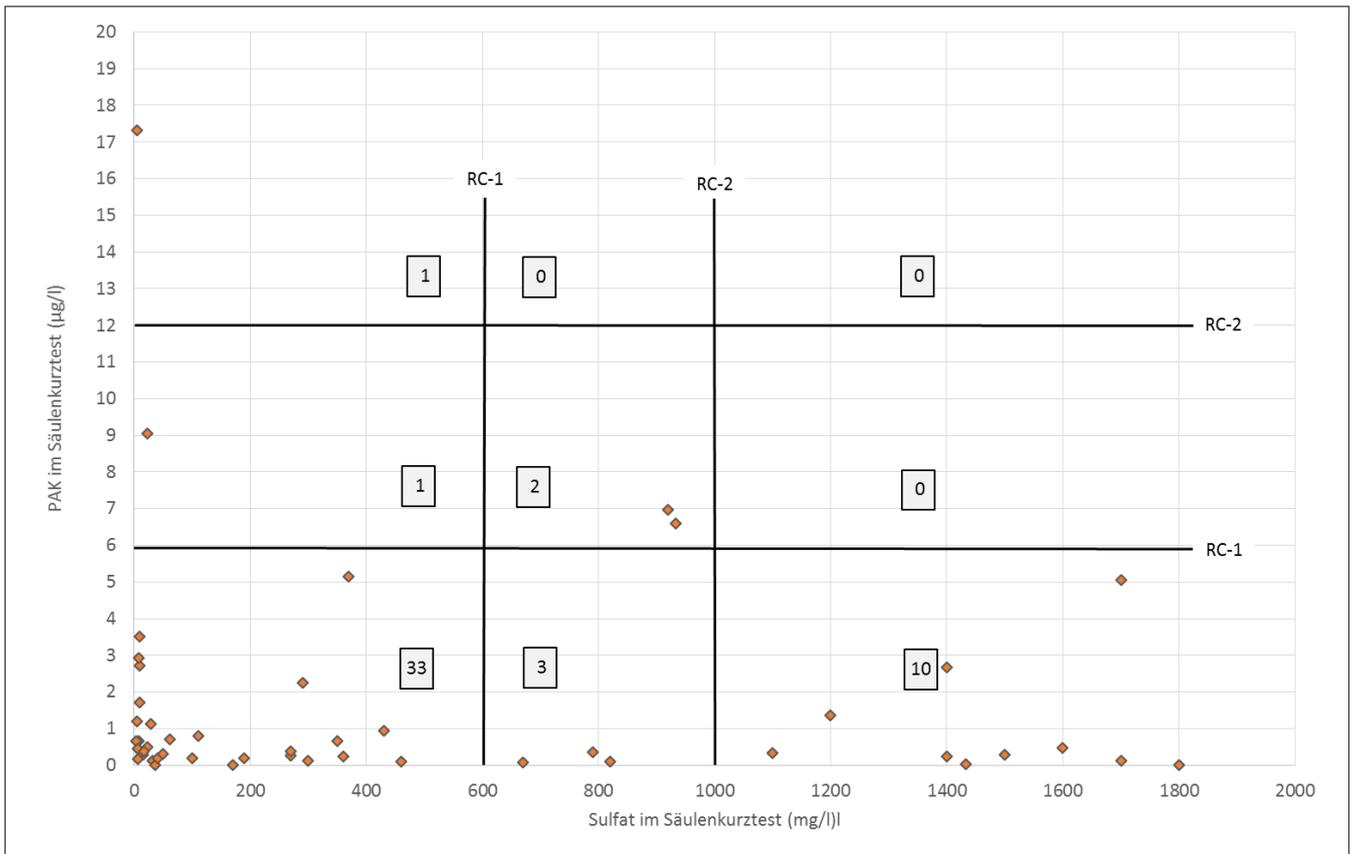


Abbildung 9: Einstufung nach EBV für PAK und Sulfat im Säulenkurztest

### 7.3 VERGLEICH ZUORDNUNGEN UVM-ERLASS VS. EBV 2012

Die Einstufung der untersuchten Proben in die Zuordnungsklassen nach UVM-Erlass (ohne Berücksichtigung von KW C10 bis C40 und elektr. Leitfähigkeit) und EBV 2012 bzw. für Sulfat EBV 2015 ist in nachfolgender Tabelle 15 vergleichend dargestellt. Hierbei werden die Z1.1- mit der RC-1-, die Z1.2- mit der RC-2- und die Z2-Klasse mit der RC-3-Klasse verglichen.

Zuordnungsklasse	Z1.1	Z1.2	Z2	> Z2
UVM-Erlass (KW C10–C40 und elektrische Leitfähigkeit nicht berücksichtigt)	44 %	30 %	6 %	20 %
Zuordnungsklasse	RC-1	RC-2	RC-3	> RC-3
EBV 2012 nur Feststoff-PAK	90 %	2 %	0 %	8 %
EBV 2012 DIN 19529/19527 2:1-Schüttel-Eluat und Feststoff	58 %	8 %	26 %	8 %
EBV 2012 DIN 19528-Säulenkurztest 2:1 und Feststoff	62 %	10 %	20 %	8 %
EBV 2012 Berechnung 2:1 DIN 19528, 9.4.3 und Feststoff	60 %	16 %	16 %	8 %

Tabelle 15: Zuordnungen nach UVM-Erlass und EBV 2012

Die Tabelle verdeutlicht, dass sich teils deutliche Verschiebungen bei den Zuordnungsklassen ergeben, wenn die Proben gemäß EBV anstatt nach UVM-Erlass eingestuft werden.

Die Feststoffgehalte führen in fast 90 % der Fälle zu einer Einstufung in die Klasse RC-1, während die Eluat-/Perkolatgehalte je nach Verfahren divergierende Einstufungen ergeben.

Allen Eluatverfahren der EBV ist dabei gemein, dass mit > 58 % der Anteil der Einstufung in die „Produkt-Kategorie“ RC-1 deutlich höher ausfällt als beim derzeit gültigen UVM-Erlass in Z1.1. Dies ist allein auf die beiden Parameter Chrom (Feststoff) bzw. Phenolindex zurückzuführen, für die die EBV höhere bzw. keine Materialwerte nennt. Werden nach UVM-Erlass diejenigen Parameter nicht berücksichtigt, die in der EBV geringere oder keine Anforderungen erhalten haben (Chrom, Phenole, KW C10–C40 und elektrische Leitfähigkeit), so ergeben sich vergleichbare Einstufungsquoten für beide Regelwerke.

Ebenso ist allen Aufschlussverfahren nach EBV gemein, dass der Anteil an > RC-3 im Vergleich zu > Z2 deutlich geringer ist. Dies führt zu einem höheren Anteil an RC-3-Material. Meistens werden die „> Z2-Proben“ in die RC-3-Klasse „verschoben“.

## 7.4 VERGLEICH DER AUFSCHLUSSVERFAHREN

### 7.4.1 Sulfat

In nachfolgender Abbildung sind die Sulfat-Konzentrationen der Aufschlussverfahren nach EBV (y-Achse) den Sulfat-Konzentrationen nach DIN 38414-4 (x-Achse) gegenübergestellt. Allgemein ergeben die EBV-Methoden für Sulfat höhere Konzentrationen als die bisherige nach UVM-Erlass. Dem wurde in der EBV 2015 mit den Zuordnungswerten von 600 mg/l (RC-1) und 1.000 mg/l (RC-2) Rechnung getragen.

Im Vergleich zwischen den EBV-Verfahren liegen die Befunde im 2:1-Schüttel-Eluat tendenziell höher als die im Säulenkurztest und die berechneten. Dies wird vor allem deutlich bei mittleren Konzentrationen, die für die Einstufung in die Klassen RC-1 bis RC-3 relevant sind. Dies führt zu den in Kapitel 7.2.4 beschriebenen unterschiedlichen Häufigkeiten in den Zuordnungsklassen, vor allem bezüglich der Einstufung in RC-3 mit 3.500 mg/l.

Die Befunde des W/F-2:1-Säulenkurztests liegen dem Mittelwert aller Methoden der jeweiligen Probe meist am nächsten.

Auffallend ist zudem, dass auch Proben mit sehr hohen WF-10:1-Befunden (> Z2) in den Aufschlüssen nach EBV ein Niveau von ca. 1.800 mg/l nicht überschreiten.

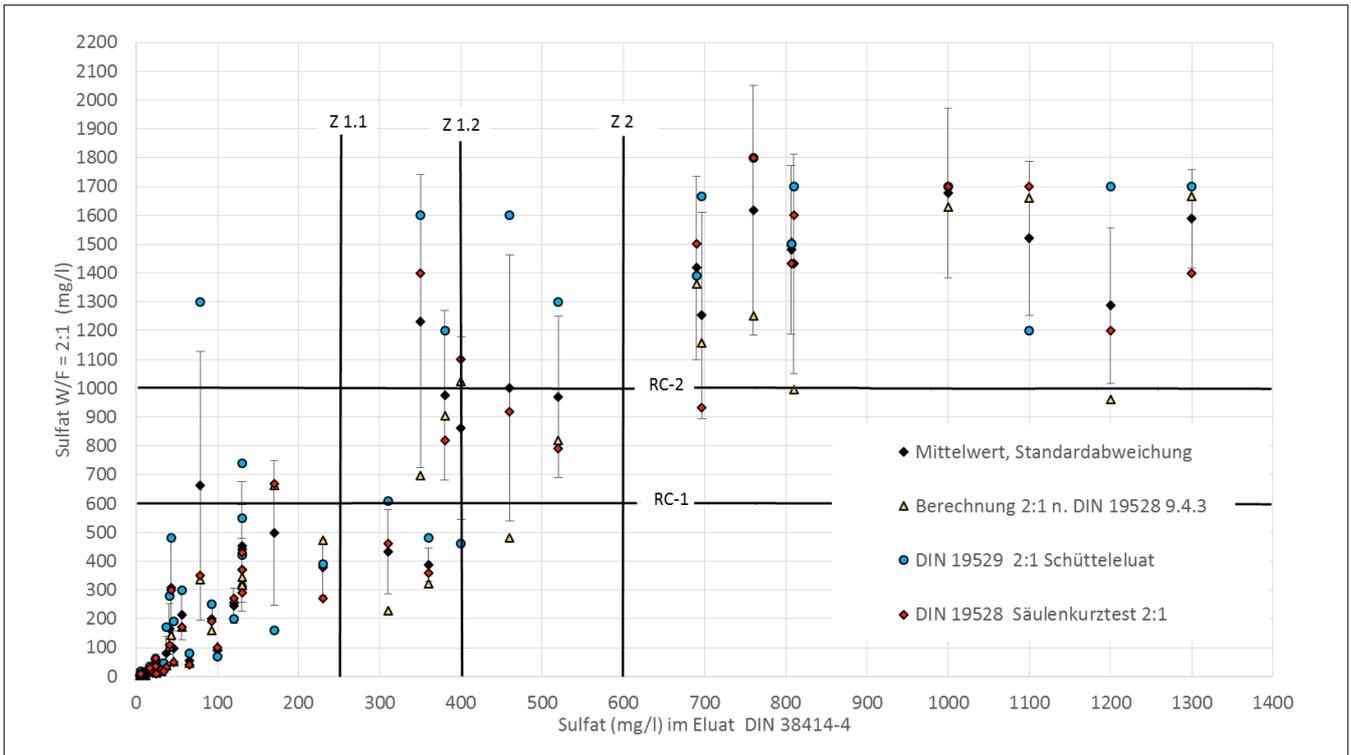


Abbildung 10: Vergleich der Aufschlussverfahren für Sulfat

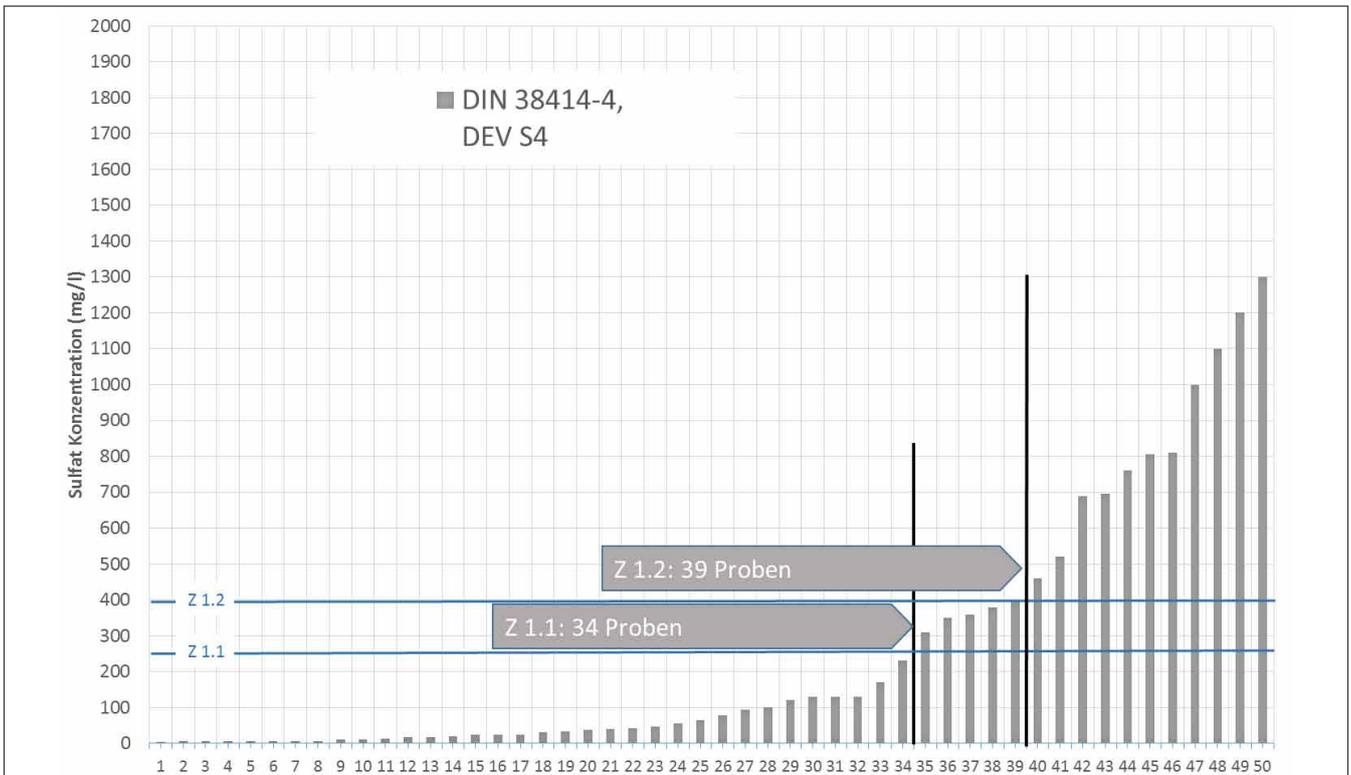


Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung Sulfat DIN 38414-4

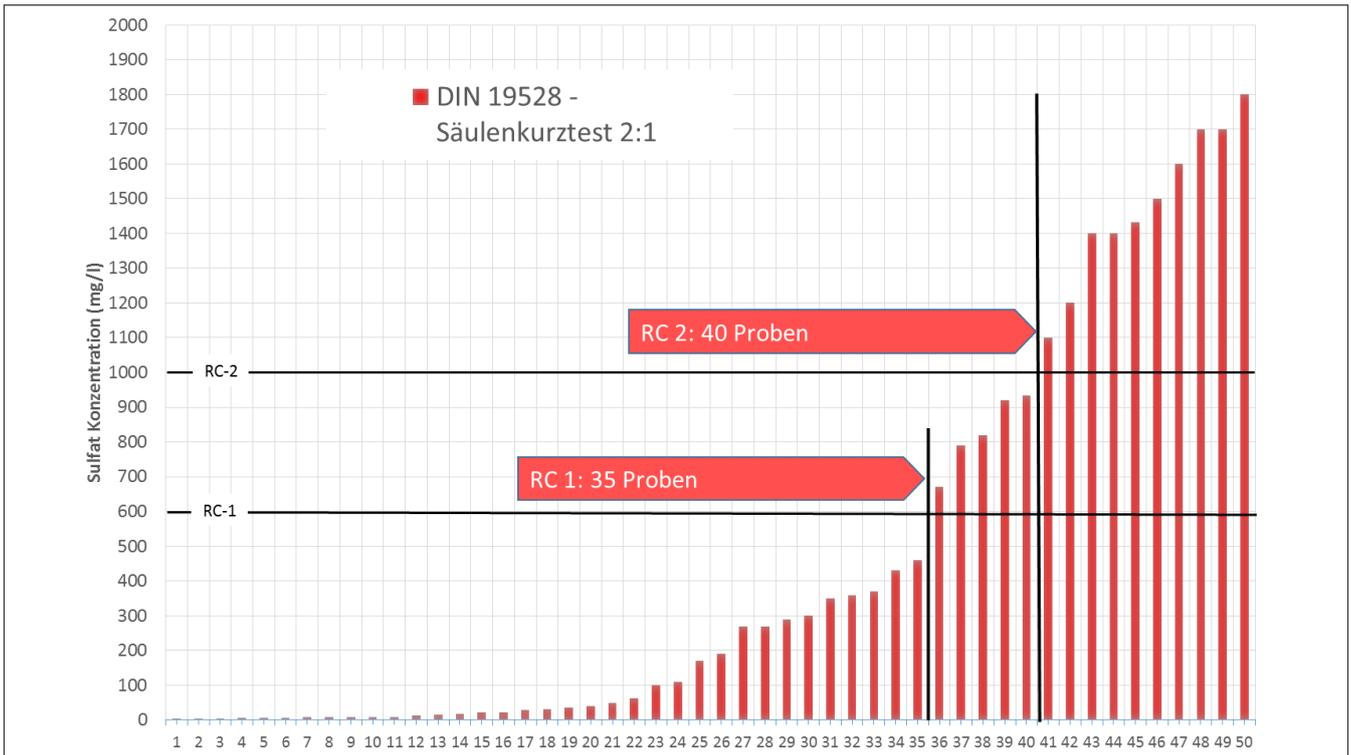


Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung Sulfat W/F-2:1-Säulenkurztest

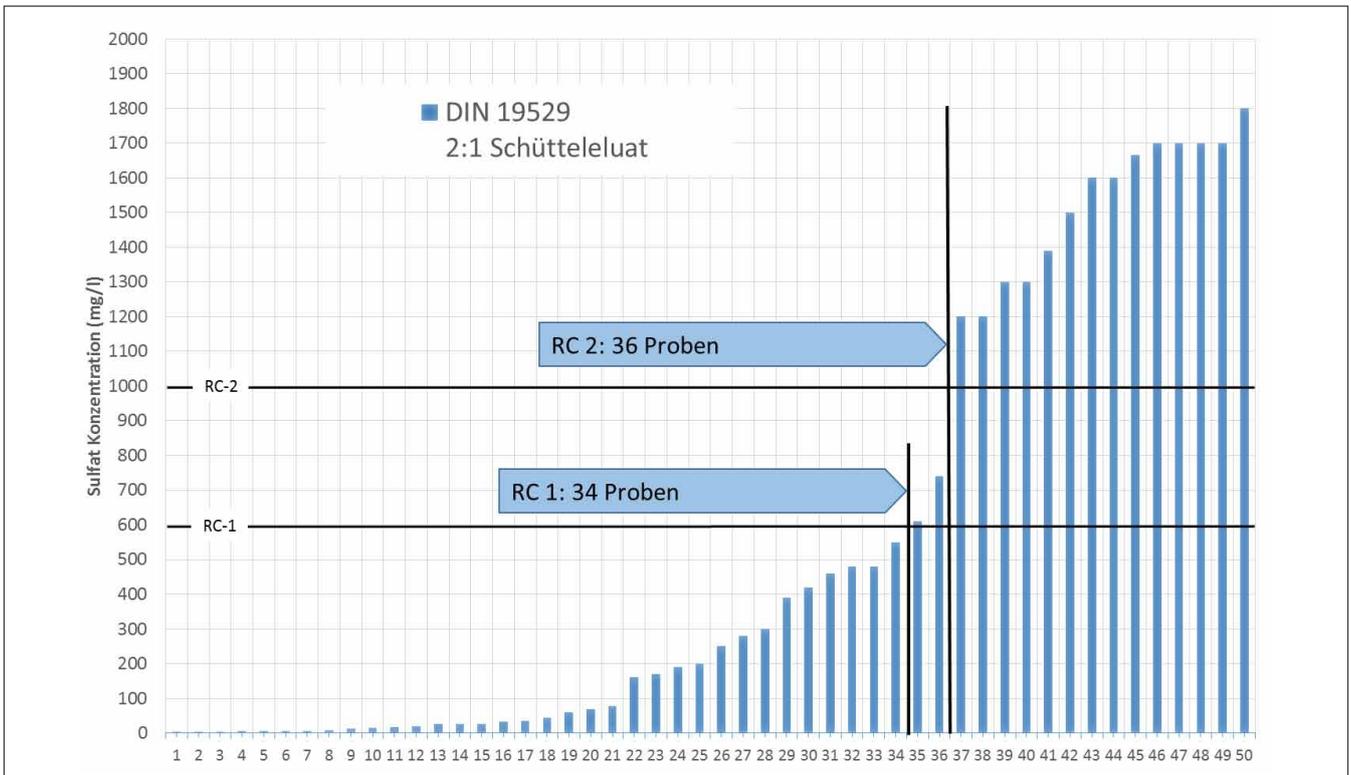


Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung Sulfat W/F 2:1-Schüttel-Eluat

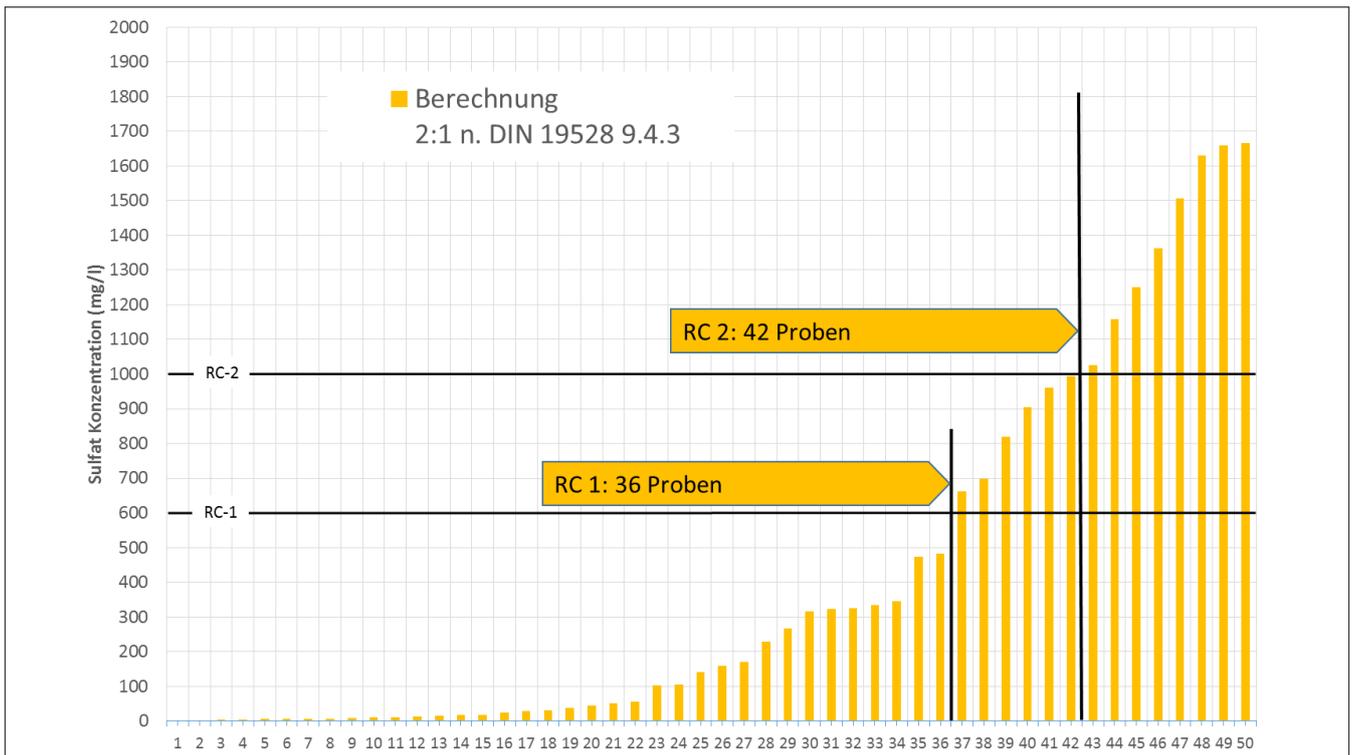


Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung Sulfat Berechnung DIN 19528, 9.4.3

Die oben dargestellten Histogramme der Sulfat-Konzentrationen verdeutlichen, wie je nach Aufschlussverfahren unterschiedlich viele Proben in die EBV-Klassen RC-1 (< 600 mg/l) und RC-2 (< 1.000 mg/l) eingestuft werden.

#### 7.4.2 PAK

In Abbildung 15 werden die PAK-Befunde der Aufschlussverfahren nach EBV denen des W/F-10:1-Verfahrens nach DIN 38414-4 gegenübergestellt. Ergänzt werden die Punktdarstellungen durch lineare Regressionen, welche mittels MS Excel 2012 berechnet wurden.

Die Konzentrationen nach EBV 2012 entsprechen im Wesentlichen denen des W/F-10:1-Schüttel-Eluats nach DIN 38414-4, im Unterschied zu Sulfat (vgl. Kap. 7.4.1).

Dagegen werden wie beim Parameter Sulfat mit dem W/F-2:1-Schüttel-Eluat nach DIN 19527 die tendenziell höchsten Konzentrationen ermittelt. Der W/F-2:1-Säulenkurztest ergibt für die meisten Proben die geringsten Konzentrationen. Die berechneten Werte nach DIN 19528, 9.4.3 liegen dazwischen.

Dies spiegelt sich in den linearen Regressionen wider, welche allerdings mit Bestimmtheitsmaßen zwischen 0,55 und 0,73 keine große Signifikanz aufzeigen.

Dies führt zu den oben geschilderten unterschiedlichen Einstufungen nach EBV 2012 je nach gewähltem Aufschlussverfahren.

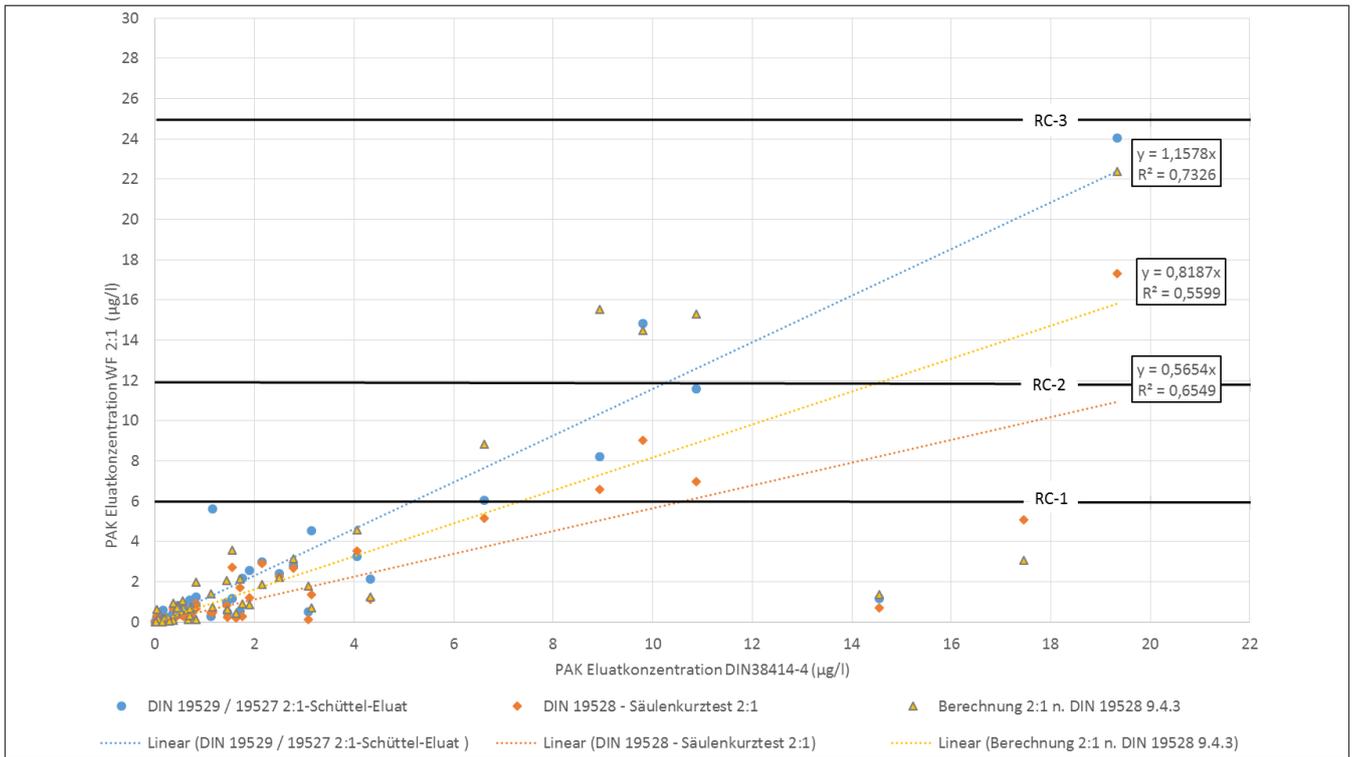


Abbildung 15: Vergleich der Aufschlussverfahren für PAK-15

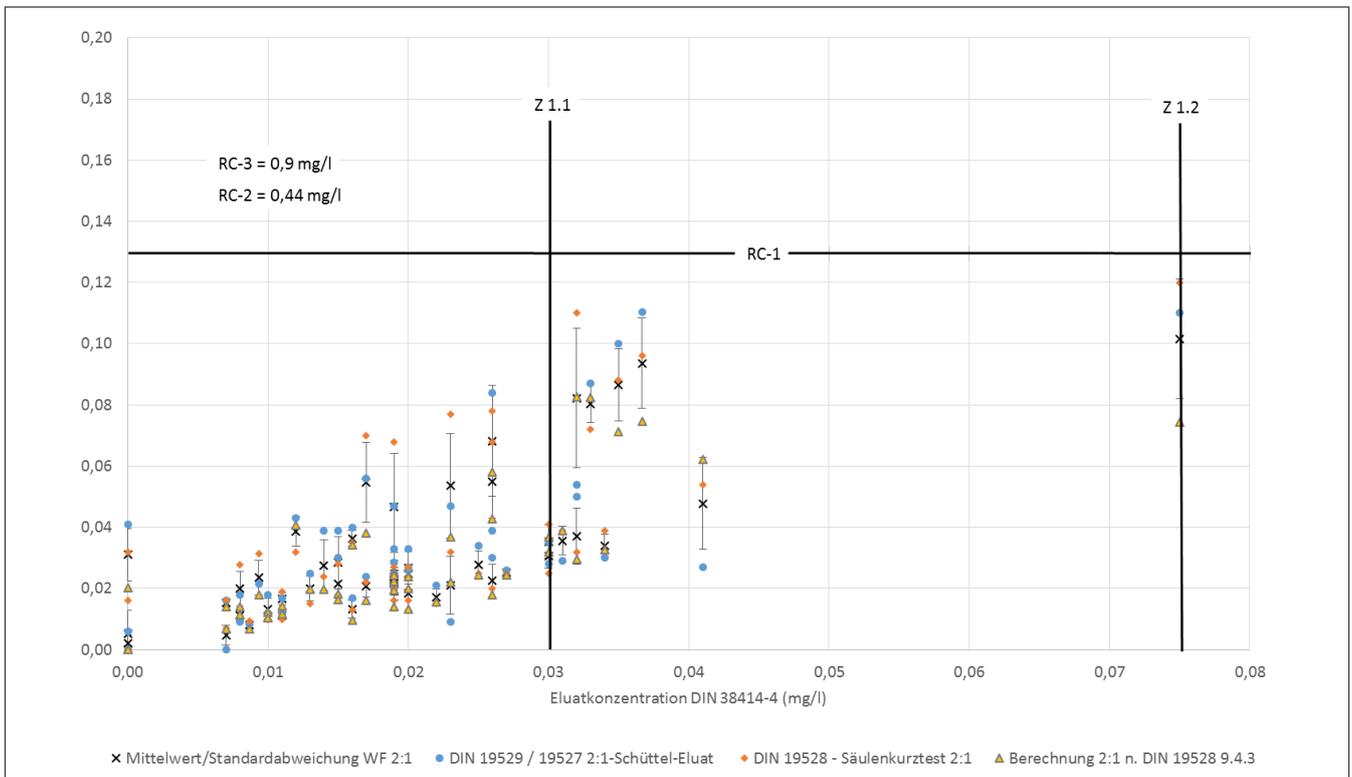


Abbildung 16: Vergleich der Aufschlussverfahren für Chrom (gesamt)

### 7.4.3 Chrom

Abbildung 16 zeigt die Werte für Chrom (gesamt) der W/F-2:1-Verfahren nach EBV 2012 gegenüber denen des W/F-10:1-Verfahrens nach UVM-Erlass.

Ähnlich wie bei Sulfat liegen in den Aufschlussverfahren nach EBV 2012 die Befunde mindestens in der Höhe der Vergleichswerte nach DIN 38414-4, tendenziell darüber. Auch hier wird dem dadurch Rechnung getragen, dass der RC-1-Wert mit 0,15 mg/l höher ist als der Z1.1-Wert von 0,03 mg/l.

Darüber hinaus wird ersichtlich, dass neun der 50 Proben nach dem W/F 10:1-Eluat den Z1.1-Wert des UVM-Erlasses überschreiten, alle Proben jedoch den RC-1-Wert einhalten. Deshalb sind die im Rahmen der vorliegenden Studie untersuchten Proben bezüglich der Chrom-Konzentrationen geeignet, um mit der EBV 2012 eine vergleichsweise hohe Verwertungsquote zu prognostizieren.

Zum anderen verdeutlicht die Abbildung, dass keine eindeutige Aussage möglich ist, welches Verfahren für Chrom (gesamt) höhere oder niedrigere Werte ergibt.

## 8 SCHLUSSBEMERKUNG

In der EBV sind drei verschiedene Methoden aufgeführt, nach denen die RC-Proben aufgeschlossen werden können, um die Ergebnisse anhand der Materialwerte der Tabelle 1 einzustufen. Wie schon vorhergehende Untersuchungen zeigt die vorliegende Studie, dass damit methodenbedingt unterschiedliche Untersuchungsergebnisse erzielt werden. Sie sind im Einzelfall einstufigsrelevant.

Um zu vermeiden, dass in der Praxis für dasselbe Material verschiedene Einstufungen getroffen werden, wenn z. B. bei der Deklarationsuntersuchung eine andere Methode verwendet wird als bei einer Kontrolluntersuchung der Annahmestelle oder wenn dem grundsätzlichen Eignungsnachweis die werkseigene Produktionskontrolle bzw. die Fremdüberwachung folgen, sollte sich der Ordnungsgeber auf eine Aufschlussmethode festlegen.

Perkolate dürften realitätsnähere Ergebnisse liefern als Schüttel-Eluate, da die Probe wie ein angenommener Ablagerungskörper durchströmt wird. Da bei den Untersuchungen meist die Zeit drängt, ist der 2:1-Säulenkurztest im Vorteil gegenüber dem ausführlichen Säulenversuch. Gegenüber den Schüttel-Eluaten hat der 2:1-Säulenkurztest keinen wesentlich höheren Zeitbedarf (das Befüllen und Aufsättigen der Säule ist (zeit)aufwändiger, die Perkolation bei RC-Material kürzer als die vorgeschriebene Schütteldauer). Da diese Methode außerdem (mit Ausnahme des bisher gebräuchlichen 1:10-Schüttel-Eluats) am preisgünstigsten ist, neigen die Autoren zur Empfehlung des W/F-2:1-Säulenkurztests nach DIN 19528.

Aufschlussmethode	Aufschluss	Analytik Parameterumfang für RC nach EBV Anl. 1, Tab. 1	Gesamtkosten
DIN 38414-4	10 €	90 €	100 €
DIN 19527 / 19529 (2:1-Schüttel-Eluate) (WPK, FÜ)	2 x 40 €	90 €	170 €
DIN 19528 (Säule ausführlich) (eFÜ)	90 €	4 x 90 €	450 €
DIN 19528 (2:1-Säulenkurztest) (WPK, FÜ)	60 €	90 €	150 €
Aufschlussmethode	Aufschluss	Analytik Parameterumfang für RC nach EBV Anl. 4, Tab. 2	Gesamtkosten
DIN 19528: Säule ausführlich (EN)	90 €	4 x 160 €	730 €

Tabelle 16: Geschätzte Kosten der Aufschlussmethoden (Laborkosten Einzelprobe)

Nach EBV, Tabelle 1, ist RC-Material im Vergleich zum UVM-Erlass nach weniger Parametern einzustufen (6 statt 17). Für eine Untersuchung nach UVM-Erlass können derzeit für Einzelproben Laborkosten von ca. 150 € angenommen werden. Bei Ablösung des UVM-Erlasses durch die EBV und Verwendung des 2:1-Säulenkurztests nach DIN 19528 würde der deutlich aufwändigere Aufschluss durch die Reduktion des Untersuchungsumfanges etwa ausgeglichen. Bei Beibehaltung der Probenanzahlen und Verwendung des 2:1-Säulenkurztests dürfte bei den Regeluntersuchungen (WPK, FÜ) eine Umstellung vom bestehenden Regelwerk in Baden-Württemberg auf die EBV etwa kostenneutral sein.

Allerdings stellen die Untersuchungen für die erweiterte Fremdüberwachung bzw. für den Eignungsnachweis im Vergleich zum jetzigen Zustand und zu den Regeluntersuchungen einen Mehraufwand dar, da sie im ausführlichen Säulenversuch bzw. zusätzlich auf einen größeren Parameterumfang erfolgen müssen. Die Kosten liegen etwa

beim 3-fachen (eFÜ) bzw. 5-fachen (EN) des UVM-Erlasses bzw. der Regeluntersuchung. Dies fällt vor allem bei mobilen Anlagen ins Gewicht, wo die Eignungsuntersuchung einmalig je Aufstellung zu erfolgen hat, bis zu einem Massenfall von 5.000 Tonnen die Regeluntersuchung ersetzt und mitunter die einzige Deklarationsuntersuchung ist.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden insgesamt 31.020 Datensätze gewonnen. Aufgrund der Aufgabenstellung wurden die Daten nur nach einzelnen Teilaspekten ausgewertet. Der geneigte Leser wird weitere Möglichkeiten der Auswertung erkennen.

Für weiter gehende Erläuterungen stehen die Verfasser gerne zur Verfügung.

#### **SGS INSTITUT FRESENIUS GMBH**

Armin Grupp  
Dipl.-Geoökol.

#### **HPC AG**

Philipp Schwarz  
Dipl.-Geogr.

Thomas Osberghaus  
Dipl.-Geol.

#### **INSTITUT DR. HAAG GMBH**

Jörg Mändle  
Dipl.-Geol.

## QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material. Artikel 2: Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Werke (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV), Entwurf Stand 31.10.2012, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin
- [2] Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial. Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg Stuttgart, April 2004
- [3] Analytische Untersuchung von Bauschuttrecyclingmaterial in Baden-Württemberg 2007/2008 – Ergebnisse von Schüttel- und Säulenelutionsverfahren, LUBW Karlsruhe, September 2008
- [4] Analytische Untersuchung von Bauschuttrecyclingmaterial in Baden-Württemberg 2009 – Ergebnisse von Schüttel- und Säulenelutionsverfahren, LUBW Karlsruhe, August 2010
- [5] Recyclingbaustoffe in Baden-Württemberg – Aktueller Stand und mögliche Auswirkungen der geplanten Ersatzbaustoffverordnung, LUBW Karlsruhe, 08/2014
- [6] Weiterentwicklung von Kriterien zur Beurteilung des schadlosen und ordnungsgemäßen Einsatzes mineralischer Ersatzbaustoffe und Prüfung alternativer Wertevorschläge, Zwischenbericht 2010 vom 31.01.2011, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften der Universität Tübingen, Arbeitsgruppe Hydrochemie, Prof. Dr. Grathwohl im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit / Umweltbundesamtes
- [7] Kontrollanalytik von Baustoffrecyclingmaterial in Rheinland-Pfalz 2012, LUWG Mainz, Dezember 2012
- [8] QRB-Leitfaden Probenbehandlung, QRB-Arbeitskreis Fremdüberwachung, Qualitätssicherungssystem Recycling-Baustoffe Baden-Württemberg, Ostfildern, 2006
- [9] DIN EN 932-2: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zum Einengen von Laboratoriumsproben, 1999
- [10] DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren, 2012
- [11] Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau TP Gestein-StB 2008, Teil 3.1.5., Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln 2004, Fassung 2007
- [12] DIN 38414-4: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung; Schlamm und Sedimente (Gruppe S); Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4), 1984
- [13] DIN 19527: Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von organischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg, 2012
- [14] DIN 19528: Elution von Feststoffen – Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen, 2009
- [15] DIN 19529: Elution von Feststoffen – Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg, 2009
- [16] CEN/TS 14405: Charakterisierung von Abfällen – Auslaugungsverhalten – Perkolationsprüfung im Aufwärtsstrom, 2004
- [17] DIN EN 932-1: Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Probenahmeverfahren, 1996
- [18] Ergebnisse der Beratung der Bund-Länder-Arbeitsgruppe „ErsatzbaustoffV“: BMU – WA II 5, AZ.: 30 114-2/2, Bonn, 02.09.2013
- [19] Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material. Artikel 2: Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Werke (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV), Entwurf Stand 23.07.2015

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

μ	„Mikro“, 10 <sup>-6</sup>	Mat.	Material	RC	Recycling
As	Arsen	MKW	Mineralölkohlenwasserstoffe	Sb	Antimon
Ba	Barium	Mo	Molybdän	SM	Metalle (Schwermetalle + Arsen)
BaP	Benzo(a)pyren (Einzelparameter der PAK)	MP	bei Proben: Mischprobe	St.-Abw.	Standardabweichung
BG	Bestimmungsgrenze	n	„Nano“, 10 <sup>-9</sup>	Stk.	Stück
Cd	Cadmium	Nap	Naphthalin (Einzelparameter der PAK)	TM	Trockenmasse (entspricht Trockensubstanz)
Cr	Chrom	Ni	Nickel	TOC	Gesamter organisch gebundener Kohlenstoff
Cr VI	Chromat	O <sub>2</sub>	Sauerstoff	TR	Trockenrückstand
Cu	Kupfer	PAK	Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe	Zn	Zink
DOC	Gelöster organischer Kohlenstoff	PAK-15	PAK-16 ohne Naphthalin		
EOX	Extrahierbare organisch gebundene Halogene	PAK-16	16 PAK-Einzelparameter nach EPA		
GFS	Geringfügigkeitsschwelle	Pb	Blei		
GW	Grundwasser	PCB	Polychlorierte Biphenyle		
H-B	Hintergrundwert Boden	PCB-6	6 PCB-Einzelparameter nach Ballschmiter		
Hg	Quecksilber	Perz.	Perzentil		
KW (GC)	Kohlenwasserstoffe (Gaschromatograph)	pH	pH-Wert		
Lf	Elektr. Leitfähigkeit	QRB	Qualitätssicherungssystem Recyclingbaustoffe Baden-Württemberg e.V.		

**DIE SGS-GRUPPE IST DAS WELTWEIT FÜHRENDE UNTERNEHMEN IN DEN BEREICHEN PRÜFEN, TESTEN, VERIFIZIEREN UND ZERTIFIZIEREN.**



**WWW.SGS.COM**  
**WWW.SGSGROUP.DE**

**WHEN YOU NEED TO BE SURE**

