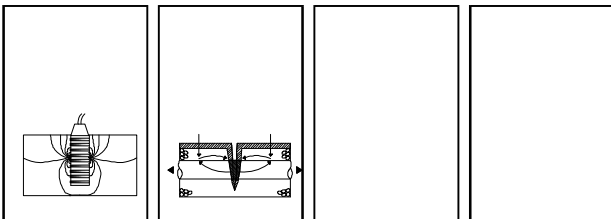
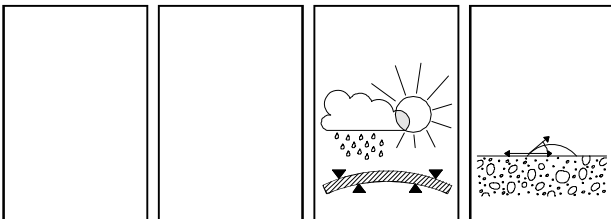
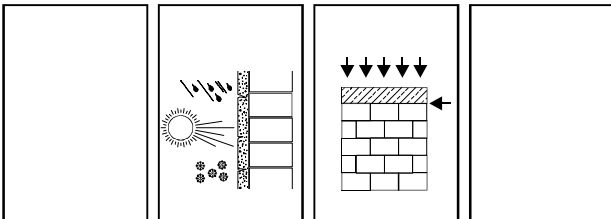
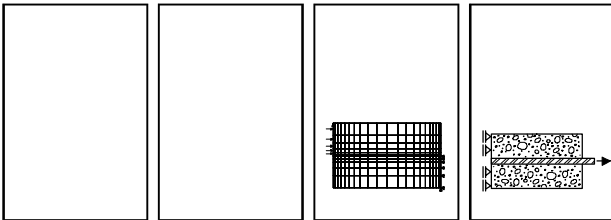
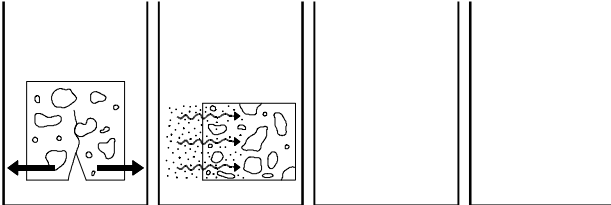


INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG AACHEN



FORSCHUNG · ENTWICKLUNG
 ÜBERWACHUNG
 PRÜFUNG · BERATUNG

RHEINISCH-
 WESTFÄLISCHE
 TECHNISCHE
 HOCHSCHULE
 AACHEN
RWTH
 AACHEN
 UNIVERSITY

Forschungsbericht F 7048

Untersuchungen zum
 Auslaugverhalten von Abdichtungs-
 und Injektionsstoffen

Vp/Sc

3. Ausfertigung

THEMA

Untersuchungen zum Auslaugverhalten von
Abdichtungs- und Injektionsstoffen

Forschungsbericht Nr.

F 7048
vom 05.08.2009

Projektbearbeitung

Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

Dipl.-Ing. A. Vollpracht

**Auftraggeber/
Förderer**

Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und
Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern
Paulshöher Weg 1
19061 Schwerin

**Auftragsdatum
Aktenzeichen**

16.01.2008
G 3.07

Dieser Bericht umfasst 150 Seiten, davon 33 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung. Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>		Seite
1	EINLEITUNG	1
2	UNTERSUCHTE ABDICHTUNGS- UND INJEKTIONSSTOFFE.....	2
2.1	Bitumen.....	2
2.2	Ungesättigte Polyesterharze.....	2
2.3	Acrylate	4
2.4	Polyurethane.....	4
2.5	Zementsuspensionen.....	5
3	VERSUCHSBESCHREIBUNGEN	5
3.1	Standtest.....	5
3.2	Inverser Säulenversuch	7
4	ANALYSEVERFAHREN	9
5	VERSUCHSAUSWERTUNG	11
5.1	Allgemeines	11
5.2	Auswertung des Standtests	11
5.2.1	Freisetzung	11
5.2.2	Auslaugrate.....	12
5.3	Auswertung des inversen Säulenversuchs	12
6	DARSTELLUNG UND INTERPRETATION DER VERSUCHSERGEB- NISSE	13
6.1	Standtest.....	13
6.1.1	Bitumen.....	13
6.1.1.1	Ergebnisse	13
6.1.1.2	Auswertung.....	14
6.1.2	Ungesättigte Polyesterharze.....	16

6.1.2.1	Ergebnisse	16
6.1.2.2	Auswertung	16
6.2	Ergebnisse des inversen Säulenversuchs	18
6.2.1	Blindwerte	18
6.2.2	Acrylatgele	19
6.2.2.1	Ergebnisse	19
6.2.2.2	Auswertung	19
6.2.3	Polyurthane	20
6.2.3.1	Ergebnisse	20
6.2.3.2	Auswertung	21
6.2.4	Zementsuspensionen	21
6.2.4.1	Ergebnisse	21
6.2.4.2	Auswertung	23
7	ZUSAMMENFASSUNG	24
	LITERATUR	31
	TABELLEN	A1-A52
	BILDER	B1-B65

1 EINLEITUNG

Bei der bauaufsichtlichen Zulassung von Bodeninjektionsmitteln (Zementsuspensionen und Weichgele), Spachtel- und Verpressmassen, Linern und sonstigen Abdichtungsstoffen, die mit Boden und Grundwasser in Berührung kommen, soll die Umweltverträglichkeit berücksichtigt werden. Es wurde daher vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) ein Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Bewertungskonzepten für die Anwendungsfälle Injektion, flächige Applikation auf Bauteiloberflächen und punktuelle Reparaturen bewilligt /Bra09/. In dem Projekt sollen vorhandene Versuchsdaten mit einem numerischen Transportmodell ausgewertet werden. Ziel ist es, Grenzwerte für die von den entsprechenden Projektgruppen des DIBt ausgewählten Auslaugversuche vorzuschlagen. Als Bewertungsmaßstab werden entsprechend dem DIBt-Papier „Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser – Teil I“ /DIB08/ die Geringfügigkeitsschwellen (GFS) /LAW04/ für das Grundwasser herangezogen. Das Projekt /Bra09/ soll als Grundlage für das entsprechende Kapitel des Teils II – „Bewertungskonzepte für spezielle Bauprodukte“ dienen. Nach umfangreicher Recherche musste jedoch festgestellt werden, dass die vorhandene Datenbasis ungenügend ist.

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war es daher, die für das Projekt /Bra09/ benötigten Versuchsergebnisse zu bestimmen. Die entsprechenden Versuche wurden bereits vorab von den zuständigen Projektgruppen des DIBt festgelegt. Es sollten ein 24 Stunden dauernder Trogversuch für Beschichtungsstoffe und der inverse Säulenversuch nach Schössner für Injektionsstoffe verwendet werden. Für die Durchführung von Modellrechnungen eignet sich der einstufige Trogversuch jedoch nicht, da der zeitliche Verlauf der Auslaugung bei der Modellierung berücksichtigt werden soll und der Versuch nur einen Einzelwert liefert. Daher wurde hier für die Charakterisierung ein Standtest herangezogen, bei dem sechs Eluate gewonnen werden (vgl. /DAf05/). Für die Berechnung einer zulässigen Freisetzung mit Hilfe der numerischen Transportsimulation müssen je Materialtyp wenigstens vier bis fünf Datensätze vorliegen. Daher wurden für dieses Projekt jeweils vier Bitumendickbeschichtungen, ungesättigte Polyesterharze, Acrylatgele, Polyurethane und Zementsuspensionen ausgewählt. Bitumen und Polyesterharze werden flächenhaft als Abdichtung aufgebracht, während Acrylatgele, Polyurethane und Zementsuspensionen in den Untergrund injiziert werden. Die Auslaugung der Abdichtungsstoffe im Standtest erfolgte am ibac, während die Injektionsstoffe am Hygiene-Institut Gelsenkirchen im Säulenversuch geprüft wurden.

2 UNTERSUCHTE ABDICHTUNGS- UND INJEKTIONSTOFFE

2.1 Bitumen

Bitumen besteht hauptsächlich aus hochmolekularen Kohlenwasserstoffen (langkettig; aliphatisch und aromatisch) und enthält des Weiteren chemisch gebundenen Schwefel, Sauerstoff, Stickstoff und einige Spuren von Metallen. Es ist ein klebriges, nahezu wasserunlösliches Material, das in unterschiedlichen Bereichen zur Abdichtung eingesetzt wird (bspw. als Anstriche, in Bitumenbahnen oder Dickbeschichtungen). Für dieses Projekt wurden vier kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen (KMB) gemäß DIN 18195-2: 2000-08 von unterschiedlichen Herstellern ausgewählt. Es handelt sich um zwei ein-komponentige (B1 und B3) und zwei zweikomponentige Systeme (B2 und B4). Die KMB B2, B3 und B4 enthalten Polystyrol als Füllstoff. In Tabelle A1 sind Gesamtgehalte der KMB an den hier betrachteten umweltrelevanten Stoffen angegeben. Für die Untersuchungen wurden Glasplatten (200 x 200 mm²) von den jeweiligen Herstellern beidseitig mit Bitumen beschichtet, die Schichtdicke lag bei 3,5-4 mm. In der Regel wurde dabei rundherum ein Streifen mit einer Breite von 10 mm freigelassen, bei Produkt B1 wurde die gesamte Breite der Glasplatte beschichtet und oben und unten ein Streifen mit einer Breite von rd. 20 mm freigelassen.

2.2 Ungesättigte Polyesterharze

Ungesättigte Polyesterharze sind Gemische aus einem Polyester-Prepolymer (polymerisationsfähige Oligomere) und einem vinylichen Monomer (Verbindung mit einer C=C-Doppelbindung). Meist wird Styrol eingesetzt. Das Polyester-Prepolymer entsteht durch Polykondensation von mehrwertigen Alkoholen (Glykole) mit ungesättigten Dicarbonsäuren, wie in Bild 1 dargestellt /Sau00/.

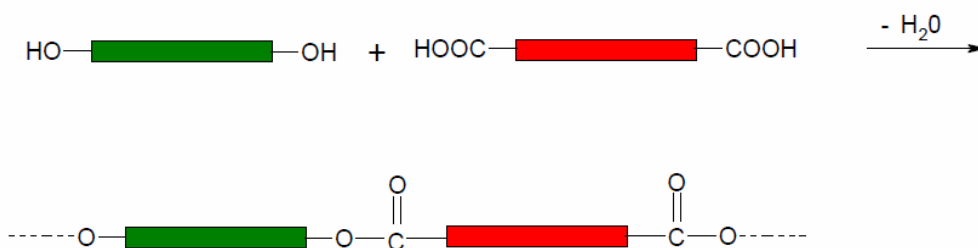


Bild 1: Schematische Darstellung der Polykondensation von Polyester-Prepolymeren

Die vier hier untersuchten Harze (uP1 bis uP4) enthalten Bisphenol A bzw. Neopentylglykol als mehrwertige Alkohole und Isophthalsäure, Terephthalsäure, Ethylendicarbonsäuren bzw. HET-Säure (Hexachloro-endo-methylen-tetrahydrophthalsäure) als Dicarbonsäuren. Ein Produkt enthält mehrere Säuren. Das Polyester-Prepolymer wird unmittelbar nach beendeter Reaktion in eine Vorlage eingerührt. Bei allen Produkten wurde hierfür Styrol verwendet. Bei der Polymerisation werden dann die Prepolymere mit durchschnittlich zwei Styrolmolekülen zu einem dreidimensional vernetzten Duomer umgesetzt (s. Bild 2).

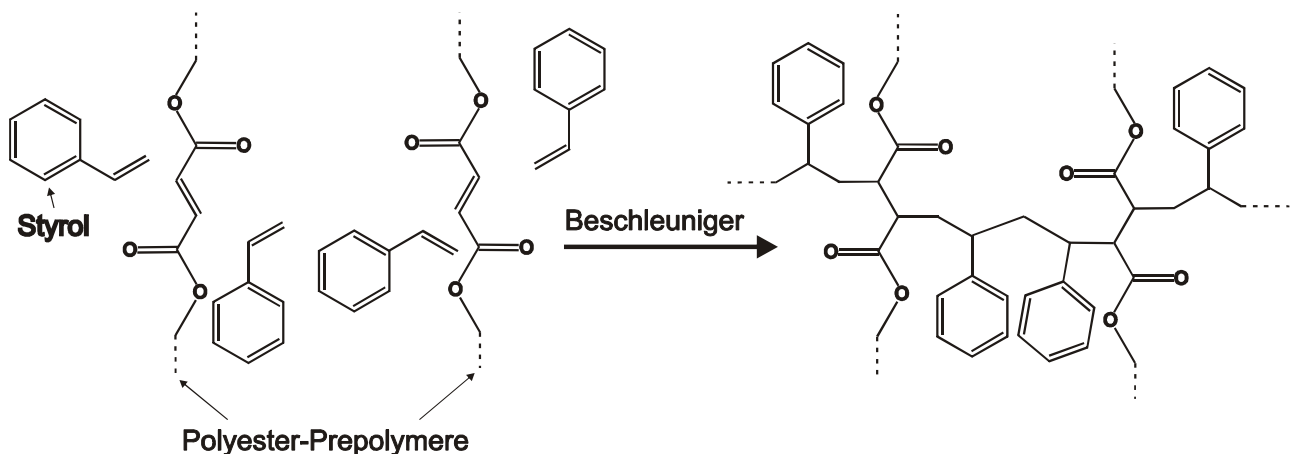


Bild 2: Polymerisation der Prepolymere mit Styrol, /Sau00/

Bei der Kanalrohrsanierung wird die Reaktion üblicherweise durch Wärmezufuhr in Form von Wasserdampf beschleunigt. Möglich ist auch eine Härtung mit UV-Licht. Das Produkt uP1 kann mit beiden Varianten ausgehärtet werden. Es wurde vom Hersteller verarbeitet und in Form von Platten mit einer Fläche von rd. 200 x 200 mm² und einer Dicke von 6 bis 7 mm angeliefert. Die Auslaugung startete ca. drei Wochen nach der Herstellung.

Die Produkte uP2 bis uP4 wurden nach dem Vorgaben des Herstellers am ibac angemischt. Hier erfolgte die Beschleunigung der Reaktion auf chemischem Weg. Den Harzen wurde dazu ein Härter auf Basis von Butanonperoxid beigemischt. Zur Beschleunigung der Radikalbildung wurde Kobaltoktoat verwendet. Zusätzlich wurde eine Paraffinlösung beigegeben, die ein klebfreies Aushärten sicherstellen sollte. Aus den Harzen wurden dann ebenfalls Platten mit den Abmessungen 200 x 200 x 5 mm³ hergestellt. Die Auslaugung begann rd. eine Woche nach der Herstellung.

In Tabelle A2 sind die Gesamtgehalte der hier betrachteten umweltrelevanten Stoffe angegeben. Vom Produkt uP1 lag leider nicht genug Probenmaterial vor, so dass die Ge-

samtgehalte nur an einer bereits eluierten Probe ermittelt werden konnten. Die Ergebnisse sind daher nur bedingt aussagekräftig. Es ist jedoch ersichtlich, dass alle Produkte noch erhebliche Mengen an monomerem Styrol enthalten. Z. T. liegt auch der Xylol-Gehalt im ein- bis zweistelligen Prozentbereich.

2.3 Acrylate

Acrylatgele sind in der Lage, Wasser physikalisch zu binden und dabei ihr Volumen zu vervielfachen, wodurch sie eine abdichtende Wirkung haben. Acrylatgele sind niedrigviskos und werden aus zwei Komponenten (A und B) hergestellt, die wiederum aus Teilkomponenten bestehen. Insgesamt wurden in diesem Projekt vier verschiedene Acrylatgele untersucht. Teilkomponente B enthält bei allen Produkten Natriumpersulfat als Initiator. Durch die Dosierung des Salzes kann die Verarbeitungszeit in gewissen Grenzen gesteuert werden. Komponente A enthält Triethanolamin und ein Acrylat, dessen Zusammensetzung variiert. Diese Komponente liefert somit die Monomere, die während der Reaktion zum Polyacrylat vernetzt werden. Z. T. sind weitere Nebenbestandteile, wie z. B. Verzögerer (Kaliumhexacyanoferrat) enthalten. Die Produkte Ac1 und Ac2 sind handelsübliche Acrylatgele, während Ac3 und Ac4 Neuentwicklungen sind, die sich noch in der Erprobungsphase befinden.

2.4 Polyurethane

Polyurethane werden in einer Polyadditionsreaktion aus Dialkoholen (stattdessen häufig auch Polyether) und Diisocyanaten gebildet. Die Verknüpfung erfolgt durch die Reaktion einer Isocyanatgruppe ($-N=C=O$) eines Moleküls mit einer Hydroxylgruppe ($-OH$) eines anderen Moleküls unter Bildung einer Urethangruppe (s. Bild 3).

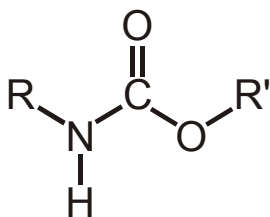


Bild 3: Urethan-Bindung

In diesem Projekt wurden vier verschiedene Polyurethane verwendet: zwei niedrig-viskose Einkomponenten Schaumharze, die in Kontakt mit Wasser ihr Volumen vervielfachen und so zu einem abdichtenden Material reagieren (Haupteinsatzgebiete: Abdichtung gegen Wasser und die Verfestigung von Lockergesteinen) und zwei niedrig-viskose Zweikomponenten-Polyurethanharze, die mit Wasser nahezu schaumfrei zu einem elastischen Harz reagieren (Haupteinsatzgebiete: Füllen von Hohlräumen und Rissen zur Abdichtung). Zu den genauen Ausgangsstoffen der Polyurethane lagen keine Informationen vor.

2.5 Zementsuspensionen

Zementsuspensionen, die z. B. für tiefliegende Injektionssohlen verwendet werden, bestehen meist aus Feinzement; z. T. wird Bentonit zugesetzt. Für dieses Projekt wurden drei handelsübliche Produkte ausgewählt, die für Hochdruckinjektionen geeignet sind. Mit den drei Zementen wurden vier Suspensionen hergestellt. Die Suspensionen ZS1 und ZS2 enthalten denselben Zement, es wurde jedoch der w/z-Wert variiert ($w/z = 1,0$ und $w/z = 0,69$). Die Suspensionen ZS3 und ZS4 wurden mit den anderen beiden Zementen und $w/z = 1,0$ hergestellt. In Tabelle A3 sind die Rohdichten und die Mahfeinheiten der Zemente enthalten. Die chemischen Zusammensetzungen der Zemente sind in Tabelle A4 angegeben. Die chemische Analyse zeigte, dass die Zemente für die Suspensionen ZS1 und ZS2 sowie ZS3 weitere Hauptbestandteile enthalten. In Tabelle A5 sind die anhand der chemischen Analyse ermittelten Hauptbestandteile dieser beiden Zemente angegeben.

3 VERSUCHSBESCHREIBUNGEN

3.1 Standtest

Im Standtest wurden die Bitumenbeschichtungen und die ungesättigten Polyesterharze untersucht. Die verwendeten Probekörper sind in den Abschnitten 2.1 und 2.2 beschrieben. Der Versuch wurde in verschließbaren Glasbehältern ohne Vorbehandlung der Proben und ohne Rühren des Eluenten durchgeführt. Es wurden jeweils drei Platten gemeinsam in einem Behälter eluiert. In Bild 4 ist der Versuch schematisch am Beispiel der beschichteten Glasplatten (Bitumenproben) dargestellt. Um biologischen Abbau zu verhindern, wurden die Glasbehälter abgedunkelt.

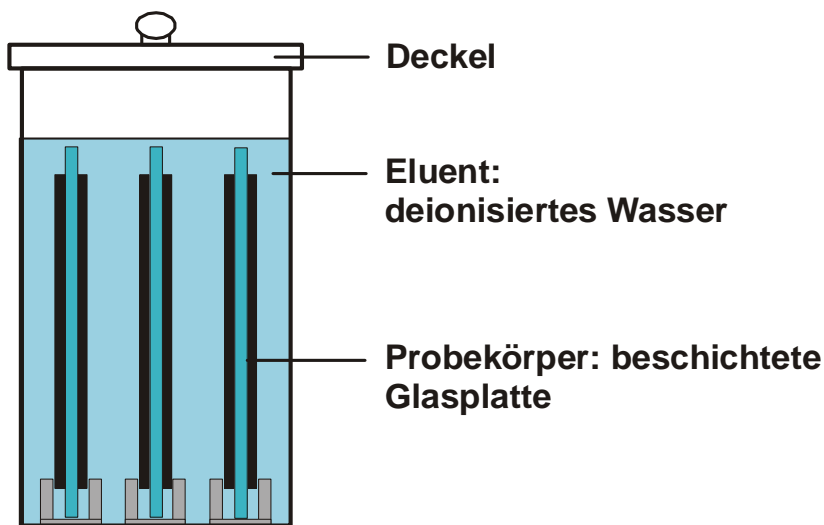


Bild 4: Schematische Darstellung des Standtests

Um den Freisetzungsverlauf bestimmen zu können, wird der Standtest mehrstufig über einen längeren Zeitraum durchgeführt. Die Entnahmezeiten orientieren sich dabei an /DAf05/ (1, 3, 7, 16, 32 und 56 Tage). Zu diesen Terminen wird das gesamte Wasser entnommen und durch neues deionisiertes Wasser ersetzt. Das Verhältnis von Volumen des Eluenten zur Oberfläche des zu prüfenden Stoffes sollte bei $V/O = 10 \text{ l/m}^2$ liegen, die Wassermenge musste jedoch leicht erhöht werden, um die Proben vollständig zu bedecken. Teilweise zeigten die Proben während des Versuchs ein Quellen, so dass die Wassermenge beim Wasserwechsel reduziert werden konnte. Daher ist das V/O-Verhältnis nicht konstant. In Tabelle A6 sind V/O-Verhältnisse von jedem Elutionsschritt aller Standteste zusammengestellt. Es wurden jeweils Doppelbestimmungen durchgeführt. Eine 2 l-Probe des entnommenen Wassers wurde unmittelbar nach der Probenahme in eine dunkle Glasflasche gefüllt und verschlossen. Dabei wurden die Flaschen bis zum Rand gefüllt, um ein Ausgasen von flüchtigen Substanzen zu verhindern. Die Flaschen wurden bis zur Analyse bei 5°C im Kühlschrank gelagert. Zusätzlich wurde eine kleinere Probe zur Bestimmung der allgemeinen Parameter, der Alkali- sowie der Chlorid- und Sulfatkonzentrationen entnommen. In Tabelle 1 sind die untersuchten Parameter zusammengestellt. Die Versuchsdurchführung erfolgte am ibac, die Einzelstoffanalytik der organischen Verbindungen führte das Hygiene-Institut Gelsenkirchen durch.

Tabelle 1: Parameterumfang bei der Elution im Standtest

Abdichtungsstoff	Ausgewählte, baustoffspezifische Parameter	Allgemeine Parameter
1	2	3
Bitumen	Σ PAK, Σ LHKW, Σ KW, BTEX-Aromaten, Phenole	TOC, pH-Wert, Leitfähigkeit, Na, K, SO_4^{2-} , Cl^-
Ungesättigte Polyesterharze	Σ PAK, Σ LHKW, Σ KW BTEX-Aromaten, Styrol	

- Σ PAK: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Summe der 15 EPA-PAK)
 Σ LHKW: leicht flüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (Summe der halogenierten C₁- und C₂-Kohlenwasserstoffe)
 Σ KW: Kohlenwasserstoffe (Summe der C₁₀- bis C₄₀-Kohlenwasserstoffe)
 BTEX: Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol

3.2 Inverser Säulenversuch

Zur Durchführung des inversen Säulenversuchs wird eine Acrylglassäule mit Sand (Quarzsand Frechen F36, 0,09/0,25 mm) gefüllt und 48 Stunden lang mit Leitungswasser gespült. Hierzu wird mit der Pumpe Wasser aus dem Vorratsbehälter von unten nach oben durch die Säule gepumpt (Förderleistung $4 \pm 0,2$ l/h). Danach wird die Wasserzufuhr unterbrochen und das zu untersuchende Material eingebracht. Die Versuchseinrichtung ist in Bild 5 schematisch dargestellt.

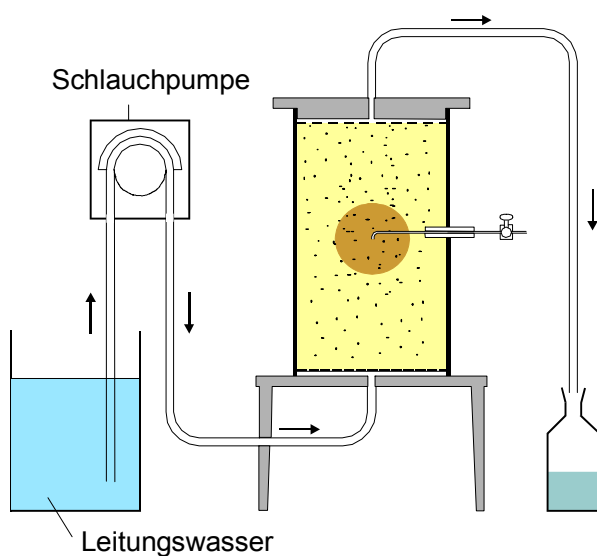


Bild 5: Schematischer Aufbau des inversen Säulenversuchs

Bei den Acrylatgelen und den Polyurethanen erfolgte die Einbringung mittels Injektion in die Mitte der Säule. Vor der Injektion wurde ein Teil des Wassers abgelassen, um einen Überdruck in der Säule zu vermeiden. Die Injektion erfolgte unterhalb des Wasserspiegels. Die Probenmenge betrug bei den Acrylatgelen 1 l und bei den Polyurethanen 0,6 l. Die Injektionen wurden von Vertretern der Hersteller durchgeführt. Die Zementsuspensionen wurden im Hygieneinstitut Gelsenkirchen gemischt und händisch in die Säule eingebaut. Hierzu wurde der Sand nach dem Spülen z. T. entnommen und 2 l Suspension in die Mitte der Säule eingebracht. Anschließend wurde der Sand wieder aufgefüllt.

Da die Fließgeschwindigkeit im Versuch wesentlich höher ist als in der praktischen Anwendung, wird die Wasserzufuhr üblicherweise erst nach einer gewissen Reaktionszeit der Injektionsmittel gestartet. Sonst kann es passieren, dass Einzelkomponenten ausgewaschen werden. Bei den Acrylatgelen und Polyurethanen liegt diese Reaktionszeit im Bereich von wenigen Minuten. Die Zementsuspensionen benötigen wesentlich länger für die Aushärtung. Hier wurde der Versuch direkt im Anschluss an das Einbringen des Probenmaterials gestartet. Zum Vergleich wurde die Zementsuspension ZS2 zusätzlich nach einer Aushärtezeit von 24 Stunden geprüft.

Die Fließgeschwindigkeit während des Versuchs betrug 4 l/h, es wurde Leitungswasser verwendet. Das Eluat wurde in Fraktionen von 2 l gesammelt und innerhalb der ersten 8 Stunden kontinuierlich beprobt. Dadurch ergaben sich 16 Proben, an denen die elektrische Leitfähigkeit, der pH-Wert und der TOC gemessen wurden. Nach der Bestimmung dieser Parameter wurden jeweils zwei Proben vereint, so dass für jede Stunde Versuchslaufzeit eine repräsentative Probe vorlag, an der die weiteren Untersuchungen durchgeführt wurden. Im weiteren Verlauf des Versuchs wurde täglich – außer an den Wochenenden – eine Probe genommen. Bei diesen Beprobungen wurde das Wasser ebenfalls kontinuierlich gesammelt. Die Analysen der Wasserproben geben daher nicht die Konzentration zum Probenahmezeitpunkt, sondern die mittlere Konzentration im Auslaugintervall an. Mit der Wassermenge kann somit die Gesamtfreisetzung berechnet werden. Bis zur Analyse wurden die Proben kühl und im Dunkeln gelagert. Auch dieser Versuch wird in Doppelbestimmung durchgeführt. Tabelle 2 gibt die untersuchten Parameter wieder. Der Versuch wurde am Hygiene-Institut Gelsenkirchen durchgeführt.

Tabelle 2: Parameterumfang bei der Elution im inversen Säulenversuch

Injektionsstoff	Ausgewählte, baustoffspezifische Parameter	Allgemeine Parameter
1	2	3
Acrylate	Σ PAK, Σ LHKW, Σ KW	TOC, pH-Wert, Leitfähigkeit, Na, K, SO_4^{2-} , Cl^-
Polyurethane	Aromatische Amine ¹⁾ , Phenole, Σ LHKW, Σ KW	
Zement-suspensionen	Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Mo, Ni, Se, Tl, V	pH-Wert, Leitfähigkeit, Na, K, SO_4^{2-} , Cl^-

1) auf Vorschlag des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) mit aufgenommenen Erläuterungen s. Tabelle 1

4 ANALYSEVERFAHREN

Die angewendeten Analyseverfahren für die Eluatanalysen sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Alle organischen Verbindungen und die Spurenelemente wurden am Hygiene-Institut Gelsenkirchen analysiert. TOC, Alkalien, Chlorid und Sulfat wurden sowohl am ibac (Standtest) als auch am Hygiene-Institut (Säulenversuch) analysiert.

Tabelle 3: Analyseverfahren

Parameter	Messmethode	Gerät	Norm
1	2	3	
TOC	IR-Spektroskopie nach katalytischer Zersetzung	Shimadzu TOC-Vcph	DIN EN 1484
Σ PAK (ohne Naphthalin)	HPLC-Fluoreszenzdetektor	Waters HPLC Separations Modul 2695 + Fluoreszenz-Detektor 3475	DIN 38407 F18
Naphthalin	GC-MSD mit Headspace oder P&T	Agilent 6890 N mit massenselektivem Detektor 5973 N	DIN 38407 F 9
LHKW	GC-ECD mit Headspace	Agilent 7890 A	DIN EN ISO 10301
Kohlenwasserstoffe (C ₁₀ bis C ₄₀)	GC-FID	Thermo Finnigan, Trace GC/FID	DIN EN ISO 9337-2
Aromatische Amine	photometrisch nach SPE	Lambda 2, Perkin-Elmer	-
Phenolindex	photometrisch	Lambda 2, Perkin-Elmer	DIN 38409 H 16
BTEX-Aromaten	GC-MSD mit Headspace oder P&T	Agilent 6890 N mit massenselektivem Detektor 5973 N	DIN 38407 F 9
Styrol	GC-MSD mit Headspace oder P&T	Agilent 6890 N mit massenselektivem Detektor 5973 N	-
Na, K	Hygiene-Institut	Skalar Segment Flow Analysensystem; Flammenphotometer Sterwood 420	-
	ibac	ELEX 6361	analog zu DIN EN 196-2
Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Hygiene-Institut	Skalar Segment Flow Analysensystem	DIN EN ISO 15682
	ibac	DX 100	DIN EN ISO 10304-1
Spurenelemente (Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Mo, Ni, Se, Ti, V)	ICP-OES	Optima 5300 DV, Perkin Elmer	DIN EN ISO 11885

Bei der Feststoffanalytik der Zemente wurden der Sulfatgehalt im Kohlenstoff-Schwefel-Analysator (CSA 2003) und die Alkalien im Flammenphotometer (Elex 6361) gemessen. Die sonstigen Hauptbestandteile wurden mit der Röntgenfluoreszenzanalyse (DIN 51418-1: 1996-09) bestimmt. Die Analyse der Spurenelemente erfolgte nach Königswasser-aufschluss (DIN EN ISO 15587-1:2002-07) mit einem Massenspektrometer mit induktiv gekoppelten Hochfrequenzplasma (ICP-MS).

5 VERSUCHSAUSWERTUNG

5.1 Allgemeines

In den Auslaugversuchen werden Konzentrationen gemessen. Diese Werte hängen jedoch von den Randbedingungen bei der Versuchsdurchführung ab und sind nicht direkt auf reale Einbaubedingungen zu übertragen. Um beurteilen zu können, welche Umweltbeeinträchtigungen durch die Freisetzung von umweltgefährdenden Stoffen aus Abdichtungs- und Injektionsstoffen auftreten können, müssen Modellrechnungen durchgeführt werden. Für solche Transportmodellierungen werden FE-Modelle angewendet. Mit diesen Transportmodellen können die Konzentrationen im Grundwasser, das mit einem Baustoff in Kontakt steht, berechnet werden. Diese Konzentrationen können dann mit geltenden Grenzwerten (Geringfügigkeitsschwellen) verglichen werden. Da kurzzeitige und kleinräumige Überschreitungen wasserrechtlich nicht relevant sind, werden die Konzentrationen sowohl zeitlich als auch räumlich gemittelt. Diese Fragestellungen sollen im Forschungsvorhaben /Bra09/ bearbeitet werden. In diesem Forschungsvorhaben sollten die notwendigen Daten für die Modellierungen bereitgestellt werden. Als Eingangsparameter wird bei kurzzeitigen Einträgen die freigesetzte Fracht und bei längerfristigen Auslaugprozessen die zeitliche Entwicklung der Auslaugrate benötigt.

5.2 Auswertung des Standtests

5.2.1 Freisetzung

Anhand der Konzentrationen in den sechs Elutionsschritten kann die kumulative Freisetzung (Fracht) nach Gleichung (1) berechnet werden. Die freigesetzte Stoffmenge wird auf die Oberfläche der Abdichtungsmaterialien bezogen.

$$E_n = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \frac{V}{O} \quad (1)$$

E_n : kumulative Freisetzung am Ende von Elutionsschritt n in mg/m^2 ($E_{\text{ges}} = E_{n=6}$)

E_i : Freisetzung im Elutionsschritt i in mg/m^2

c_i : Konzentration im Eluat i in mg/l

V/O: Volumen des Eluenten bezogen auf die Oberfläche der Probe, hier $V/O = 10,6$ bis $12,2 \text{ l}/\text{m}^2$

5.2.2 Auslaugrate

Bei länger andauernden Auslaugprozessen wird im Transportmodell der zeitliche Verlauf der Auslaugrate als Eingabeparameter benötigt. Die Auslaugrate in jedem einzelnen Elutionsschritt kann nach Gleichung (2) berechnet werden.

$$J_i = \frac{E_i}{t_i} \quad (2)$$

J_i : Auslaugrate in Elutionsschritt i in $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

E_i : Freisetzung im Elutionsschritt i in mg/m^2 (s. Gl.(1))

t_i : Länge des Elutionsschritts i in d

Um den zeitlichen Verlauf der Auslaugrate über die Versuchslaufzeit hinaus zu prognostizieren, werden die sechs Einzelwerte in doppeltlogarithmischem Maßstab über der Zeit aufgetragen. Als Zeitpunkt wird die Mitte des Auslaugintervalls gewählt. In dieser Darstellung ergibt sich i. d. R. eine Gerade. Die Steigung der Geraden lässt gewisse Rückschlüsse auf den maßgeblichen Freisetzungsprozess zu. Beispielsweise ergibt sich bei einer Desorption von oberflächlich gebundenen Stoffen („wash-off-Effekt“) eine Steigung von -1. Bei kontinuierlicher Freisetzung, z. B. durch Auflösungsprozesse, ist die Steigung 0. Bei diffusionsgesteuerten Prozessen ist die Steigung -0,5 (vgl. /Hoh03/).

5.3 Auswertung des inversen Säulenversuchs

Im inversen Säulenversuchen erfolgte die Freisetzung in einem sehr kurzen Zeitraum, so dass im Modell mit einem einmaligen Eintrag gerechnet werden kann. Im Gegensatz zu den Abdichtungsstoffen, die im Standtest geprüft wurden, ist bei den Injektionsstoffen die Oberfläche des Baustoffs nicht klar definiert; die Injektionskörper weisen häufig unregelmäßige Formen auf. Daher wird die Freisetzung hier auf die Menge des Injektionsstoffs bezogen (s. Gleichung (3)). Bei der Modellierung muss dann eine Annahme getroffen werden, wie viel Injektionsstoff zur Abdichtung erforderlich ist.

$$E_n = \sum_{i=1}^n \left[(c_i - c_0) \cdot \frac{V_i}{m} \right] \quad (3)$$

- E_n : Gesamtfreisetzung nach Eluat n in mg/kg
 c_i : Konzentration im Eluat i in mg/l
 c_0 : mittlerer Blindwert in mg/l (s. Abschnitt 6.2.1)
 V_i : Wassermenge des Eluats i in l
 m : Menge des Injektionsguts in kg

Die mittleren Blindwerte sind in Abschnitt 6.2.1 angegeben. Liegen die Konzentrationen c_i durchgehend im Streubereich der Blindwerte, so ist die Summation nach Gleichung (3) abzurechnen.

6 DARSTELLUNG UND INTERPRETATION DER VERSUCHS- ERGEBNISSE

6.1 Standtest

6.1.1 Bitumen

6.1.1.1 Ergebnisse

Die Beschichtung B2 wurde als erstes untersucht, dabei wurden versehentlich keine TOC-Werte ermittelt. Zusätzlich ergab sich ein Problem bei der PAK-Analytik: Es wurde eine Überlagerung mehrerer Peaks festgestellt, so dass keine Auswertung vorgenommen werden konnte. Es wurde vermutet, dass die Überlagerung durch Naphthalin hervorgerufen wurde. Daher wurde der Versuch wiederholt (B2c) und der TOC-Gehalt und die Naphthalinkonzentration bestimmt. Leider bestätigte sich die Vermutung nicht; Naphthalin konnte in den Eluaten von B2c nicht gefunden werden. Die Substanz, die die Überlagerung verursacht hat, konnte somit nicht identifiziert werden. Dennoch wurde bei allen folgenden Versuchen Naphthalin zur Sicherheit direkt mit bestimmt. Die Ergebnisse zur PAK-Auslaugung von B2 konnten aus diesem Grund nicht verwertet werden

Bei der Bitumenbeschichtung B3 trat ab dem vierten Eluat eine Blasenbildung auf, die auf eine Hinterwanderung der Beschichtung durch den Eluenten zurückzuführen war. Dadurch vergrößerte sich die Oberfläche im Kontakt mit dem Eluenten auf undefinierte Weise. Die Konzentrationen stiegen z. T. erheblich an. Dieses Problem war bereits bei einem anderen einkomponentigen Bitumen aufgetreten, das deshalb verworfen wurde. Eine nochmalige Wiederholung des Versuchs war im Rahmen dieses Projekts nicht möglich. Daher können nur die ersten drei Eluate von B3 für die Prognose der Auslaugrate herangezogen werden.

Für zukünftige Untersuchungen wird empfohlen, bei einkomponentigen Bitumen aufgeraute Glasplatten oder Edelstahlgitter als Träger zu verwenden.

Die Ergebnisse der Standtests an den Bitumendickbeschichtungen sind in den Tabellen A6 bis A9 zusammengestellt. Es ist ersichtlich, dass die Eluate der einkomponentigen Bitumenbeschichtungen B1 und B3 im neutralen Bereich (pH 6 bis 8) liegen, während sich bei den zweikomponentigen Systemen erhöhte pH-Werte (pH 10 bis maximal 11,8) ergeben. Die einkomponentigen Systeme setzen geringere Mengen an Alkalien, Chlorid und Sulfat frei. Phenole, Naphthalin und LHKW waren in den Eluaten der Bitumen generell nicht nachweisbar, KW wurden nur im Ausnahmefall gefunden. BTEX-Aromaten waren bei Bitumen B4 nachweisbar. Von besonderer Bedeutung sind die PAK, die in allen Eluaten enthalten waren und bei Bitumen in jedem Fall untersucht werden sollten.

6.1.1.2 Auswertung

Anhand der Eluatkonzentrationen wurde die Freisetzung nach Gleichung (1) berechnet (vgl. Abschnitt 5.2.1). Die Ergebnisse sind für die Parameter Natrium, Kalium, Chlorid, Sulfat, TOC und Σ PAK in den Bildern B1 bis B6 im Anhang dargestellt. Es wurde, soweit möglich, für die ein- und zweikomponentigen Systeme jeweils die gleiche Skalierung in den Bildern verwendet, bei Chlorid und Sulfat waren die Differenzen zwischen B2 und B4 jedoch zu groß. Bild B7 zeigt die Freisetzung der BTEX-Aromaten der Beschichtung B4. Bei den letzten beiden Eluaten lag die Konzentration unter der Nachweisgrenze. Hier wurde auf der sicheren Seite liegend die Nachweisgrenze als Konzentration angesetzt.

Aus den Bildern wird ersichtlich, dass sich die Bitumen in ihrem Freisetzungsverhalten erheblich unterscheiden. Gemäß Gleichung (2), Abschnitt 5.2.2, wurden für jeden Elutionschritt die Auslaugraten der nachweisbaren Stoffe bestimmt. Die Auslaugraten sind in den Bildern B8 bis B14 im Verlauf der Zeit dargestellt. Es wurde ein doppeltlogarithmischer Maßstab gewählt. Die Bilder verdeutlichen, dass die Auslaugraten der unterschiedlichen Bitumen z. T. um mehrere Größenordnungen voneinander abweichen. Die ermittelten Steigungen der Ausgleichsgeraden sind z. T. für denselben Parameter sehr unterschiedlich, häufig liegen sie jedoch im Bereich von -0,35 und -0,65, was auf diffusive Prozesse hindeutet. Bei den PAK ist der Rückgang häufig steiler, d. h. hier spielen möglicherweise Oberflächeneffekte eine Rolle, oder es tritt eine Verarmung auf. Für Bitumen B3 wurden z. T. positive Steigungen ermittelt. Dies ist auf die geringe Anzahl an Messpunkten und die Versuchsstreuungen zurückzuführen. Diese Ergebnisse können nicht verwertet werden.

Für die Modellierung wird der Verlauf der Auslaugrate über die Zeit benötigt. Da die Ergebnisse keine eindeutige Definition des maßgeblichen Freisetzungsprozesses zulassen, werden hier die individuell ermittelten Gleichungen aus den Bildern in delogarithmierter Form herangezogen. Es gilt:

$$\lg J = m \cdot \lg t + n \quad \Leftrightarrow \quad J = t^m \cdot 10^n \quad (4)$$

Tabelle 4: Mathematische Beschreibung der Auslaugraten der untersuchten umweltrelevanten Parameter und des TOC aus den Bitumenbeschichtungen (gefittete Funktionen)

Bitumenbeschichtung	Parameter	Auslaugrate
-	-	mg/(m ² d)
1	2	3
B1	Chlorid	$J = t^{-0,278} \cdot 4,385$
	Sulfat	$J = t^{-0,129} \cdot 1,560$
	TOC	$J = t^{-0,441} \cdot 16,18$
	PAK	$J = t^{-0,700} \cdot 0,00043$
B2	Chlorid	$J = t^{-0,879} \cdot 11,04$
	Sulfat	$J = t^{-0,570} \cdot 49,66$
	TOC	$J = t^{-0,606} \cdot 26,79$
	PAK	Peak nicht auswertbar
	BTEX	$J = t^{-0,758} \cdot 0,0243$
B3	Chlorid	ermittelte Gleichung nicht verwertbar
	Sulfat	$J = t^{-0,444} \cdot 0,845$
	TOC	$J = t^{-0,369} \cdot 17,30$
	PAK	$J = t^{-0,558} \cdot 0,00040$
B4	Chlorid	$J = t^{-0,521} \cdot 146,2$
	Sulfat	$J = t^{-0,633} \cdot 751,6$
	TOC	$J = t^{-0,583} \cdot 134,3$
	PAK	$J = t^{-0,854} \cdot 0,00077$

In Tabelle 4 werden die Gleichungen der umweltrelevanten Parameter und des TOC zusammengefasst. Bei der Modellierung im Rahmen von /Bra09/ können anhand der Gleichungen Datenlisten mit Stützpunkten erstellt werden, zwischen denen das Transportprogramm automatisch interpoliert (vgl. /Bra05a/). Im Rahmen der Transportberechnung ist zu überprüfen, ob die ins Modell eingetragenen Schadstofffrachten im Zeitraum von 0 bis 56 Tagen zu den Versuchsergebnissen passen. Bei zu großen Abweichungen muss ggf. ein anderer Freisetzungsverlauf gewählt werden.

6.1.2 Ungesättigte Polyesterharze

6.1.2.1 Ergebnisse

Die Eluatkonzentrationen, die in den Standtests an den ungesättigten Polyesterharzen uP1 bis uP4 ermittelt wurden, sind in den Tabellen A10 bis A13 zusammengestellt. Es ist ersichtlich, dass die Eluate insbesondere bei den späteren Prüfterminen pH-Werte im sauren Bereich aufweisen. Alkalien, Chlorid und Sulfat werden nur in vernachlässigbaren Mengen ausgelaugt. Auch LHKW und KW brauchen bei den Polyesterharzen offenbar nicht betrachtet zu werden, die Konzentrationen lagen alle unter den Nachweisgrenzen. Bei uP1 wurden in einigen Eluaten erhöhte Konzentrationen an BTEX-Aromaten gefunden, die jedoch außerhalb des Kalibrationsbereichs lagen und deshalb nicht quantifiziert werden konnten. Es wurde ein Wiederholversuch durchgeführt (uP1c), bei dem jedoch keine BTEX-Aromaten nachgewiesen werden konnten. Bei den Harzen uP2 bis uP4 wurden durchgehend hohe Konzentrationen an Ethylbenzol und Xylol gefunden. Im Unterschied zu uP1 begann bei diesen Harzen die Elution bereits eine Woche nach der Herstellung. Die BTEX-Aromaten gehören zu den leicht flüchtigen Verbindungen. Die geringeren Konzentrationen bei uP1 und insbesondere beim Wiederholversuch uP1c könnten daher auf eine Ausgasung vor Versuchsbeginn zurückzuführen sein. Neben den BTEX-Aromaten wurde Styrol z. T. in erheblichen Konzentrationen festgestellt. Auch PAK waren in den Eluaten nachweisbar, allerdings fällt hier die Konzentration im Verlauf des Versuchs deutlich ab. Die TOC-Werte wurden nach DIN EN 1484:1997-08 ermittelt. Da bei diesem Verfahren flüchtige Verbindungen ausgetrieben werden können und der Anteil an flüchtigen Substanzen in den Eluaten der Polyesterharze sehr hoch war, können die Ergebnisse nur als Anhaltspunkte für den Gehalt an schwerflüchtigen Verbindungen im Eluat dienen. Aus diesem Grund wird der TOC im folgenden Abschnitt nicht berücksichtigt.

6.1.2.2 Auswertung

Die Freisetzungsverläufe von Styrol, Ethylbenzol, Toluol (nur uP2), m+p- und o-Xylol sowie PAK sind in den Bildern B15 bis B20 dargestellt. Bei Benzol lagen nur wenige Eluatkonzentrationen über der Nachweisgrenze, daher wird kein Freisetzungsverlauf dargestellt. Bei den Harzen uP1 und uP2 lagen die PAK-Konzentrationen in einzelnen Eluaten zwischenzeitig unter der Nachweisgrenze. Hier wurde auf der sicheren Seite liegend die Nachweisgrenze angesetzt. In den letzten Eluaten waren bei allen Harzen keine PAK mehr nachweisbar, daher wurde die Berechnung der Freisetzung abgebrochen, sobald die Eluatkonzentrationen durchgehend unter der Nachweisgrenze lagen.

Die Auslaugraten in jedem Einzelintervall wurden wie in Abschnitt 5.2.2, Gleichung (2), beschrieben berechnet. Die Bilder B21 bis B26 zeigen die zeitliche Entwicklung der Auslaugraten im doppeltlogarithmischen Maßstab. Es ist ersichtlich, dass die Steigungen meist deutlich steiler als -0,5 sind. D. h. Styrol und die BTEX-Aromaten werden verstärkt zu Beginn ausgelaugt. Vermutlich tritt hier im Verlauf der Zeit eine Verarmung auf.

Für Styrol wurde in /LAW04/ keine Geringfügigkeitsschwelle definiert. Der Parameter wurde in das Versuchsprogramm aufgenommen, da bekannt war, dass er aus Polyesterharzen freigesetzt wird. Im Rahmen der Modellierungen im Forschungsprojekt /Bra09/ wird Styrol berücksichtigt, auch wenn ein verbindlicher Vergleichswert fehlt, da die Umweltrelevanz gegeben ist. Wie bei den Bitumen werden für die Auslaugraten die experimentell ermittelten Verläufe herangezogen (vgl. Abschnitt 6.1.1.2). Die Gleichungen sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Mathematische Beschreibung der Auslaugraten der untersuchten umweltrelevanten Parameter aus den ungesättigten Polyesterharzen (gefittete Funktionen)

Ungesättigtes Polyesterharz	Parameter	Auslaugrate
-	-	mg/(m ² d)
1	2	3
uP1	Styrol	$J = t^{-0,608} \cdot 17,30$
	PAK	$J = t^{-0,740} \cdot 0,000156$
uP2	Styrol	$J = t^{-0,857} \cdot 174,6$
	Ethylbenzol	$J = t^{-0,791} \cdot 4,198$
	Toluol	$J = t^{-0,881} \cdot 0,0548$
	m+p-Xylol	$J = t^{-0,796} \cdot 16,79$
	o-Xylol	$J = t^{-0,810} \cdot 1,742$
	PAK	$J = t^{-0,588} \cdot 0,000124$
uP3	Styrol	$J = t^{-1,038} \cdot 36,56$
	Ethylbenzol	$J = t^{-0,831} \cdot 0,650$
	m+p-Xylol	$J = t^{-0,841} \cdot 2,761$
	o-Xylol	$J = t^{-0,844} \cdot 0,255$
	PAK	$J = t^{-0,647} \cdot 0,000129$
uP4	Styrol	$J = t^{-1,260} \cdot 57,02$
	Ethylbenzol	$J = t^{-1,052} \cdot 2,729$
	m+p-Xylol	$J = t^{-1,077} \cdot 12,76$
	o-Xylol	$J = t^{-1,113} \cdot 1,714$
	PAK	$J = t^{-0,765} \cdot 0,000118$

6.2 Ergebnisse des inversen Säulenversuchs

6.2.1 Blindwerte

Da der inverse Säulenversuch mit Leitungswasser durchgeführt wird, sind die Hintergrundkonzentrationen (Blindwerte) bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Es wurden bei jedem Versuch die elektrische Leitfähigkeit, der pH-Wert sowie die Konzentrationen an Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat im Leitungswasser bzw. im Blind-Eluat aus der gespülten Säule untersucht. Tabelle 6 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 6: Blindwerte – allgemeine Parameter, Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat

Parameter	Einheit	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert
1	2	3	4	5
pH-Wert	-	7,1	7,9	7,5
elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	422	520	490
TOC	mg/l	1,1	2,8	2,0
Natrium		19,0	28,1	23,1
Kalium		2,3	5,4	4,0
Chlorid		28,0	33,0	30,5
Sulfat		46,0	57,0 ¹⁾	49,9

1) In einem Fall wurden 86 mg/l ermittelt; dieser Wert wurde als Ausreißer eingestuft und aussortiert.

Bei den Versuchen zur Auslaugung der Acrylatgele und Polyurethane wurden die organischen Parameter gemäß Tabelle 2 untersucht, hier waren jedoch keine Hintergrundkonzentrationen nachweisbar. Daher wurden die Blindwerte zu Null angesetzt. Dies traf auch für die meisten Spurenelemente zu, die bei den Säulenversuchen an den Zementsuspension untersucht wurden (s. Tabelle 2). Lediglich für die Parameter Barium und Kupfer wurden Blindwerte ermittelt, die in Tabelle 7 ausgewertet wurden.

Tabelle 7: Blindwerte – nachweisbare Spurenelemente

Parameter	Einheit	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert
1	2	3	4	5
Barium	µg/l	23,0	37,0	29,0
Kupfer		< 5,0	27,0	12,5

Die unterschiedlichen Nachweisgrenzen für die einzelnen Parameter können aus den Ergebnistabellen im Anhang entnommen werden.

Bei der Auswertung der Versuche werden die Spannweiten der Blindwerte in den Bildern mit dargestellt, um die Ergebnisse korrekt interpretieren zu können.

6.2.2 Acrylatgele

6.2.2.1 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Säulenversuche an den vier Acrylatgelen sind in Tabelle A14 bis A21 angegeben. Berücksichtigt sind die Parameter pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, TOC sowie die Konzentrationen an Natrium, Kalium, Chlorid und Sulfat. Aus den Tabellen A14, A16, A18 und A20 ist ersichtlich, dass die Acrylatgele den pH-Wert nur wenig erhöhen. Es wird maximal ein pH-Wert von 8,6 erreicht. Die Leitfähigkeit steigt bei den Acrylatgelen Ac1, Ac2 und Ac4 kurzfristig an (s. auch Bild B27 bis B30). Die Versuchsstreuungen der Parallelversuche sind sehr klein, d. h. der Säulenversuch ist gut reproduzierbar. Die Konzentrationserhöhungen der Alkalien waren bei den Acrylatgelen nur marginal, daher wird auf eine graphische Darstellung verzichtet. Auch Chloride werden aus Acrylatgelen offenbar nur in sehr geringen Mengen freigesetzt. Bei Sulfat zeigten Ac1 und Ac2 signifikante Konzentrationserhöhungen (s. Bild B31 bis B34).

Es wurde z. T. ein erheblicher Anstieg des TOC-Gehalts im Eluat gefunden, wie die Bilder B35 bis B38 zeigen. Hier wurde der höchste Anstieg beim Acrylatgel Ac3 gefunden. An organischen Einzelparametern wurden PAK, LHKW und KW untersucht. Für die Summe der PAK (außer Naphthalin) lag die Nachweisgrenze bei 0,01 µg/l. Naphthalin wurde separat mit einer Nachweisgrenze von 1 µg/l analysiert. Bei den LHKW betrug die Nachweisgrenze 10 µg/l und bei den KW 100 µg/l. Die Konzentrationen dieser Parameter lagen bei allen Acrylatgelen unter den Nachweisgrenzen. Die Einzelsubstanzen wurden ausgewählt wurden, weil hier eine Geringfügigkeitsschwelle definiert wurde (s. /LAW04/), sie sind jedoch für die Acrylatgele nicht relevant. Höchst wahrscheinlich ist der TOC auf Mono- und Oligomere des Acrylats, sowie auf Triethanolamin zurückzuführen.

6.2.2.2 Auswertung

In Bild B39 ist die Sulfatfreisetzung innerhalb der ersten vier Tage für die Acrylatgele Ac1 und Ac2 dargestellt. Die Berechnung erfolgte nach Gleichung (3). Bei den späteren Eluaten wurden z. T. Konzentrationen unterhalb des mittleren Blindwerts gefunden, d. h. es tritt keine signifikante Freisetzung mehr auf. Bild B40 zeigt die TOC-Freisetzungen der Acry-

latgele. Es wurde hier ein Zeitraum von 8 Tagen gewählt. Nach dieser Zeit tritt keine signifikante Konzentrationserhöhung im Vergleich zum Blindwert mehr auf. In der Tabelle 8 sind die ermittelten Gesamtfreisetzungen zusammengefasst. Bei der Modellierung wird hier ein einmaliger Eintrag vorgenommen.

Tabelle 8: Gesamtfreisetzungen im inversen Säulenversuch an den Acrylatgelen (Mittelwerte)

Acrylatgel	Parameter	Gesamtfreisetzung
-	-	mg/kg
1	2	3
Ac1	TOC	2993
	Sulfat	1032
Ac2	TOC	3261
	Sulfat	1137
Ac3	TOC	11279
Ac4	TOC	7065

6.2.3 Polyurthane

6.2.3.1 Ergebnisse

Die Tabellen A22 bis A33 geben die Versuchsergebnisse der inversen Säulenversuche an den Polyurethanen wieder. Aus den Tabellen A22, A25, A28 und A31 geht hervor, dass der pH-Wert des Eluats durch die Polyurethane nur wenig beeinflusst wird. Es ergeben sich Werte um pH 8. Die Leitfähigkeit wird kurzfristig leicht erhöht, wie die Bilder B41 bis B44 verdeutlichen. Wie bei den Acrylatgelen werden zu Versuchsbeginn leichte Anstiege in den Alkali- und Chloridkonzentrationen gefunden, die ausgelaugten Mengen sind jedoch klein, so dass auf eine graphische Darstellung verzichtet wird. Sulfat wird nicht freigesetzt, die Konzentrationen liegen im Streubereich der Blindwerte.

Die TOC-Konzentrationen sind in den Bildern B45 bis B48 dargestellt. Wie erwartet sind die Konzentrationen deutlich geringer als bei den Acrylatgelen. Im Unterschied zu den sonstigen Ergebnissen der Säulenversuche wird bei PUR4 über einen längeren Zeitraum eine signifikante TOC-Erhöhung festgestellt. Zum Ende des Versuchs sind die Werte noch nicht auf Blindwertniveau abgefallen. Die untersuchten organischen Einzelsubstanzen lagen fast durchgehend unter der Nachweisgrenze (s. Tabellen A24, A27, A29 und A33). Lediglich bei den aromatischen Aminen wurde eine Konzentrationserhöhung für die Poly-

urethane PUR1 und PUR2 gefunden. Die Verläufe sind in den Bildern B49 und B50 dargestellt. Anstelle der Mittelwertkurven wurden Ausgleichskurven bestimmt und eine Annahme für den Freisetzungsverlauf nach Unterschreitung der Nachweisgrenze getroffen.

6.2.3.2 Auswertung

Bei den Polyurethanen wurde die TOC-Freisetzung und für PUR1 und PUR2 die Freisetzung der aromatischen Amine berechnet. In Tabelle 9 sind die Freisetzungen von PUR1, PUR2 und PUR3 dargestellt. PUR4 wird gesondert betrachtet, da sich der Freisetzungsprozess hier über einen längeren Zeitraum erstreckt.

Tabelle 9: Gesamtfreisetzungen im inversen Säulenversuch an den Polyurethanen (Mittelwerte)

Polyurethan	Parameter	Gesamtfreisetzung
-	-	mg/kg
1	2	3
PUR1	TOC	595
	aromatische Amine	6,217
PUR2	TOC	362
	aromatische Amine	3,351
PUR3	TOC	1381

Der Freisetzungsverlauf für PUR4 ist in Bild B51 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Freisetzung innerhalb der ersten 8 Tage relativ kontinuierlich ansteigt und dann abknickt. Bei der Modellierung wird dieser Freisetzungsverlauf durch zwei Geraden angenähert, die in Bild B51 mit dargestellt sind. Die Auslaugrate entspricht jeweils der Steigung der Geraden. D. h. bei der Modellierung wird für den Zeitraum $t = 0$ bis $t = 8$ d eine Auslaugrate von $J_1 = 3127$ mg/(kg·d) angesetzt und für $t > 8$ d bis $t = 16$ d eine Auslaugrate von $J_2 = 366$ mg/(kg·d).

6.2.4 Zementsuspensionen

6.2.4.1 Ergebnisse

Die gemessenen Eluatkonzentrationen der vier Zementsuspensionen sind in Tabelle A34 bis A46 zusammengestellt. Die Tabellen A47 bis A49 zeigen die Ergebnisse für die Zementsuspension ZS2 bei späterem Versuchsstart (24 Stunden Aushärtezeit).

Die Bilder B52 bis B56 zeigen den zeitlichen Verlauf des pH-Werts. Es ist ersichtlich, dass kurzfristig hohe pH-Werte von bis zu 11,8 erreicht werden. Innerhalb eines Tages fällt der pH-Wert jedoch auf < 9 ab und bleibt i. d. R. bis zum Versuchsende zwischen pH 8 und 9. Die Suspensionen ZS1 und ZS2, die sich nur im w/z-Wert unterscheiden, liefern sehr ähnliche pH-Werte. Bei einer Aushärtezeit von 24 Stunden (Bild B54) fällt der maximale pH-Wert nur unwesentlich geringer aus, der weitere Verlauf entspricht den Ergebnissen bei sofortigem Versuchstart. Mit der Suspension ZS3 werden geringere pH-Werte erreicht und der pH-Wert fällt auf ein niedrigeres Niveau ab. Dies kann auf die Zementzusammensetzung zurückzuführen sein – nach Tabelle A5 enthält dieser Zement nur 30,6 M.-% Portlandzementklinker. Die hohen pH-Werte gehen mit einem Anstieg der Leitfähigkeit einher (s. Bilder B57 bis B61).

Die Konzentrationen der Alkalien sind in den Bildern B62 bis B71 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Natriumkonzentrationen deutlich kleiner als die Kaliumkonzentrationen sind. Bei Natrium liegen die Konzentrationen häufig im Bereich der Blindwerte, die eine relativ große Streubreite aufweisen. Daher ist eine genaue Bilanzierung von Natrium nicht möglich. Die Aushärtezeit von 24 Stunden bewirkt bei Kalium einen deutlichen Rückgang der Konzentrationen (s. Bild B69 im Vergleich zu Bild B68).

Bei den Chloridkonzentrationen (s. Bilder B72 bis B76) wurde für ZS1 und ZS2 ein Anstieg der Konzentrationen nach über 7 Tagen Elution festgestellt. Dieser Anstieg war jedoch auf erhöhte Hintergrundkonzentrationen zurückzuführen und ist daher nicht relevant. Vergleicht man die Bilder B73 und B74, so wird deutlich, dass die Aushärtezeit auch bei Chlorid eine Verringerung der Konzentrationen zur Folge hat. Bei der Suspension ZS4 wurde nur ein minimaler Anstieg der Chloridkonzentration gefunden. Der Zement für ZS4 weist den geringsten Chloridgehalt auf.

Die Sulfatkonzentrationen sind in den Bildern B77 bis B81 dargestellt. Die Aushärtezeit hat hier besonderen Einfluss auf Auslaugung, wie aus Bild B79 im Vergleich zu Bild B78 ersichtlich wird.

Die Zementsuspensionen ZS1, ZS2 und insbesondere ZS4 setzen organische Verbindungen frei (s. Bilder B82 bis B86). Wahrscheinlich enthalten die Suspensionen organische Zusätze, ggf. werden auch Mahlhilfen ausgelaugt.

Die Bariumkonzentrationen sind in den Bildern B87 bis B91 dargestellt. Häufig zeigt sich ein Maximum unmittelbar nach Versuchsbeginn, dann fällt die Konzentration ab und steigt nach einigen Stunden wieder an. Ein Ansteigen der Bariumfreisetzung nach dem Erstarren

wurde auch in /Bra05b/ bei der Untersuchung von Frischbeton festgestellt. Eine Quantifizierung der Bariumfreisetzung ist aufgrund der hohen und relativ stark streuenden Hintergrundwerte nicht möglich. Häufig tritt insbesondere zum Ende des Versuchs eine Adsorption von Barium auf. Da die Konzentrationen gering sind, ist der Parameter offenbar nicht umweltrelevant.

Neben Barium sind im Anhang die Konzentrationen von Chrom, Molybdän und Vanadium graphisch dargestellt (s. Bilder B92 bis B103). Bei diesen Parametern lagen die Konzentrationen häufig schon nach wenigen Eluatn unter der Nachweisgrenze. Es wurde eine Annahme für den Verlauf des Konzentrationsrückgangs in diesem Bereich getroffen. Der angenommene Verlauf ist in den Bildern dargestellt. Auffallend ist, dass bei ZS4 hohe Chrom- und Molybdänkonzentrationen gefunden wurden. Der Zement von ZS4 weist bei beiden Parametern relativ hohe Gehalte auf. Bei ZS1, ZS2 und ZS3 wurde für Vanadium ein etwas länger andauernder Konzentrationsanstieg festgestellt (s. Bilder B99, B100 und B102). Nach 8 bis 9 Tagen lag die Konzentration unter der Nachweisgrenze. Signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen für ZS1 und ZS2 gibt es nicht, d. h. der Wasserzementwert hat auf die Auslaugung keinen nachweisbaren Einfluss. Die Vorlagerungszeit dagegen hat einen erheblichen Einfluss. Bei Chrom und Molybdän waren nach einer Aushärtezeit von 24 Stunden keine Konzentrationserhöhungen mehr nachweisbar, bei Vanadium war der Konzentrationsanstieg erheblich geringer und kurzfristiger. Neben Chrom, Molybdän und Vanadium wurde in einzelnen Eluatn Kupfer nachgewiesen, die Konzentrationen lagen jedoch durchgehend im Bereich der Blindwerte. Im Versuchsverlauf fallen die Kupferkonzentrationen bei allen Zementinjektionen unter den Blindwert ab. Hier scheinen daher Adsorptionseffekte vorzuherrschen.

6.2.4.2 Auswertung

Anhand der Eluatkonzentrationen wurde die Gesamtfreisetzung nach Gleichung (3) für die Parameter Chlorid, Sulfat, TOC, Chrom, Molybdän und Vanadium berechnet. Wie in Abschnitt 6.2.4.1 beschrieben, wurde für den Konzentrationsrückgang unter der Nachweisgrenze eine Annahme getroffen, diese wurde bei der Berechnung der Freisetzung berücksichtigt. Für die Modellierung wird bei allen Parametern von einem einmaligen Eintrag ausgegangen.

Tabelle 9: Gesamtfreisetzungen im inversen Säulenversuch an den Zementinjektionen (Mittelwerte)

Zementsuspension	Parameter	Gesamtfreisetzung
-	-	mg/kg
1	2	3
ZS1	Chlorid	131,8
	Sulfat	752,5
	TOC	17,1
	Chrom	0,034
	Molybdän	0,066
	Vanadium	0,812
ZS2	Chlorid	127,9
	Sulfat	470,9
	TOC	13,7
	Chrom	0,044
	Molybdän	0,047
	Vanadium	0,827
ZS2 mit 24 h Aushärtezeit	Chlorid	38,9
	Sulfat	137,6
	TOC	10,7
	Vanadium	0,0056
ZS3	Chlorid	68,9
	Sulfat	255,6
	TOC	3,1
	Chrom	0,062
	Vanadium	0,218
ZS4	Chlorid	6,944
	Sulfat	500,3
	TOC	172,5
	Chrom	0,148
	Molybdän	0,197
	Vanadium	0,010

7 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens war es, Ergebnisse zum Auslaugverhalten von Injektions- und Abdichtungsstoffen zu gewinnen. Mit diesen Daten können in einem anderen Forschungsvorhaben (/Bra09/) Modellrechnungen mit einem numerischen Transportprogramm durchgeführt werden. Bei den Transportberechnungen werden unterschied-

liche Anwendungsfälle, z. B. eine Bauwerksabdichtung gegen drückendes Grundwasser, modelliert und die Konzentrationen im Grundwasser berechnet. Anhand der Modellrechnungen kann die Umweltverträglichkeit der Baustoffe beurteilt werden. Ziel ist es, ein Bewertungskonzept für die Umweltverträglichkeit von Abdichtungs- und Injektionsstoffen zu erarbeiten und Grenzwerte für Auslaugversuche zu definieren, mit denen sichergestellt ist, dass keine schädliche Grundwasserverunreinigung auftritt. Dieses Konzept kann bei der Erteilung von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen verwendet werden.

Es wurden in diesem Projekt jeweils vier Bitumendickbeschichtungen, ungesättigte Polyesterharze, Acrylatgele, Polyurethane und Zementsuspensionen untersucht. Betrachtet wurden die in Tabelle 10 zusammengestellten Parameter.

Tabelle 10: Parameterumfang

Versuch	Baustoff	Ausgewählte, baustoffspezifische Parameter	Allgemeine Parameter
1	2	3	4
Standtest	Bitumen	Σ PAK, Σ LHKW, Σ KW, BTEX-Aromaten, Phenole	TOC, pH-Wert, Leitfähigkeit, Na, K, SO_4^{2-} , Cl^-
	Ungesättigte Polyesterharze	Σ PAK, Σ LHKW, Σ KW BTEX-Aromaten, Styrol	
Inverser Säulenversuch	Acrylate	Σ PAK, Σ LHKW, Σ KW	TOC, pH-Wert, Leitfähigkeit, Na, K, SO_4^{2-} , Cl^-
	Polyurethane	Aromatische Amine, Phenole, Σ LHKW, Σ KW	
	Zement-suspensionen	Sb, As, Pb, Cd, Cr, Co, Cu, Mo, Ni, Se, Ti, V	pH-Wert, Leitfähigkeit, Na, K, SO_4^{2-} , Cl^-

Σ PAK: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (Summe der 15 EPA-PAK)

Σ LHKW: leicht flüchtige Halogenkohlenwasserstoffe (Summe der halogenierten C₁- und C₂-Kohlenwasserstoffe)

Σ KW: Kohlenwasserstoffe (Summe der C₁₀- bis C₄₀-Kohlenwasserstoffe)

BTEX: Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol

Die Bitumenbeschichtungen und die Polyesterharze wurden in einem Standtest in Anlehnung an den Langzeitstandtest für Beton /DAf05/ geprüft, wobei das Verhältnis vom Volumen des Eluenten zur Oberfläche des Prüfkörpers auf ca. 12 l/m² reduziert wurde. Das Auslagverhalten der Acrylatgele, Polyurethane und Zementsuspensionen wurde im inversen Säulenversuch nach Schössner geprüft. In diesem Versuch werden die Injektionsmaterialien in eine sandgefüllte Säule eingebracht, die von unten nach oben von Lei-

tungswasser durchströmt wird. In diesem Projekt wurden die Eluate als Sammelproben gewonnen, so dass die gemessenen Konzentrationen Mittelwerte des jeweiligen Beprobungszeitraums sind. Bei allen Versuchen wurden Doppelbestimmungen durchgeführt.

Im Standtest wurde die Konzentration der angegebenen Stoffe in sechs Eluaten über einen Zeitraum von 56 Tagen bestimmt. Anhand der Eluatkonzentrationen wurden die Freisetzungen bezogen auf die Baustoffoberfläche (in mg/m^2) und die Auslaugraten (in $\text{mg}/(\text{m}^2\text{d})$) berechnet. Als Eingabeparameter für die Modellierung der Grundwasserkonzentrationen wird die Auslaugrate im Verlauf der Zeit benötigt. Die Einzelwerte der Auslaugraten wurden daher über der Zeit aufgetragen, wobei ein doppeltlogarithmischer Maßstab gewählt wurde. In dieser Darstellung lassen sich die Messwerte durch Ausgleichsgeraden annähern. Die Steigung der Geraden lässt gewisse Rückschlüsse auf den maßgeblichen Freisetzungsprozess zu. Beispielsweise ergibt sich bei einer Desorption von oberflächlich gebundenen Stoffen („wash-off-Effekt“) eine Steigung von -1. Bei kontinuierlicher Freisetzung, z. B. durch Auflösungsprozesse, ist die Steigung 0. Bei diffusionsgesteuerten Prozessen ist die Steigung -0,5 (vgl. /Hoh03/). Bei den Bitumen wurden für Chlorid, Sulfat und TOC häufig Steigungen im Bereich von -0,35 und -0,65 gefunden, was auf diffusive Prozesse hindeutet. Bei den PAK ist der Rückgang steiler, d. h. hier spielen möglicherweise Oberflächeneffekte eine Rolle, oder es tritt eine Verarmung auf. Bei den ungesättigten Polyesterharzen waren Styrol, BTEX-Aromaten und PAK nachweisbar. Der Abfall der Ausgleichsgeraden war hier meist deutlich steiler als -0,5, d. h., diese Stoffe werden verstärkt zu Beginn ausgelaugt. Vermutlich tritt im Verlauf der Zeit eine Verarmung auf. Die ermittelten Geradengleichungen wurden umgeformt, um Funktionen für die Auslaugrate zu bestimmen. In Tabelle 11 sind die ermittelten Funktionen für alle nachweisbaren umweltrelevanten Stoffe angegeben. Für Styrol wurde in /LAW04/ keine Geringfügigkeitsschwelle definiert. Der Parameter wurde in das Versuchsprogramm aufgenommen, da bekannt war, dass er aus Polyesterharzen freigesetzt wird. Im Rahmen der Modellierungen im Forschungsprojekt /Bra09/ wird Styrol berücksichtigt, auch wenn ein verbindlicher Vergleichswert fehlt, da die Umweltrelevanz gegeben ist.

Tabelle 11: Auslaugraten der Abdichtungsstoffe

Baustoff	Parameter	Auslaugrate
-	-	mg/(m ² d)
1	2	3
Bitumen B1	Chlorid	$J = t^{-0,278} \cdot 4,385$
	Sulfat	$J = t^{-0,129} \cdot 1,560$
	TOC	$J = t^{-0,441} \cdot 16,18$
	PAK	$J = t^{-0,700} \cdot 0,00043$
Bitumen B2	Chlorid	$J = t^{-0,879} \cdot 11,04$
	Sulfat	$J = t^{-0,570} \cdot 49,66$
	TOC	$J = t^{-0,606} \cdot 26,79$
	PAK	Peak nicht auswertbar
	BTEX	$J = t^{-0,758} \cdot 0,0243$
Bitumen B3	Chlorid	ermittelte Gleichung nicht verwertbar
	Sulfat	$J = t^{-0,444} \cdot 0,845$
	TOC	$J = t^{-0,369} \cdot 17,30$
	PAK	$J = t^{-0,558} \cdot 0,00040$
Bitumen B4	Chlorid	$J = t^{-0,521} \cdot 146,2$
	Sulfat	$J = t^{-0,633} \cdot 751,6$
	TOC	$J = t^{-0,583} \cdot 134,3$
	PAK	$J = t^{-0,854} \cdot 0,00077$
ungesättigtes Polyesterharz uP1	Styrol	$J = t^{0,608} \cdot 17,30$
	PAK	$J = t^{0,740} \cdot 0,000156$
ungesättigtes Polyesterharz uP2	Styrol	$J = t^{0,857} \cdot 174,6$
	Ethylbenzol	$J = t^{-0,791} \cdot 4,198$
	Toluol	$J = t^{0,881} \cdot 0,0548$
	m+p-Xylol	$J = t^{0,796} \cdot 16,79$
	o-Xylol	$J = t^{0,810} \cdot 1,742$
	PAK	$J = t^{-0,588} \cdot 0,000124$
ungesättigtes Polyesterharz uP3	Styrol	$J = t^{1,038} \cdot 36,56$
	Ethylbenzol	$J = t^{0,831} \cdot 0,650$
	m+p-Xylol	$J = t^{0,841} \cdot 2,761$
	o-Xylol	$J = t^{-0,844} \cdot 0,255$
	PAK	$J = t^{0,647} \cdot 0,000129$
ungesättigtes Polyesterharz uP4	Styrol	$J = t^{1,260} \cdot 57,02$
	Ethylbenzol	$J = t^{1,052} \cdot 2,729$
	m+p-Xylol	$J = t^{1,077} \cdot 12,76$
	o-Xylol	$J = t^{1,113} \cdot 1,714$
	PAK	$J = t^{0,765} \cdot 0,000118$

Bei den Säulenversuchen wird in aller Regel nur ein sehr kurzfristiger Konzentrationsanstieg gefunden. Hier wird daher in der Modellierung mit einem einmaligen Schadstoffeintrag gerechnet. Mit der in jedem Beprobungszeitraum angefallenen Wassermenge und den ermittelten Konzentrationen wurden die freigesetzten Stoffmengen unter Berücksichtigung der Hintergrundkonzentrationen berechnet. Die Freisetzung wird hier auf die Menge des Injektionsstoffs bezogen. Bei den Acrylatgelen wurden die ausgewählten organischen Einzelverbindungen nicht nachgewiesen, daher kann hier nur der TOC und z. T. Sulfat ausgewertet werden. Der TOC ist für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit nicht relevant. Wenn die maßgeblichen Verbindungen jedoch identifiziert werden, ermöglichen die hier gewonnenen Daten Rückschlüsse auf die Umweltwirkung der Baustoffe. Bei den Polyurethanen wurde die TOC-Freisetzung und für PUR1 und PUR2 die Freisetzung der aromatischen Amine berechnet. Die übrigen organischen Parameter waren in den Eluaten nicht nachweisbar. Bei einem Polyurethan (PUR4) wurde eine länger andauernde Auslaugung festgestellt. Der Freisetzungsverlauf wurde durch zwei Geraden angenähert. Bei den Zementsuspensionen wurde die Gesamtfreisetzung für die Parameter Chlorid, Sulfat, TOC, Chrom, Molybdän und Vanadium berechnet. Die anderen Spurenelemente waren in den Eluaten in aller Regel nicht nachweisbar. Tabelle 12 fasst die Ergebnisse der Säulenversuche zusammen.

Tabelle 12: Gesamtfreisetzungen im inversen Säulenversuch

Baustoff	Parameter	Gesamtfreisetzung
-	-	mg/kg
1	2	3
Acrylatgel Ac1	TOC	2993
	Sulfat	1032
Acrylatgel Ac2	TOC	3261
	Sulfat	1137
Acrylatgel Ac3	TOC	11279
Acrylatgel Ac4	TOC	7065
Polyurethan PUR1	TOC	595
	aromatische Amine	6,217
Polyurethan PUR2	TOC	362
	aromatische Amine	3,351
Polyurethan PUR3	TOC	1381
Polyurethan PUR4	TOC	28316 ¹⁾
Zementsuspension ZS1	Chlorid	131,8
	Sulfat	752,5
	TOC	17,1
	Chrom	0,034
	Molybdän	0,066
	Vanadium	0,812
Zementsuspension ZS2	Chlorid	127,9
	Sulfat	470,9
	TOC	13,7
	Chrom	0,044
	Molybdän	0,047
	Vanadium	0,827
Zementsuspension ZS2 mit 24 h Aushärtezeit	Chlorid	38,9
	Sulfat	137,6
	TOC	10,7
	Vanadium	0,0056
Zementsuspension ZS3	Chlorid	68,9
	Sulfat	255,6
	TOC	3,1
	Chrom	0,062
	Vanadium	0,218
Zementsuspension ZS4	Chlorid	6,944
	Sulfat	500,3
	TOC	172,5
	Chrom	0,148
	Molybdän	0,197
	Vanadium	0,010

1) Bei der Modellierung wird die Auslaugrate als Eingangsparameter gewählt.

Für $t = 0$ bis $t = 8$ d gilt: $J_1 = 3127$ mg/(kg·d) und für $t > 8$ d bis $t = 16$ d gilt $J_2 = 366$ mg/(kg·d)

Dieses Projekt wurde in guter Zusammenarbeit mit dem Hygiene-Institut Gelsenkirchen bearbeitet. Ein Großteil der Analysen und die Durchführung der Säulenversuche erfolgten am Hygiene-Institut.

LITERATUR

- /Bra05a/ Brameshuber, W. ; Vollpracht, A.: Modellrechnungen zur Untersuchung der Auswirkungen der neuen LAWA-Regelungen auf die Bewertung der Umweltverträglichkeit von Beton. Aachen : Institut für Bauforschung, 2005. – Forschungsbericht Nr. F 909
- /Bra05b/ Brameshuber, W. ; Vollpracht, A.: Prüfverfahren und Entwicklung von Prüfkriterien zur Bewertung der Auslaugung umweltrelevanter Stoffe aus Frischbeton – Fortsetzungsprojekt. Aachen : Institut für Bauforschung, 2005. – Forschungsbericht Nr. F 817/1
- /Bra09/ Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Bewertung der Umweltverträglichkeit von Abdichtungs- und Injektionsstoffen. Aachen : Institut für Bauforschung, 2006. – Forschungsbericht Nr. F 7039, in Bearbeitung
- /DAf05/ DAfStb, TA Umwelt: DAfStb-Richtlinie „Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen“. – Ausgabe Mai 2005. Berlin : Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
- /DIB08/ Deutsches Institut für Bautechnik: Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser – Teil I. Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, Mai 2008
- /Hoh03/ Hohberg, I.: Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugungsverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Diss., 2002. - Zugl.: Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2003), Nr. 542
- /LAW04/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, Unterausschuss „Geringfügigkeitsschwellen“: Ableitung von Geringfügigkeitsschwellen für das Grundwasser. Düsseldorf : Länderarbeitsgemeinschaft Wasser, LAWA, 2004 (verfügbar unter www.lawa.de)
- /Sau00/ Sauer, F.: Ungesättigte Polyester – Ein Überblick. www.borchers.de/pages/584/UngesättigtePolyesterEinberblickdeutsch.pdf, 2000

Tabelle A1: Untersuchte umweltrelevante Inhaltsstoffe der Bitumendickbeschichtungen

Bestandteil	Einheit	Bitumen			
		B1	B2	B3	B4
1	2	3	4	5	6
Phenol	mg/kg	0,36	0,83	0,46	0,80
BTEX		< 1	< 1	< 1	< 1
Naphthalin		< 1	< 1	< 1	< 1
∑ PAK (EPA)		10,5	5,4	< 1	< 1
LHKW		< 1	< 1	< 1	< 1

Tabelle A2: Untersuchte umweltrelevante Inhaltsstoffe der ungesättigten Polyesterharze

Bestandteil/Parameter	Einheit	Ungesättigtes Polyesterharz			
		uP1 ¹⁾	uP2	uP3	uP4
1	2	3	4	5	6
Styrol	M.-%	6,3	29,73	13,62	3,89
Ethylbenzol		0,0062	2,734	0,6984	1,458
m+p-Xylol		0,006	10,11	2,65	5,73
o-Xylol		0,0069	1,387	0,3	0,8
Benzol	mg/kg	33	55	136	27
Toluol		71	209	49	62
1,3,5-Trimethylbenzol		904	< 1	< 1	< 1
LHKW		< 1	< 1	< 1	< 1
Naphthalin		< 1	< 1	< 1	< 1
∑ PAK (EPA)		< 1	3,2	< 1	< 1

1) Da von diesem Material nicht genügend Probekörper vorlagen, konnten die Gesamtgehalte lediglich an der ausgelaugten Probe bestimmt werden.

Tabelle A3: Dichte und Mahlfineinheit der Zemente für die Zementsuspensionen

Parameter	Einheit	Zement		
		für ZS1 und ZS2	für ZS3	für ZS4
1	2	3	4	5
Dichte	g/cm ³	2,921	2,811	3,152
Mahlfineinheit ¹⁾	cm ² /g	5091	5092	9351 ²⁾

1) Die Mahlfineinheit wurde nach DIN EN 196-6:1990-03 bestimmt (Blainewerte).

2) Wert ungenau, da außerhalb des Kalibrationsbereichs

Tabelle A4: Chemische Zusammensetzung der Zemente für die Zementinjektionen¹⁾

Bestandteil/Parameter		Einheit	Zement		
			für ZS1 und ZS2	für ZS3	für ZS4
1	2	3	4	5	
Glühverlust an Luft		M.-%	11,54	15,00	1,68
Glühverlust unter Argon			13,33	–	–
Unlöslicher Rückstand (HCl/Soda)			8,43	12,90	0,58
Unlöslicher Rückstand (EDTE)			22,50	38,24	–
Kohlenstoff als CO ₂ (CSA)		M.-%	11,23	14,20	0,79
als C			3,06	3,87	0,22
Sulfat, SO ₃ (gravimetrisch)			1,55	0,51	2,14
Gesamtschwefel als SO ₃ (CSA)			2,27	1,55	2,44
Chlorid (HNO ₃ -Aufschluss)			0,061	0,030	0,018
SiO ₂			21,75	24,92	20,99
TiO ₂			0,43	0,56	0,19
Al ₂ O ₃			5,94	8,07	3,10
Fe ₂ O ₃			1,92	1,22	4,44
MnO			0,08	0,15	0,20
MgO			1,91	2,63	0,86
CaO			51,84	44,38	64,85
P ₂ O ₅			0,18	0,06	0,09
Na ₂ O			0,16	0,16	0,06
K ₂ O			0,60	0,50	0,43
Spuren- elemente	Antimon (Sb)		mg/kg	1,35	< 0,05
	Arsen (As)	6,81		7,94	8,85
	Barium (Ba)	258,0		303,4	250,8
	Blei (Pb)	12,4		2,0	8,8
	Bor (B)	168,0		134,0	141,0
	Cadmium (Cd)	0,63		0,25	0,25
	Chrom (gesamt) (Cr)	35,8		29,9	68,9
	Kobalt (Co)	5,85		5,14	8,23
	Kupfer (Cu)	48,7		15,6	16,6
	Molybdän (Mo)	2,29		2,88	5,84
	Nickel (Ni)	16,7		13,2	25,9
	Quecksilber (Hg)	< 0,01		< 0,01	< 0,01
	Selen (Se)	7,66		9,23	7,05
	Thallium (Tl)	1,15		1,56	0,95
	Vanadium (V)	41,1		39,9	62,2
Zink (Zn)	233,0	28,4	68,3		

1) bezogen auf die getrocknete Probe
 CSA: Kohlenstoffschwefelanalysator
 –: nicht bestimmt

Tabelle A5: Bestandteile der Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen

Bestandteil	Einheit	Zement	
		für ZS1 und ZS2	für ZS3
1	2	3	4
Portlandzementklinker	M.-%	51,43	30,63
Hüttensand		11,26	22,04
Kalksteinmehl		22,46	28,4
Kieselsäurehaltiger Füller		12,37	18,12
Erstarrungsregler		2,48	0,81

Tabelle A6: V/O-Verhältnisse in den Standtesten

Versuch	Einheit	V/O-Verhältnis im Elutionsschritt					
		1 (0 bis 1 d)	2 (1 bis 3 d)	3 (3 bis 7 d)	4 (7 bis 16 d)	5 (16 bis 32 d)	6 (32 bis 56 d)
1	2	3	4	5	6	7	8
B1	a	10,6	11,2	11,1	10,5	10,9	10,9
	b	10,7	11,4	11,4	10,7	11,4	11,4
B2	a	11,7	11,6	11,6	11,7	11,7	11,7
	b	11,7	11,6	11,7	11,7	11,7	11,7
	c ²⁾	11,3	11,3	11,2	11,1	11,2	11,2
B3	a	11,7	11,7	11,7	1)	1)	1)
	b	11,7	11,7	11,7	1)	1)	1)
B4	a	11,0	11,0	11,0	11,0	10,8	10,8
	b	11,0	10,6	11,0	11,0	11,7	10,8
uP1	a	11,7	11,2	11,7	11,7	11,7	11,7
	b	12,2	12,2	11,9	11,8	11,7	11,9
	c ²⁾	19,4	19,4	19,1	19,1	19,1	19,4
uP2	a	11,9	11,9	12,1	12,1	11,9	12,1
	b	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,2
uP3	a	11,5	11,5	11,4	11,2	11,5	11,2
	b	12,2	11,9	12,1	12,2	12,0	12,2
uP4	a	12,1	12,1	12,2	12,1	11,9	12,2
	b	12,2	12,1	12,1	12,1	11,9	12,2

1) Ab dem 4. Eluat trat eine Blasenbildung auf, die auf eine Hinterwanderung der Beschichtung durch den Eluenten zurückzuführen war. Dadurch vergrößerte sich die Oberfläche im Kontakt mit dem Eluenten auf undefinierte Weise. Es kann kein V/O-Verhältnis angegeben werden.

2) Aufgrund von Problemen bei der Analytik wurden die Versuche wiederholt. Bei uP1 waren jedoch nur noch zwei Probeplatten vorhanden, daher vergrößerte sich das V/O-Verhältnis.

Tabelle A7: Ergebnisse des Standtests an Bitumendickbeschichtung B1

Parameter	Einheit	Eluatkonzentrationen zum Entnahmezeitpunkt											
		1 d		3 d		7 d		16 d		32 d		56 d	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	–	8,0	7,3	6,5	7,1	6,2	6,6	6,2	6,6	6,1	6,3	7,4	7,2
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	15,4	13,1	15,2	12,1	17,0	14,4	38,3	27,0	64,7	37,6	90,9	70,3
TOC	mg/l	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	6,0	5,0	5,0	5,0	6,0	7,0
Natrium	mg/l	1,6	1,3	1,1	0,9	1,7	1,3	3,2	2,9	4,4	4,2	6,7	7,3
Kalium		0,5	0,3	0,9	1,2	3,0	0,3	2,8	0,2	7,5	7,0	3,7	8,1
Chlorid		0,5	0,2	1,0	1,0	2,3	0,5	1,9	0,4	3,2	3,0	2,7	3,3
Sulfat		0,2	0,2	0,2	0,2	0,9	0,3	0,7	0,5	1,3	1,3	2,6	3,0
Σ LHKW	µg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
KW		< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Σ BTEX-Aromaten		< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Phenole		< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Naphthalin		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Σ PAK (ohne Naphthalin)	ng/l	55,4	66,8	56,6	40,3	41,1	72,2	61,8	55,8	69,8	55,8	69,2	64,3

Tabelle A8: Ergebnisse des Standtests an Bitumendickbeschichtung B2

Parameter	Einheit	Eluatkonzentrationen zum Entnahmezeitpunkt												
		1 d		3 d		7 d		16 d		32 d		56 d		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	–	10,9	10,5	10,8	11,0	10,5	11,2	10,9	11,5	10,5	10,2	9,9	11,1	
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	233	120	401	394	323	540	465	826	480	468	443	758	
TOC	mg/l	4 ¹⁾	-	3 ¹⁾	-	3 ¹⁾	-	5 ¹⁾	-	6 ¹⁾	-	6 ¹⁾	-	
Natrium	mg/l	10,5	6,4	13,1	12,8	17,1	17,8	29,3	31,2	36,5	37,8	35,8	37,2	
Kalium		23,2	13,1	35,2	35,0	46,0	48,0	77,1	83,3	95,0	97,9	88,0	100,2	
Chlorid		1,7	1,6	1,3	1,2	0,9	0,4	1,0	1,7	0,8	0,6	1,0	0,8	
Sulfat		7,5	4,2	6,7	6,1	6,2	5,4	6,8	15,7	16,9	9,1	8,0	11,1	
Σ LHKW	µg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	
KW		< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	200	100	< 100	< 100
Σ BTEX-Aromaten		< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	3,6	4,0	3,4	3,4	3,7	4,3	
Phenole		< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	
Naphthalin		< 1 ¹⁾	-	< 1 ¹⁾	-	< 1 ¹⁾	-	< 1 ¹⁾	-	< 1 ¹⁾	-	< 1 ¹⁾	-	
Σ PAK (ohne Naphthalin)	ng/l	Nicht bestimmbar, da Peak durch Überlagerung gestört										49,2	25,5	

1) Diese Werte wurden im Nachgang im Versuch B2c bestimmt, da die TOC-Werte bei den Analysen B2a und b nicht ermittelt worden waren und die PAK nicht bestimmbar waren. Es wurde vermutet, dass bei den PAK eine Überlagerung mit Naphthalin aufgetreten ist. Dies bestätigte sich jedoch nicht.

Tabelle A9: Ergebnisse des Standtests an Bitumendickbeschichtung B3

Parameter	Einheit	Eluatkonzentrationen zum Entnahmezeitpunkt											
		1 d		3 d		7 d		16 d ¹⁾		32 d ¹⁾		56 d ¹⁾	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	–	5,9	5,8	7,2	6,9	5,5	6,3	8,1	7,8	8,1	8,1	8,0	8,1
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	9,4	7,7	8,8	8,3	21,9	85,3	132	130	220	304	169	207
TOC	mg/l	2,0	2,0	2,0	2,0	4,0	3,0	23,0	20,0	27,0	40,0	25,0	34,0
Natrium	mg/l	0,5	0,3	0,3	0,3	0,7	0,8	6,3	5,9	10,4	14,8	9,5	11,6
Kalium		0,8	0,8	1,0	1,1	5,9	4,6	29,9	28,3	53,1	74,6	44,6	52,1
Chlorid		0,5	0,6	0,6	0,7	5,4	2,9	18,0	17,1	33,5	42,2	20,3	23,7
Sulfat		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	1,4	1,3	11,4	6,8	2,9	3,0
Σ LHKW		< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
KW	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	320	310	530	400	300	570	
Σ BTEX-Aromaten	µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,4	2,1	< 2	< 2	< 2	< 2
Phenole		< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Naphthalin		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Σ PAK (ohne Naphthalin)	ng/l	51,5	46,4	55,7	41,6	61,0	45,9	247,0	247,0	388,0	771,0	436,9	360,8

1) Ab dem 4. Eluat trat eine Blasenbildung auf, die auf eine Hinterwanderung der Beschichtung durch den Eluenten zurückzuführen war. Die Konzentrationen steigen daher z. T. erheblich an.

Tabelle A10: Ergebnisse des Standtests an Bitumendickbeschichtung B4

Parameter	Einheit	Eluatkonzentrationen zum Entnahmezeitpunkt												
		1 d		3 d		7 d		16 d		32 d		56 d		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	–	11,4	11,3	11,2	11,2	11,2	11,4	10,9	11,5	11,2	11,6	10,6	11,8	
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	1252	1119	849	819	997	1072	1291	1786	1638	2090	1472	2251	
TOC	mg/l	23,0	20,0	15,0	13,0	18,0	16,0	26,0	23,0	40,0	30,0	34,0	34,0	
Natrium	mg/l	73,7	62,1	65,8	55,3	84,0	75,1	122,1	109,4	149,4	128,9	151,9	146,5	
Kalium		96,5	83,1	58,5	44,3	86,1	71,5	160,7	141,1	219,4	192,6	237,5	230,6	
Chlorid		14,4	11,9	23,6	21,0	33,4	30,6	44,5	43,5	41,2	37,2	30,9	29,7	
Sulfat		158	140	73,0	58,2	79,5	74,4	127	111	175	138	204	175	
Σ LHKW	µg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	
KW		< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	210	140
Σ BTEX-Aromaten		2,3	2,0	3,3	3,3	4,0	4,6	5,9	6,7	< 2	< 2	< 2	< 2	
Phenole		< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	
Naphthalin		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	
Σ PAK (ohne Naphthalin)	ng/l	77,5	101,1	78,6	107,7	100,1	108,5	92,2	121,6	53,1	42,9	60,4	62,2	

Tabelle A11: Ergebnisse des Standtests am ungesättigten Polyesterharz uP1

Parameter	Einheit	Eluatkonzentrationen zum Entnahmezeitpunkt												
		1 d		3 d		7 d		16 d		32 d		56 d		
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
pH-Wert	–	8,5	8,3	6,5	6,0	5,4	5,3	6,0	5,2	2,9	3,2	2,9	5,9	
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	14,9	10,0	6,2	3,4	6,9	5,3	5,3	5,6	5,2	6,3	3,0	3,9	
TOC	mg/l	< 2 ¹⁾	-	< 2 ¹⁾	-	< 2 ¹⁾	-	6,0 ¹⁾	-	5,0 ¹⁾	-	5 ¹⁾	-	
Natrium	mg/l	1,2	1,1	0,1	0,1	< 0,1	0,1	1,0	1,3	< 0,1	0,1	0,1	0,2	
Kalium		< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	1,0	0,1	0,5	0,3	0,3	1,0	0,4	0,2	
Chlorid		0,9	0,2	< 0,1	< 0,1	0,6	0,1	0,6	0,6	0,7	0,3	< 0,1	< 0,1	
Sulfat		0,4	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	0,1	< 0,1	< 0,1	
Styrol	mg/l	1,8	0,04 ²⁾	2,6	0,11 ²⁾	2,4	1,3	5,6	3,2	3,4	1,9	2,76	3,89	
Σ LHKW	µg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	
KW		< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	200	300	< 100	< 100
Σ BTEX-Aromaten		< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2,4	> 10	> 10	> 10	> 10	< 2	< 2	
Σ PAK (ohne Naphthalin)	ng/l	39,8	< 10	17,9	11,8	< 10	14,7	16,2	28,9	20,2	23,0	< 10	< 10	

1) Diese Werte wurden im Nachgang im Versuch uP1c bestimmt. Bei den BTEX-Aromaten wurden in vier Eluaten nicht Konzentrationen außerhalb des Kalibrationsbereichs gefunden. Bei der Wiederholung waren jedoch keine BTEX-Aromaten nachweisbar.

2) Vermutlich ist Styrol ausgegast. Es wird der Wert der Parallelprobe angesetzt.

Tabelle A12: Ergebnisse des Standtests am ungesättigten Polyesterharz uP2

Parameter	Einheit	Eluatkonzentrationen zum Entnahmezeitpunkt											
		1 d		3 d		7 d		16 d		32 d		56 d	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	–	7,2	6,3	6,1	5,6	5,7	5,3	6,6	6,3	4,7	4,7	4,7	4,6
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	14,0	6,3	5,1	4,0	5,5	4,9	5,1	4,9	5,6	7,6	9,7	8,4
TOC	mg/l	7,5	6,2	6,3	4,4	4,9	4,7	6,4	6,4	7,3	7,3	8,0	6,0
Natrium	mg/l	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Kalium		0,9	0,2	0,3	0,1	0,3	0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Chlorid		0,5	0,2	0,3	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sulfat		0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Styrol	mg/l	21,8	18,4	19,15	16,51	18,08	17,45	18,44	20,39	2,61	7,18	10,02	5,59
Σ LHKW	µg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
KW		< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Σ BTEX-Aromaten		2652	2306	2512	2317	2657	2726	2764	3226	496	1299	1709	2010
Benzol		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	2	4	< 1	1	2	< 1
Toluol		7	6	7	2	7	6	6	7	1	3	3	1
Ethylbenzol		490	420	470	430	500	510	507	577	91	218	331	187
m+p-Xylol		1940	1700	1850	1700	1960	2020	2054	2410	372	823	1237	705
o-Xylol		215	180	185	185	190	190	195	228	32	100	136	67
Σ PAK (ohne Naphthalin)	ng/l	17,0	18,0	11,0	17,0	< 10	< 10	19,1	42,5	< 10	< 10	< 10	< 10

Tabelle A14: Ergebnisse des Standtests am ungesättigten Polyesterharz uP4

Parameter	Einheit	Eluatkonzentrationen zum Entnahmezeitpunkt											
		1 d		3 d		7 d		16 d		32 d		56 d	
		a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
pH-Wert	–	8,1	8,3	5,9	5,1	5,7	4,7	6,1	6,5	5,0	4,6	4,7	4,5
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	6,2	6,3	2,5	6,0	4,3	5,3	3,8	5,9	3,6	6,8	9,5	8,0
TOC	mg/l	6,2	10,0	4,2	7,5	4,0	7,6	5,1	4,7	3,6	6,0	6,0	10,0
Natrium	mg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Kalium		0,2	0,4	0,7	< 0,1	0,1	< 0,1	0,4	0,6	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Chlorid		0,2	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sulfat		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Styrol	mg/l	7,65	7,27	5,37	5,74	3,44	3,77	2,02	1,77	0,31	0,32	0,41	1,04
Σ LHKW		< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
KW		< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Σ BTEX-Aromaten	µg/l	1960	2361	1672	2146	1229	1723	864	998	269	435	694	956
Benzol		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	2	1	2	1	1	5
Toluol		2	1	< 1	< 1	< 1	2	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1
Ethylbenzol		321	370	279	333	198	262	152	162	49	76	116	167
m+p-Xylol		1456	1728	1247	1591	925	1285	638	736	198	318	514	700
o-Xylol		181	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	40	63	83
Σ PAK	ng/l	16,0	17,0	10,0	13,0	< 10	< 10	< 10	10	< 10	< 10	< 10	< 10

Tabelle A15: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Acrylatgel Ac1 – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	7,5	7,4	423	450	1,8	2,2
1b	0,04	7,5	7,3	425	440	1,8	2,3
2a	0,06	7,5	7,4	441	462	6,2	11,0
2b	0,08	7,3	7,2	691	763	125,0	172,0
3a	0,10	7,5	7,4	807	848	204,0	223,0
3b	0,13	7,5	7,5	640	680	114,0	141,0
4a	0,15	7,5	7,4	561	555	80,0	71,0
4b	0,17	7,5	7,5	505	498	50,0	48,0
5a	0,19	7,3	7,5	476	472	39,0	36,0
5b	0,21	7,5	7,5	464	458	33,0	29,0
6a	0,23	7,5	7,5	461	455	29,0	23,0
6b	0,25	7,4	7,5	453	457	29,0	21,0
7a	0,27	7,5	7,5	455	453	24,0	19,0
7b	0,29	7,5	7,5	452	452	23,0	20,0
8a	0,31	7,5	7,5	443	444	19,0	18,0
8b	0,33	7,6	7,5	450	448	19,0	17,0
9	0,98	7,6	7,5	473	472	11,0	7,8
10	1,98	7,8	7,8	442	442	5,9	5,7
11	2,98	8,0	8,0	452	450	5,0	4,6
12	3,98	8,1	8,1	445	451	3,5	3,8
13	6,98	7,9	7,8	461	459	2,0	3,0
14	7,98	8,0	7,9	461	459	2,4	2,3
15	8,98	8,0	7,9	459	454	2,4	2,2
16	9,98	8,0	7,9	453	448	2,2	2,2
17	10,98	7,9	8,1	464	458	2,3	2,2
18	13,98	8,1	8,1	457	448	2,1	2,1
19	14,98	8,1	8,1	461	448	2,1	2,0
20	15,98	8,1	8,1	471	467	2,1	1,9
21	16,98	8,0	8,0	463	458	2,0	1,9

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A16: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Acrylatgel Ac1 – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	29,7	22,2	5,3	4,8	34	27	46	46
2	24,4	21,5	5,5	5,4	27	25	50	52
3	27,2	29,0	5,5	5,9	27	28	76	80
4	33,9	35,6	5,2	5,2	38	40	78	76
5	39,3	39,4	5,2	4,8	42	43	69	66
6	39,8	40,0	4,7	4,7	43	43	65	63
7	40,0	39,6	4,7	4,7	44	43	63	62
8	39,6	39,4	4,7	4,7	44	44	62	61
9	21,1	20,2	6,0	6,1	25	25	54	51
10	36,0	33,5	5,0	5,2	41	38	54	43
11	26,9	32,5	5,6	5,3	32	38	51	52
12	30,6	29,1	5,5	5,6	36	34	50	51
13	31,9	35,4	5,7	5,5	29	30	49	47
14	29,8	35,9	5,7	5,5	37	36	50	50
15	23,7	32,8	5,8	5,5	36	38	49	50
16	30,9	27,1	5,7	6,1	38	36	50	50
17	31,0	32,3	5,6	5,6	37	38	50	50
18	26,2	30,5	5,7	5,5	33	38	49	50
19	31,9	34,5	5,7	5,5	39	42	50	50
20	31,0	34,4	5,7	5,5	38	43	50	52
21	30,8	33,9	5,7	5,6	39	43	51	52

Tabelle A17: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Acrylatgel Ac2 – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	7,4	7,4	434	451	1,8	2,1
1b	0,04	7,4	7,3	434	441	1,9	2,0
2a	0,06	7,3	7,4	576	495	61,0	69,0
2b	0,08	7,3	7,3	707	734	64,0	71,0
3a	0,10	7,3	7,3	691	676	227,0	138,0
3b	0,13	7,4	7,3	626	611	225,0	140,0
4a	0,15	7,4	7,4	546	564	63,0	144,0
4b	0,17	7,4	7,4	479	506	67,0	146,0
5a	0,19	7,5	7,4	461	481	41,0	83,0
5b	0,21	7,5	7,4	457	470	45,0	81,0
6a	0,23	7,5	7,4	450	460	23,0	44,0
6b	0,25	7,6	7,5	450	458	24,0	43,0
7a	0,27	7,6	7,5	449	453	11,0	32,0
7b	0,29	7,5	7,6	454	455	13,0	34,0
8a	0,31	7,5	7,6	447	438	13,0	11,0
8b	0,33	7,5	7,6	442	441	12,0	10,0
9	0,96	7,8	7,5	453	467	9,4	5,7
10	1,96	7,9	8,0	447	450	5,6	4,8
11	2,96	8,1	8,1	452	454	3,9	4,5
12	3,96	8,0	8,1	465	455	3,5	3,9
13	6,96	7,9	7,9	456	458	3,2	3,3
14	7,96	8,0	8,1	455	455	2,5	2,2
15	8,96	7,9	8,1	458	440	2,5	2,0
16	9,96	8,0	8,1	448	448	1,8	2,0
17	10,96	7,8	8,1	461	462	1,6	2,1
18	13,96	8,0	8,0	465	462	1,8	2,1
19	14,96	8,1	7,9	462	458	1,8	2,1
20	15,96	8,1	7,9	471	465	1,6	2,2
21	16,96	8,0	7,9	456	453	1,6	2,1

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A18: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Acrylatgel Ac2 – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	24,7	20,7	4,9	5,1	28	26	47	46
2	27,6	25,4	5,7	6,2	26	25	58	53
3	43,1	43,9	4,4	6,6	35	35	77	69
4	45,8	47,0	4,6	4,4	42	43	72	72
5	46,6	50,1	5,1	5,3	44	44	65	67
6	41,8	48,1	5,1	5,1	44	45	61	63
7	42,0	49,1	5,1	5,1	44	44	61	61
8	41,0	48,6	5,1	5,0	44	43	58	59
9	30,7	23,3	5,6	6,2	34	28	53	54
10	30,4	32,4	5,7	5,7	34	36	52	52
11	32,6	29,5	5,7	5,7	36	34	52	52
12	29,4	27,4	5,8	5,9	34	32	51	51
13	25,6	30,3	5,9	5,7	29	27	50	48
14	36,5	23,2	5,5	6,1	35	34	50	48
15	35,0	24,7	5,6	5,9	36	41	49	50
16	31,4	33,3	5,5	5,5	40	41	50	49
17	32,2	33,1	5,5	5,4	40	30	49	48
18	24,2	21,0	6,0	6,1	29	27	49	50
19	31,4	28,4	5,8	5,9	38	35	50	49
20	32,0	25,2	5,8	6,0	39	32	50	50
21	29,1	22,1	5,9	6,1	35	28	49	49

Tabelle A19: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Acrylatgel Ac3 – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	7,8	7,8	485	500	2,4	2,5
1b	0,04	7,8	7,7	473	490	5,9	2,2
2a	0,06	7,7	7,6	470	481	1532,0	1455,7
2b	0,08	7,7	7,7	485	497	2230,0	2097,6
3a	0,10	7,7	7,7	508	510	564,0	500,0
3b	0,13	7,7	7,6	511	509	213,0	181,5
4a	0,15	7,7	7,7	515	512	97,3	124,0
4b	0,17	7,7	7,8	511	510	83,1	76,6
5a	0,19	7,7	7,8	511	511	54,7	52,3
5b	0,21	7,7	7,8	510	511	42,4	37,3
6a	0,23	7,7	7,8	508	509	28,2	26,1
6b	0,25	7,7	7,8	501	502	25,5	25,3
7a	0,27	7,8	7,8	497	497	22,8	24,1
7b	0,29	7,7	7,8	490	489	22,6	23,6
8a	0,31	7,7	7,7	477	478	17,9	21,3
8b	0,33	7,7	7,8	480	479	16,5	20,3
9	1,02	8,3	8,4	501	497	11,9	8,1
10	4,02	8,1	8,3	508	497	5,6	3,6
11	5,02	8,1	8,3	461	484	3,9	2,7
12	6,02	8,2	8,2	482	484	3,8	2,9
13	7,02	8,2	8,3	470	457	3,3	2,5
14	8,02	8,3	8,2	492	476	3,4	3,4
15	11,02	8,2	8,4	480	467	3,0	2,5
16	12,02	8,3	8,1	500	495	3,1	2,8
17	13,02	8,4	8,4	500	502	3,1	3,1
18	14,02	8,4	8,3	481	488	2,8	2,9
19	15,02	8,3	8,3	478	483	2,8	2,8
20	18,02	8,4	8,6	477	474	2,7	2,7
21	19,02	8,4	8,4	443	462	2,2	2,4

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A20: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Acrylatgel Ac3 – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	24,0	21,0	3,0	3,0	35	31	52	53
2	29,0	21,0	3,5	2,3	39	38	54	59
3	23,0	22,0	3,1	2,4	30	31	55	57
4	21,0	21,0	3,0	2,9	29	30	56	55
5	21,0	21,0	3,3	3,1	29	30	53	53
6	21,0	21,0	3,3	3,3	30	30	53	51
7	22,0	22,0	3,4	3,3	31	32	53	52
8	23,0	23,0	3,3	3,2	33	34	49	48
9	21,0	21,0	3,6	3,3	30	31	53	51
10	21,0	23,0	3,4	3,1	29	32	54	48
11	20,0	25,0	3,2	3,1	32	33	51	46
12	28,0	23,0	2,0	2,6	36	33	48	50
13	25,0	24,0	2,8	2,6	33	33	48	44
14	22,0	23,0	2,9	2,9	32	33	50	48
15	23,0	23,0	3,0	2,8	32	33	49	47
16	21,0	22,0	3,3	3,2	31	32	51	48
17	21,0	21,0	3,5	3,3	31	32	52	48
18	21,0	21,0	3,3	2,8	31	31	46	46
19	22,0	22,0	3,0	3,1	31	31	46	48
20	22,0	23,0	3,0	2,6	31	33	48	46
21	23,0	23,0	2,8	2,7	32	32	44	43

Tabelle A21: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Acrylatgel Ac4 – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	7,7	7,7	498	496	2,2	2,6
1b	0,04	7,6	7,7	486	483	5,6	2,5
2a	0,06	7,6	7,6	666	655	137,0	130,0
2b	0,08	7,7	7,7	872	904	265,0	290,0
3a	0,10	7,8	7,8	928	967	498,2	503,4
3b	0,13	7,8	7,9	891	934	541,9	603,6
4a	0,15	7,9	7,9	777	844	445,2	522,1
4b	0,17	7,9	7,9	638	756	222,0	189,3
5a	0,19	7,8	7,9	569	635	95,9	134,0
5b	0,21	7,8	7,8	545	555	60,1	94,2
6a	0,23	7,8	7,9	530	531	49,7	53,3
6b	0,25	7,8	7,8	518	515	28,4	41,9
7a	0,27	7,8	7,8	507	503	26,5	22,5
7b	0,29	7,8	7,8	497	495	22,7	18,5
8a	0,31	7,8	7,8	495	492	20,5	15,1
8b	0,33	7,8	7,8	492	491	20,3	14,0
9	1,02	8,3	8,3	507	506	14,2	8,3
10	4,02	8,1	8,0	499	502	5,5	5,2
11	5,02	8,3	8,2	486	435	3,4	2,9
12	6,02	8,3	8,4	461	467	3,4	3,4
13	7,02	8,3	8,2	457	467	3,1	3,4
14	8,02	8,4	8,5	487	478	3,3	3,6
15	11,02	8,1	8,2	498	487	3,2	3,4
16	12,02	8,3	8,4	501	500	3,1	3,3
17	13,02	8,4	8,5	500	500	3,3	3,6
18	14,02	8,4	8,5	471	473	2,7	2,9
19	15,02	8,4	8,5	482	479	2,9	3,0
20	18,02	8,5	8,6	470	473	2,7	2,9
21	19,02	8,4	8,4	478	456	2,7	2,6

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A22: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Acrylatgel Ac4 – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	23,3	23,1	4,8	4,7	30	31	47	49
2	33,6	28,6	3,8	5,2	31	33	41	47
3	34,8	36,2	2,4	4,2	28	27	52	54
4	35,2	33,5	3,3	4,1	28	28	51	54
5	26,7	35,4	3,9	3,5	28	29	50	52
6	27,7	23,1	3,0	5,4	30	30	49	49
7	24,4	24,3	5,2	5,1	33	33	47	48
8	24,4	24,4	4,9	4,9	33	32	46	47
9	21,5	22,3	5,2	5,4	29	30	50	51
10	22,0	21,9	5,1	5,1	30	30	49	49
11	25,6	26,4	4,5	4,1	33	34	42	40
12	24,6	24,3	4,4	4,6	33	33	48	45
13	23,4	23,7	4,2	4,1	31	30	43	42
14	22,2	22,8	4,8	4,7	29	30	45	45
15	21,8	22,9	4,9	4,9	29	29	43	48
16	21,8	22,3	5,1	5,2	28	29	46	48
17	22,0	21,7	5,3	5,4	27	27	45	45
18	23,1	22,6	4,8	4,9	28	28	42	43
19	22,5	22,9	5,0	5,0	28	28	43	44
20	22,5	22,3	4,5	4,5	28	28	43	44
21	21,8	22,9	4,6	4,4	28	28	43	44

Tabelle A23: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR1 – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	5,7	5,8	594	593	2,0	2,1
1b	0,04	5,6	5,7	598	596	2,0	1,9
2a	0,06	5,6	5,7	560	544	2,4	1,7
2b	0,08	5,6	5,9	516	544	7,2	4,0
3a	0,10	5,8	5,9	495	531	12,0	7,2
3b	0,13	6,0	5,9	494	518	8,4	13,0
4a	0,15	6,1	5,9	495	509	8,0	20,0
4b	0,17	6,2	6,0	494	501	5,6	14,0
5a	0,19	6,2	6,2	488	497	4,5	11,0
5b	0,21	6,3	6,2	488	494	4,5	8,3
6a	0,23	6,4	6,2	498	492	3,1	7,9
6b	0,25	6,5	6,2	485	490	2,7	6,4
7a	0,27	6,5	6,4	487	489	2,6	6,0
7b	0,29	6,5	6,6	487	485	2,3	4,2
8a	0,31	6,6	6,7	489	488	2,2	4,0
8b	0,33	6,6	6,6	487	487	2,1	4,1
9	1,04	7,8	7,5	500	500	3,0	3,6
10	2,04	8,1	7,8	491	492	2,6	3,7
11	3,04	8,1	8,0	491	491	2,7	3,3
12	4,04	7,9	8,0	488	488	2,8	3,2
13	7,04	7,9	8,1	480	479	2,8	2,7
14	8,04	8,1	8,1	463	463	2,3	2,8
15	9,04	7,8	8,1	467	465	2,4	2,6
16	10,04	8,0	8,0	458	463	2,2	2,6
17	11,04	7,8	7,9	458	455	2,8	2,1
18	14,04	7,9	7,9	472	465	2,8	2,7
19	15,04	7,9	8,0	462	462	2,9	2,4
20	16,04	7,8	7,9	451	466	2,7	2,2
21	17,04	8,0	8,0	452	452	2,3	2,0

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A24: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR1 – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	34,1	30,5	6,1	6,0	44	40	49	49
2	40,1	38,4	5,7	5,9	50	52	49	50
3	37,2	35,9	4,9	5,4	47	47	49	49
4	38,1	35,8	4,9	4,9	48	47	48	47
5	41,7	39,6	4,8	4,5	52	52	48	48
6	43,2	41,5	4,8	4,5	53	53	47	47
7	42,9	42,2	4,7	4,6	54	53	48	47
8	46,6	43,6	4,8	4,7	53	53	48	47
9	39,7	41,7	4,9	4,9	49	51	48	49
10	33,8	33,3	5,2	5,0	41	42	47	47
11	36,1	35,0	5,0	4,9	42	43	47	47
12	25,4	33,1	5,1	5,0	32	40	46	48
13	29,2	31,0	5,0	5,1	35	37	47	46
14	32,6	33,7	5,0	5,1	41	41	48	45
15	27,4	28,8	5,1	5,2	33	35	46	46
16	30,1	25,6	5,1	5,2	35	31	44	45
17	31,4	30,1	4,9	4,9	41	42	53	53
18	23,4	25,8	5,2	5,2	31	33	50	50
19	25,1	26,9	5,2	5,2	33	36	52	52
20	31,1	27,2	5,1	5,2	41	36	51	52
21	31,3	30,5	5,1	5,1	38	37	46	46

Tabelle A25: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR1 – organische Verbindungen

Eluat-Nr.	aromatische Amine		Phenolindex		Σ LHKW		Σ KW	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	$\mu\text{g/l}$							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	26	18	<10	<10	<10	<10	<100	<100
2	22	32	<10	<10	<10	<10	<100	<100
3	77	90	<10	<10	<10	<10	<100	<100
4	82	98	<10	<10	<10	<10	<100	<100
5	70	90	<10	<10	<10	<10	<100	<100
6	80	90	<10	<10	<10	<10	<100	<100
7	60	80	<10	<10	<10	<10	<100	<100
8	50	80	<10	<10	<10	<10	<100	<100
9	20	20	<10	<10	<10	<10	<100	<100
10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
11	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
12	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
13	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
14	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
15	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
16	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
17	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
18	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
19	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
20	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
21	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100

Tabelle A26: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR2 – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	5,3	5,4	621	662	2,0	10,0
1b	0,04	5,3	5,5	604	620	1,9	17,0
2a	0,06	5,2	5,5	497	563	4,6	26,0
2b	0,08	5,5	5,6	481	540	8,1	18,0
3a	0,10	5,6	5,6	486	528	8,0	17,0
3b	0,13	5,7	5,7	493	522	7,5	14,0
4a	0,15	5,8	5,8	491	509	6,9	11,0
4b	0,17	5,9	5,9	489	505	5,6	7,3
5a	0,19	5,8	6,0	482	488	5,0	6,2
5b	0,21	5,9	6,1	480	497	4,8	5,3
6a	0,23	6,0	6,2	479	495	3,7	5,0
6b	0,25	6,1	6,2	481	495	2,8	4,4
7a	0,27	6,2	6,3	485	493	3,0	4,2
7b	0,29	6,3	6,3	485	494	2,5	4,0
8a	0,31	6,4	6,4	485	494	2,3	3,8
8b	0,33	6,7	6,7	502	504	1,8	3,8
9	0,98	7,5	7,4	499	499	2,0	3,8
10	1,98	7,6	7,7	495	493	2,0	2,7
11	2,98	7,7	7,9	492	491	1,9	2,5
12	3,98	7,8	7,9	488	481	2,0	2,5
13	6,98	7,8	7,9	487	420	1,9	2,4
14	7,98	7,8	8,0	483	467	2,0	2,5
15	8,98	7,9	7,9	470	470	2,0	2,2
16	9,98	7,9	7,9	461	459	2,0	2,2
17	10,98	7,6	8,0	424	460	2,1	2,3
18	13,98	7,6	7,7	425	467	3,0	3,0
19	14,98	7,7	7,9	441	453	3,0	2,0
20	15,98	8,1	8,0	464	464	2,6	2,2
21	16,98	7,8	7,9	439	453	2,6	2,2

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A27: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR2 – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	37,3	35,2	6,9	6,3	46	46	48	49
2	41,0	39,7	5,3	5,5	51	51	49	49
3	38,5	40,1	5,0	5,2	48	50	48	48
4	41,1	39,9	4,8	5,0	51	51	48	48
5	43,1	42,6	4,7	4,7	53	52	48	47
6	43,3	43,4	4,7	4,7	53	53	48	47
7	43,1	43,1	4,7	4,7	53	52	47	47
8	43,2	43,6	4,9	4,8	52	53	46	48
9	38,8	38,3	4,9	5,0	47	47	47	47
10	36,5	35,2	5,1	5,0	43	43	46	47
11	33,9	33,5	5,0	5,1	41	40	46	47
12	31,7	31,8	5,0	5,1	38	38	46	47
13	27,6	27,4	5,0	5,0	33	33	46	47
14	27,0	34,0	5,2	4,7	38	42	49	46
15	26,7	24,4	5,2	5,2	33	31	46	47
16	26,3	26,3	5,3	5,2	32	32	45	46
17	30,3	24,8	5,0	5,1	39	35	52	55
18	19,9	20,1	5,4	5,4	27	28	52	52
19	21,6	31,0	5,4	5,1	30	40	53	50
20	23,0	23,6	5,3	5,3	32	33	53	53
21	25,2	26,5	5,2	5,2	32	33	47	47

Tabelle A28: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR2 – organische Verbindungen

Eluat-Nr.	aromatische Amine		Phenolindex		Σ LHKW		Σ KW	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	$\mu\text{g/l}$							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	21	20	<10	<10	<10	<10	<100	<100
2	26	25	<10	<10	<10	<10	<100	<100
3	25	24	<10	<10	<10	<10	<100	<100
4	40	39	<10	<10	<10	<10	<100	<100
5	30	40	<10	<10	<10	<10	<100	<100
6	30	30	<10	<10	<10	<10	<100	<100
7	30	20	<10	<10	<10	<10	<100	<100
8	30	30	<10	<10	<10	<10	<100	<100
9	20	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
11	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
12	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
13	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
14	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
15	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
16	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
17	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
18	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
19	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
20	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
21	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100

Tabelle A29: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR3 – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	5,5	5,5	570	566	8,5	3,3
1b	0,04	5,3	5,3	575	583	5,4	2,8
2a	0,06	5,1	5,2	509	561	15,4	9,6
2b	0,08	5,2	5,0	473	470	23,5	17,3
3a	0,10	5,3	5,3	478	464	31,3	31,3
3b	0,13	5,5	5,6	478	481	30,1	33,6
4a	0,15	5,7	5,6	474	486	21,3	34,5
4b	0,17	5,7	5,8	482	474	16,8	28,7
5a	0,19	5,9	5,9	478	489	13,4	23,4
5b	0,21	5,9	5,6	477	481	10,1	23,4
6a	0,23	5,9	5,6	475	473	9,8	19,2
6b	0,25	5,9	5,7	472	472	9,7	15,0
7a	0,27	6,0	5,8	466	465	7,0	12,0
7b	0,29	6,2	6,0	467	466	7,2	8,9
8a	0,31	6,2	6,1	466	467	6,6	8,8
8b	0,33	6,2	6,1	468	467	6,7	8,2
9	1,02	7,5	7,6	497	485	5,1	5,4
10	2,02	7,9	7,7	479	481	2,6	5,3
11	3,02	7,9	7,8	486	487	2,1	4,6
12	4,02	7,9	7,9	485	484	1,8	2,2
13	7,02	7,6	7,7	496	482	2,3	1,7
14	8,02	7,6	7,7	481	491	1,8	2,2
15	9,02	7,8	7,8	480	483	2,5	1,9
16	10,02	8,1	8,1	477	478	2,4	1,6
17	11,02	7,9	7,9	480	483	3,2	3,5
18	14,02	7,9	8,0	480	486	3,1	3,5
19	15,02	8,0	8,0	483	487	3,0	3,1
20	16,02	8,0	8,1	484	485	3,1	3,0
21	17,02	7,9	8,0	482	484	2,8	2,8

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A30: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR3 – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	31,6	32,4	6,1	6,0	38	40	42	43
2	33,7	33,7	5,3	5,4	40	40	42	41
3	27,1	26,2	4,6	4,4	33	33	44	45
4	26,2	25,1	4,6	4,3	35	33	49	45
5	28,4	29,0	4,6	4,6	36	37	42	44
6	32,4	32,5	4,6	4,5	40	42	42	46
7	35,5	35,5	4,5	4,3	42	43	41	43
8	36,3	36,4	4,3	4,3	43	45	40	44
9	29,5	22,6	4,7	5,8	36	31	43	45
10	30,7	29,3	4,7	4,6	37	37	42	44
11	28,3	27,5	5,0	5,0	34	34	43	44
12	27,0	27,3	5,1	5,1	34	33	45	43
13	22,5	28,0	5,0	4,7	30	36	46	43
14	30,5	24,5	4,6	4,8	38	32	43	45
15	28,9	25,7	4,6	4,7	38	34	47	44
16	29,2	28,7	4,5	4,6	37	37	43	43
17	27,9	26,7	5,0	5,0	33	33	42	43
18	29,5	22,5	4,9	5,1	36	29	41	43
19	30,1	27,1	4,9	5,1	36	33	42	43
20	25,1	24,7	5,1	5,0	33	32	50	44
21	26,1	23,5	4,8	5,0	34	31	44	45

Tabelle A31: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR3 – organische Verbindungen

Eluat-Nr.	aromatische Amine		Phenolindex		Σ LHKW		Σ KW	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	$\mu\text{g/l}$							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
11	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
12	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
13	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
14	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
15	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
16	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
17	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
18	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
19	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
20	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
21	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100

Tabelle A32: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR4 – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	5,8	5,4	490	495	2,4	3,2
1b	0,04	5,5	5,5	535	520	2,5	2,2
2a	0,06	5,4	5,6	549	551	2,2	2,4
2b	0,08	5,2	5,5	489	509	2,7	2,4
3a	0,10	5,4	5,6	472	494	21,5	4,2
3b	0,13	5,6	5,6	490	491	54,3	9,1
4a	0,15	5,6	5,6	486	486	69,4	13,5
4b	0,17	5,7	5,7	485	484	55,0	21,9
5a	0,19	5,7	5,6	479	478	55,6	67,0
5b	0,21	5,7	5,6	476	469	49,8	57,2
6a	0,23	5,7	5,7	472	468	46,2	56,5
6b	0,25	5,8	5,8	467	464	48,0	48,7
7a	0,27	6,1	5,9	467	463	47,2	46,8
7b	0,29	6,1	5,9	464	466	39,9	39,0
8a	0,31	6,2	6,0	461	463	33,8	32,9
8b	0,33	6,3	6,1	468	464	33,0	33,2
9	1,02	7,9	7,8	492	481	32,1	27,8
10	2,02	8,0	7,9	479	479	32,3	27,6
11	3,02	8,2	8,1	484	484	26,7	26,1
12	4,02	7,8	7,9	485	480	22,1	23,9
13	7,02	7,6	7,9	496	480	15,3	23,7
14	8,02	7,5	7,7	492	479	11,0	14,1
15	9,02	7,6	7,8	488	481	4,8	7,4
16	10,02	8,0	7,9	475	484	4,0	6,6
17	11,02	7,9	7,7	479	487	3,5	4,8
18	14,02	7,9	7,9	483	489	3,8	4,7
19	15,02	7,9	8,0	484	483	3,6	4,2
20	16,02	8,0	8,0	482	482	3,1	3,6
21	17,02	8,0	8,0	482	481	4,0	4,2

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A33: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR4 – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	30,2	30,1	5,4	5,3	37	37	43	44
2	33,9	33,7	5,5	5,6	40	40	40	41
3	27,9	28,0	4,4	4,8	35	35	44	44
4	26,7	28,2	4,4	4,5	35	37	44	44
5	30,2	30,6	4,4	4,4	39	40	42	42
6	34,0	33,9	4,2	4,2	43	42	42	42
7	35,0	34,8	4,2	4,1	43	44	42	42
8	35,7	35,7	4,1	4,1	44	44	41	41
9	22,4	29,2	4,9	4,4	30	37	41	43
10	29,4	28,9	4,5	4,6	37	37	46	44
11	28,3	27,9	4,9	5,0	36	34	48	43
12	27,0	28,1	5,0	4,9	33	35	44	44
13	22,4	27,6	5,5	4,5	32	37	48	43
14	22,3	28,7	4,8	4,4	33	38	49	44
15	30,4	25,8	4,3	4,5	32	34	50	44
16	22,7	24,4	4,7	4,5	40	33	47	44
17	28,4	22,9	4,9	5,1	36	29	47	43
18	28,8	23,8	4,9	5,1	35	30	43	44
19	31,1	30,8	5,0	4,9	37	36	41	41
20	30,9	29,0	4,8	4,9	38	37	43	44
21	21,4	29,1	5,1	4,8	28	37	45	44

Tabelle A34: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs am Polyurethan PUR4 – organische Verbindungen

Eluat-Nr.	aromatische Amine		Phenolindex		Σ LHKW		Σ KW	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	$\mu\text{g/l}$							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
2	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
3	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
4	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
5	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
6	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
7	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
8	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
9	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
11	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
12	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
13	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
14	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
15	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
16	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
17	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
18	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
19	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
20	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100
21	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100

Tabelle A35: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS1 (w/z = 1,0) – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	10,0	9,8	924	1106	5,5	10,3
1b	0,04	11,7	11,7	1925	2130	9,1	10,5
2a	0,06	11,2	11,1	1073	1014	5,0	5,3
2b	0,08	10,7	10,0	746	635	4,0	4,7
3a	0,10	10,1	9,6	610	574	3,2	3,4
3b	0,13	9,7	9,2	554	545	3,0	2,9
4a	0,15	9,6	9,2	549	538	2,7	2,7
4b	0,17	9,8	9,1	513	530	2,7	2,7
5a	0,19	9,9	9,1	500	528	2,7	2,6
5b	0,21	9,6	9,3	520	531	2,6	2,7
6a	0,23	9,6	9,3	506	525	2,7	2,7
6b	0,25	9,6	9,3	510	516	2,6	2,6
7a	0,27	9,5	9,3	505	513	2,4	2,5
7b	0,29	9,5	9,3	499	506	2,3	2,4
8a	0,31	9,5	9,3	492	495	2,2	2,3
8b	0,33	9,4	9,3	490	488	2,1	2,2
9	1,02	8,9	8,8	498	503	2,7	2,7
10	2,02	8,6	8,6	501	501	2,5	2,7
11	3,02	8,4	8,5	497	492	2,6	2,7
12	4,02	8,4	8,5	488	485	2,6	2,5
13	7,02	8,1	8,4	492	477	2,5	2,2
14	8,02	8,2	8,4	497	484	2,7	2,3
15	9,02	8,3	8,3	468	464	1,6	1,7
16	10,02	8,3	8,4	472	474	2,0	2,0
17	11,02	8,4	8,4	484	467	2,2	1,8
18	14,02	8,0	8,1	494	496	2,4	2,5
19	15,02	8,2	8,4	495	485	2,5	2,3
20	16,02	8,4	8,4	489	480	2,3	2,0
21	17,02	8,2	8,2	497	480	2,7	2,1

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A36: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS1 (w/z = 1,0) – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	39,0	39,0	114,1	164,5	80	78	270	376
2	35,0	27,0	83,4	73,1	61	45	172	163
3	28,0	22,0	39,8	30,7	44	35	98	89
4	22,0	21,0	30,7	21,1	35	34	88	78
5	21,0	21,0	20,4	17,6	32	33	74	73
6	21,0	21,0	16,1	14,9	32	32	70	69
7	22,0	21,0	11,0	12,9	33	33	62	65
8	23,0	23,0	9,5	9,1	36	36	58	60
9	20,0	21,0	4,6	6,3	30	31	50	54
10	21,0	20,0	5,0	5,0	31	30	47	48
11	20,0	20,0	4,3	4,2	29	29	48	50
12	21,0	20,0	4,1	3,7	31	30	45	49
13	22,0	24,0	3,8	3,4	32	34	48	48
14	20,0	22,0	3,6	3,3	31	33	49	50
15	27,0	29,0	3,0	2,9	40	41	44	45
16	26,0	25,0	3,0	3,0	37	36	44	46
17	23,0	28,0	3,0	2,5	34	40	46	45
18	21,0	21,0	3,2	2,8	32	31	47	49
19	21,0	23,0	3,4	2,8	31	35	49	47
20	24,0	25,0	3,4	3,4	36	38	46	43
21	20,0	25,0	3,9	3,4	31	38	46	44

Tabelle A37: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS1 (w/z = 1,0) – Spurenelemente

Eluat-Nr.	Antimon		Arsen		Barium		Blei		Cadmium		Chrom		Kobalt	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	µg/l													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	<1	<1	1,0	<1	42	54	<5	<5	<0,3	<0,3	10	8	<5	<5
2	<1	<1	<1	<1	21	21	<5	<5	<0,3	<0,3	6	2	<5	<5
3	<1	<1	<1	<1	17	18	<5	<5	<0,3	<0,3	3	4	<5	<5
4	<1	<1	<1	<1	20	25	<5	<5	<0,3	<0,3	3	2	<5	<5
5	<1	<1	<1	<1	23	26	<5	<5	<0,3	<0,3	3	2	<5	<5
6	<1	<1	<1	<1	25	27	<5	<5	<0,3	<0,3	2	1	<5	<5
7	<1	<1	<1	<1	26	26	<5	<5	<0,3	<0,3	2	1	<5	<5
8	<1	<1	<1	<1	26	25	<5	<5	<0,3	<0,3	1	1	<5	<5
9	<1	<1	<1	<1	47	37	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
10	<1	<1	<1	<1	41	38	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
11	<1	<1	<1	<1	32	31	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
12	<1	<1	<1	<1	27	28	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
13	<1	<1	<1	<1	28	27	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
14	<1	<1	<1	<1	28	25	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
15	<1	<1	<1	<1	22	21	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
16	<1	<1	<1	<1	25	24	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
17	<1	<1	<1	<1	24	23	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
18	<1	<1	<1	<1	23	26	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
19	<1	<1	<1	<1	26	25	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
20	<1	<1	<1	<1	27	26	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
21	<1	<1	<1	<1	30	27	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5

Tabelle A37: Fortsetzung

Eluat-Nr.	Kupfer		Molybdän		Nickel		Selen		Thallium		Vanadium		Zink	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	µg/l													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	20	27	20,0	20,0	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	3	<5	<5
2	12	7	10,0	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	4	<5	<5
3	<5	<5	<10	10,0	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	5	<5	<5
4	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	3	<5	<5
5	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	3	<5	<5
6	5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	3	<5	<5
7	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	3	<5	<5
8	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	4	<5	<5
9	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	4	<5	<5
10	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	4	<5	<5
11	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	5	<5	<5
12	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	4	<5	<5
13	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	2	<5	<5
14	6	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	1	2	<5	<5
15	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
16	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
17	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
18	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
19	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
20	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
21	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5

Tabelle A38: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS2 (w/z = 0,69) – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	9,1	11,5	746	2050	5,7	14,5
1b	0,04	11,6	10,8	1910	720	12,7	5,5
2a	0,06	10,7	9,6	836	559	5,1	3,0
2b	0,08	9,9	9,3	613	557	3,3	2,9
3a	0,10	9,5	9,2	567	551	2,9	2,7
3b	0,13	9,2	9,1	543	537	2,7	2,5
4a	0,15	9,1	9,1	525	531	2,6	2,5
4b	0,17	9,0	9,0	518	522	2,5	2,4
5a	0,19	9,0	9,1	511	518	2,4	2,5
5b	0,21	9,1	9,2	508	515	2,4	2,5
6a	0,23	9,1	9,2	501	513	2,4	2,5
6b	0,25	9,1	9,2	497	509	2,4	2,4
7a	0,27	9,1	9,2	492	505	2,4	2,4
7b	0,29	9,1	9,2	489	501	2,3	2,4
8a	0,31	9,1	9,2	482	495	2,2	2,3
8b	0,33	9,1	9,2	479	490	2,1	2,2
9	1,02	8,6	8,6	494	494	2,8	2,8
10	2,02	8,5	8,5	501	489	2,6	2,6
11	3,02	8,5	8,4	487	492	2,7	2,6
12	4,02	8,4	8,4	484	485	2,5	2,5
13	7,02	8,2	8,5	496	477	2,7	2,2
14	8,02	8,2	8,3	493	486	3,1	2,5
15	9,02	8,2	8,3	483	466	2,3	1,7
16	10,02	8,3	8,3	487	472	2,4	1,9
17	11,02	8,2	8,2	477	468	1,8	1,7
18	14,02	8,2	8,5	485	479	2,4	2,0
19	15,02	8,3	8,4	489	483	2,8	2,1
20	16,02	8,3	8,3	484	483	2,1	2,2
21	17,02	8,3	8,4	480	479	2,1	2,0

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A39: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS2 (w/z = 0,69) – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	41,0	39,0	154,6	171,3	81	82	259	313
2	26,0	22,0	65,7	30,1	44	34	128	80
3	22,0	21,0	27,6	21,0	35	32	77	67
4	20,0	20,0	20,2	16,8	32	31	66	64
5	20,0	20,0	16,0	14,6	31	32	62	60
6	20,0	20,0	12,9	12,8	30	30	60	59
7	20,0	21,0	10,9	11,0	31	31	57	56
8	22,0	21,0	9,5	9,5	34	34	52	53
9	21,0	18,0	6,8	6,4	31	31	53	51
10	21,0	21,0	5,7	5,9	31	31	50	47
11	20,0	20,0	4,9	7,1	30	32	51	49
12	21,0	21,0	4,5	4,5	31	30	50	48
13	20,0	23,0	4,3	3,9	29	34	49	47
14	21,0	23,0	4,1	3,7	32	34	48	47
15	24,0	28,0	4,4	2,9	35	39	50	43
16	22,0	26,0	3,9	2,9	32	37	49	43
17	27,0	28,0	3,4	2,8	39	40	45	42
18	24,0	25,0	3,4	3,0	35	37	46	43
19	22,0	24,0	3,5	3,1	34	37	46	45
20	25,0	25,0	3,8	3,4	38	37	47	46
21	26,0	25,0	3,6	3,4	44	39	39	45

Tabelle A40: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS2 (w/z = 0,69) – Spurenelemente

Eluat-Nr.	Antimon		Arsen		Barium		Blei		Cadmium		Chrom		Kobalt	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	µg/l													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	<1	<1	1,3	1,6	21	30	<5	<5	<0,3	<0,3	7	12	<5	<5
2	<1	<1	1,2	1,8	13	19	<5	<5	<0,3	<0,3	3	2	<5	<5
3	<1	<1	<1	<1	24	23	<5	<5	<0,3	<0,3	2	1	<5	<5
4	<1	<1	<1	<1	27	26	<5	<5	<0,3	<0,3	1	1	<5	<5
5	<1	<1	<1	<1	28	26	<5	<5	<0,3	<0,3	1	1	<5	<5
6	<1	<1	<1	<1	28	26	<5	<5	<0,3	<0,3	1	1	<5	<5
7	<1	<1	<1	<1	28	26	<5	<5	<0,3	<0,3	1	1	<5	<5
8	<1	<1	<1	<1	27	25	<5	<5	<0,3	<0,3	1	1	<5	<5
9	<1	<1	<1	<1	36	39	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
10	<1	<1	<1	<1	33	36	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
11	<1	<1	<1	<1	27	29	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
12	<1	<1	<1	<1	24	25	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
13	<1	<1	<1	<1	27	25	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
14	<1	<1	<1	<1	25	25	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
15	<1	<1	<1	<1	23	21	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
16	<1	<1	<1	<1	22	23	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
17	<1	<1	<1	<1	24	22	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
18	<1	<1	<1	<1	23	23	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
19	<1	<1	<1	<1	22	24	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
20	<1	<1	<1	<1	24	24	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
21	<1	<1	<1	<1	25	25	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5

Tabelle A40: Fortsetzung

Eluat-Nr.	Kupfer		Molybdän		Nickel		Selen		Thallium		Vanadium		Zink	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	µg/l													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	11	22	20,0	20,0	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	7	<5	<5
2	<5	<5	10,0	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	4	<5	<5
3	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	3	<5	<5
4	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	2	<5	<5
5	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	2	<5	<5
6	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	2	<5	<5
7	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	3	<5	<5
8	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	3	<5	<5
9	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	4	<5	<5
10	6,0	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	4	<5	<5
11	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	5	<5	<5
12	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	4	<5	<5
13	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	2	<5	<5
14	<5	5,0	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	1	<5	<5
15	<5	5,0	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	<1	<5	<5
16	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
17	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
18	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
19	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
20	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
21	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5

Tabelle A41: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS3 (w/z = 1,0) – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	8,4	9,4	572	601	2,7	4,0
1b	0,04	10,5	10,8	831	1061	4,3	5,8
2a	0,06	10,2	10,5	610	668	2,4	2,6
2b	0,08	9,9	9,8	529	509	1,7	1,6
3a	0,10	9,5	9,4	515	495	1,8	1,9
3b	0,13	9,3	9,1	522	510	2,0	2,2
4a	0,15	9,3	9,0	518	503	2,2	2,2
4b	0,17	9,2	9,1	505	489	2,4	2,2
5a	0,19	8,7	8,5	493	475	2,0	1,9
5b	0,21	9,3	9,1	480	468	1,9	1,9
6a	0,23	9,4	9,3	463	452	2,0	1,6
6b	0,25	9,5	9,4	452	435	1,6	1,5
7a	0,27	9,5	9,4	437	439	1,6	1,3
7b	0,29	9,6	9,5	440	429	1,5	1,1
8a	0,31	9,6	9,4	437	432	1,1	1,1
8b	0,33	9,5	9,4	437	420	1,1	1,0
9	1,02	8,4	8,4	488	480	2,3	2,2
10	2,02	7,9	8,0	480	473	2,5	2,2
11	3,02	8,0	8,1	458	459	1,9	1,9
12	4,02	7,9	7,9	456	460	1,9	2,0
13	7,02	8,0	8,1	470	466	2,4	2,1
14	8,02	7,9	8,0	462	465	1,9	2,0
15	9,02	7,8	7,9	482	485	3,0	3,2
16	10,02	7,7	7,8	478	484	2,3	2,6
17	11,02	8,1	8,0	482	482	2,9	3,5
18	14,02	8,2	8,2	478	477	2,2	2,3
19	15,02	8,1	8,2	483	487	2,3	2,4
20	16,02	8,0	8,1	488	488	2,7	2,6
21	17,02	8,0	8,1	482	482	2,3	2,2

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A42: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS3 (w/z = 1,0) – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	36,0	36,0	24,5	29,2	48	49	139	170
2	32,0	32,0	18,8	18,6	42	39	118	87
3	26,0	23,0	11,2	9,4	33	31	69	64
4	22,0	21,0	9,2	8,0	31	31	63	62
5	24,0	24,0	8,4	7,6	32	33	57	56
6	27,0	27,0	7,4	7,0	35	35	50	48
7	29,0	29,0	6,6	6,2	37	36	47	44
8	29,0	29,0	5,9	5,6	36	36	42	41
9	21,0	21,0	4,3	4,3	29	31	49	50
10	21,0	22,0	3,6	3,6	30	31	48	47
11	24,0	23,0	2,9	3,5	31	32	42	42
12	24,0	23,0	3,5	3,4	33	32	42	42
13	22,0	23,0	3,6	3,1	32	32	44	43
14	25,0	25,0	3,2	3,5	35	35	44	43
15	20,0	20,0	3,6	3,5	31	31	46	47
16	21,0	20,0	3,9	3,7	31	30	40	42
17	21,0	21,0	3,7	3,7	31	32	39	41
18	23,0	23,0	3,5	3,2	34	34	38	37
19	22,0	22,0	3,5	3,2	34	33	39	38
20	20,0	20,0	3,5	3,3	32	31	42	36
21	22,0	22,0	3,3	3,2	34	34	35	35

Tabelle A43: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS3 (w/z = 1,0) – Spurenelemente

Eluat-Nr.	Antimon		Arsen		Barium		Blei		Cadmium		Chrom		Kobalt	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	µg/l													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	<1	<1	<1	<1	23	31	<1	<1	<0,3	<0,3	3	4	<5	<5
2	<1	<1	<1	<1	16	15	<1	<1	<0,3	<0,3	3	4	<5	<5
3	<1	<1	<1	<1	23	23	<1	<1	<0,3	<0,3	3	3	<5	<5
4	<1	<1	<1	<1	27	27	<1	<1	<0,3	<0,3	3	3	<5	<5
5	<1	<1	<1	<1	26	27	<1	<1	<0,3	<0,3	3	3	<5	<5
6	<1	<1	<1	<1	23	24	<1	<1	<0,3	<0,3	3	3	<5	<5
7	<1	<1	<1	<1	20	20	<1	<1	<0,3	<0,3	3	3	<5	<5
8	<1	<1	<1	<1	19	19	<1	<1	<0,3	<0,3	3	2	<5	<5
9	<1	<1	<1	<1	47	47	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
10	<1	<1	<1	<1	43	46	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
11	<1	<1	<1	<1	33	36	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
12	<1	<1	<1	<1	30	33	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
13	<1	<1	<1	<1	29	31	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
14	<1	<1	<1	<1	26	28	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
15	<1	<1	<1	<1	32	34	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
16	<1	<1	<1	<1	27	30	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
17	<1	<1	<1	<1	27	29	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
18	<1	<1	<1	<1	26	27	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
19	<1	<1	<1	<1	27	27	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
20	<1	<1	<1	<1	28	28	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
21	<1	<1	<1	<1	26	26	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5

Tabelle A43: Fortsetzung

Eluat-Nr.	Kupfer		Molybdän		Nickel		Selen		Thallium		Vanadium		Zink	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	µg/l													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	4	<5	<5
2	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	4	5	<5	<5
3	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	3	<5	<5
4	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	2	<5	<5
5	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	2	<5	<5
6	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	2	<5	<5
7	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	2	<5	<5
8	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	2	<5	<5
9	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	3	2	<5	<5
10	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	2	<1	<5	<5
11	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
12	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
13	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
14	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
15	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
16	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
17	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
18	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
19	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
20	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
21	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5

Tabelle A44: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS4 (w/z = 1,0) – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	11,8	11,5	2507	2002	79,3	59,6
1b	0,04	11,5	10,6	1335	734	29,4	15,4
2a	0,06	10,3	9,8	667	581	13,2	6,8
2b	0,08	10,0	9,6	612	569	8,1	5,6
3a	0,10	9,7	9,5	570	559	7,5	5,2
3b	0,13	9,6	9,4	543	551	8,1	4,8
4a	0,15	9,5	9,4	540	547	8,3	4,7
4b	0,17	9,5	9,4	538	538	7,9	4,8
5a	0,19	9,6	9,3	545	536	7,5	4,6
5b	0,21	9,4	9,3	542	533	7,2	4,6
6a	0,23	9,4	9,3	525	526	6,7	4,5
6b	0,25	9,5	9,3	530	524	6,4	4,3
7a	0,27	9,5	9,4	534	522	5,8	4,2
7b	0,29	9,4	9,3	523	518	5,6	4,1
8a	0,31	9,3	9,3	523	516	5,0	4,0
8b	0,33	9,4	9,3	518	514	4,7	3,8
9	1,02	8,9	8,8	530	530	3,1	3,1
10	2,02	8,7	8,5	528	527	2,9	2,8
11	3,02	8,6	8,4	523	521	3,0	2,8
12	4,02	8,2	8,5	524	521	2,8	2,8
13	7,02	8,5	8,4	518	520	2,8	2,7
14	8,02	8,5	8,4	520	521	2,8	2,8
15	9,02	8,4	8,4	520	520	2,8	2,7
16	10,02	8,4	8,4	508	507	2,7	2,7
17	11,02	8,2	8,2	521	520	2,8	2,7
18	14,02	8,5	8,5	520	516	2,7	2,7
19	15,02	8,2	8,3	523	522	2,5	2,6
20	16,02	8,4	8,4	521	522	2,6	2,6
21	17,02	8,3	8,3	518	518	2,7	2,7

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A45: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS4 (w/z = 1,0) – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	37,0	32,0	237,6	179,0	36	34	342	255
2	24,0	23,0	57,0	36,6	31	30	102	80
3	23,0	22,0	40,3	26,0	31	30	79	67
4	23,0	22,0	37,6	27,5	31	29	74	64
5	23,0	22,0	32,0	26,1	30	30	70	62
6	22,0	21,0	29,1	24,5	30	30	63	58
7	22,0	22,0	30,1	22,9	31	30	58	54
8	22,0	21,0	25,8	21,7	30	30	54	51
9	22,0	21,0	10,8	10,7	30	30	51	50
10	21,0	21,0	6,9	6,3	28	29	49	47
11	21,0	21,0	6,1	5,5	28	29	48	47
12	21,0	20,0	5,8	5,3	28	28	49	50
13	21,0	20,0	5,3	4,8	28	28	49	48
14	21,0	20,0	5,2	5,1	29	28	48	50
15	20,0	20,0	4,8	4,7	28	29	53	50
16	20,0	19,0	4,5	4,5	27	27	51	48
17	20,0	20,0	4,3	4,5	28	28	51	50
18	20,0	20,0	4,5	4,3	28	28	50	49
19	19,0	19,0	4,7	4,5	28	28	49	51
20	20,0	20,0	4,6	4,5	30	30	49	50
21	20,0	19,0	4,5	4,4	29	30	49	50

Tabelle A46: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS4 (w/z = 1,0) – Spurenelemente

Eluat-Nr.	Antimon		Arsen		Barium		Blei		Cadmium		Chrom		Kobalt	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	µg/l													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	<1	<1	<1	<1	78	52	<1	<1	<0,3	<0,3	112	96	<5	<5
2	<1	<1	<1	<1	20	25	<1	<1	<0,3	<0,3	7	7	<5	<5
3	<1	<1	<1	<1	22	29	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
4	<1	<1	<1	<1	25	31	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
5	<1	<1	<1	<1	29	33	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
6	<1	<1	<1	<1	33	36	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
7	<1	<1	<1	<1	39	40	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
8	<1	<1	<1	<1	49	46	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
9	<1	<1	<1	<1	46	43	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
10	<1	<1	<1	<1	38	33	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
11	<1	<1	<1	<1	32	29	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
12	<1	<1	<1	<1	29	28	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
13	<1	<1	<1	<1	28	27	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
14	<1	<1	<1	<1	26	26	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
15	<1	<1	<1	<1	26	26	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
16	<1	<1	<1	<1	25	25	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
17	<1	<1	<1	<1	25	25	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
18	<1	<1	<1	<1	27	26	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
19	<1	<1	<1	<1	26	26	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
20	<1	<1	<1	<1	27	27	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
21	<1	<1	<1	<1	26	25	<1	<1	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5

Tabelle A46: Fortsetzung

Eluat-Nr.	Kupfer		Molybdän		Nickel		Selen		Thallium		Vanadium		Zink	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	µg/l													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	21	22	150	120	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	6	6	<5	<5
2	6	6	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
3	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
4	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
5	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
6	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
7	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
8	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
9	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
10	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
11	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
12	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
13	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
14	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
15	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
16	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
17	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
18	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
19	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
20	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
21	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5

Tabelle A47: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS2 (w/z = 0,69) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit) – allgemeine Parameter¹⁾

Eluat-Nr.	Entnahmezeitpunkt	pH-Wert		elektrische Leitfähigkeit		TOC	
		Säule A	Säule B	Säule A	Säule B	Säule A	Säule B
-	d	-	-	µS/cm		mg/l	
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	0,02	11,1	11,0	1678	1435	13,1	8,3
1b	0,04	11,2	11,3	1093	1064	5,9	4,6
2a	0,06	11,0	11,2	704	880	2,8	4,9
2b	0,08	10,6	10,3	548	538	2,7	4,4
3a	0,10	10,1	9,7	504	505	2,3	3,0
3b	0,13	9,7	9,4	499	506	2,3	2,6
4a	0,15	9,6	9,3	490	501	2,4	2,4
4b	0,17	9,4	9,2	483	493	2,4	2,4
5a	0,19	9,3	9,0	487	501	2,4	2,4
5b	0,21	9,3	9,0	488	500	2,3	2,3
6a	0,23	9,2	8,9	477	491	2,3	2,3
6b	0,25	9,2	9,0	464	475	2,1	2,1
7a	0,27	9,2	9,0	455	465	2,1	2,1
7b	0,29	9,2	9,0	447	457	2,0	2,0
8a	0,31	9,2	9,0	440	451	1,9	1,9
8b	0,33	9,3	9,0	425	437	1,7	1,7
9	1,02	8,8	8,8	460	437	1,7	2,0
10	2,02	8,6	8,6	454	445	2,1	1,9
11	5,02	8,4	8,6	480	451	2,3	2,1
12	6,02	8,2	8,4	490	477	2,3	2,2
13	7,02	8,4	8,4	451	450	1,9	1,9
14	8,02	8,2	8,4	497	475	2,6	2,2
15	9,02	8,1	8,3	506	503	2,8	2,8
16	12,02	8,1	8,5	510	485	2,8	2,5
17	13,02	8,2	8,4	517	514	2,9	2,8
18	14,02	8,4	8,5	511	512	2,8	2,9
19	15,02	8,3	8,5	513	508	2,8	2,8
20	16,02	8,4	8,5	515	507	2,8	2,8
21	19,02	8,3	8,5	512	504	2,8	2,8

1) Bei den Eluaten 1a bis 8b wurden nach der Bestimmung von pH-Wert, Leitfähigkeit und TOC jeweils die a- und b-Eluate vereint, um den Analysenaufwand zu reduzieren.

Tabelle A48: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS2 (w/z = 0,69) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit) – Natrium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatkonzentrationen

Eluat-Nr.	Natrium		Kalium		Chlorid		Sulfat	
	a	b	a	b	a	b	a	b
-	mg/l							
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	53,0	40,0	134,2	99,2	60	47	100	85
2	30,0	35,0	42,0	75,5	35	44	94	93
3	26,0	25,0	24,5	26,2	30	31	70	65
4	23,0	23,0	16,1	15,1	30	31	58	56
5	22,0	21,0	13,6	11,3	31	30	54	53
6	22,0	23,0	11,5	7,9	30	31	50	47
7	23,0	22,0	10,3	8,3	31	31	48	52
8	24,0	23,0	9,0	6,1	32	30	47	49
9	23,0	24,0	4,9	3,9	30	31	48	43
10	23,0	23,0	3,8	2,9	31	32	44	41
11	21,0	23,0	3,3	2,4	30	31	48	45
12	21,0	22,0	2,9	2,2	31	31	51	48
13	24,0	24,0	1,5	2,7	34	34	49	44
14	21,0	23,0	1,6	1,7	32	32	55	52
15	20,0	20,0	2,9	2,4	31	30	53	60
16	20,0	21,0	3,0	2,3	32	31	52	56
17	20,0	20,0	3,3	2,4	31	31	58	58
18	20,0	20,0	1,5	2,3	31	31	51	61
19	20,0	20,0	1,8	2,5	30	30	52	59
20	19,0	19,0	3,7	3,7	29	28	49	47
21	19,0	19,0	3,2	3,3	30	29	50	48

Tabelle A49: Ergebnisse des inversen Säulenversuchs an der Zementsuspension ZS2 (w/z = 0,69) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit) – Spurenelemente

Eluat-Nr.	Antimon		Arsen		Barium		Blei		Cadmium		Chrom		Kobalt	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	µg/l													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	<1	<1	<1	<1	39	26	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
2	<1	<1	<1	<1	43	41	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
3	<1	<1	<1	<1	37	52	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
4	<1	<1	<1	<1	51	54	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
5	<1	<1	<1	<1	50	60	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
6	<1	<1	<1	<1	50	58	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
7	<1	<1	<1	<1	40	57	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
8	<1	<1	<1	<1	50	53	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
9	<1	<1	<1	<1	44	46	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
10	<1	<1	<1	<1	36	35	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
11	<1	<1	<1	<1	26	25	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
12	<1	<1	<1	<1	31	29	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
13	<1	<1	<1	<1	26	26	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
14	<1	<1	<1	<1	30	29	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
15	<1	<1	<1	<1	25	25	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
16	<1	<1	<1	<1	27	25	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
17	<1	<1	<1	<1	30	30	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
18	<1	<1	<1	<1	26	26	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
19	<1	<1	<1	<1	25	26	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
20	<1	<1	<1	<1	26	26	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5
21	<1	<1	<1	<1	26	25	<5	<5	<0,3	<0,3	<1	<1	<5	<5

Tabelle A49: Fortsetzung

Eluat-Nr.	Kupfer		Molybdän		Nickel		Selen		Thallium		Vanadium		Zink	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
-	µg/l													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	11	12	<10	<10	<5	<5	<1	<1	1,1	0,8	4	2	<5	<5
2	13	12	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
3	7	5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
4	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
5	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
6	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
7	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
8	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
9	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
10	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
11	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
12	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
13	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
14	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
15	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
16	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
17	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
18	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
19	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
20	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5
21	<5	<5	<10	<10	<5	<5	<1	<1	<0,8	<0,8	<1	<1	<5	<5

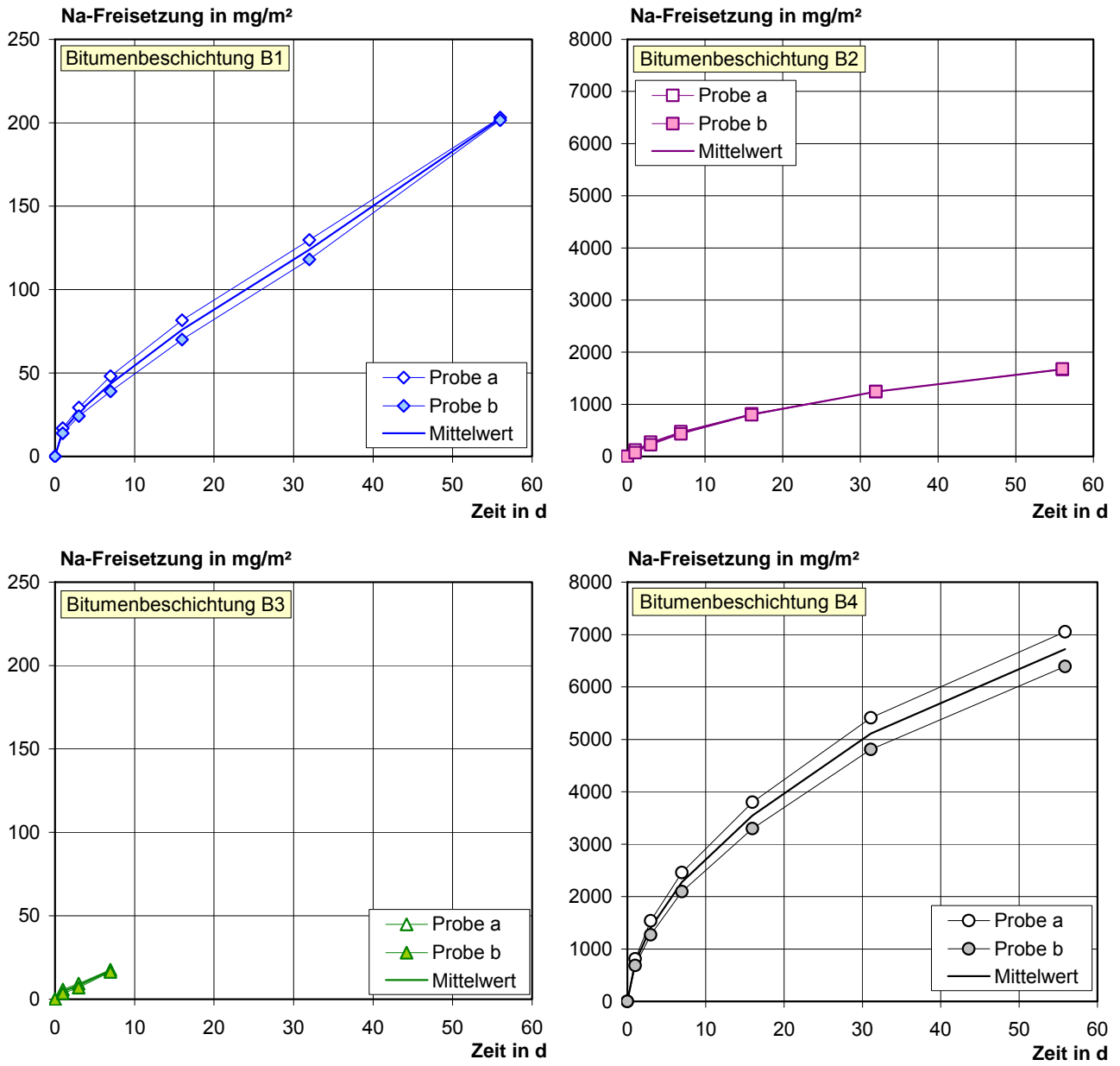


Bild B1: Natriumfreisetzung im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (links: einkomponentige Systeme; rechts: zweikomponentige Systeme)

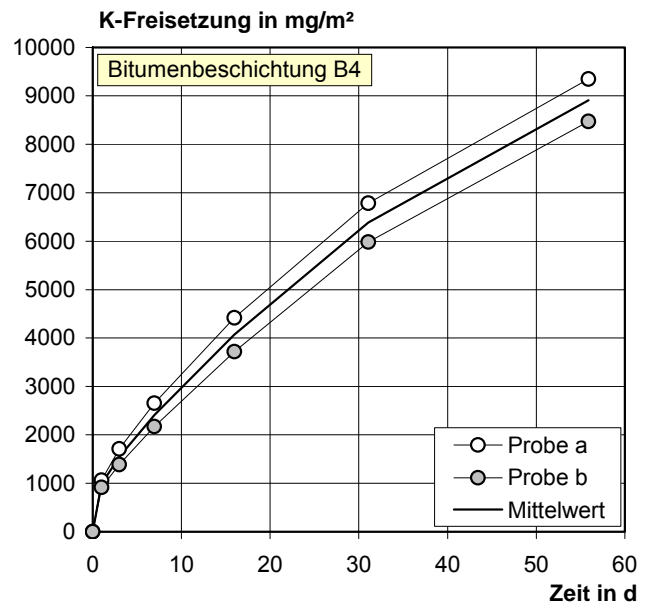
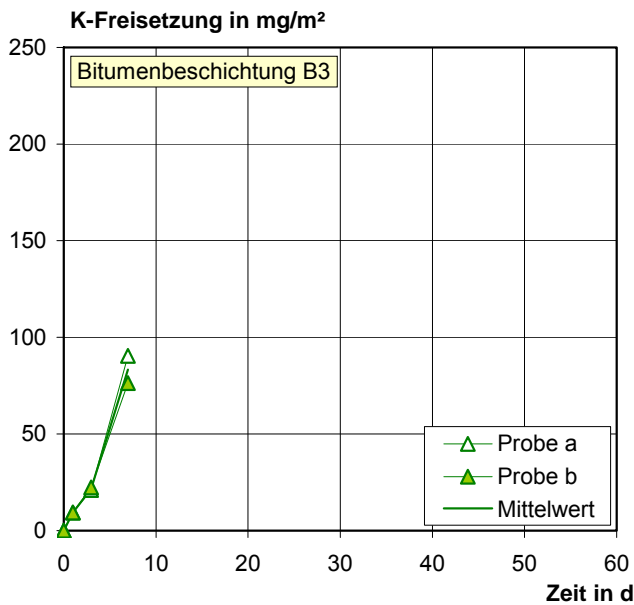
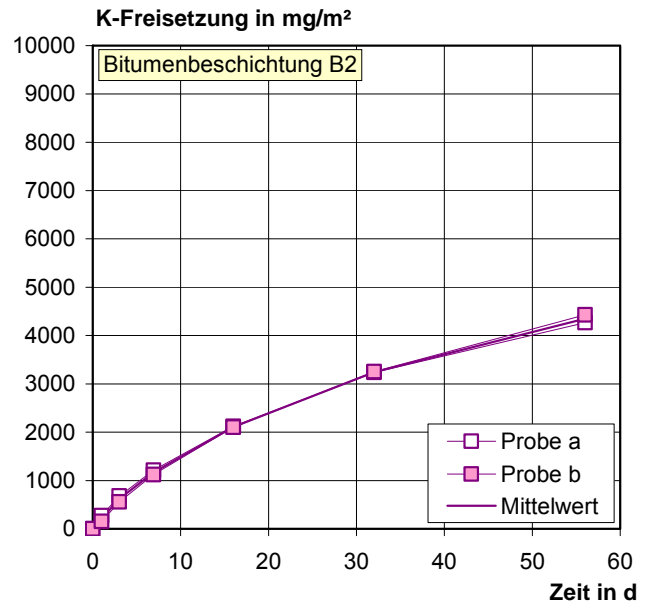
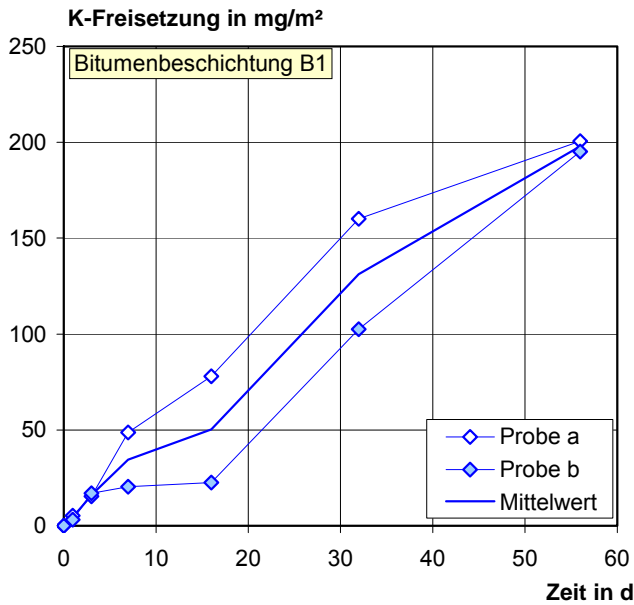


Bild B2: Kaliumfreisetzung im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (links: einkomponentige Systeme; rechts: zweikomponentige Systeme)

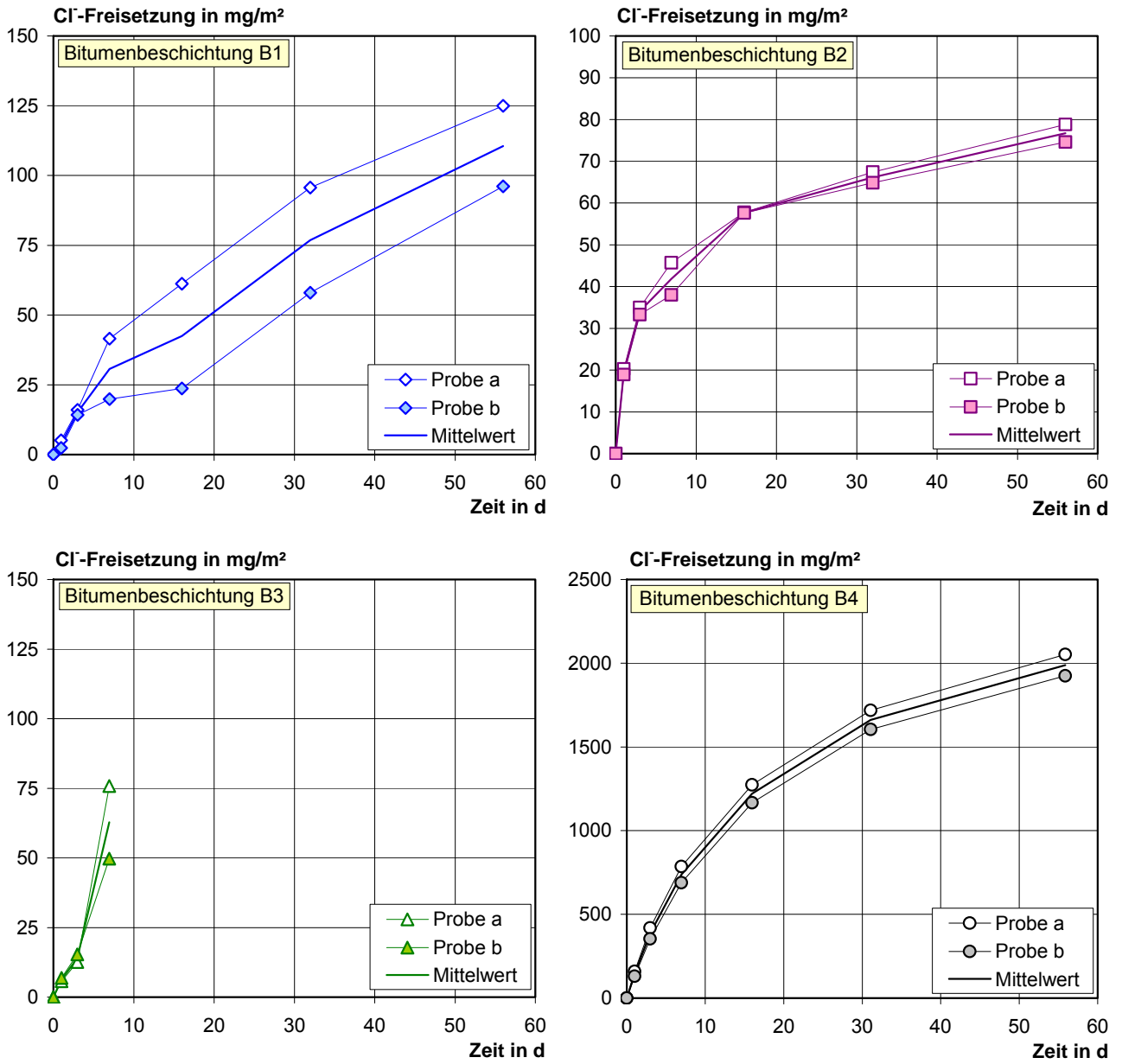


Bild B3: Chloridfreisetzung im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (links: einkomponentige Systeme; rechts: zweikomponentige Systeme)

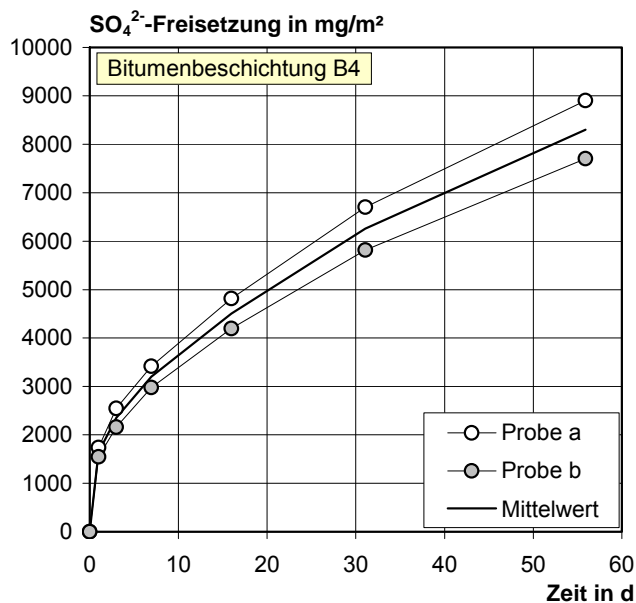
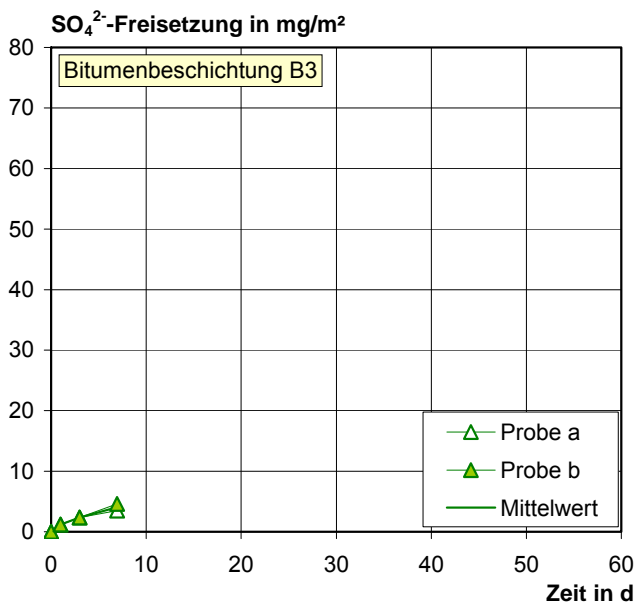
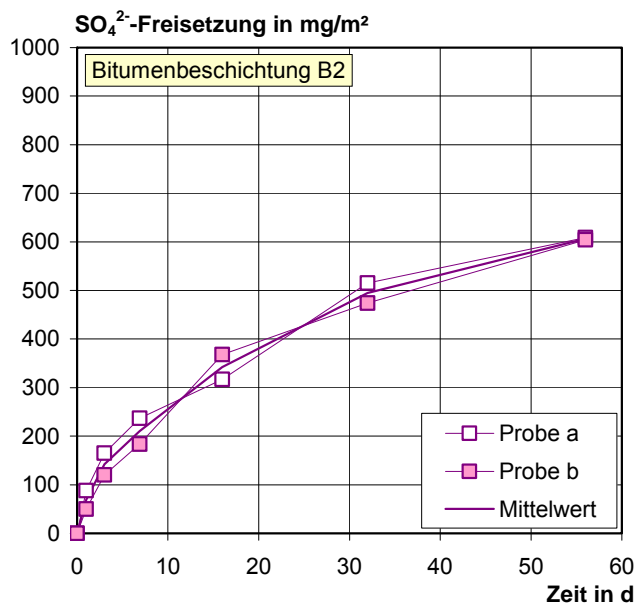
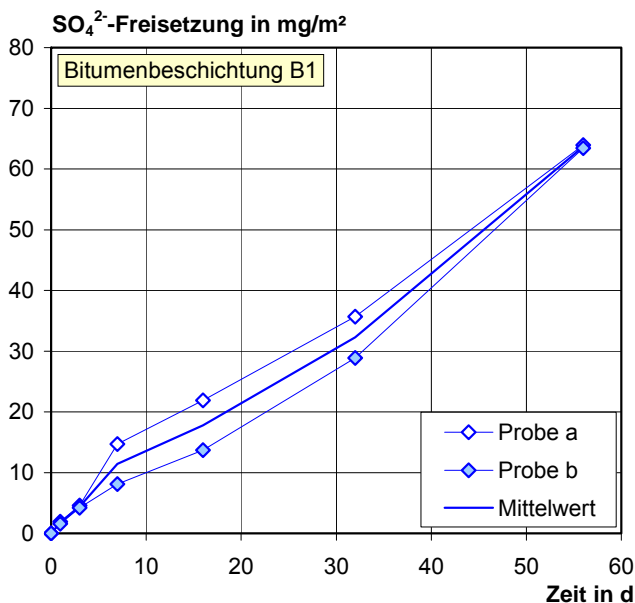


Bild B4: Sulfatfreisetzung im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (links: einkomponentige Systeme; rechts: zweikomponentige Systeme)

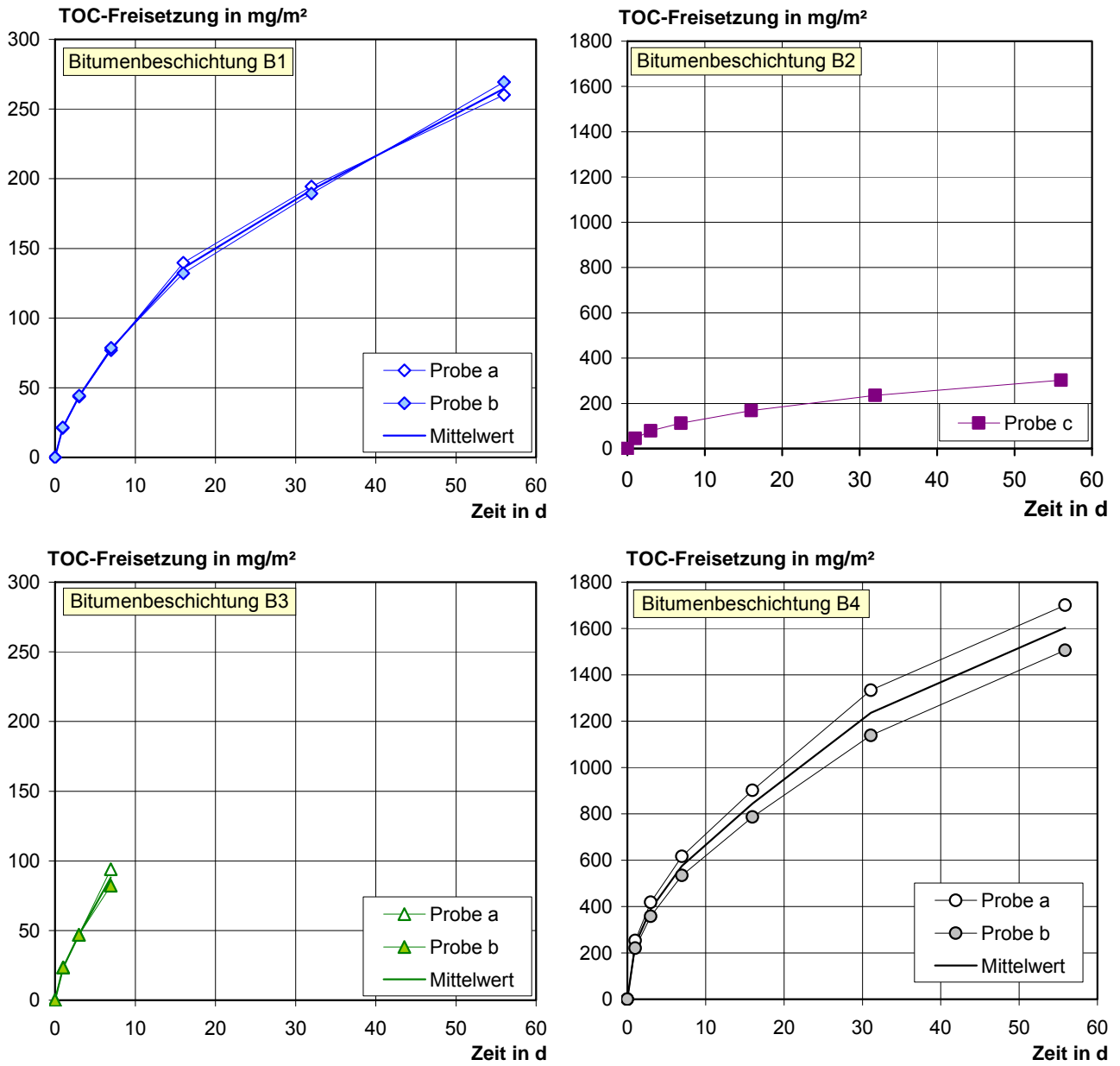


Bild B5: TOC-Freisetzung im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (links: einkomponentige Systeme; rechts: zweikomponentige Systeme)

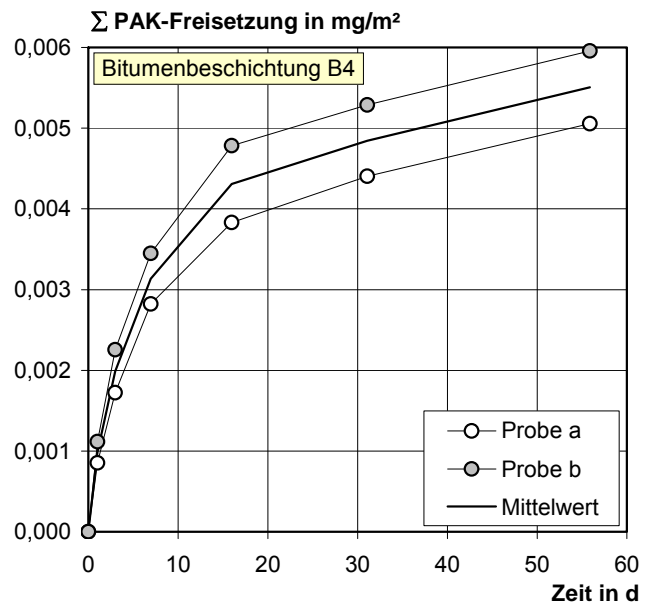
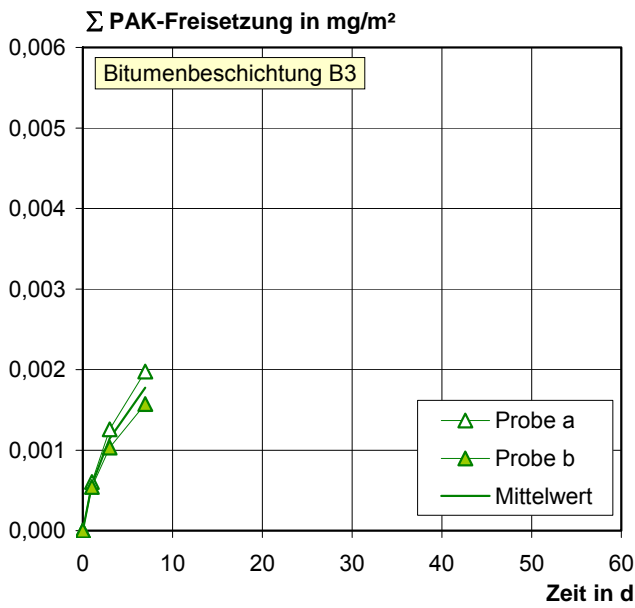
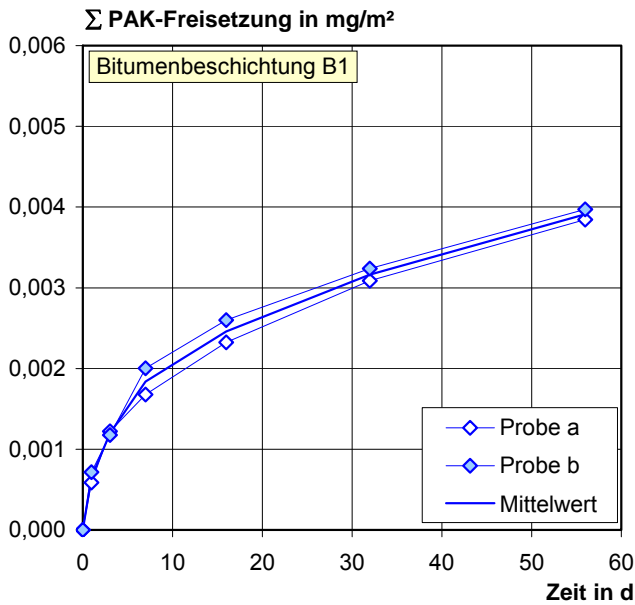


Bild B6: Σ PAK-Freisetzung im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (links: einkomponentige Systeme; rechts: zweikomponentige Systeme)

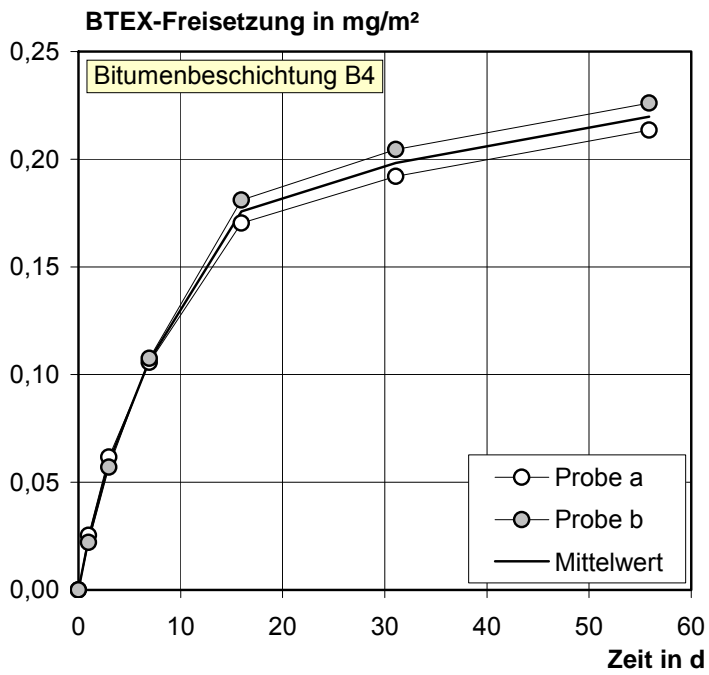


Bild B7: BTEX-Freisetzung im Standtest an Bitumenbeschichtung B4

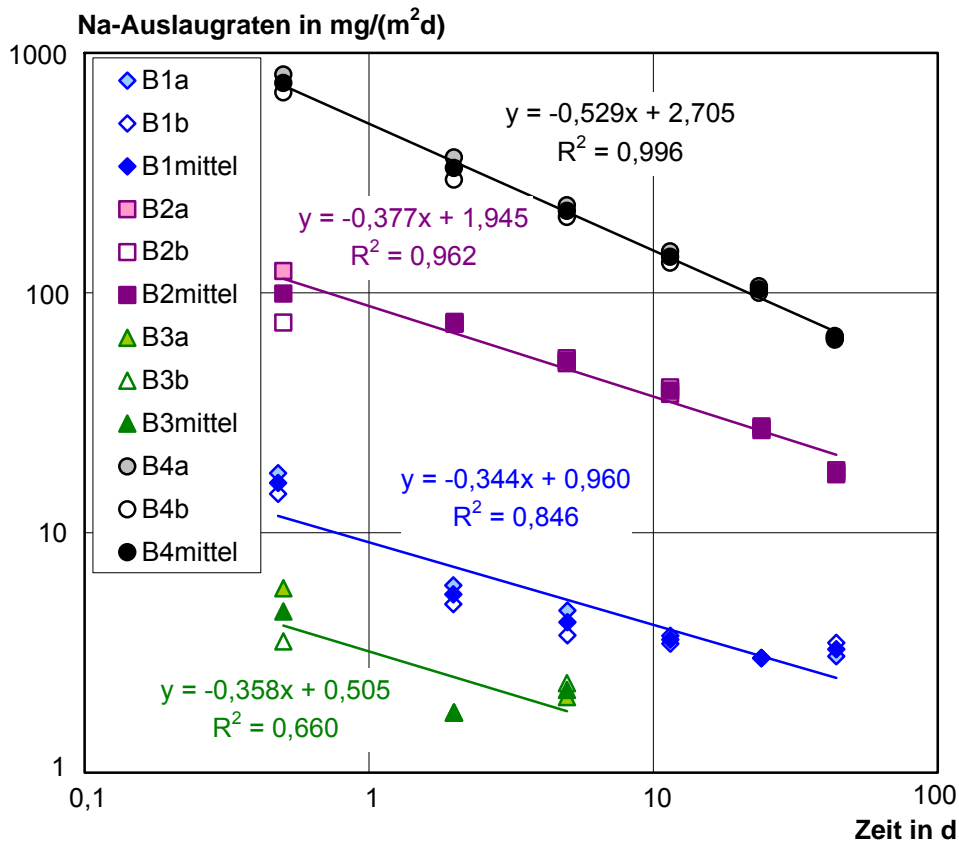


Bild B8: Natriumauslaugraten im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (Ausgleichsgeraden in doppeltlogarithmischem Maßstab)

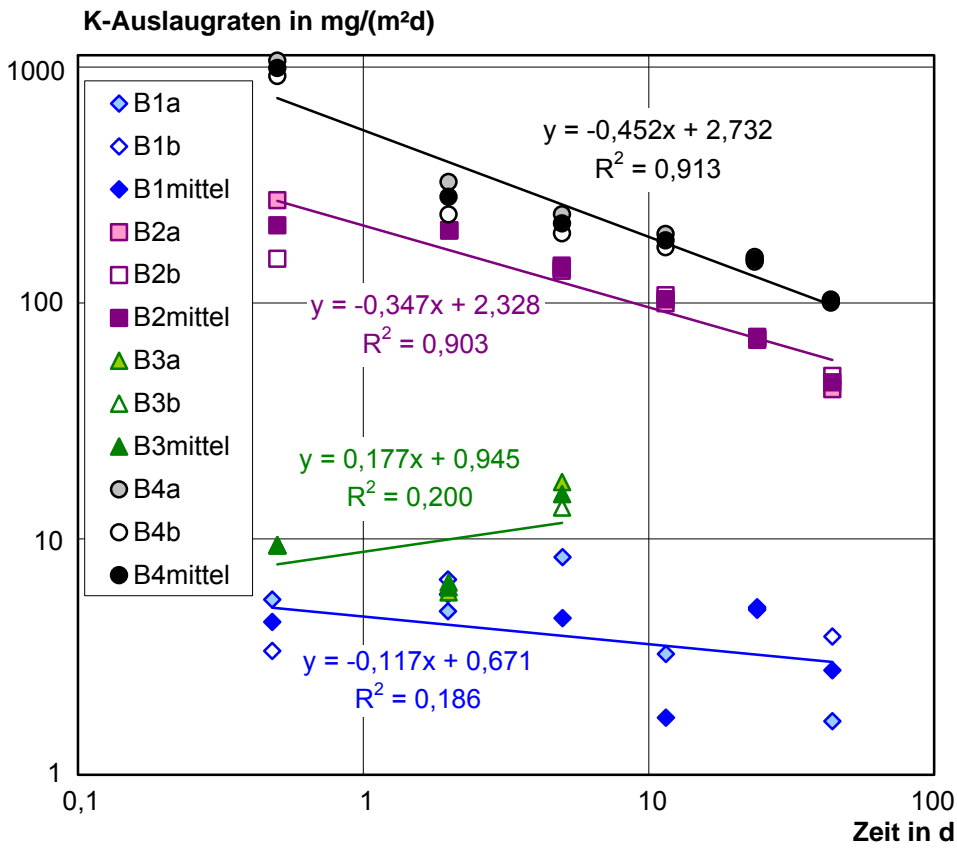


Bild B9: Kaliumauslaugraten im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (Ausgleichsgeraden in doppeltlogarithmischem Maßstab)

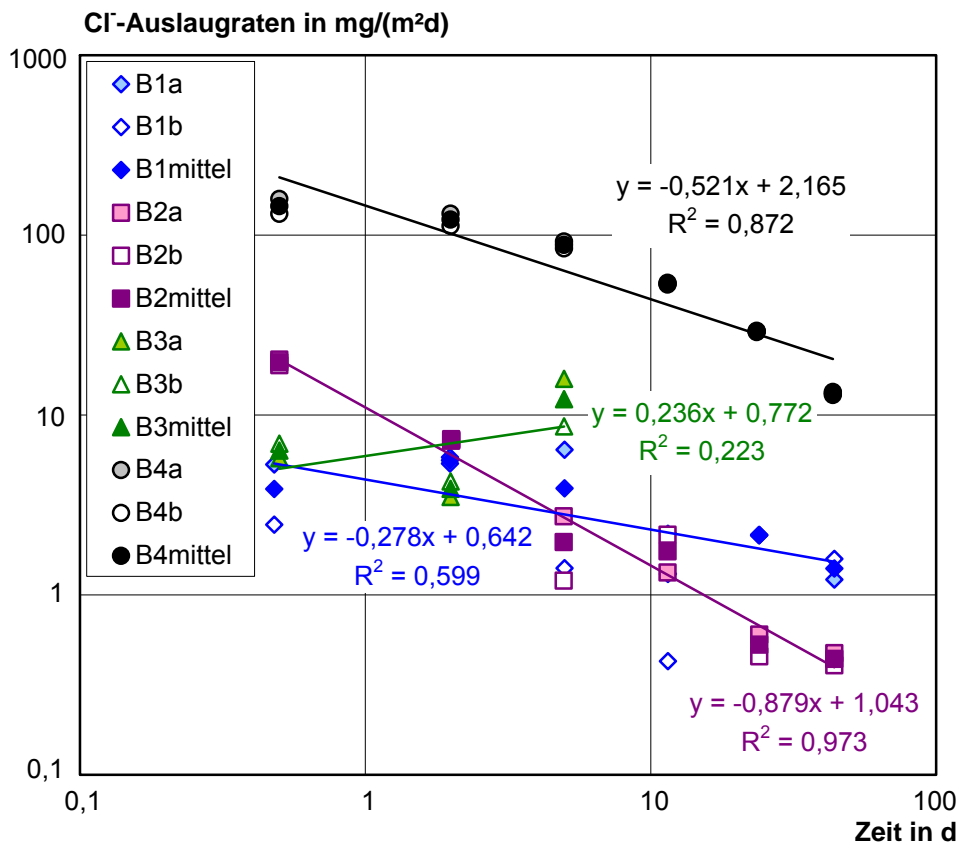


Bild B10: Chloridauslaugraten im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (Ausgleichsgeraden in doppeltlogarithmischem Maßstab)

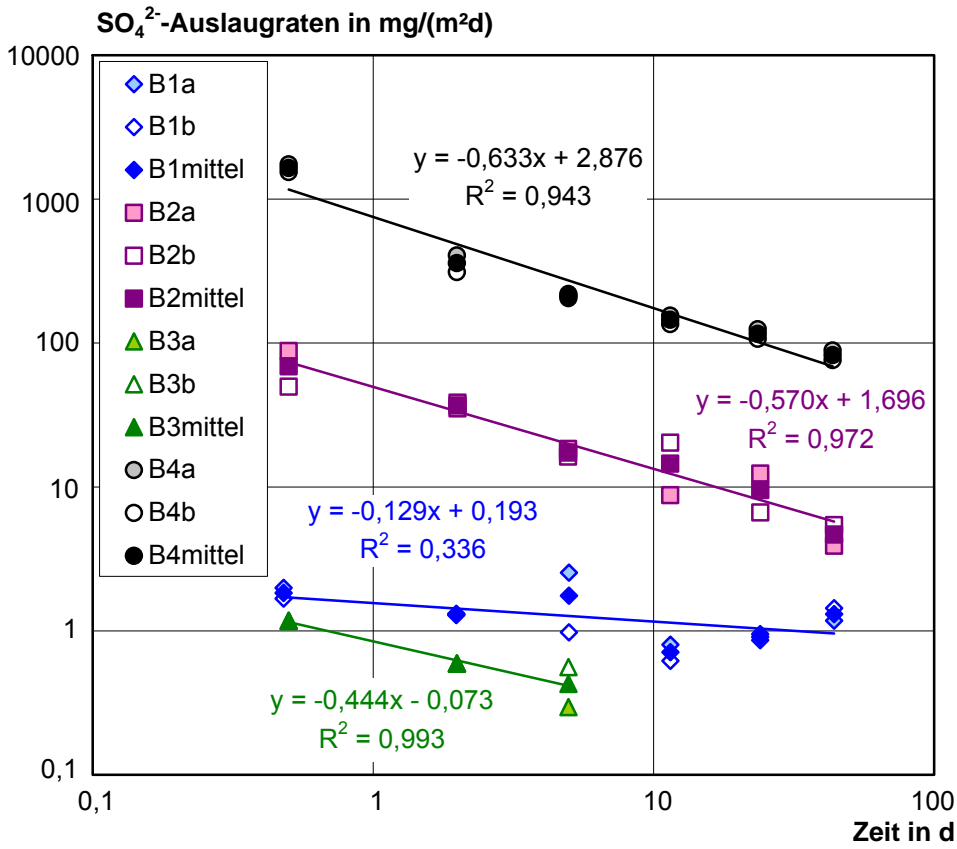


Bild B11: Sulfatauslaugraten im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (Ausgleichsgeraden in doppeltlogarithmischem Maßstab)

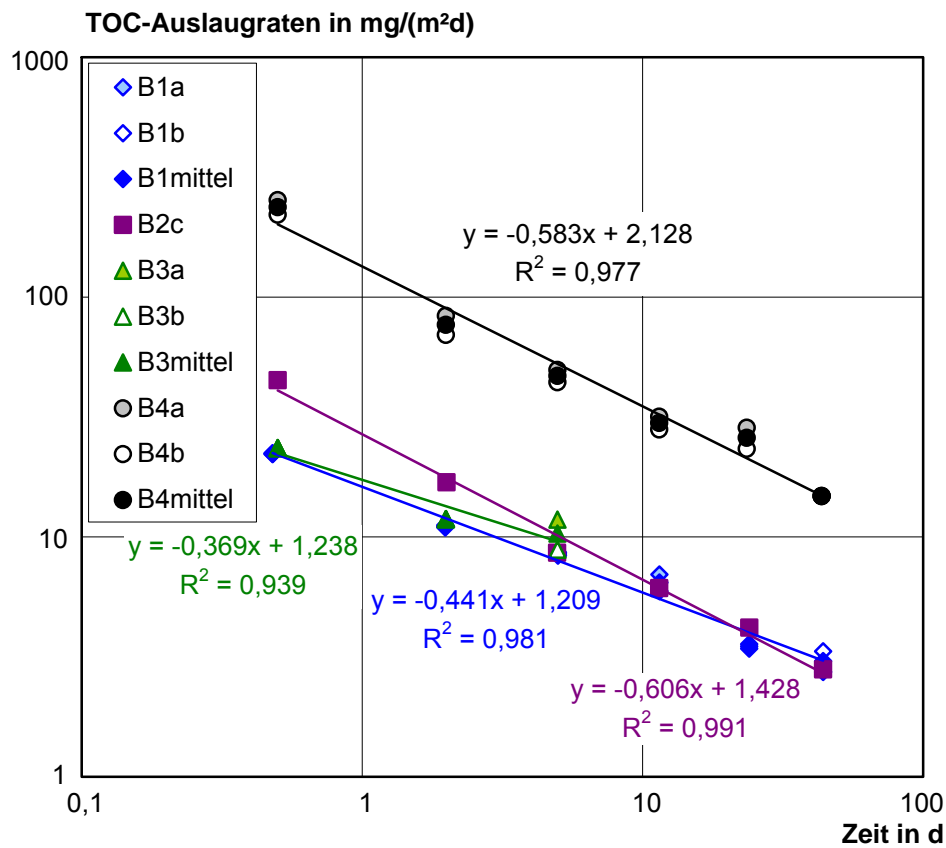


Bild B12: TOC-Auslaugraten im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (Ausgleichsgeraden in doppeltlogarithmischem Maßstab)

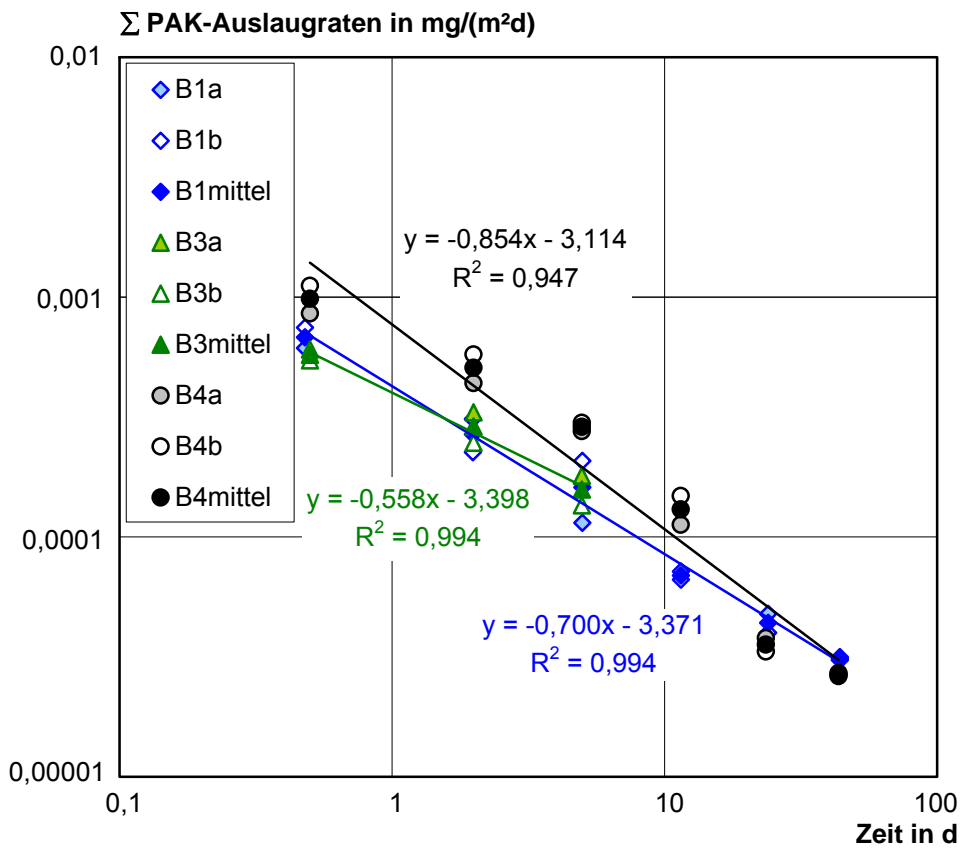


Bild B13: Σ PAK-Auslaugraten im Standtest an den Bitumenbeschichtungen (Ausgleichsgeraden in doppeltlogarithmischem Maßstab)

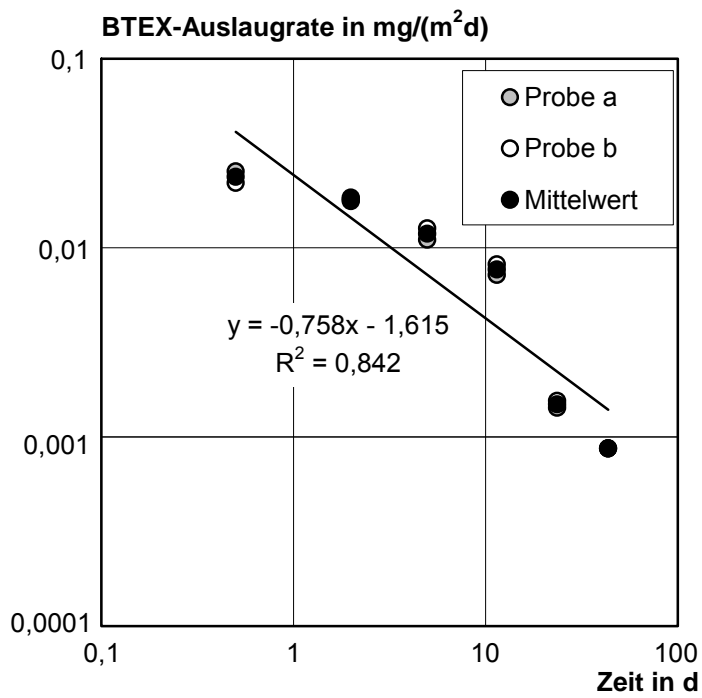


Bild B14: BTEX-Auslaugraten im Standtest an Bitumenbeschichtung B4 (Ausgleichsgerade in doppeltlogarithmischem Maßstab)

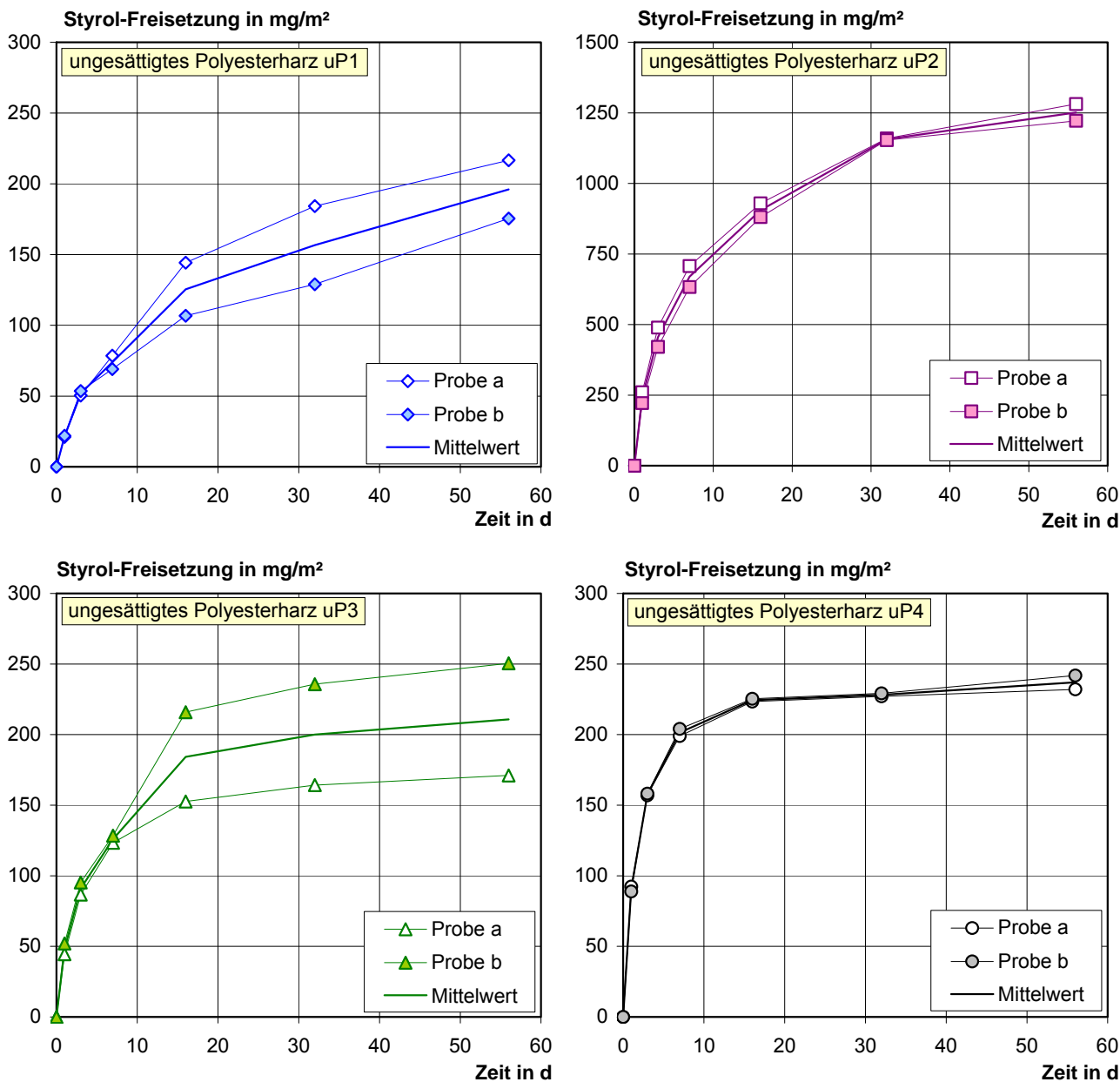


Bild B15: Styrolfreisetzungen im Standtest an den ungesättigten Polyesterharzen

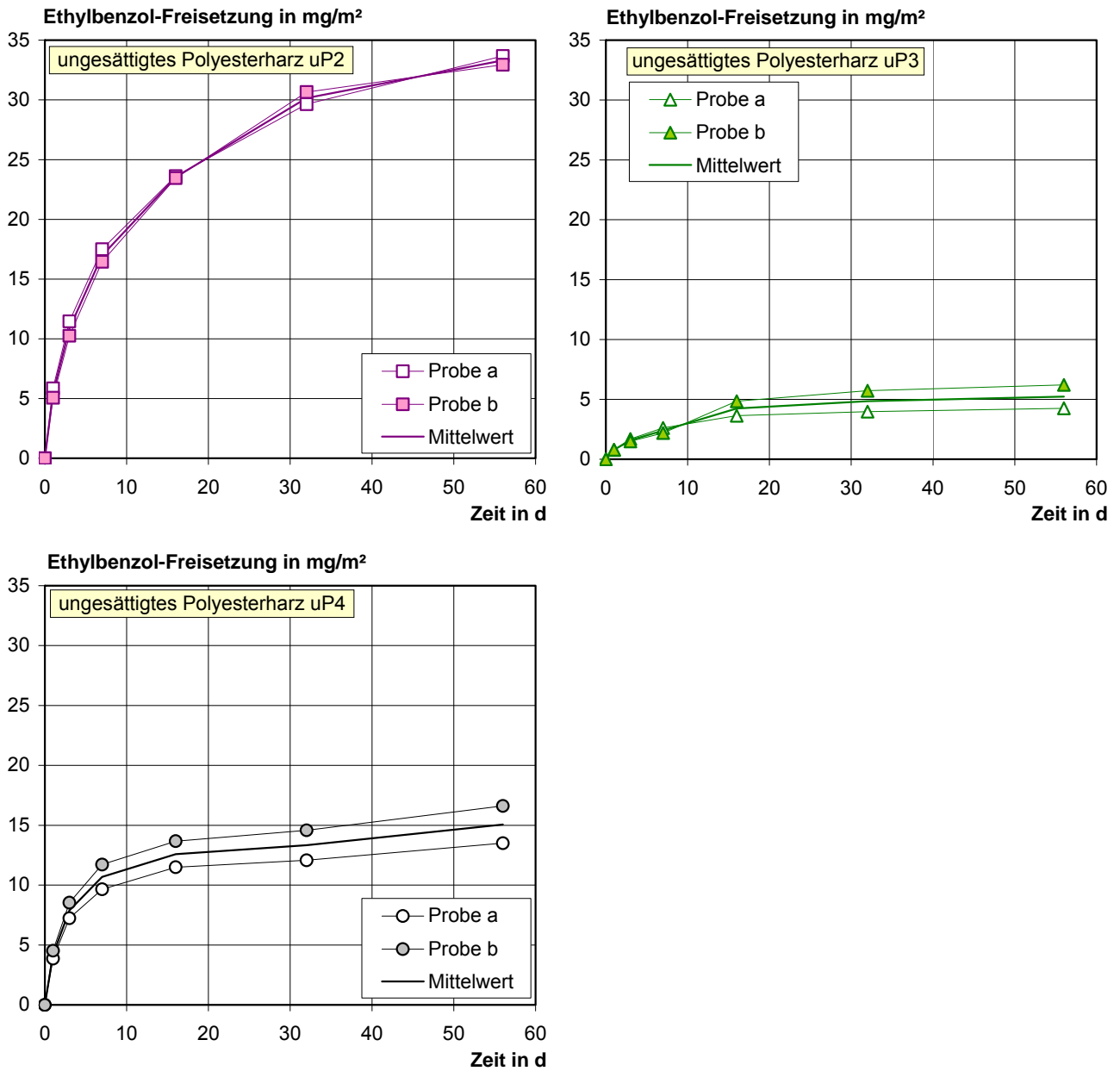


Bild B16: Ethylbenzolfreisetzungen im Standtest an den ungesättigten Polyesterharzen

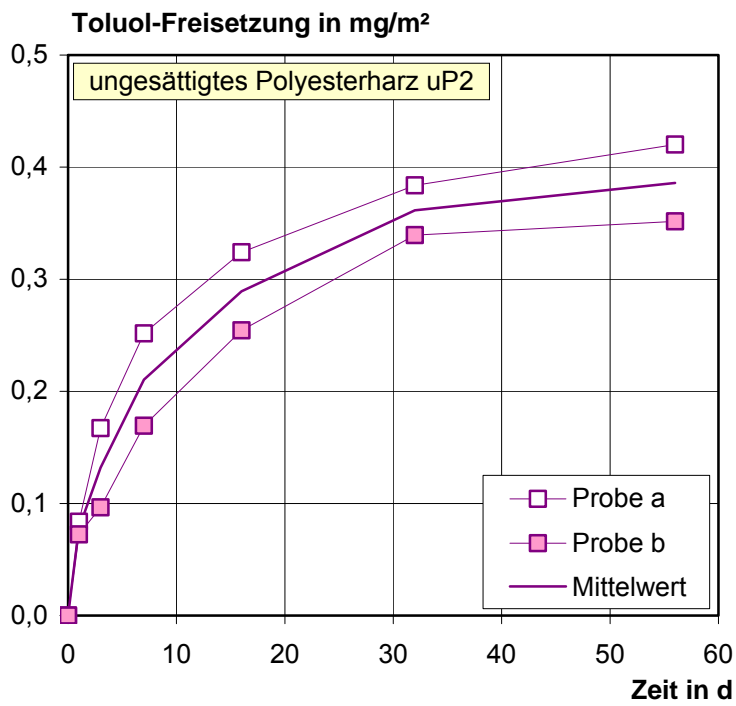


Bild B17: Toluolfreisetzungen im Standtest am ungesättigten Polyesterharz uP2

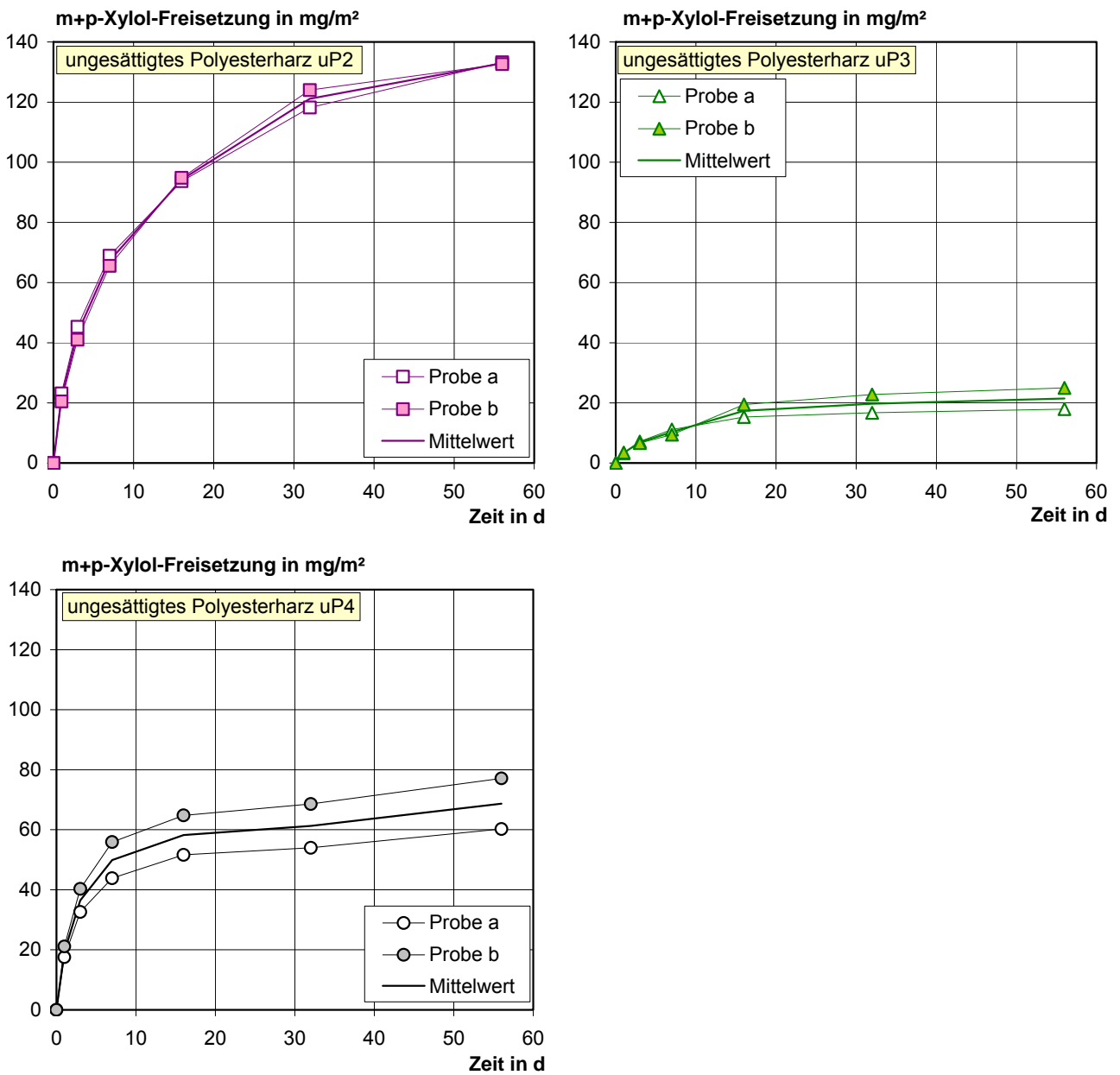


Bild B18: m+p-Xylolefreisetzungen im Standtest an den ungesättigten Polyesterharzen

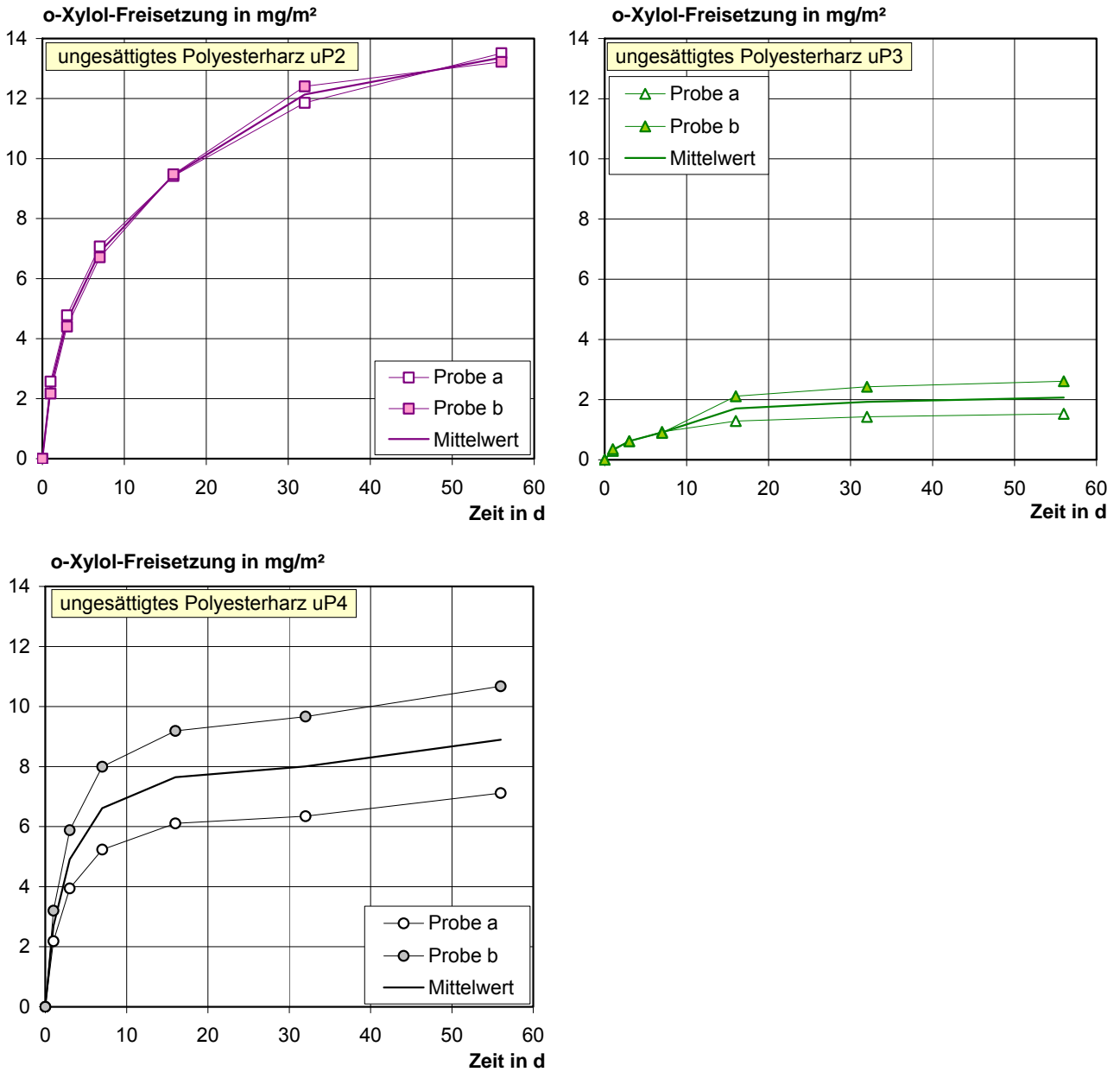


Bild B19: o-Xylolefreisetzungen im Standtest an den ungesättigten Polyesterharzen

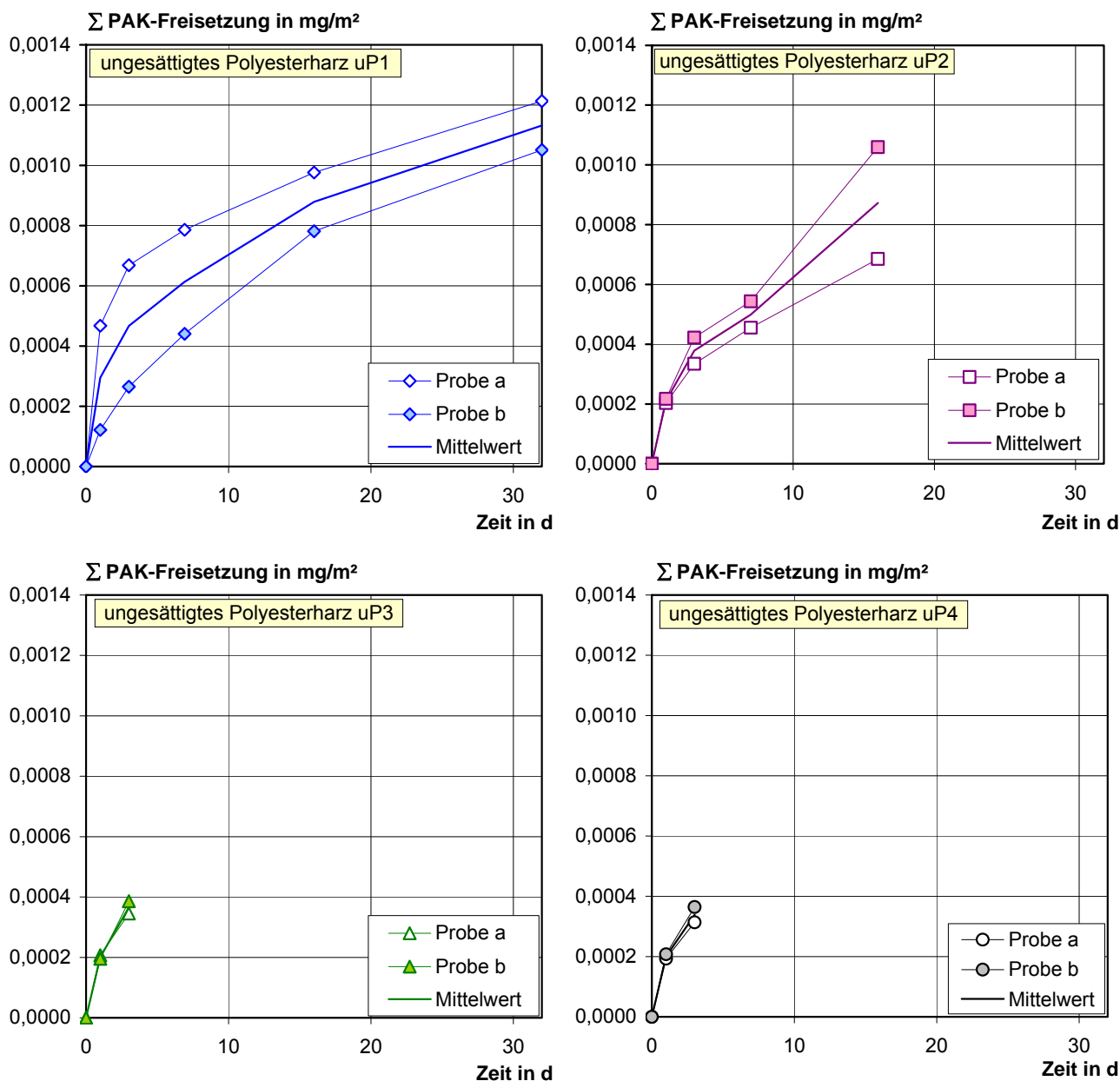


Bild B20: Σ PAK-Freisetzungen im Standtest an den ungesättigten Polyesterharzen (soweit nachweisbare Konzentrationen vorlagen)

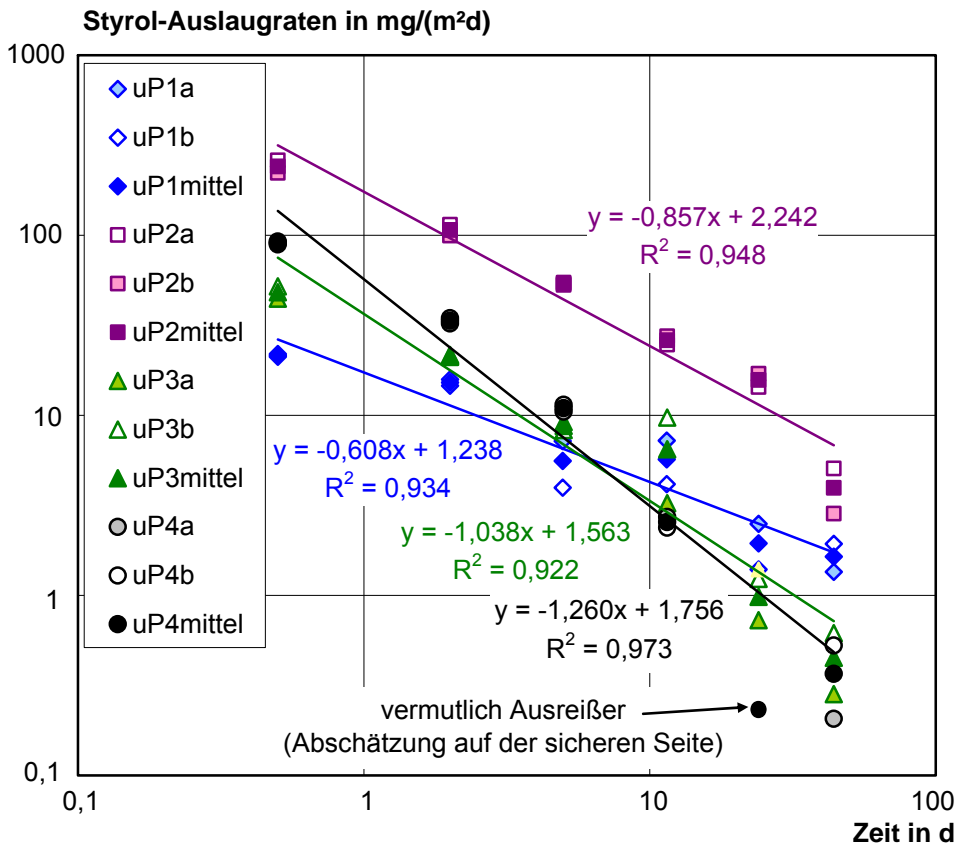


Bild B21: Styrol-Auslaugraten im Standtest an den ungesättigten Polyesterharzen (Ausgleichsgeraden in doppeltlogarithmischem Maßstab)

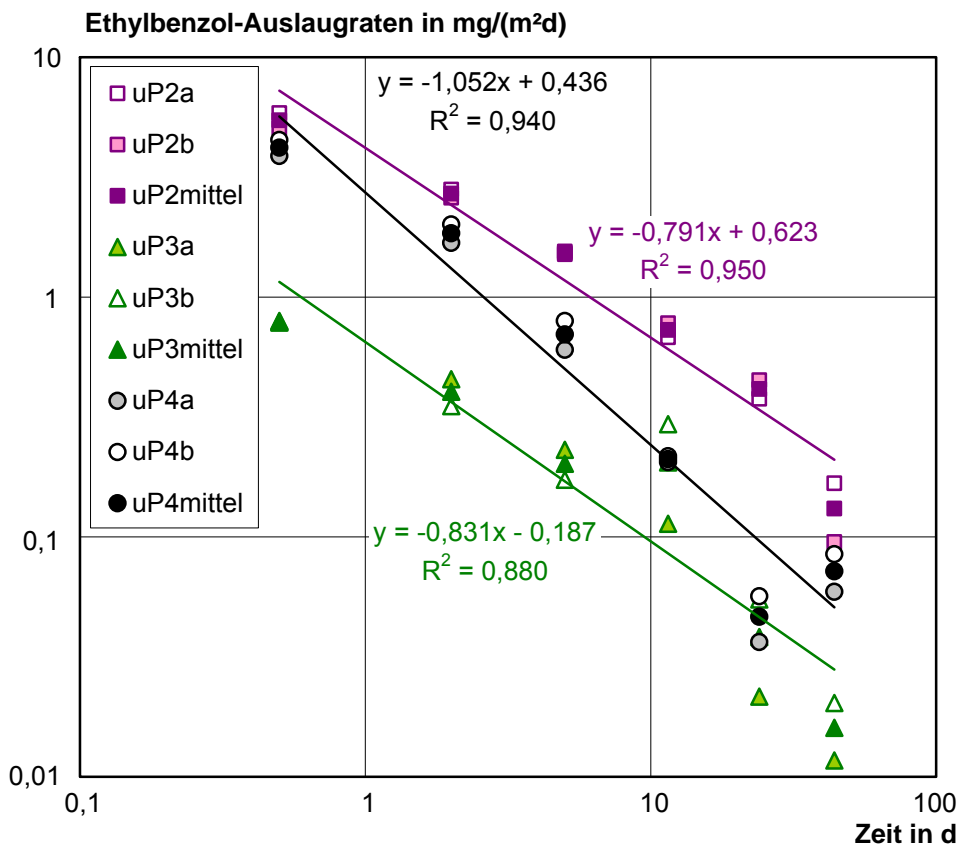


Bild B22: Ethylbenzol-Auslaugraten im Standtest an den ungesättigten Polyesterharzen (Ausgleichsgeraden in doppeltlogarithmischem Maßstab)

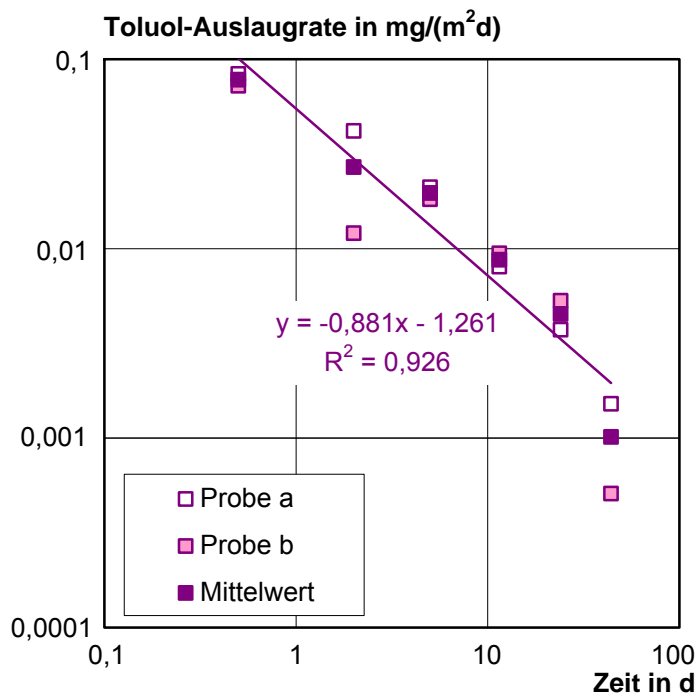


Bild B23: Toluol-Auslaugrate im Standtest am ungesättigten Polyesterharz uP2 (Ausgleichsgerade in doppeltlogarithmischem Maßstab)

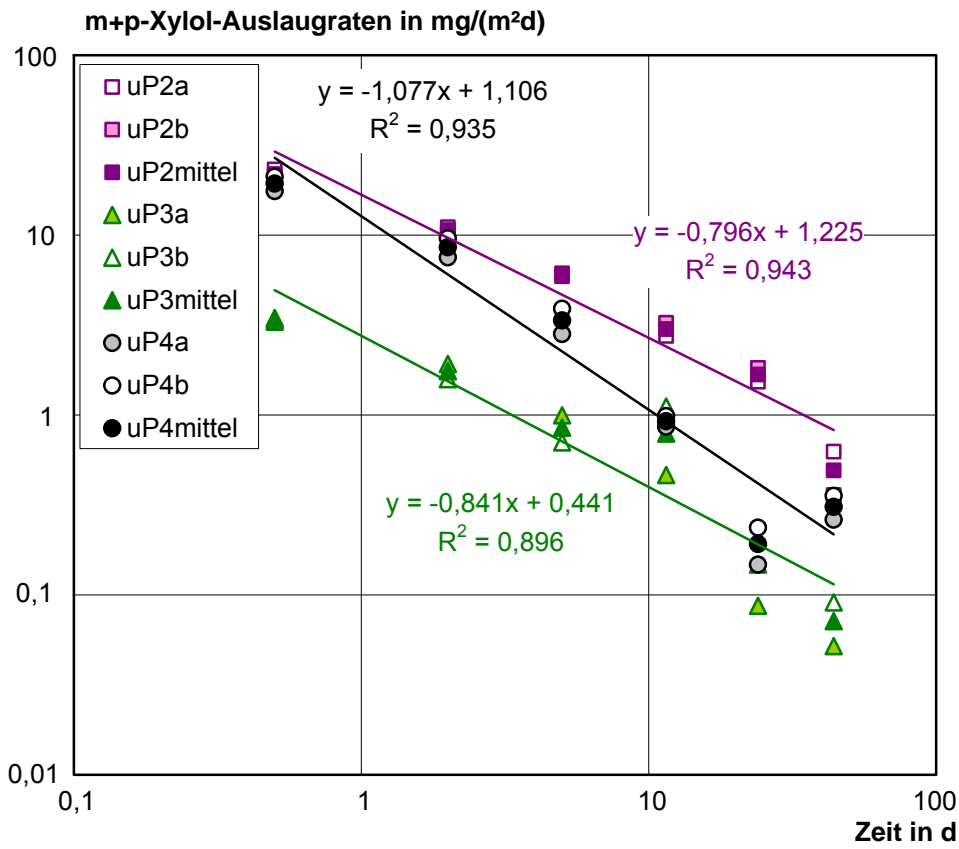


Bild B24: m+p-Xylol-Auslaugraten im Standtest an den ungesättigten Polyesterharzen (Ausgleichsgeraden in doppeltlogarithmischem Maßstab)

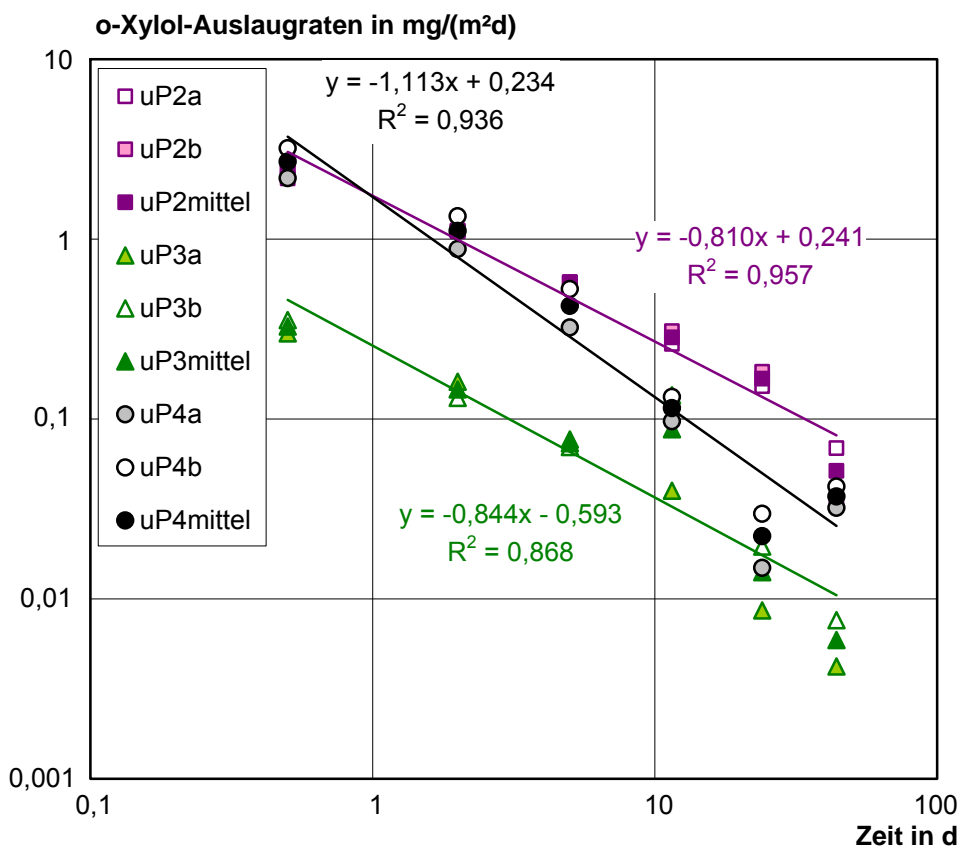


Bild B25: m+p-Xylol-Auslaugraten im Standtest an den ungesättigten Polyesterharzen (Ausgleichsgeraden in doppeltlogarithmischem Maßstab)

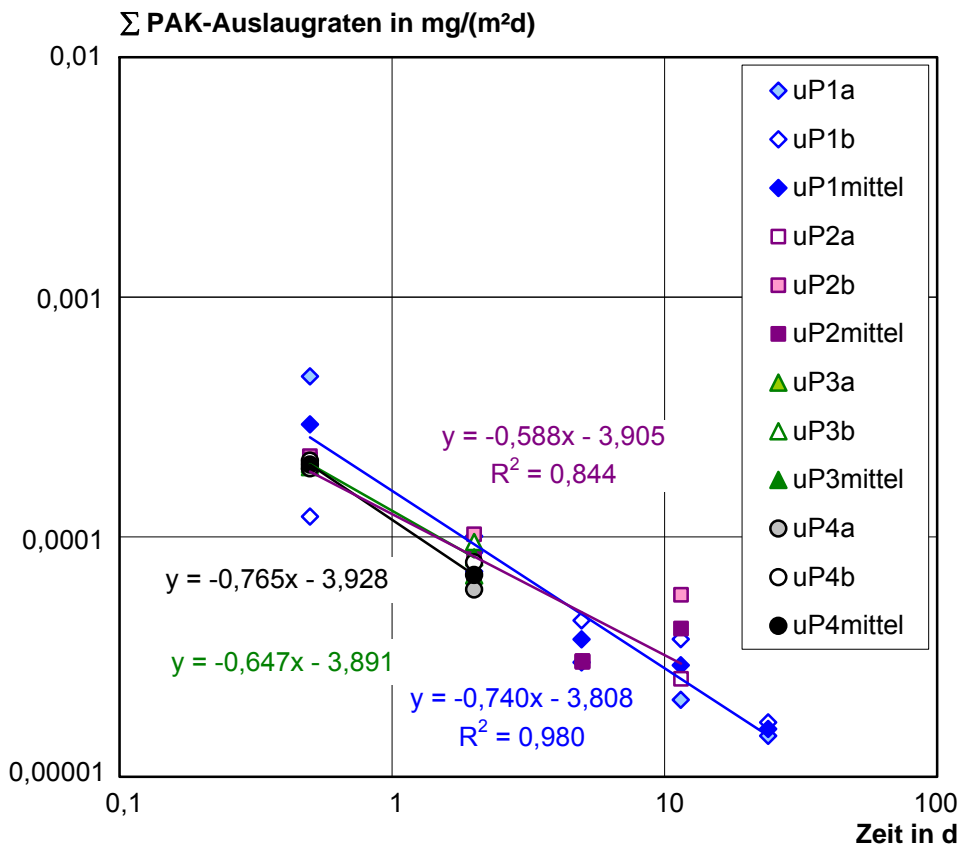


Bild B26: Σ PAK-Auslaugraten im Standtest an den ungesättigten Polyesterharzen (Ausgleichsgeraden in doppeltlogarithmischem Maßstab)

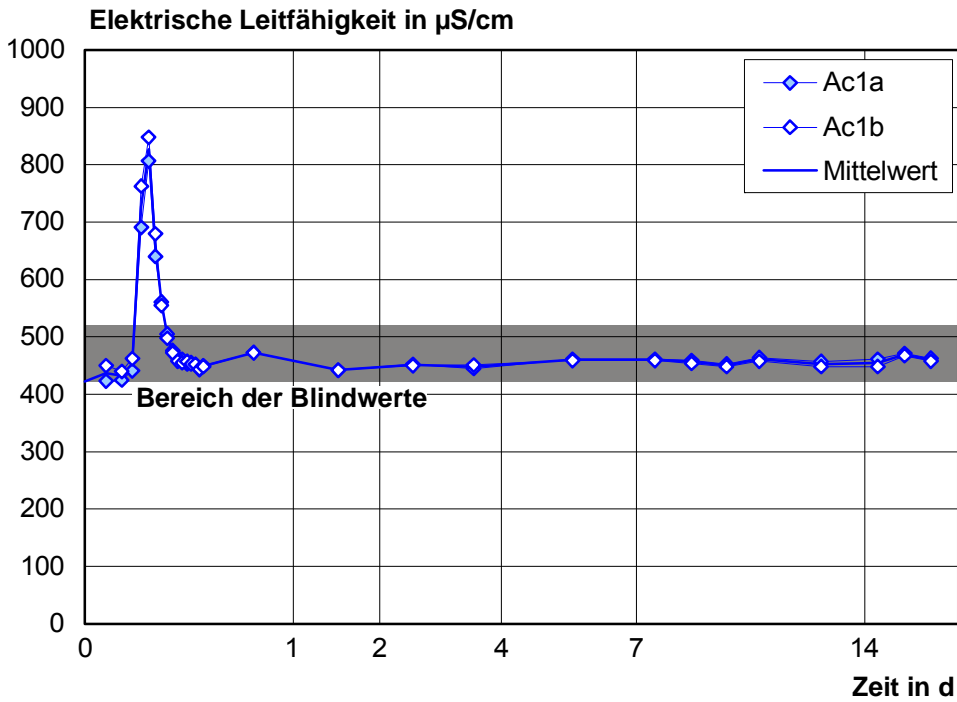


Bild B27: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac1

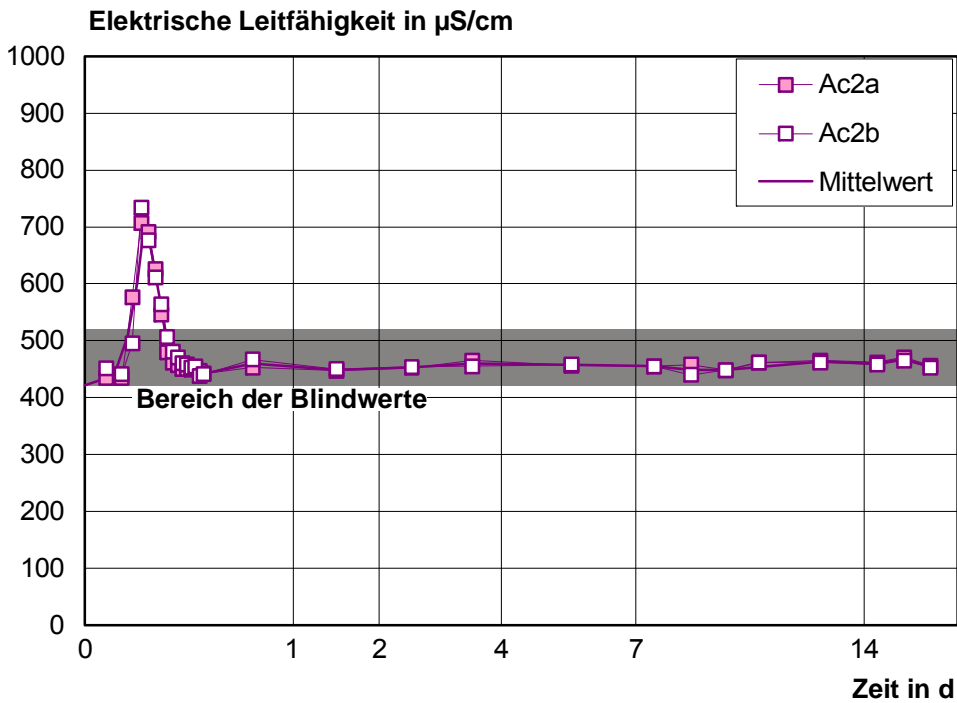


Bild B28: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac2

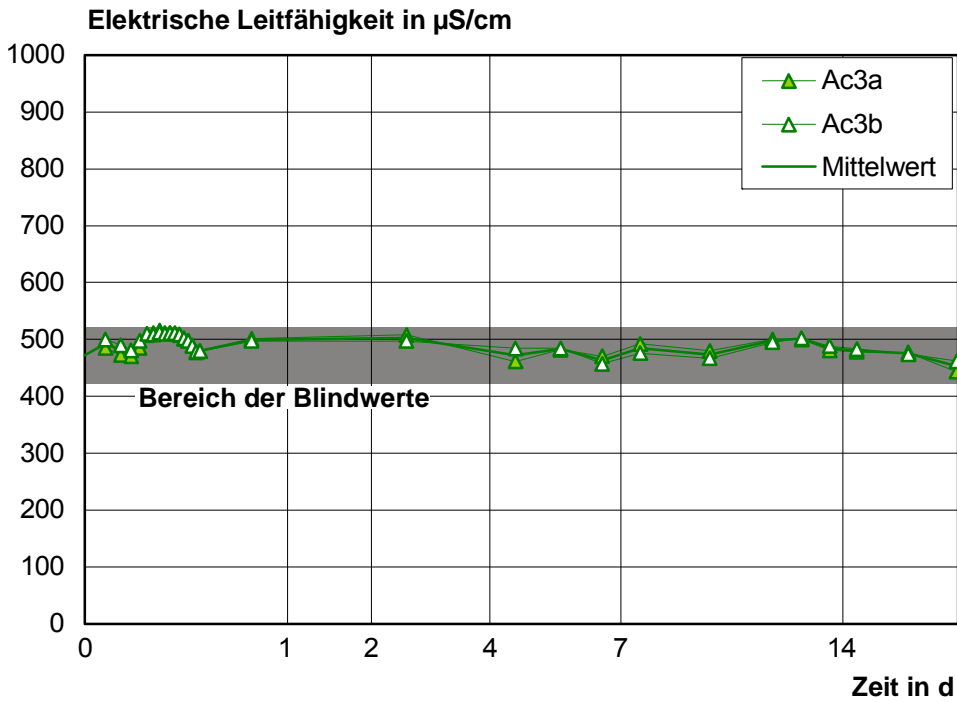


Bild B29: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac3

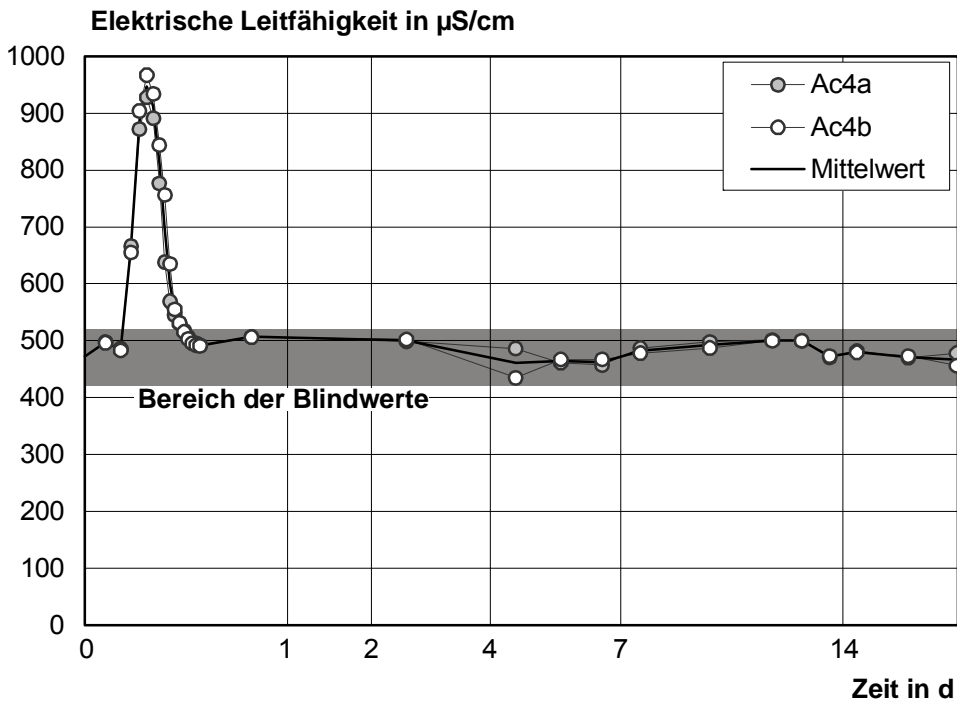


Bild B30: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac4

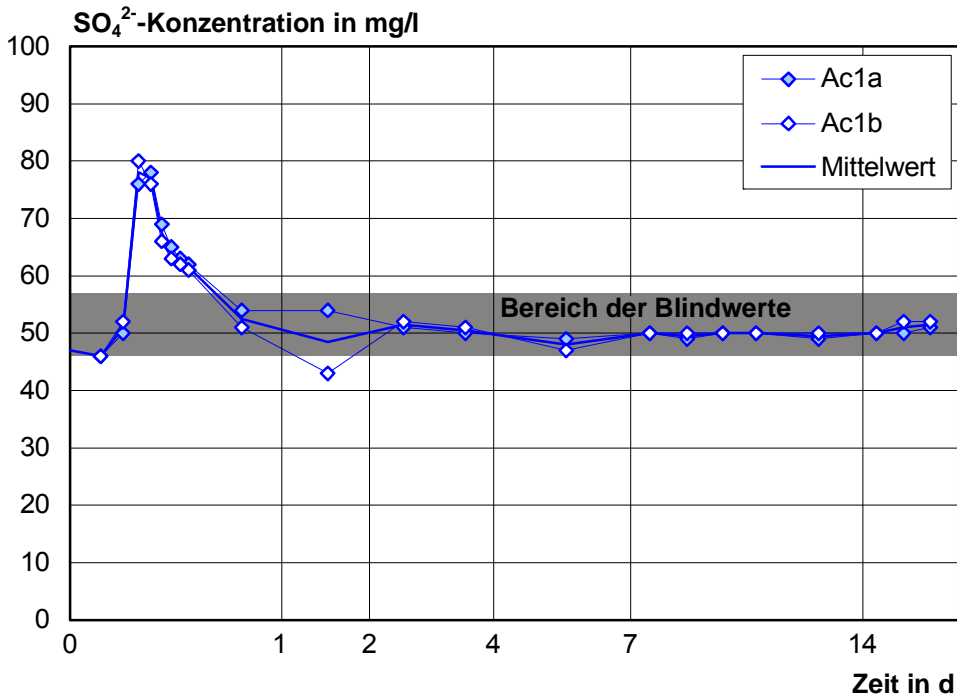


Bild B31: Sulfatkonzentration im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac1

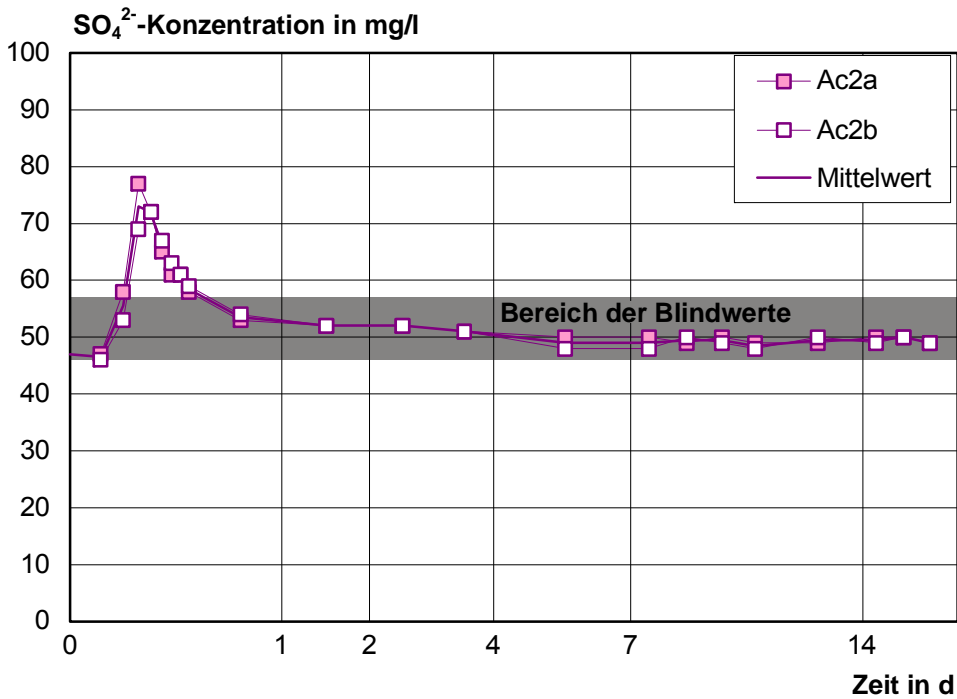


Bild B32: Sulfatkonzentration im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac2

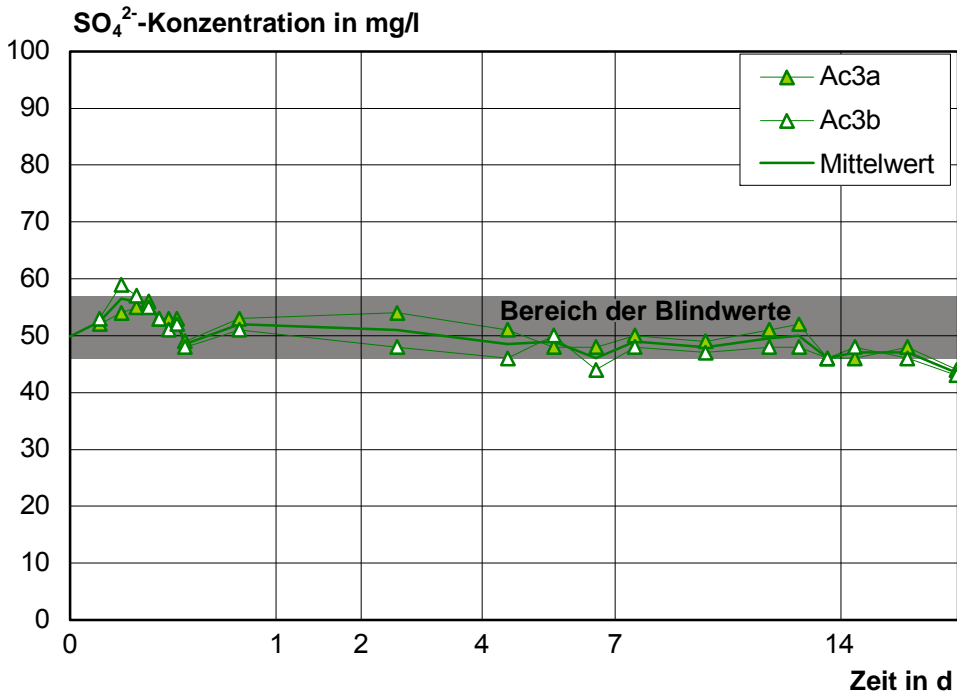


Bild B33: Sulfatkonzentration im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac3

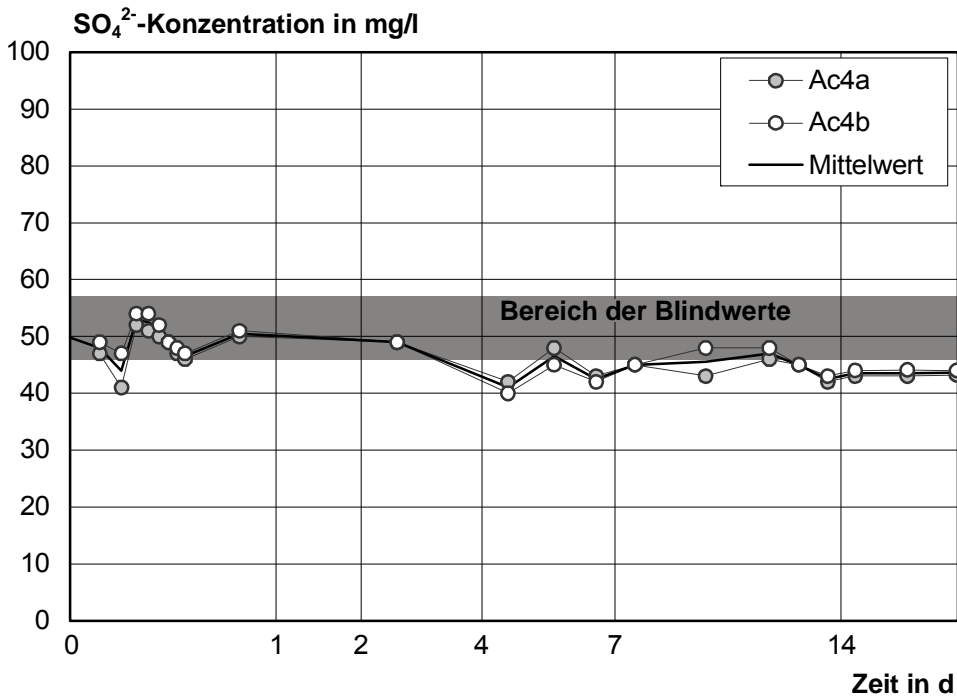


Bild B34: Sulfatkonzentration im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac4

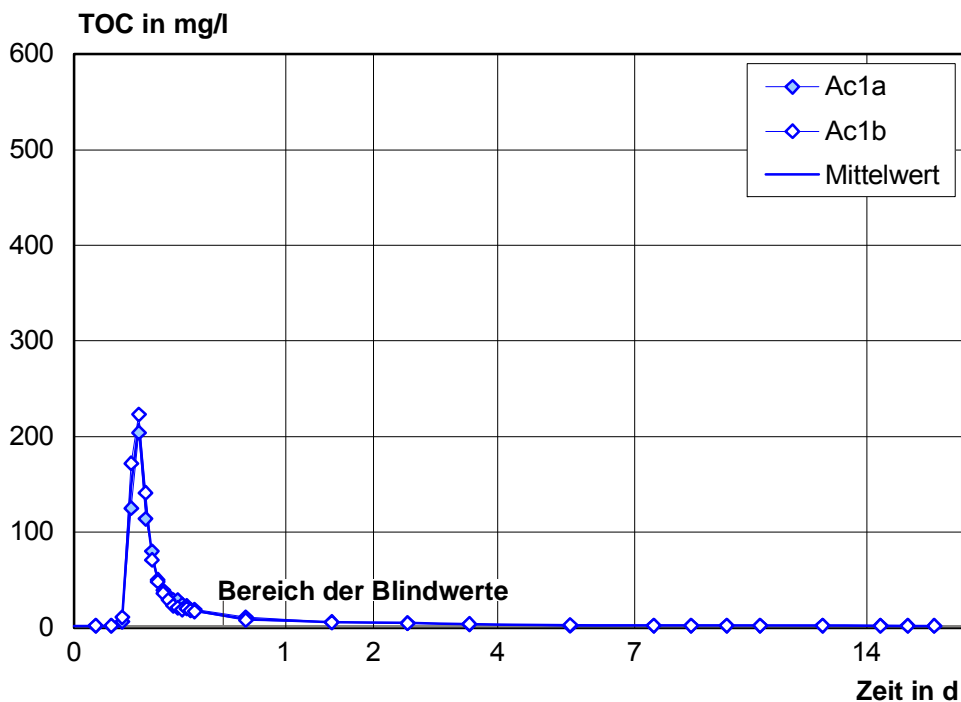


Bild B35: TOC im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac1

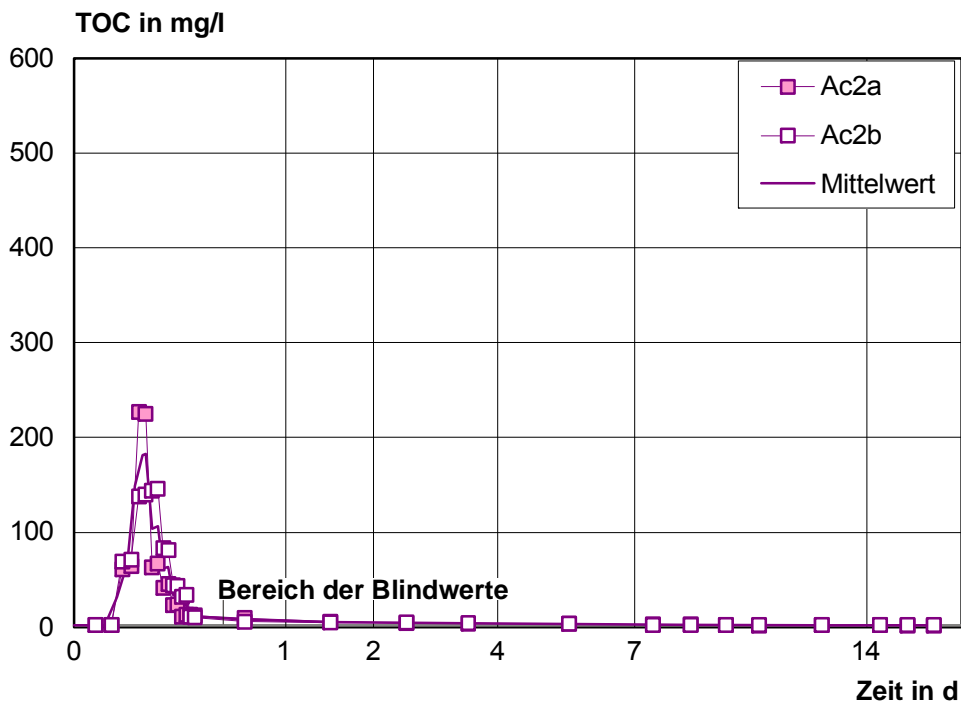


Bild B36: TOC im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac2

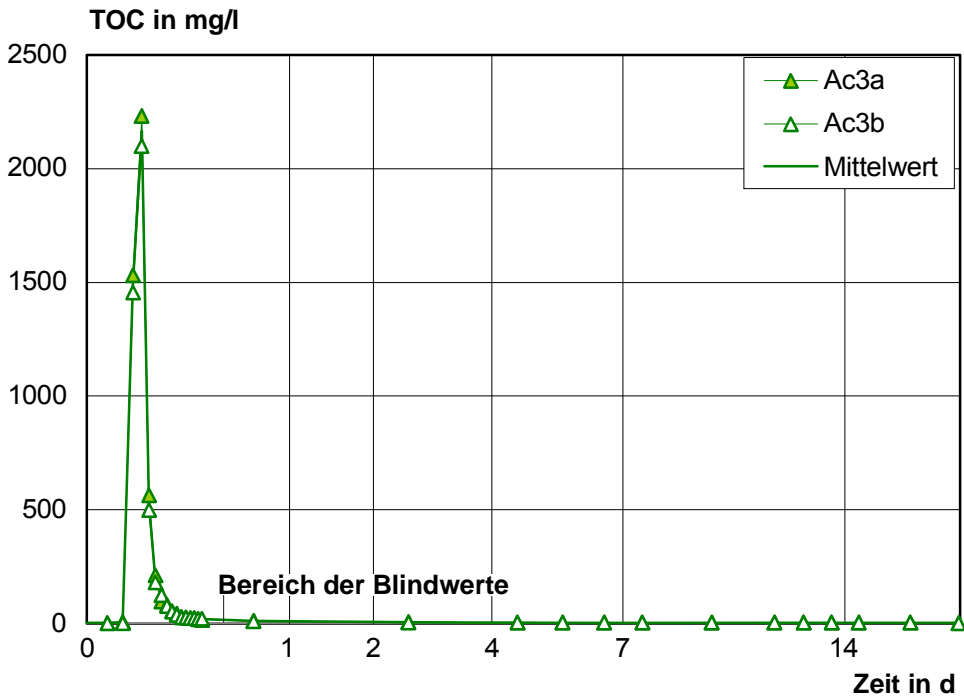


Bild B37: TOC im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac3

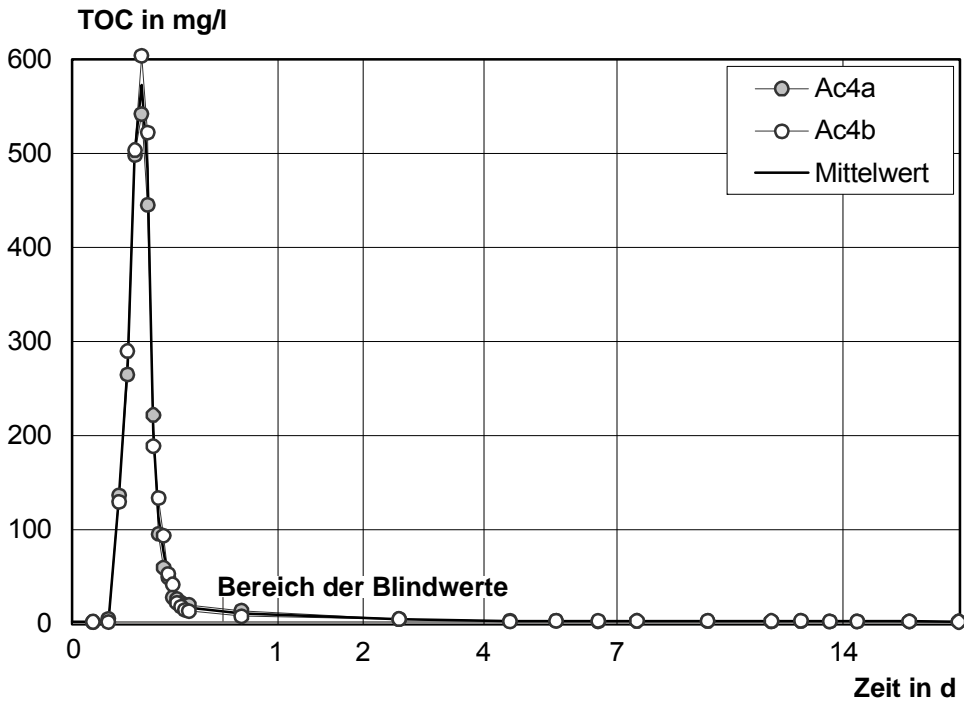


Bild B38: TOC im inversen Säulenversuch am Acrylatgel Ac4

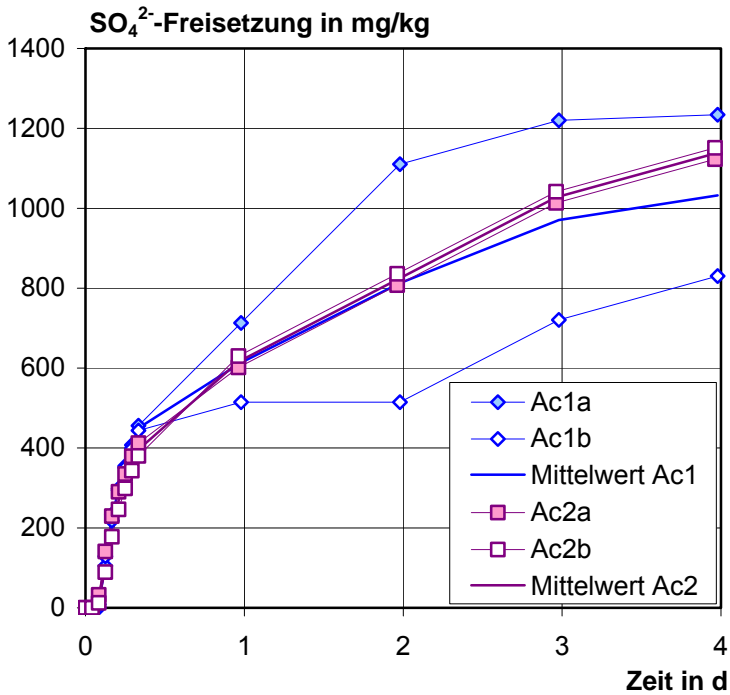


Bild B39: Sulfatfreisetzungen der Acrylatgele Ac1 und Ac2 im inversen Säulenversuch

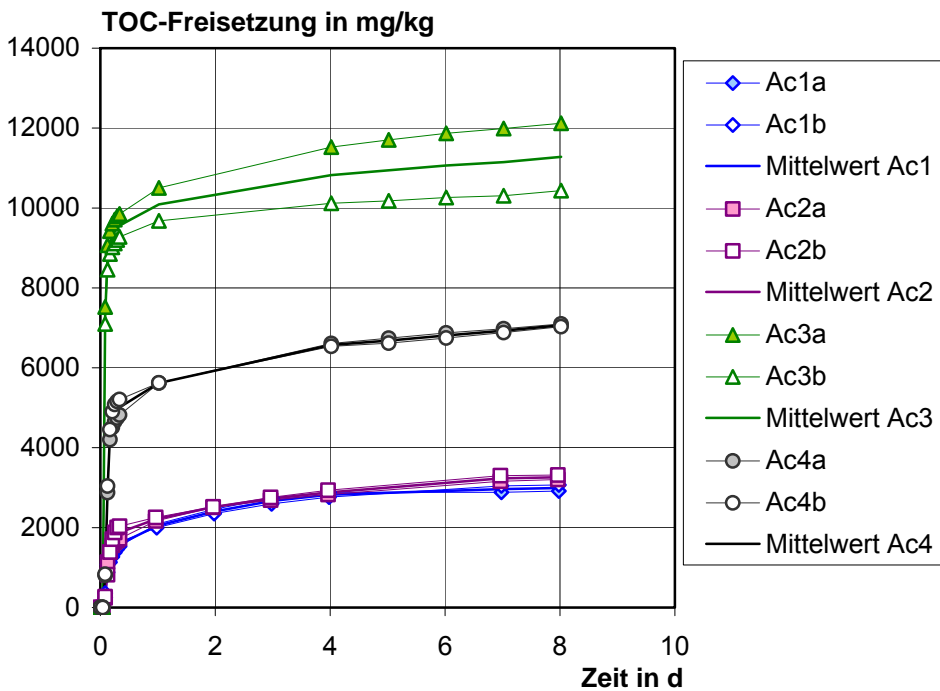


Bild B40: TOC-Freisetzungen der Acrylatgele im inversen Säulenversuch

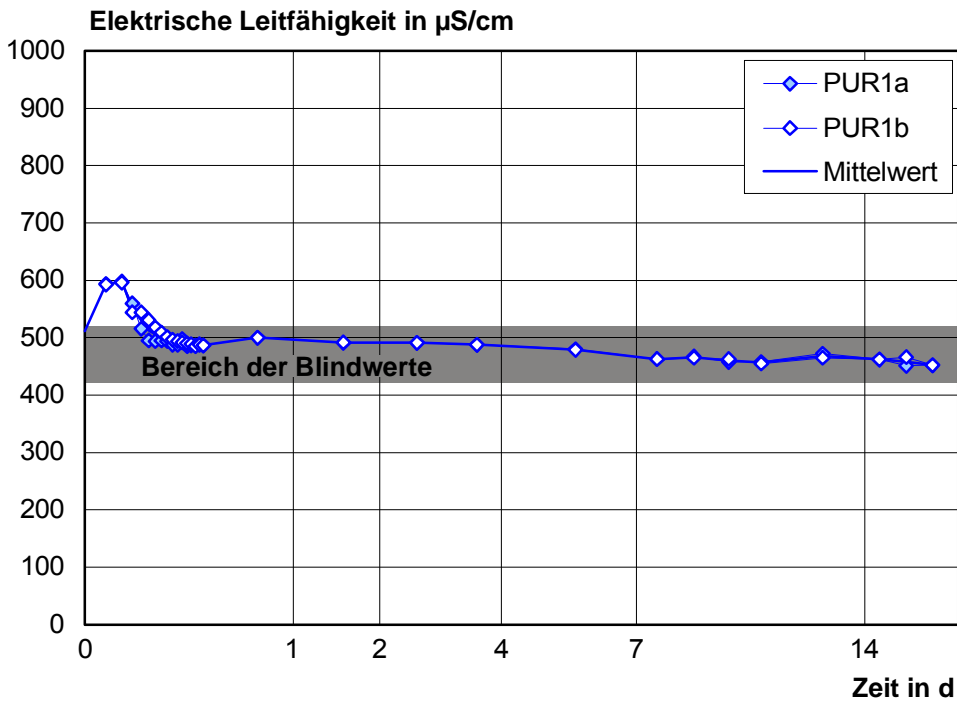


Bild B41: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch am Polyurethan PUR1

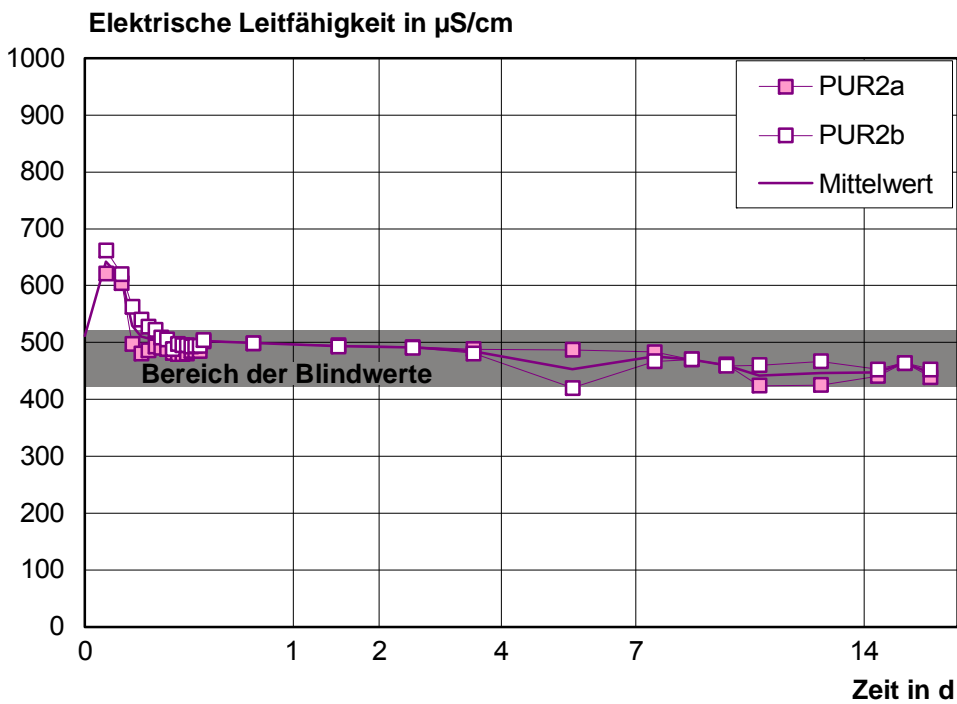


Bild B42: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch am Polyurethan PUR2

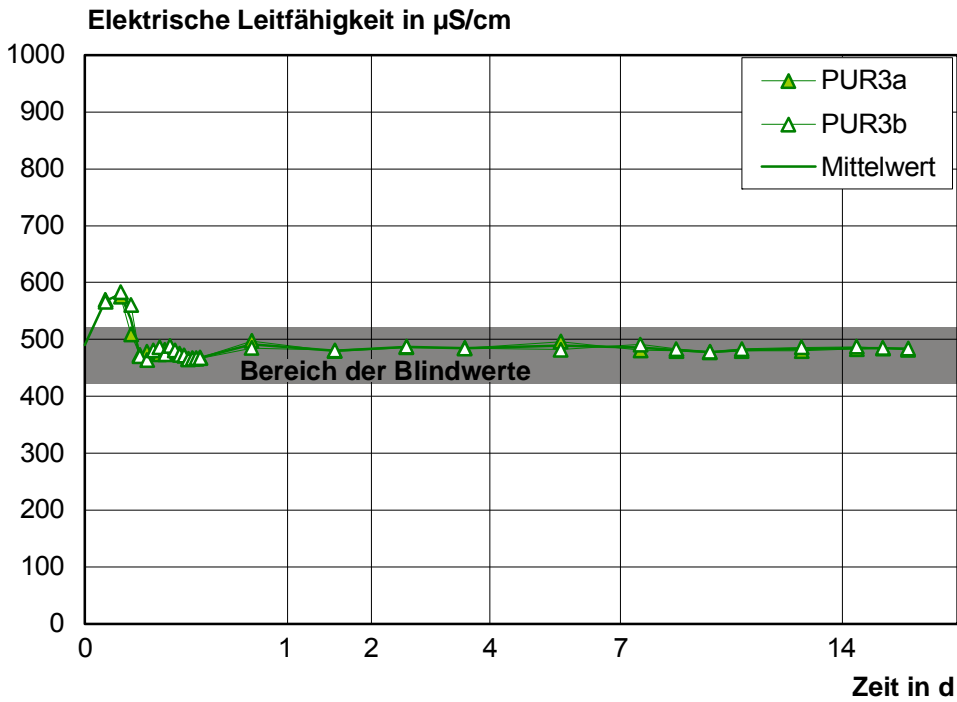


Bild B43: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch am Polyurethan PUR3

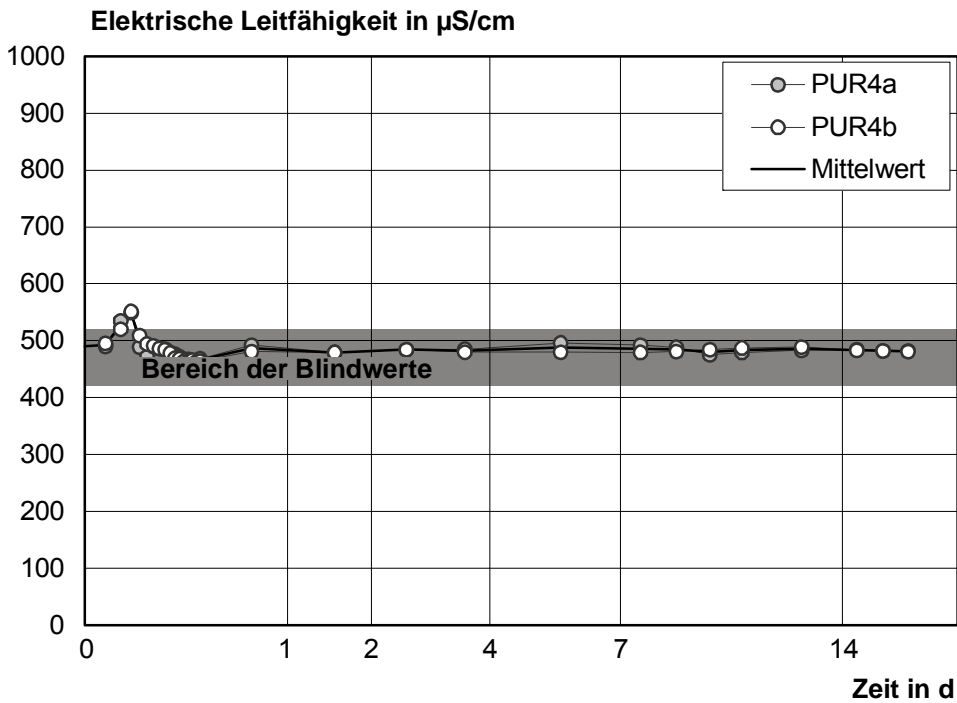


Bild B44: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch am Polyurethan PUR4

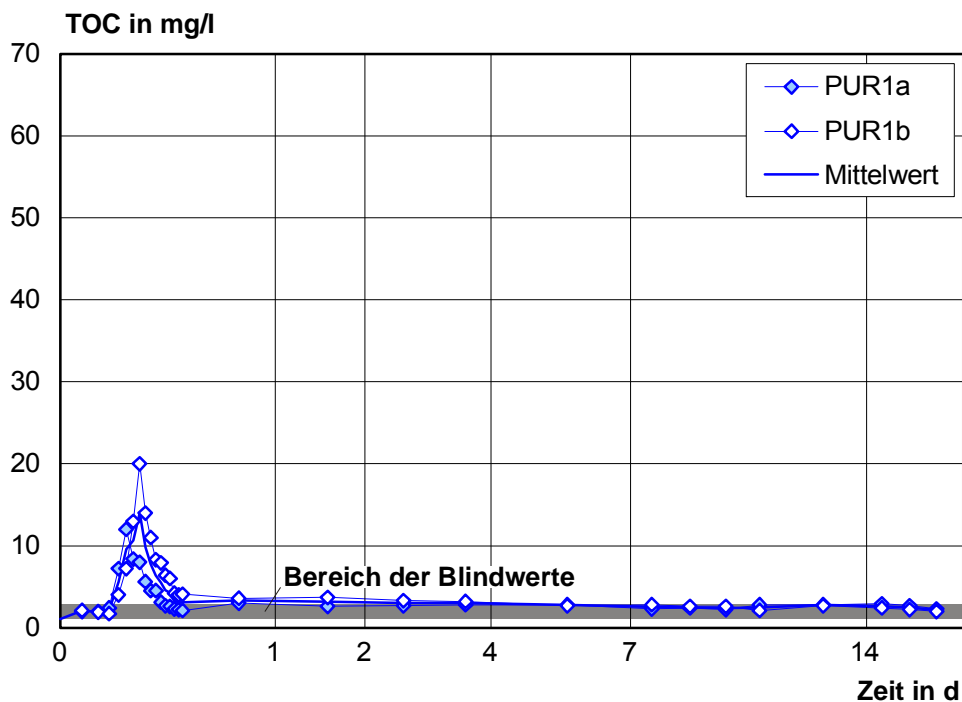


Bild B45: TOC im inversen Säulenversuch am Polyurethan PUR1

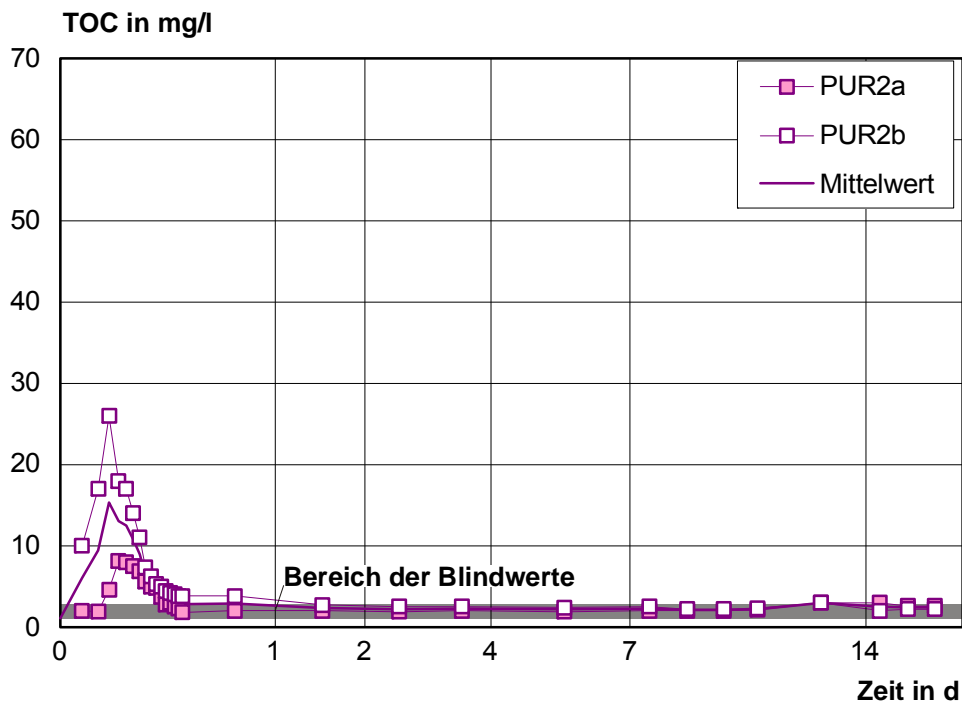


Bild B46: TOC im inversen Säulenversuch am Polyurethan PUR2

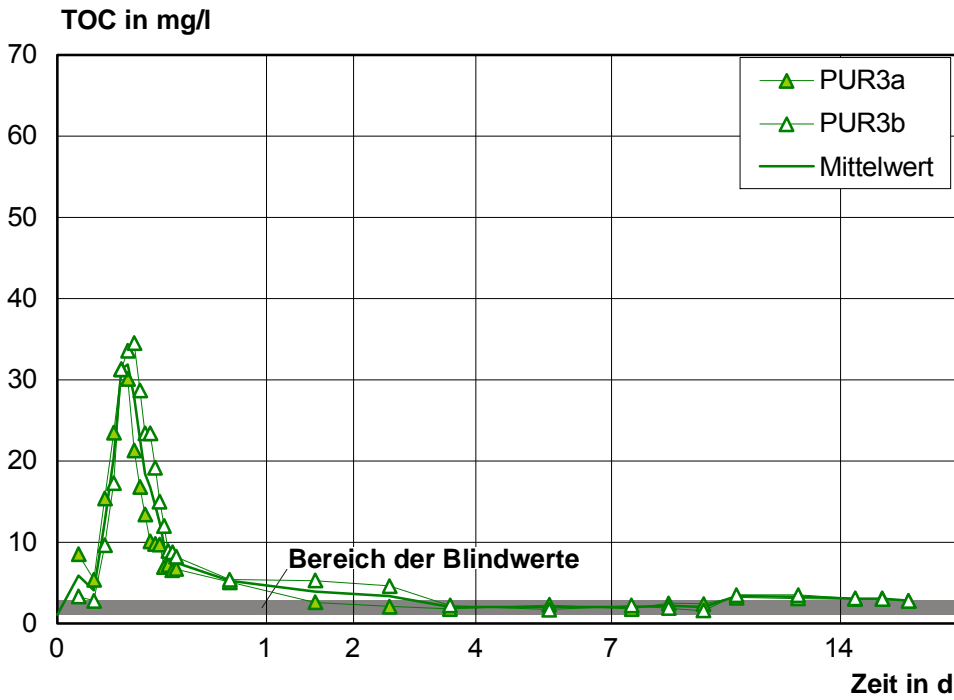


Bild B47: TOC im inversen Säulenversuch am Polyurethan PUR3

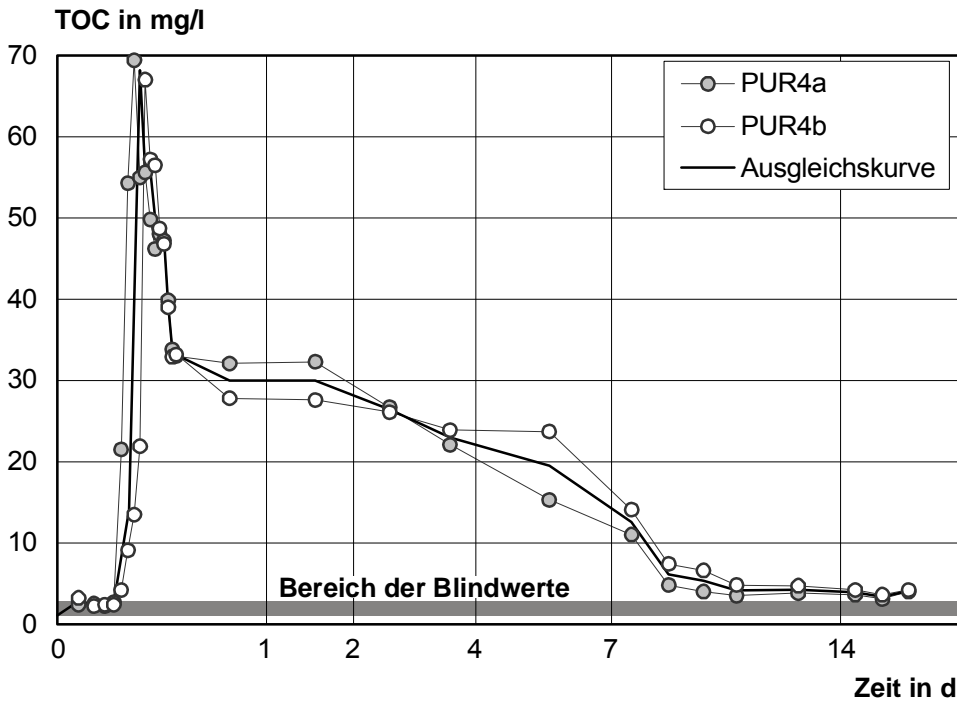


Bild B48: TOC im inversen Säulenversuch am Polyurethan PUR4

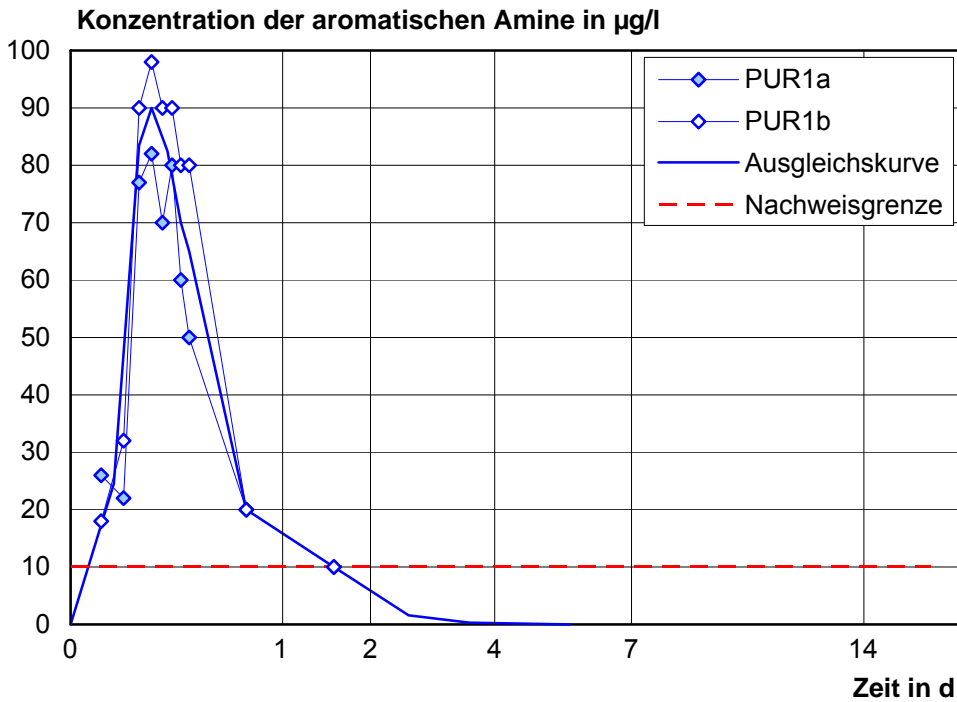


Bild B49: Konzentration der aromatischen Amine im inversen Säulenversuch am Polyurethan PUR1

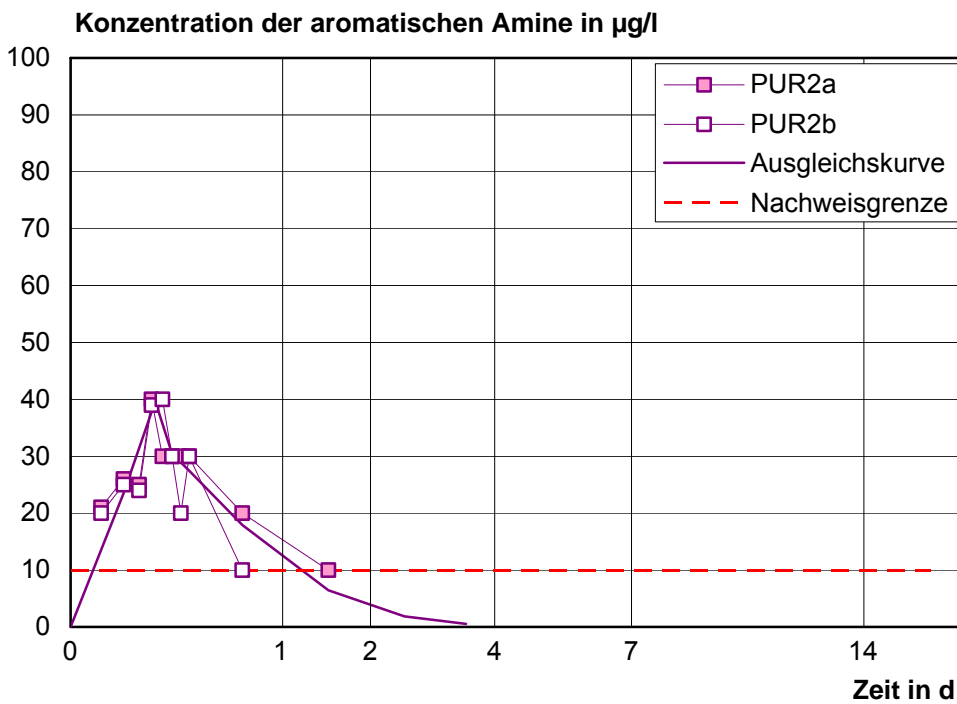


Bild B50: Konzentration der aromatischen Amine im inversen Säulenversuch am Polyurethan PUR2

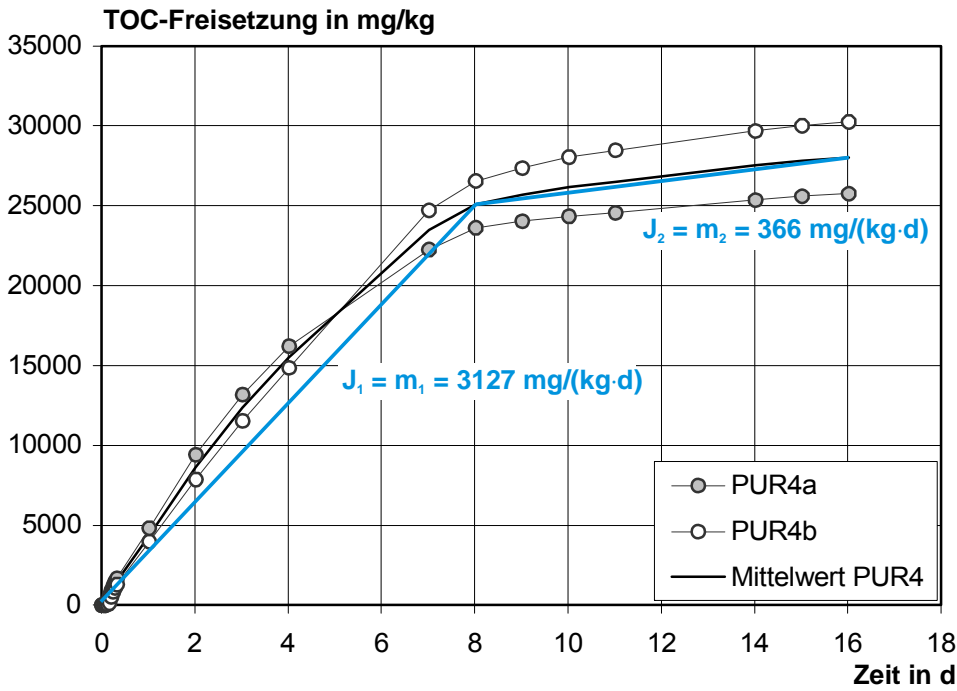


Bild B51: TOC-Freisetzung im inversen Säulenversuch am Polyurethan PUR4

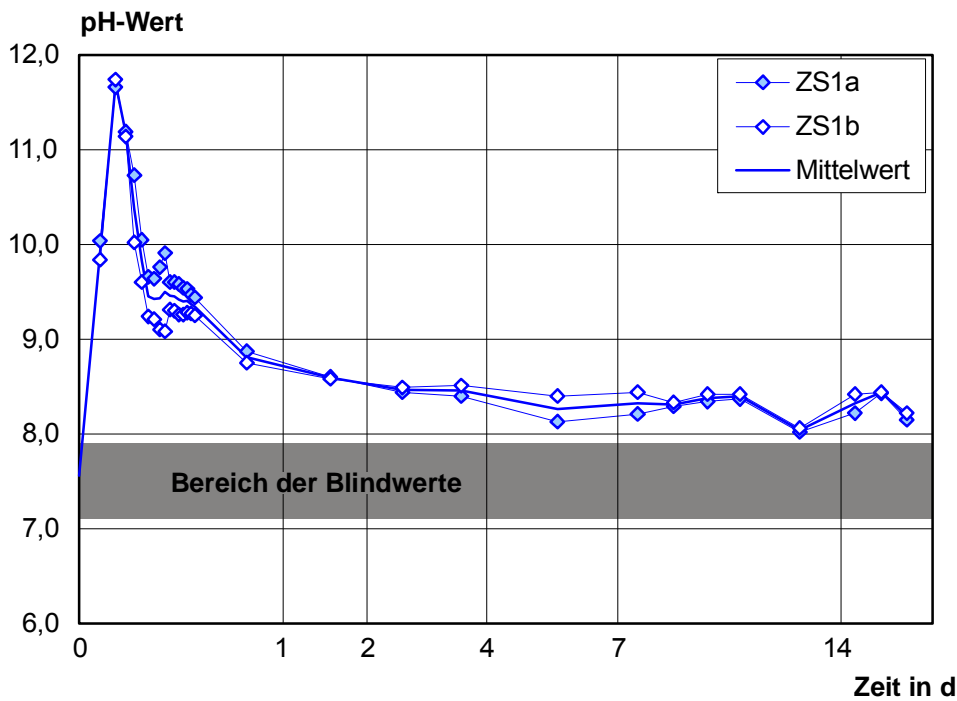


Bild B52: pH-Wert im inversen Säulenversuch an der Zement-suspension ZS1 (w/z = 1,0)

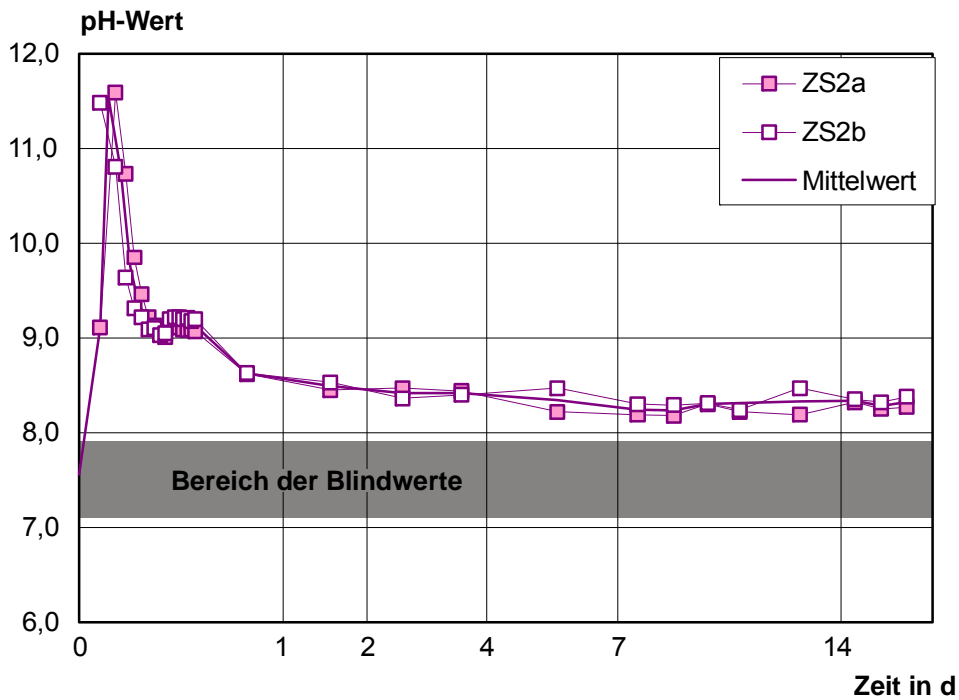


Bild B53: pH-Wert im inversen Säulenversuch an der Zement-suspension ZS2 ($w/z = 0,69$)

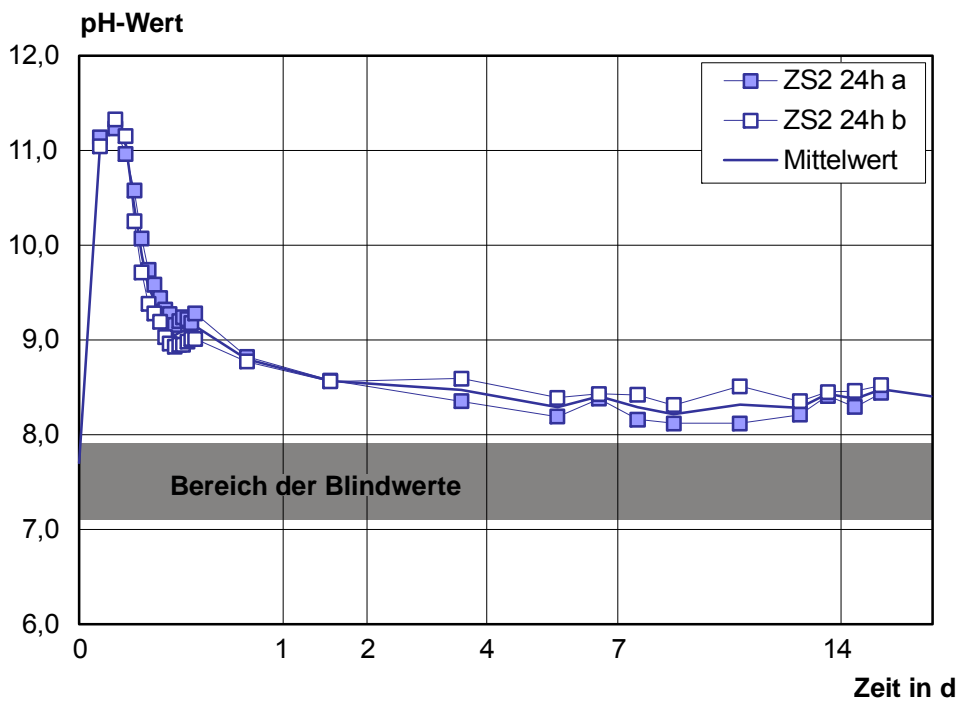


Bild B54: pH-Wert im inversen Säulenversuch an der Zement-suspension ZS2 ($w/z = 0,69$) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit)

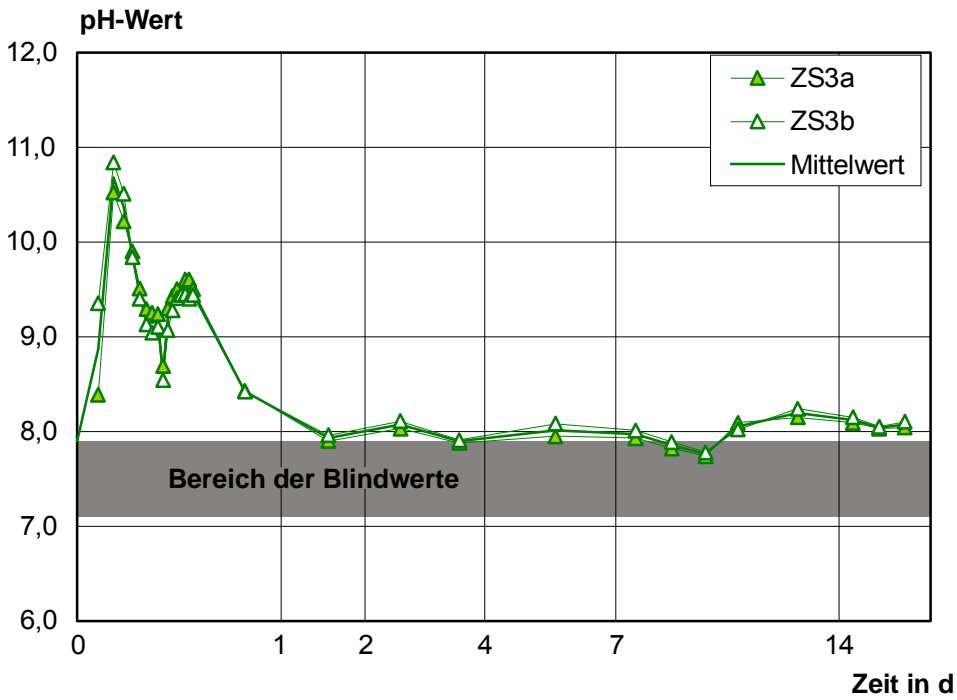


Bild B55: pH-Wert im inversen Säulenversuch an der Zement-suspension ZS3 (w/z = 1,0)

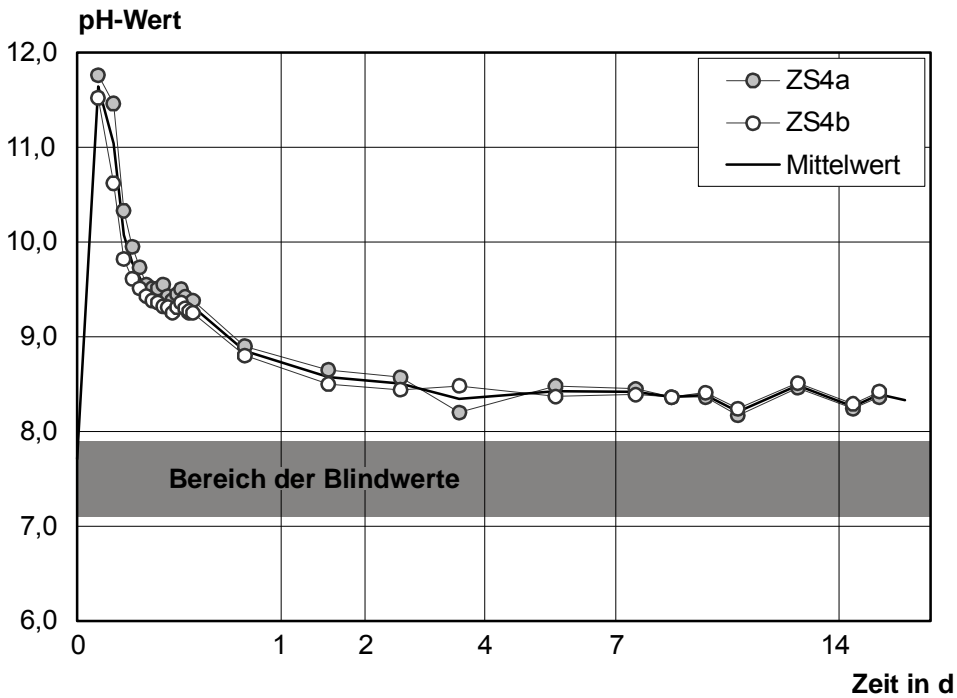


Bild B56: pH-Wert im inversen Säulenversuch an der Zement-suspension ZS4 (w/z = 1,0)

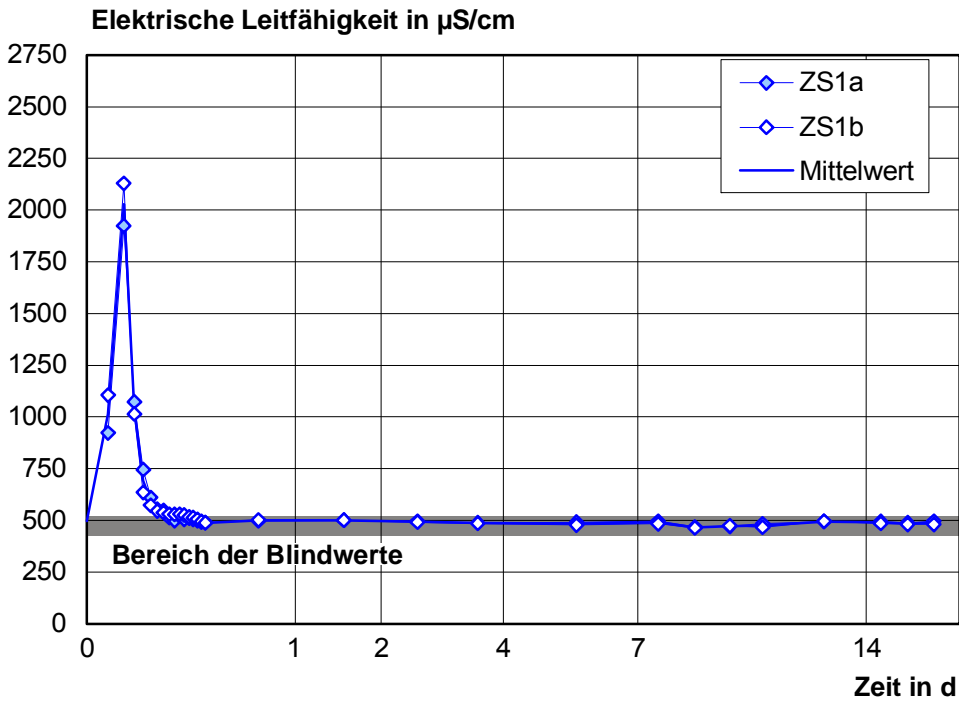


Bild B57: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS1 ($w/z = 1,0$)

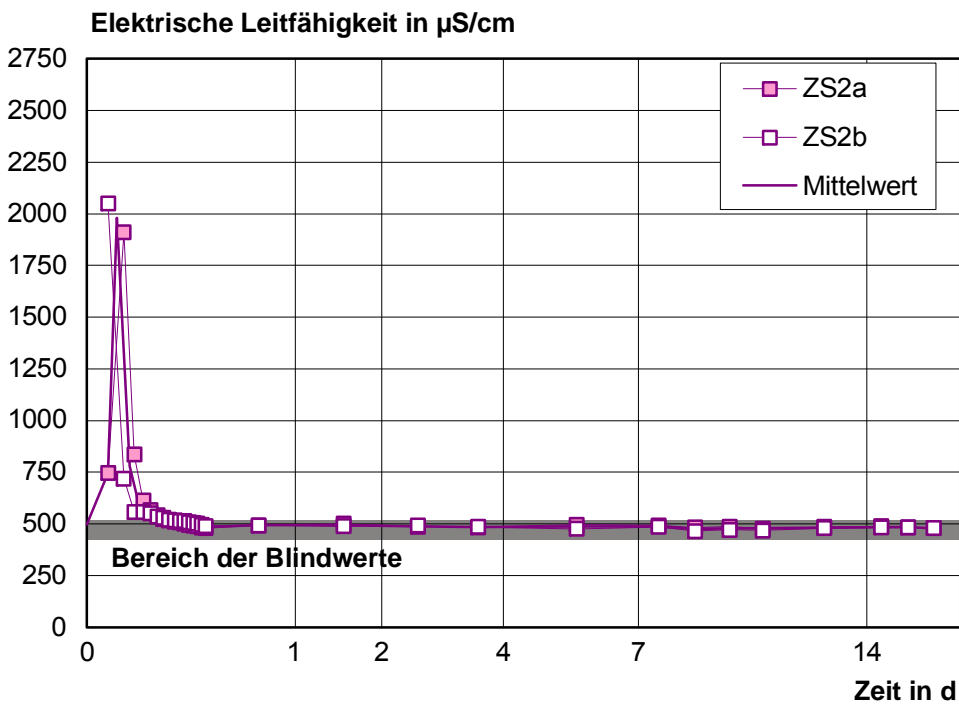


Bild B58: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 ($w/z = 0,69$)

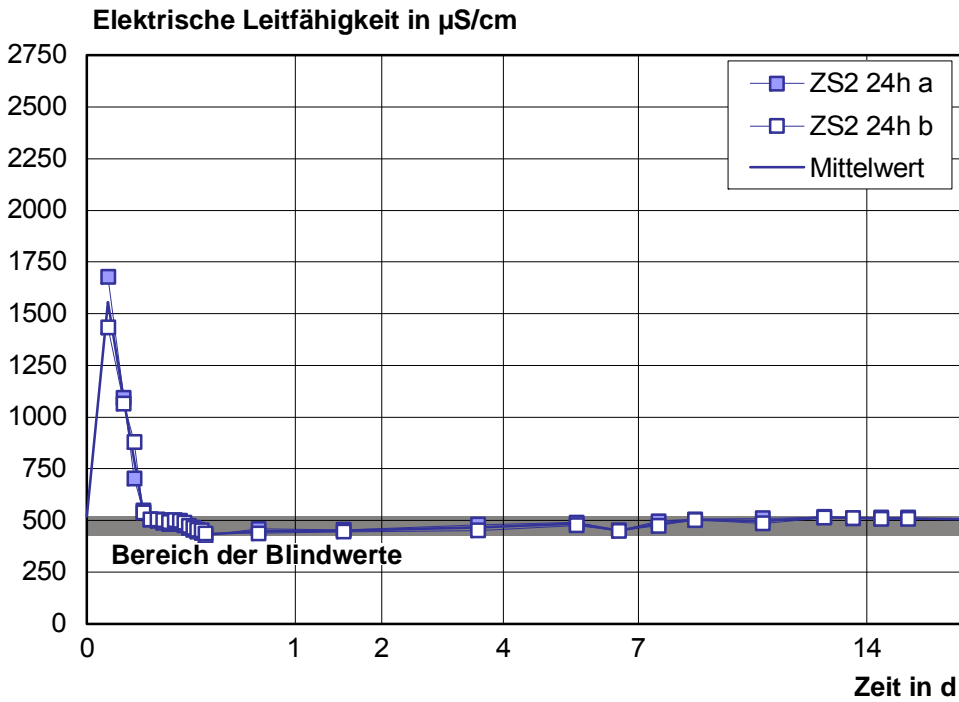


Bild B59: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 ($w/z = 0,69$) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit)

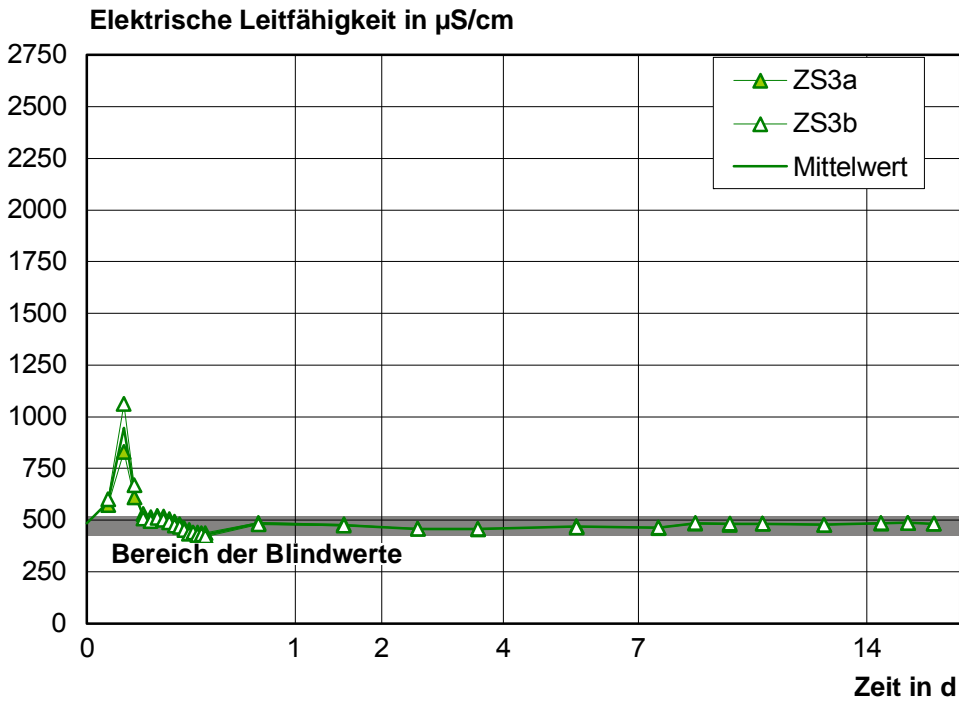


Bild B60: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS3 ($w/z = 1,0$)

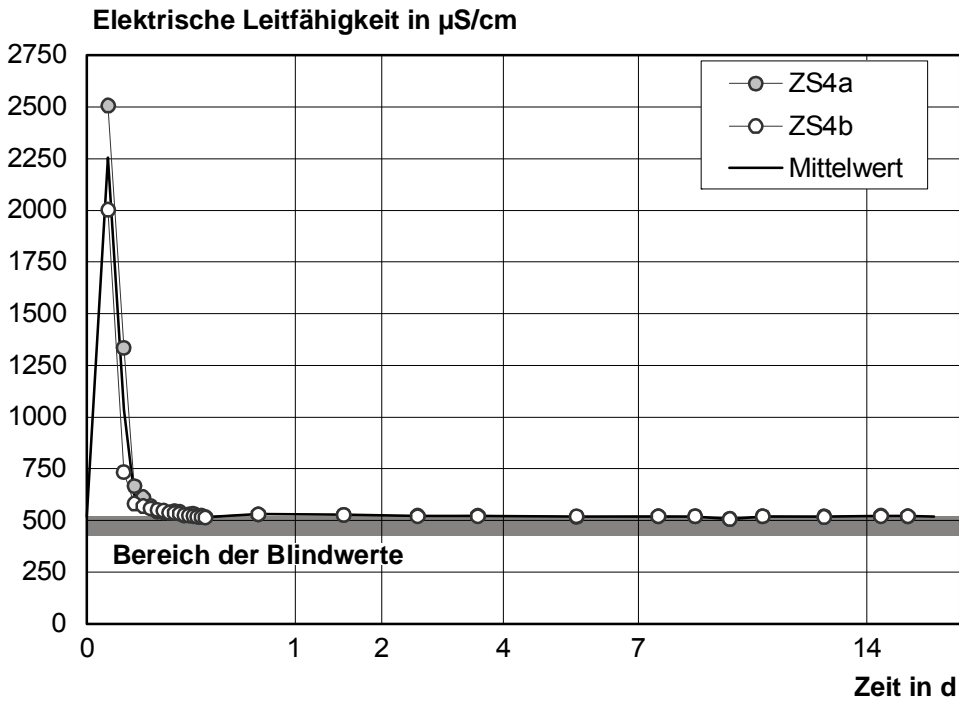


Bild B61: Elektrische Leitfähigkeit im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS4 ($w/z = 1,0$)

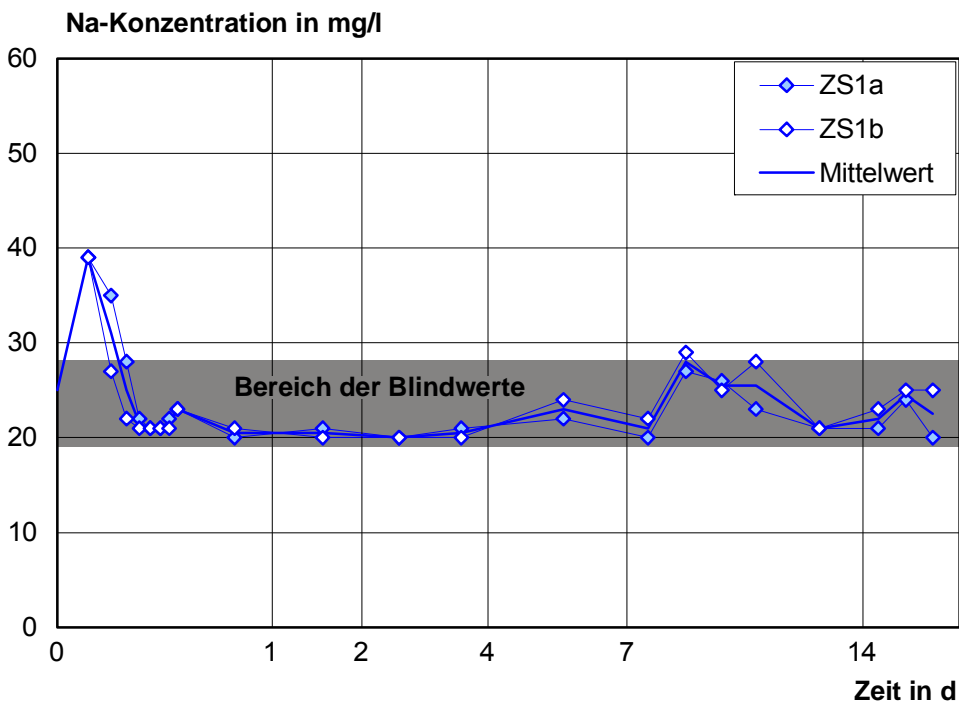


Bild B62: Natriumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS1 ($w/z = 1,0$)

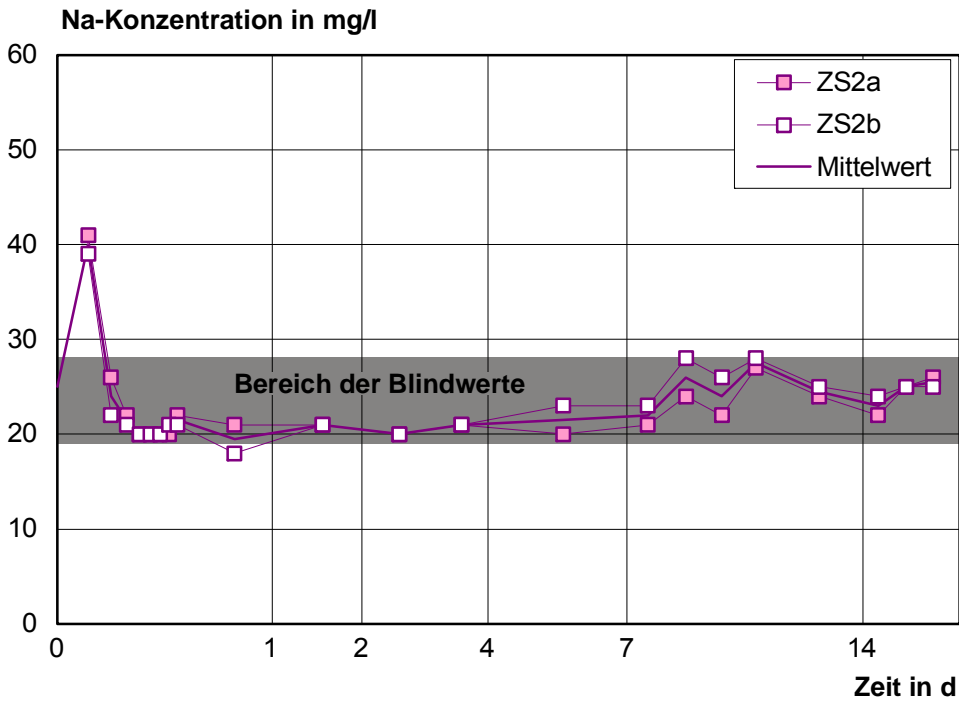


Bild B63: Natriumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 ($w/z = 0,69$)

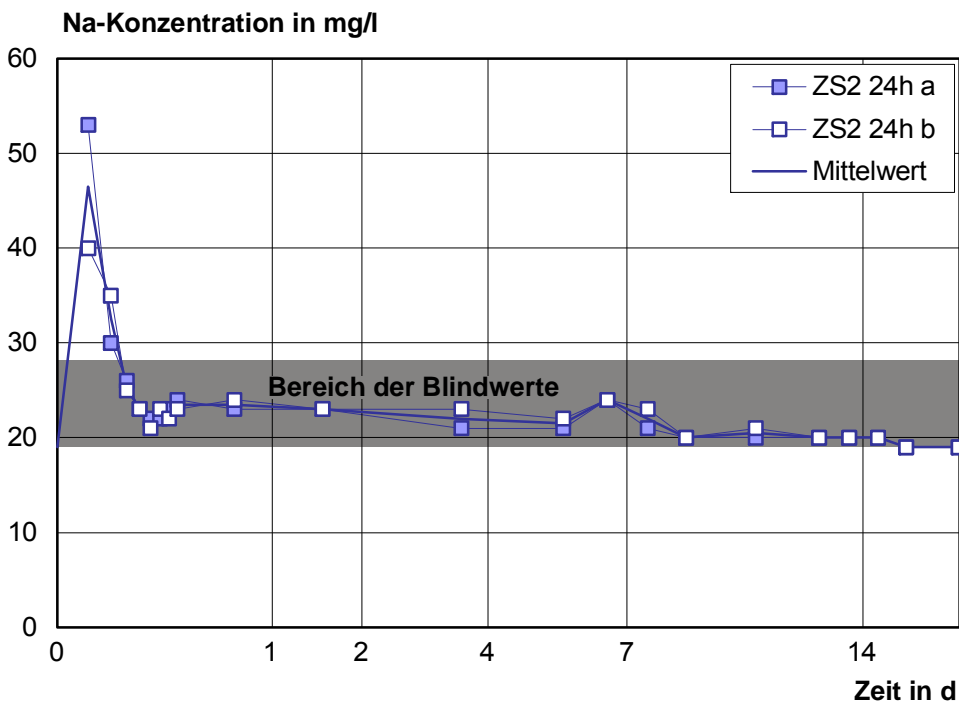


Bild B64: Natriumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 ($w/z = 0,69$) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit)

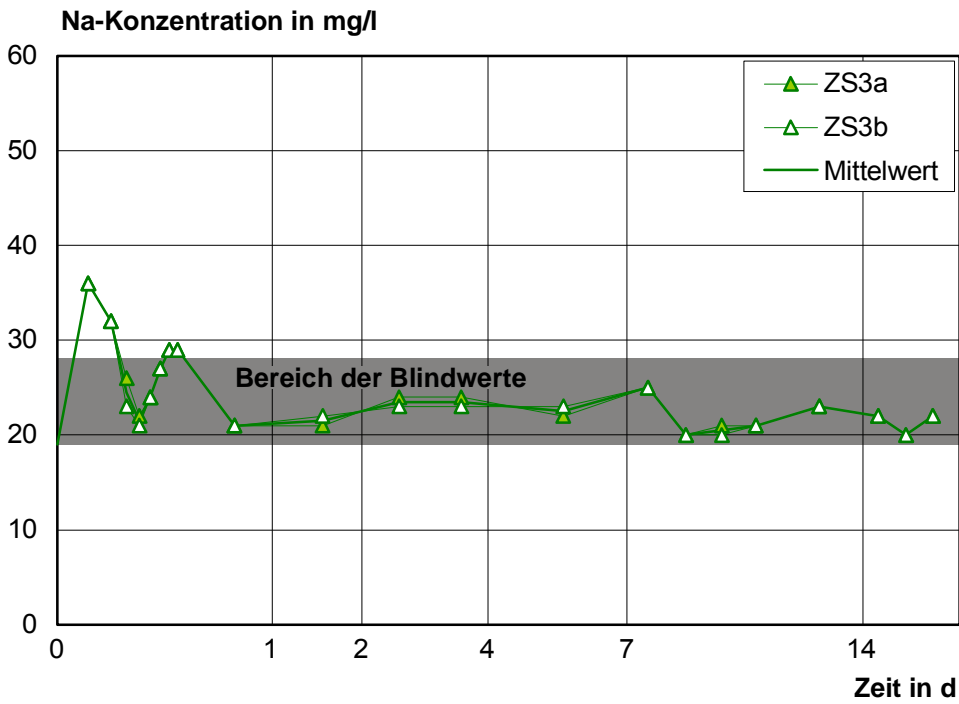


Bild B65: Natriumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS3 (w/z = 1,0)

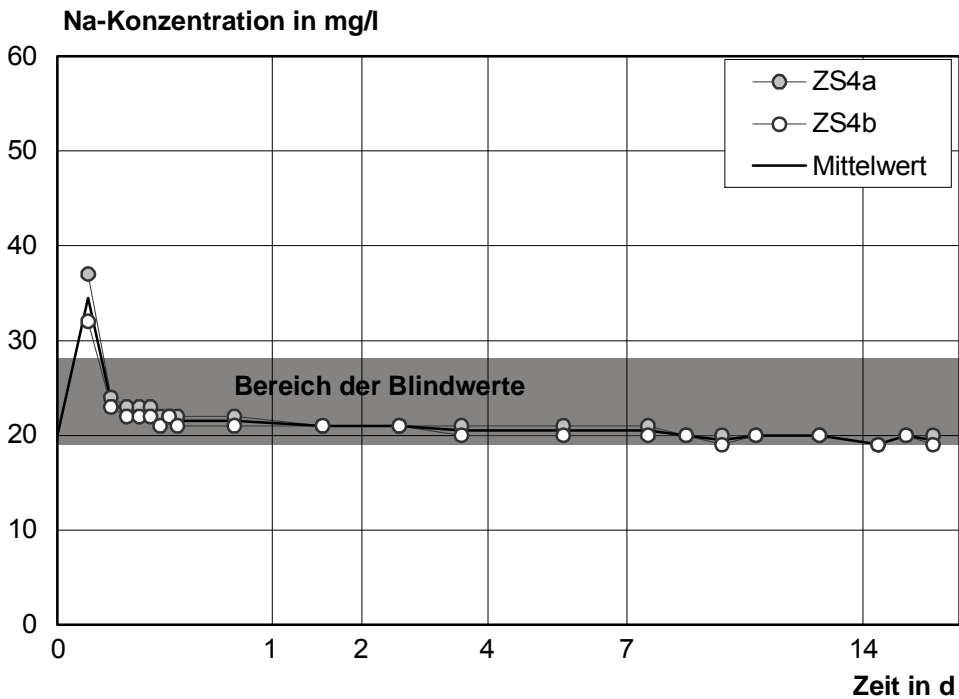


Bild B66: Natriumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS4 (w/z = 1,0)

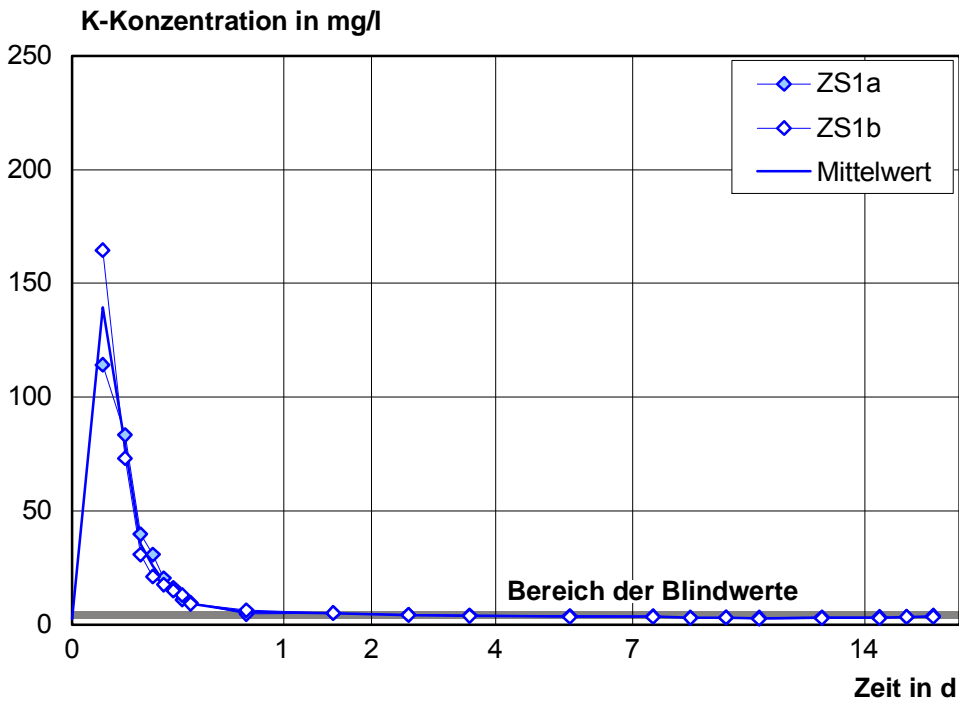


Bild B67: Kaliumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS1 (w/z = 1,0)

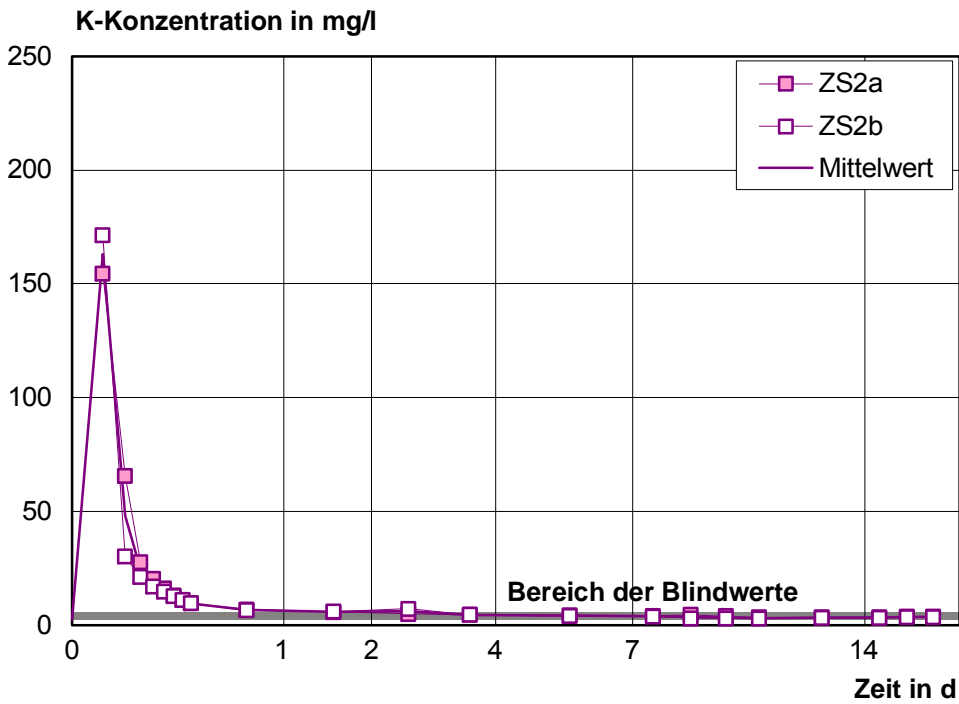


Bild B68: Kaliumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 (w/z = 0,69)

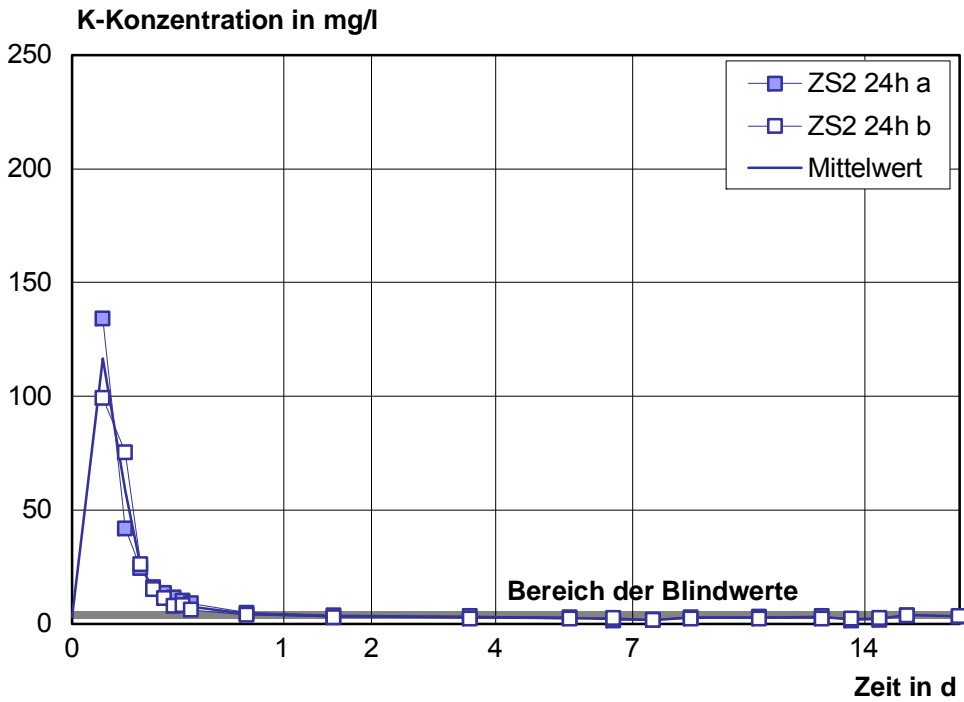


Bild B69: Kaliumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 ($w/z = 0,69$) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit)

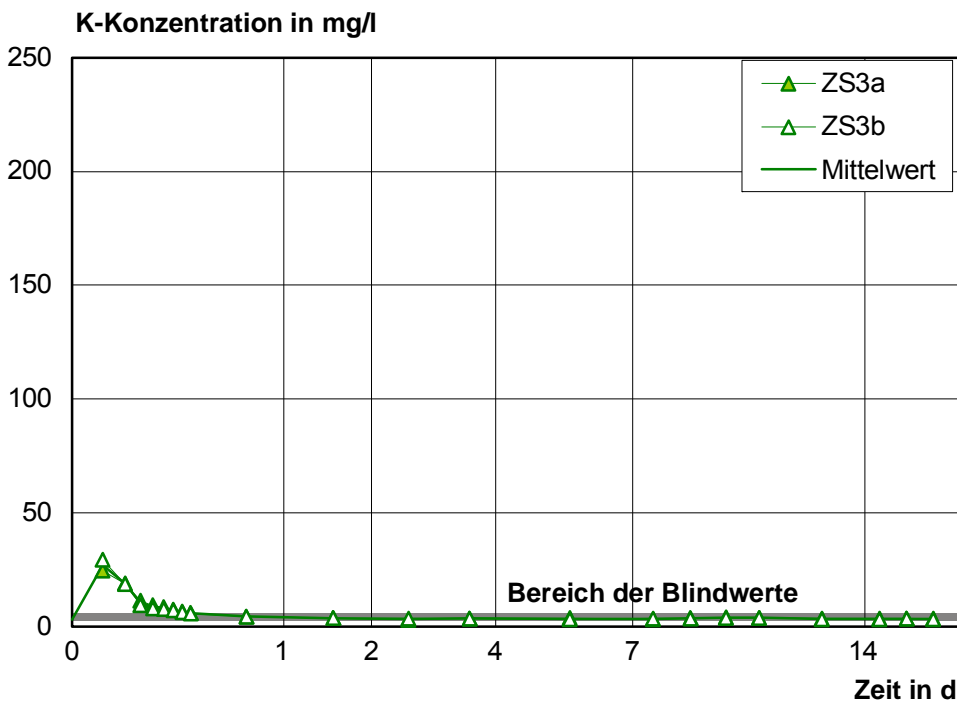


Bild B70: Kaliumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS3 ($w/z = 1,0$)

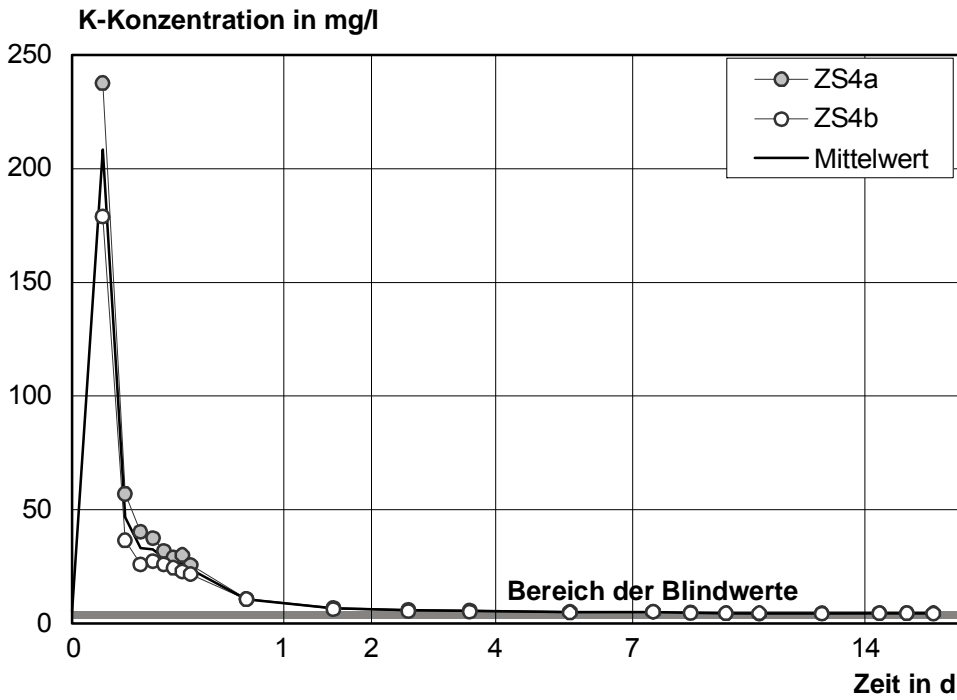


Bild B71: Kaliumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS4 (w/z = 1,0)

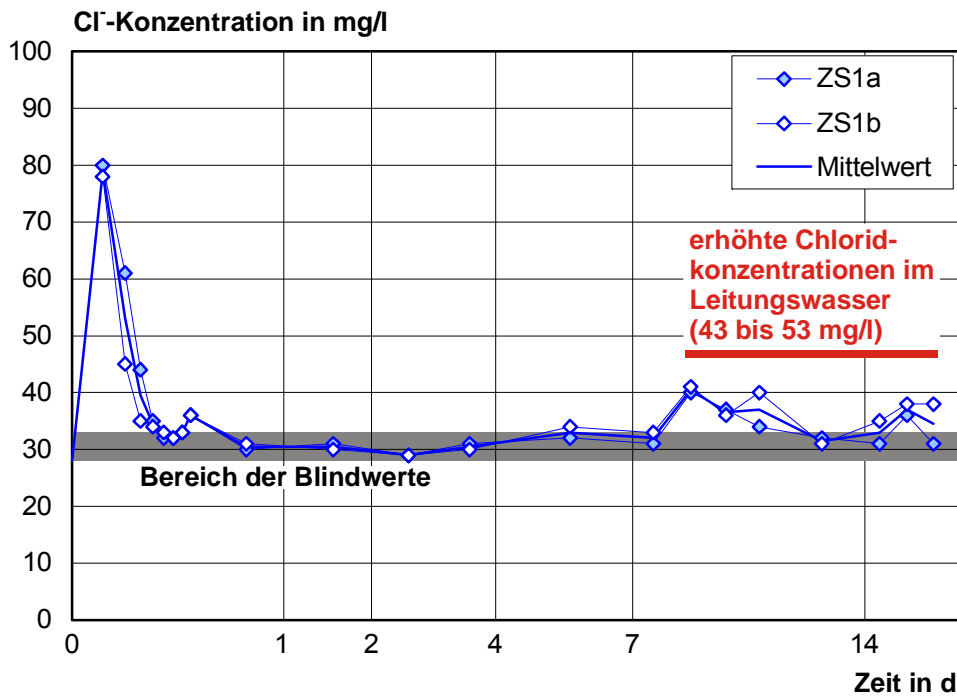


Bild B72: Chloridkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS1 (w/z = 1,0)

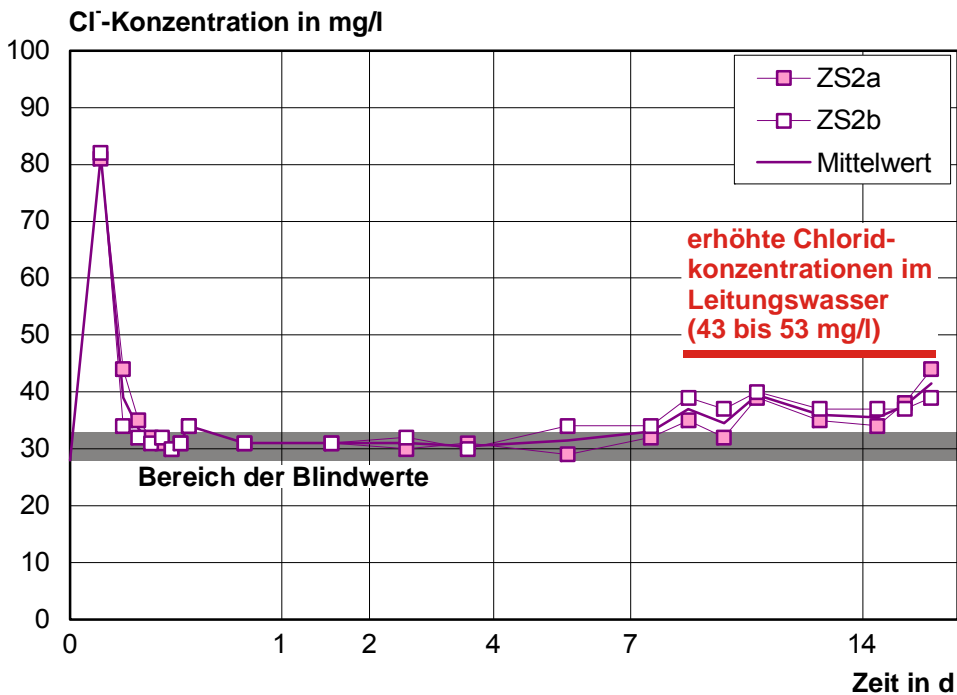


Bild B73: Chloridkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 ($w/z = 0,69$)

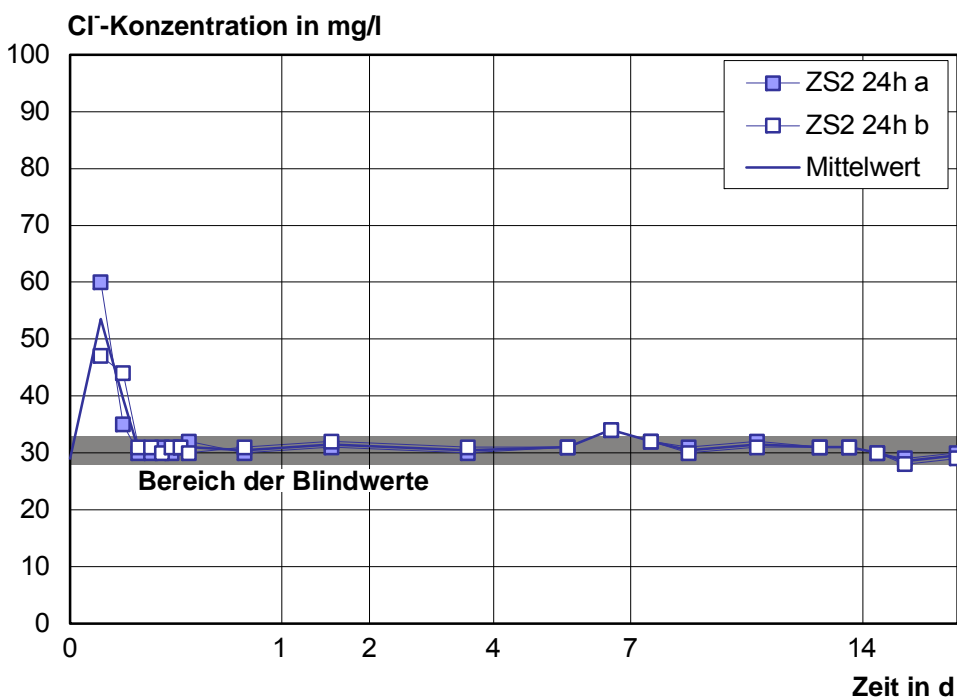


Bild B74: Chloridkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 ($w/z = 0,69$) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit)

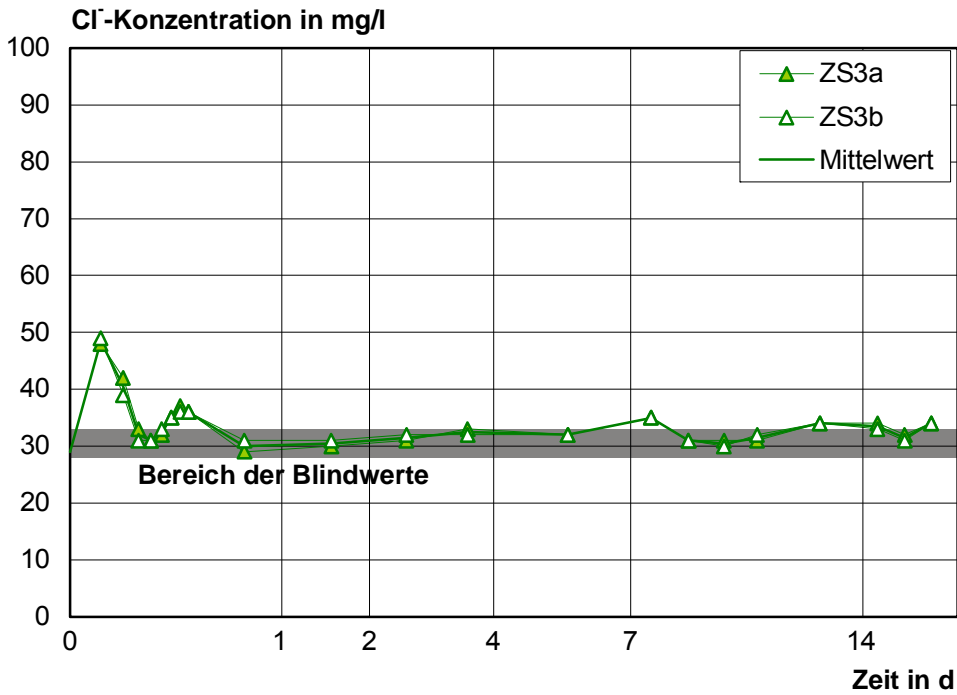


Bild B75: Chloridkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS3 (w/z = 1,0)

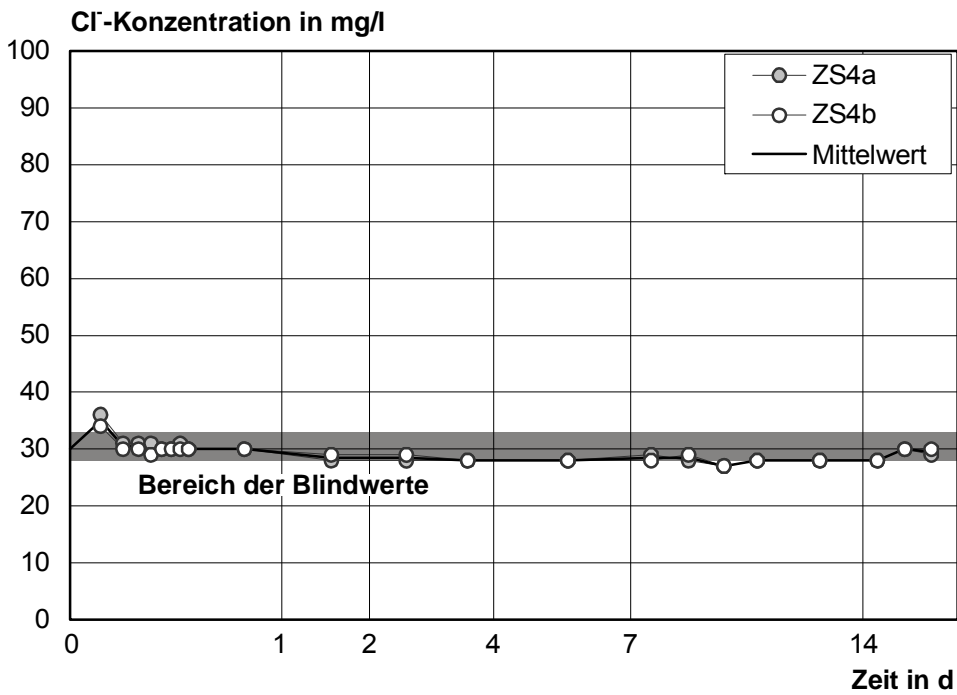


Bild B76: Chloridkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS4 (w/z = 1,0)

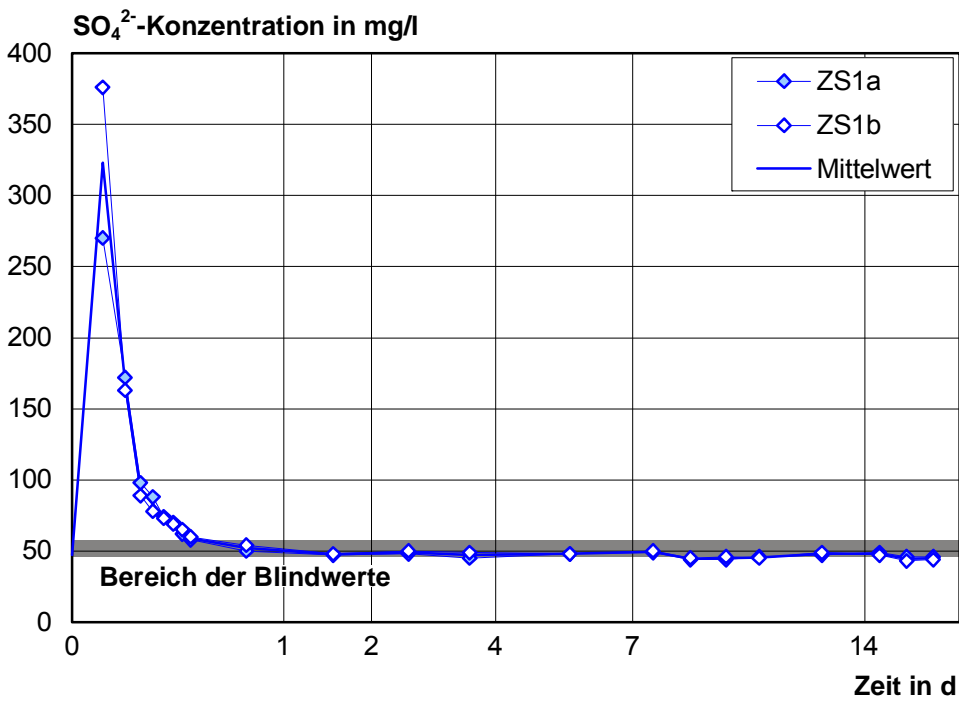


Bild B77: Sulfatkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS1 (w/z = 1,0)

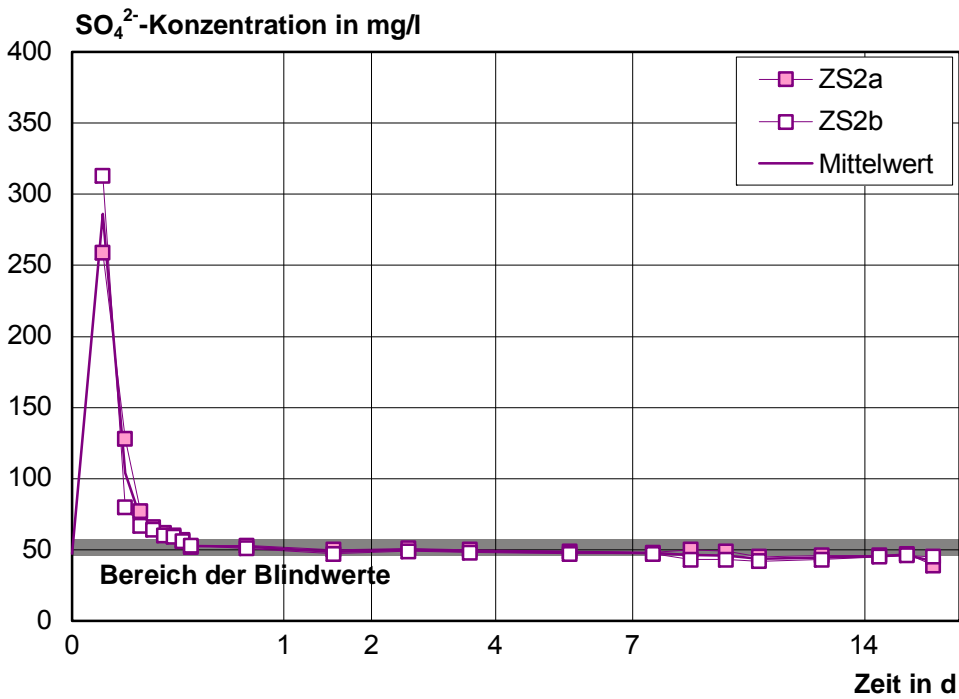


Bild B78: Sulfatkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 (w/z = 0,69)

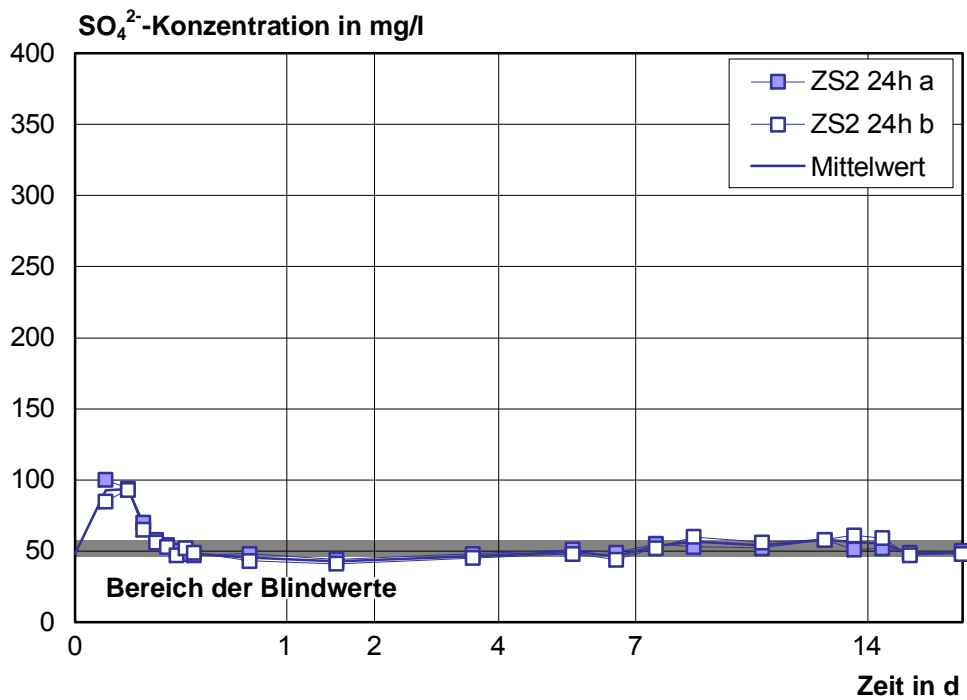


Bild B79: Sulfatkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 ($w/z = 0,69$) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit)

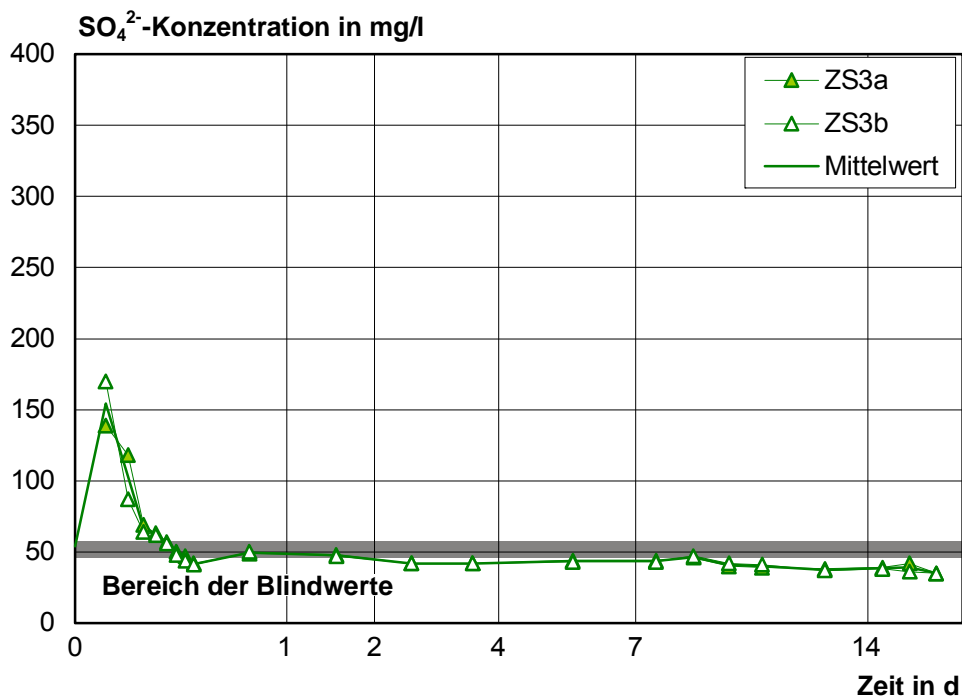


Bild B80: Sulfatkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS3 ($w/z = 1,0$)

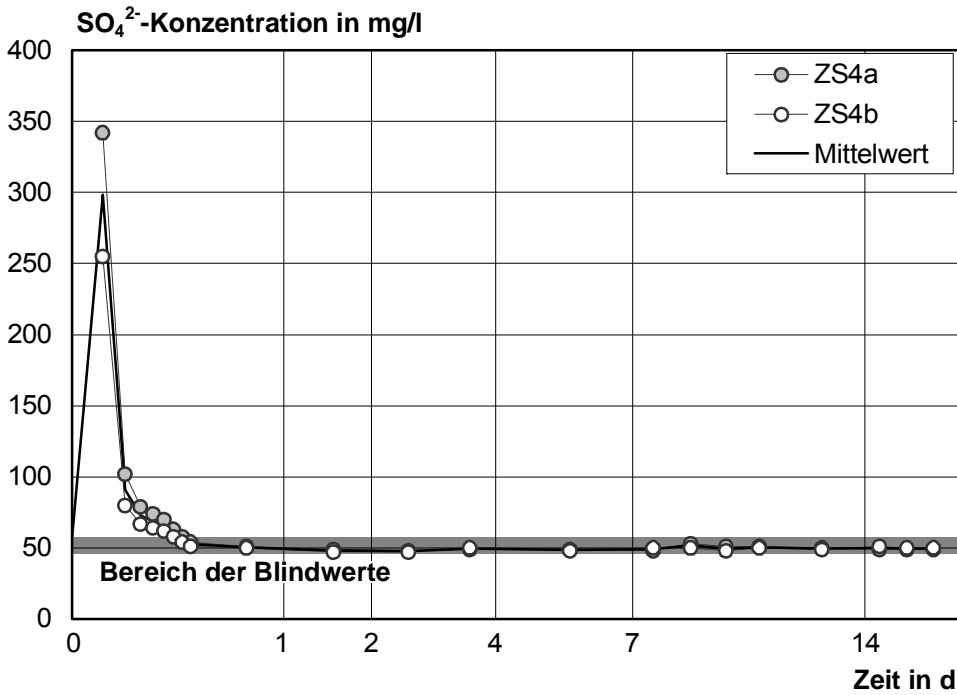


Bild B81: Sulfatkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS4 (w/z = 1,0)

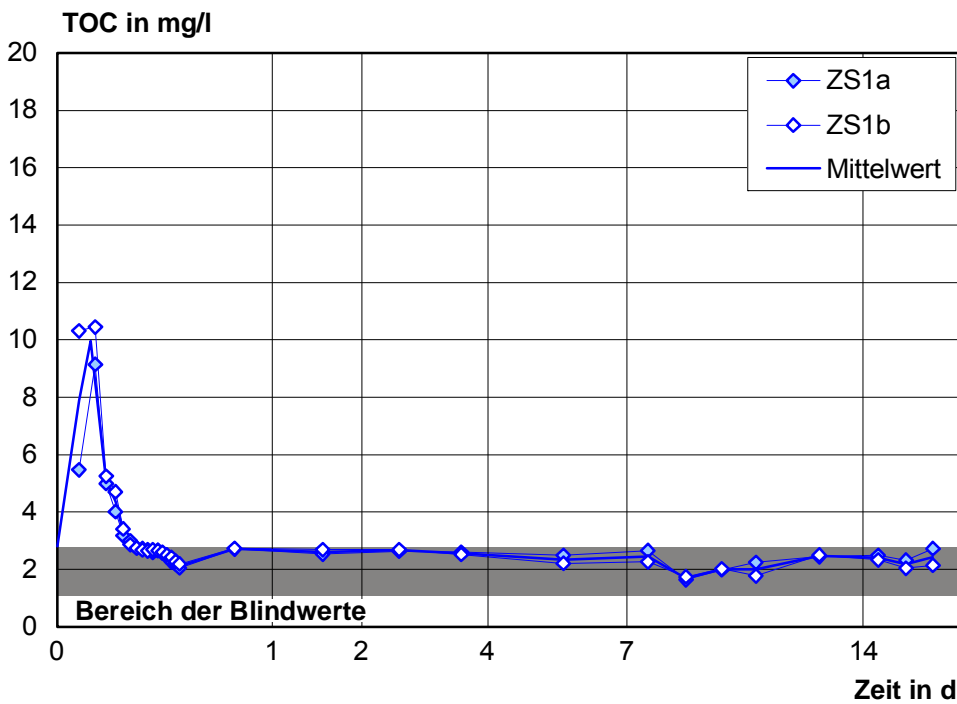


Bild B82: TOC im inversen Säulenversuch an der Zement-suspension ZS1 (w/z = 1,0)

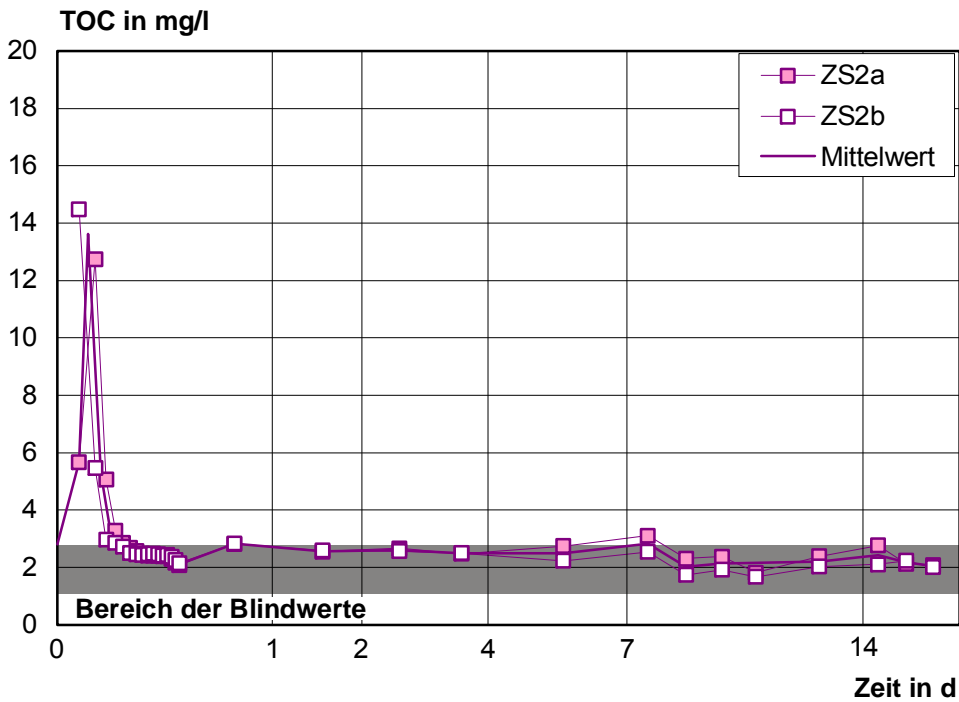


Bild B83: TOC im inversen Säulenversuch an der Zement-suspension ZS2 (w/z = 0,69)

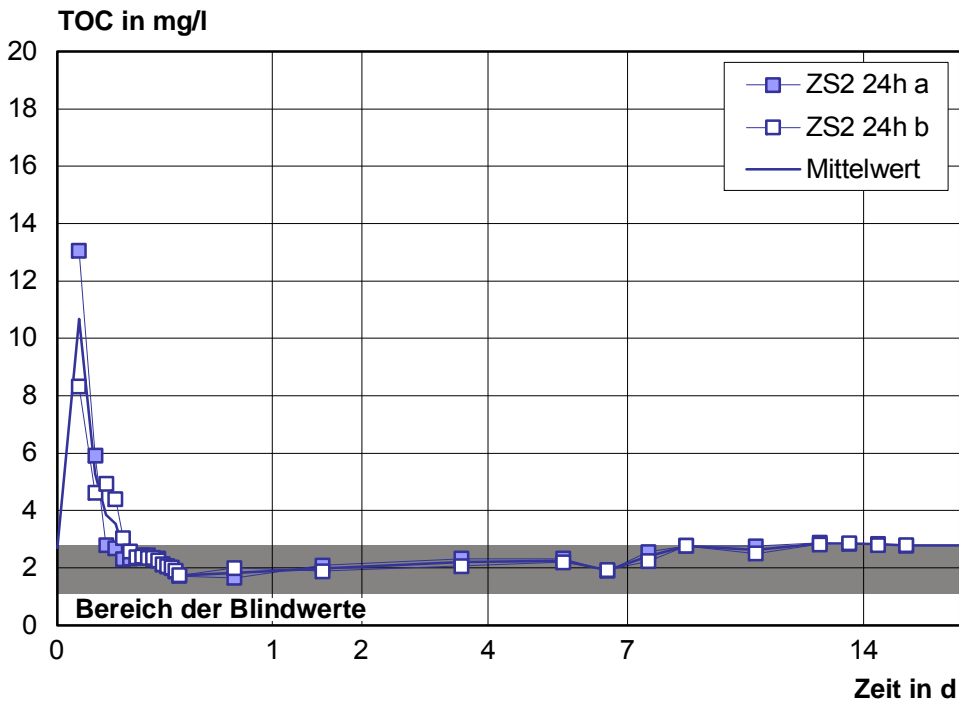


Bild B84: TOC im inversen Säulenversuch an der Zement-suspension ZS2 (w/z = 0,69) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit)

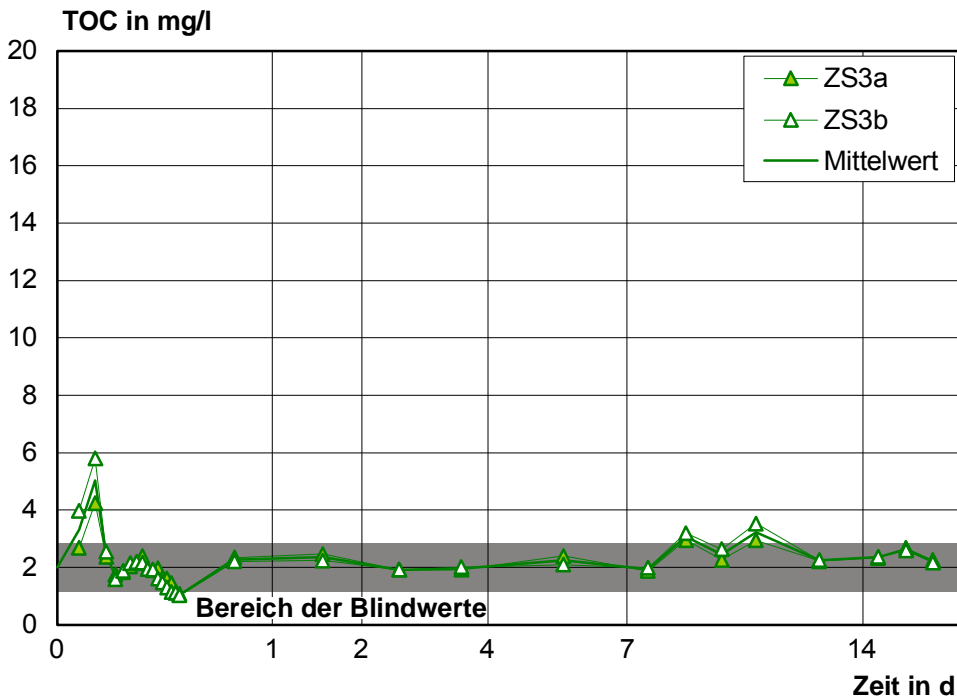


Bild B85: TOC im inversen Säulenversuch an der Zement-suspension ZS3 (w/z = 1,0)

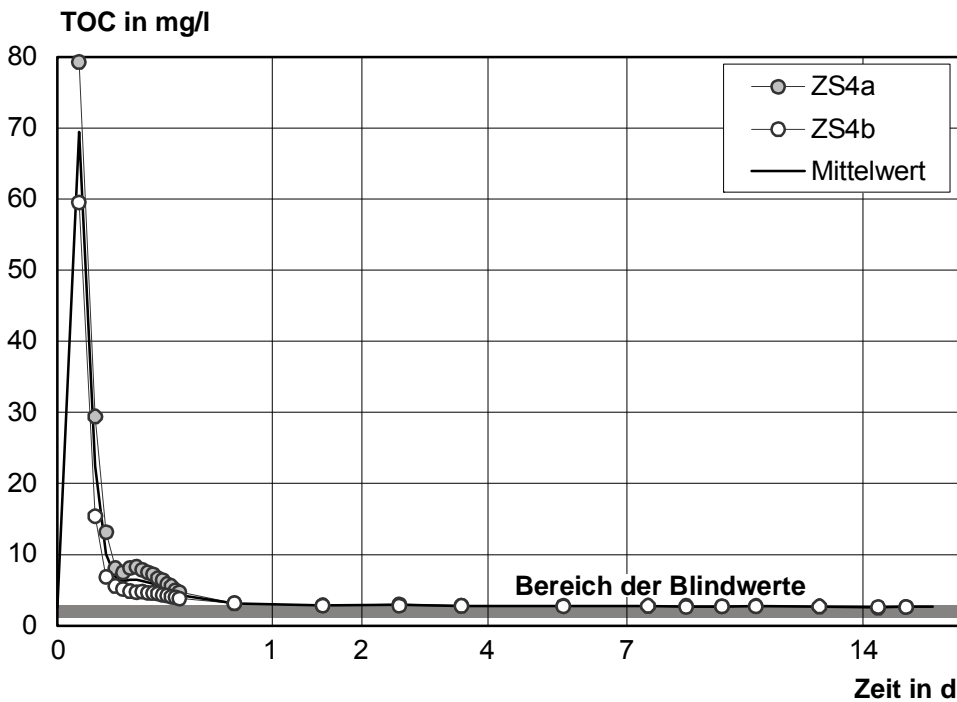


Bild B86: TOC im inversen Säulenversuch an der Zement-suspension ZS4 (w/z = 1,0)

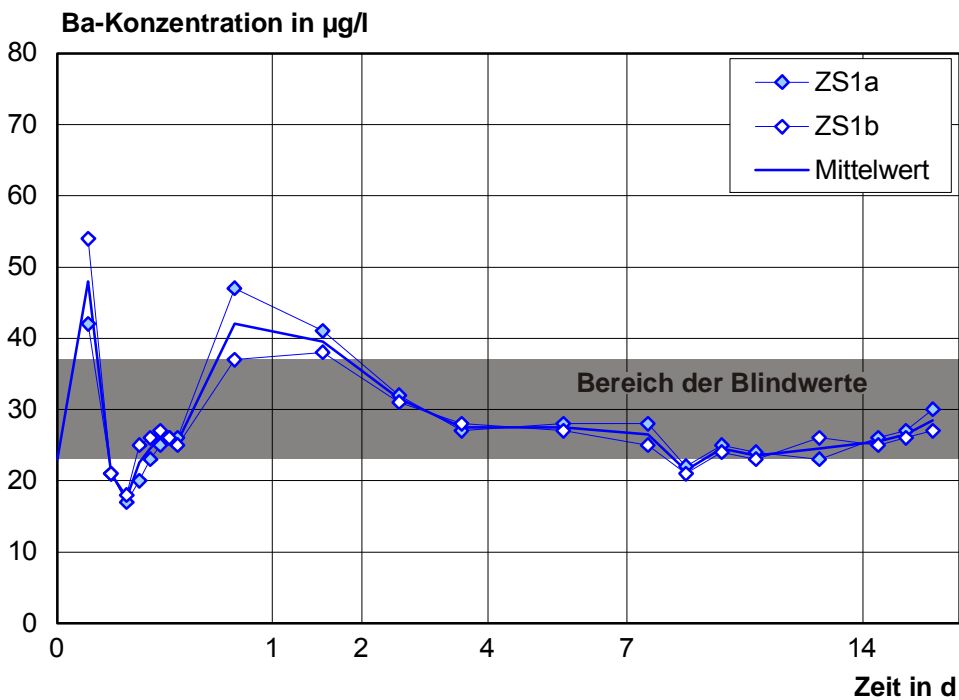


Bild B87: Bariumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS1 (w/z = 1,0)

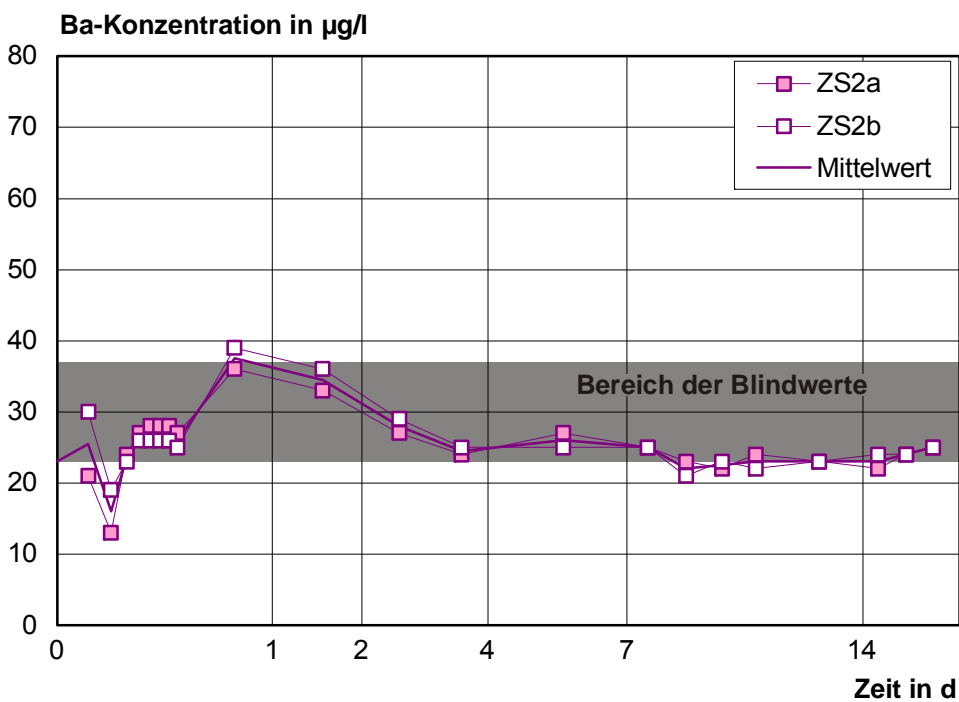


Bild B88: Bariumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 (w/z = 0,69)

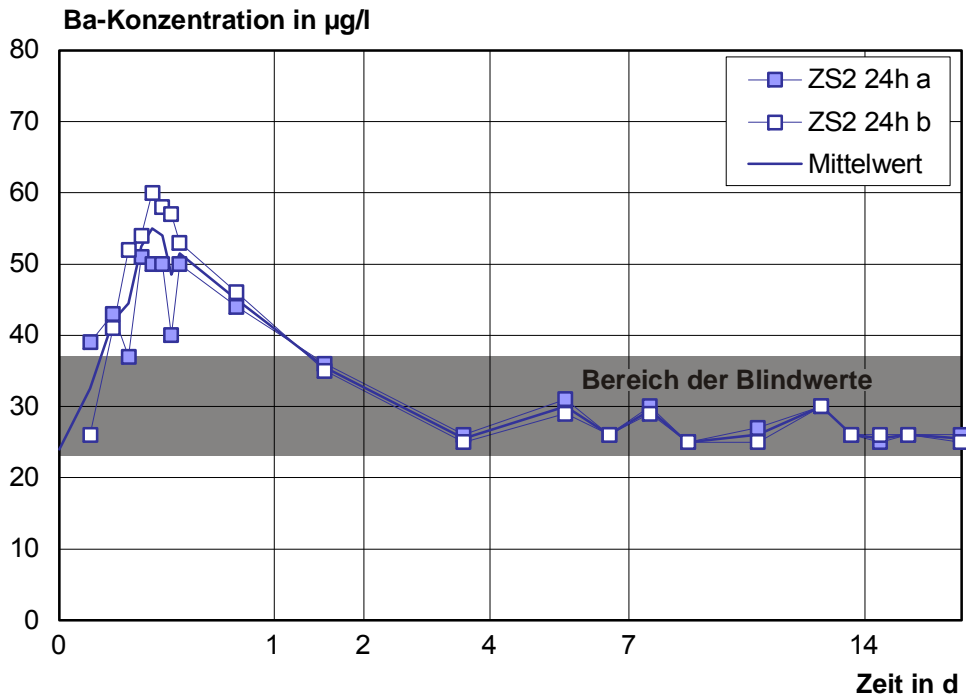


Bild B89: Bariumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 ($w/z = 0,69$) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit)

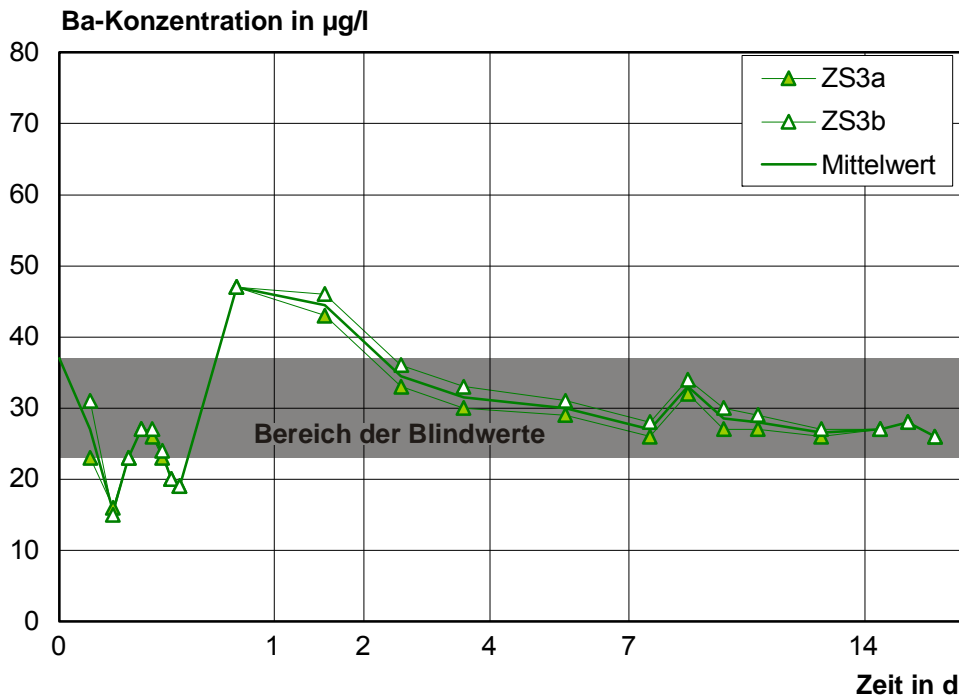


Bild B90: Bariumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS3 ($w/z = 1,0$)

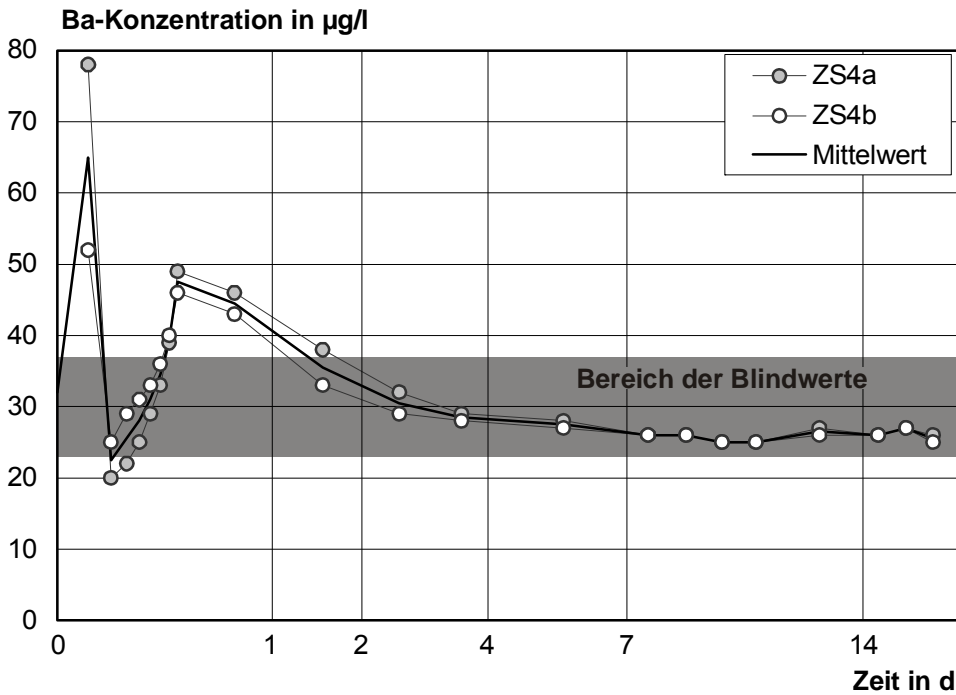


Bild B91: Bariumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS4 (w/z = 1,0)

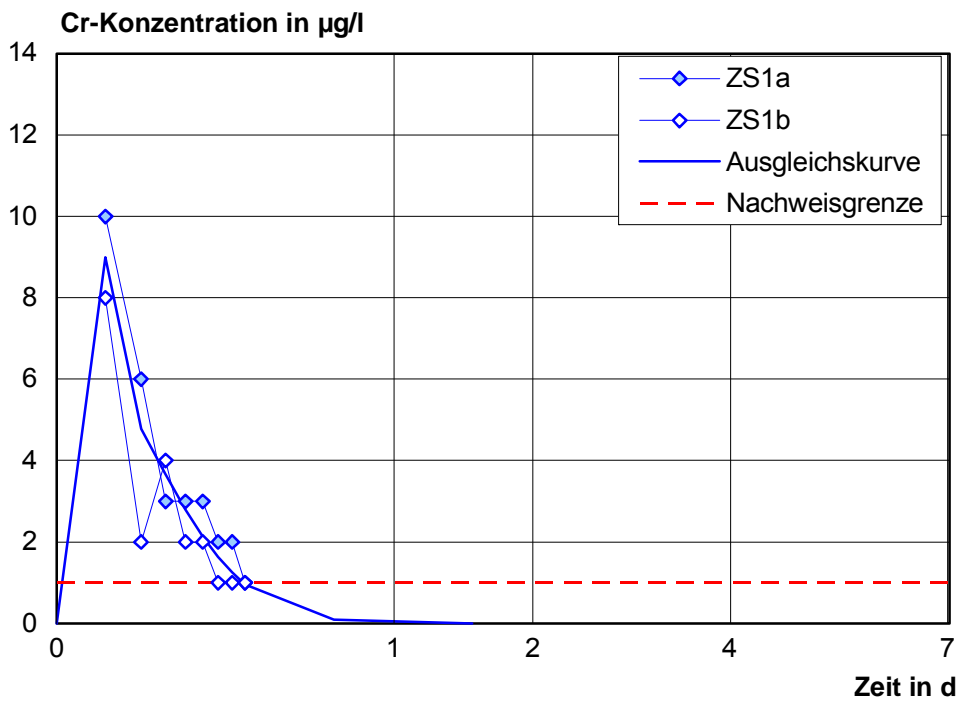


Bild B92: Chromkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS1 (w/z = 1,0)

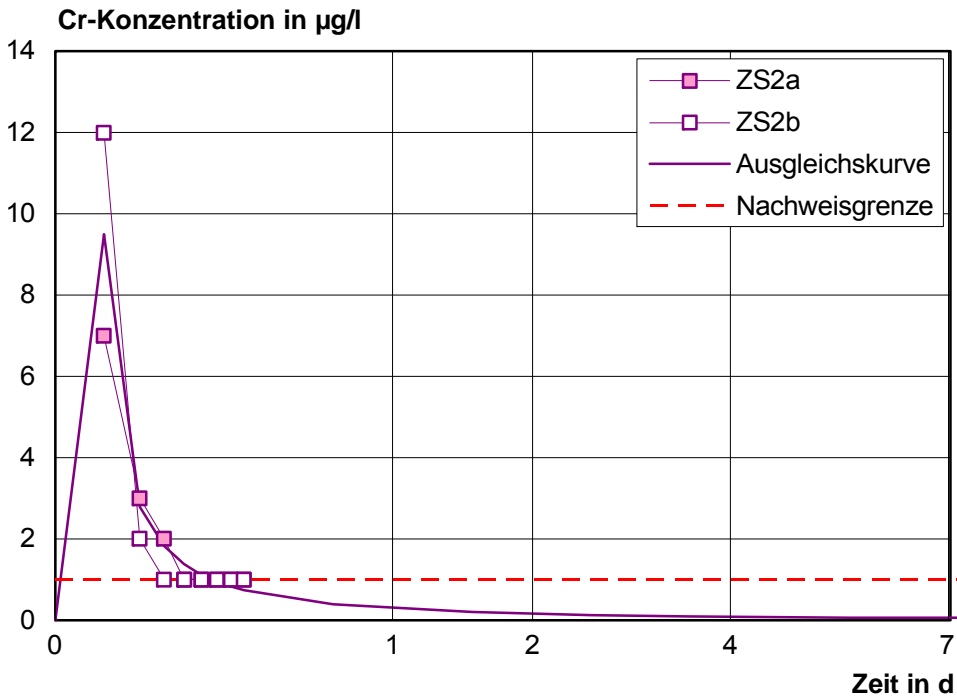


Bild B93: Chromkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 (w/z = 0,69)

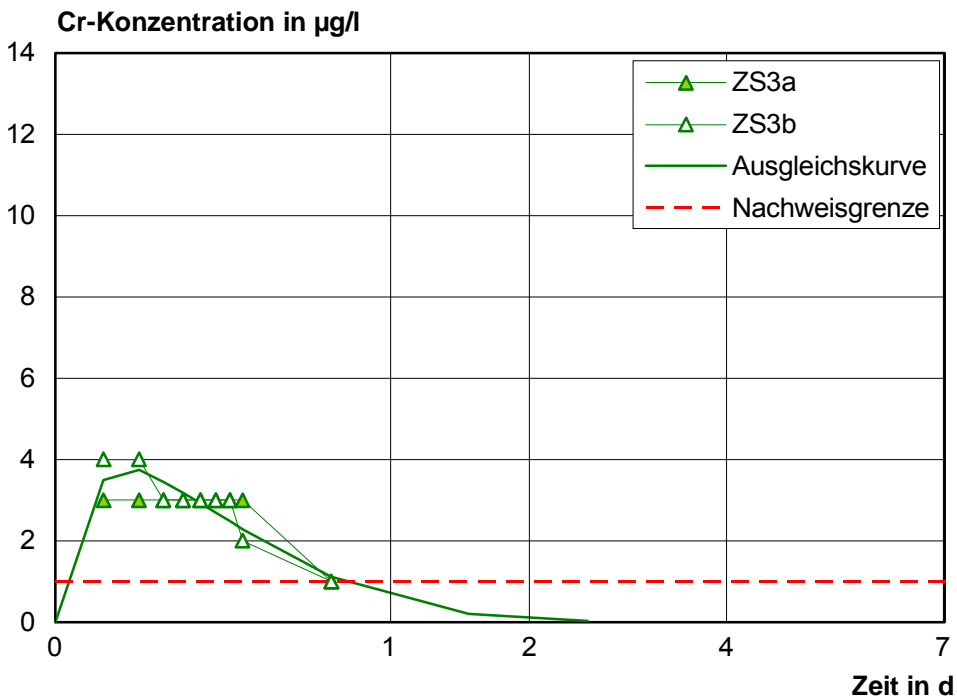


Bild B94: Chromkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS3 (w/z = 1,0)

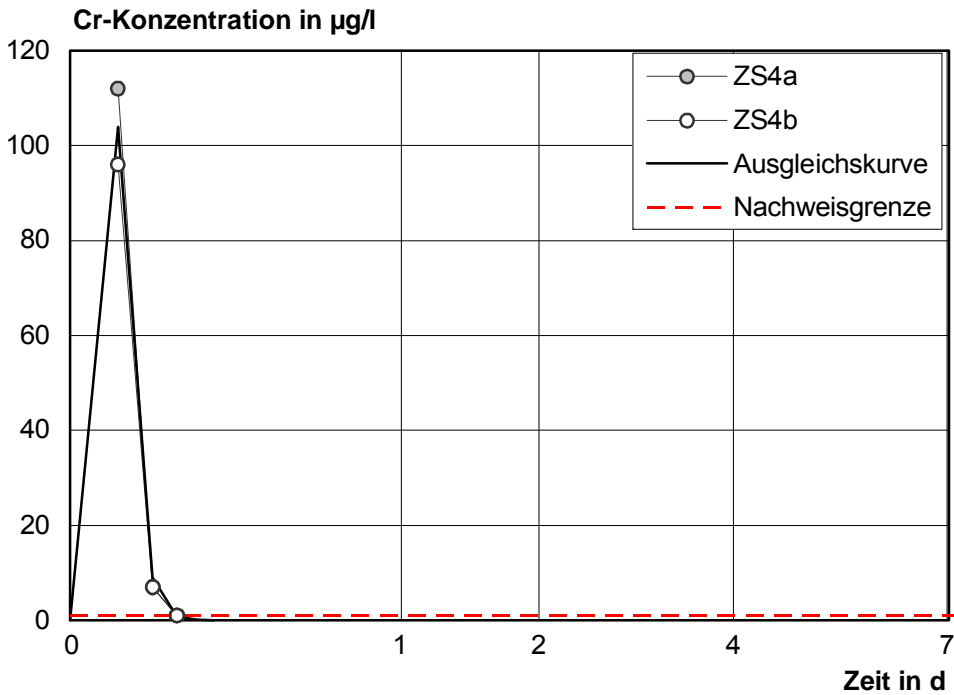


Bild B95: Chromkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS4 (w/z = 1,0)

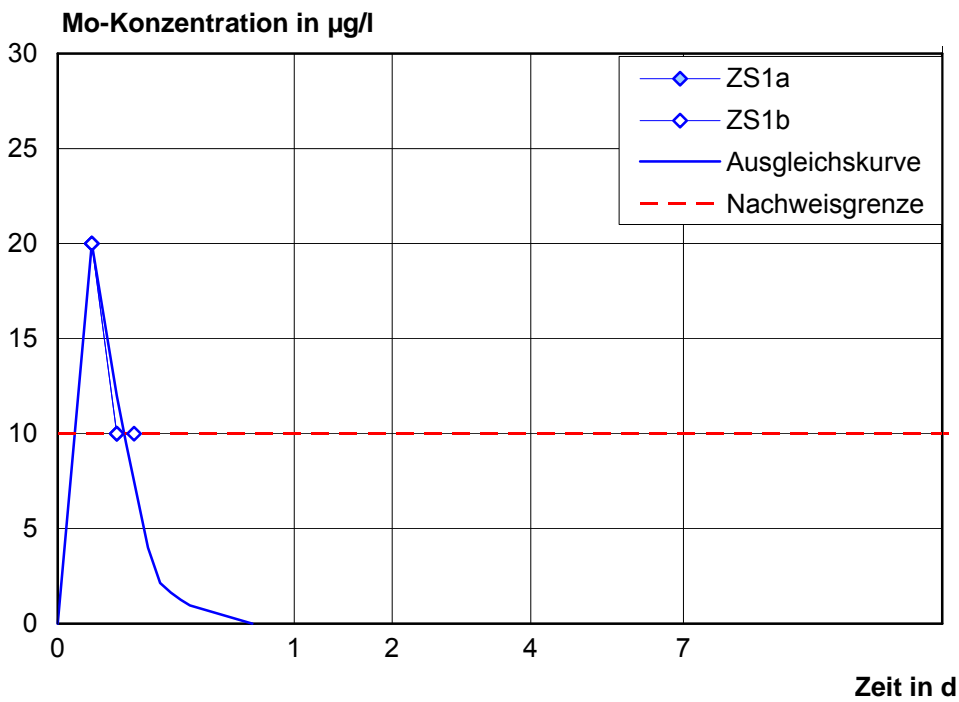


Bild B96: Molybdänkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS1 (w/z = 1,0)

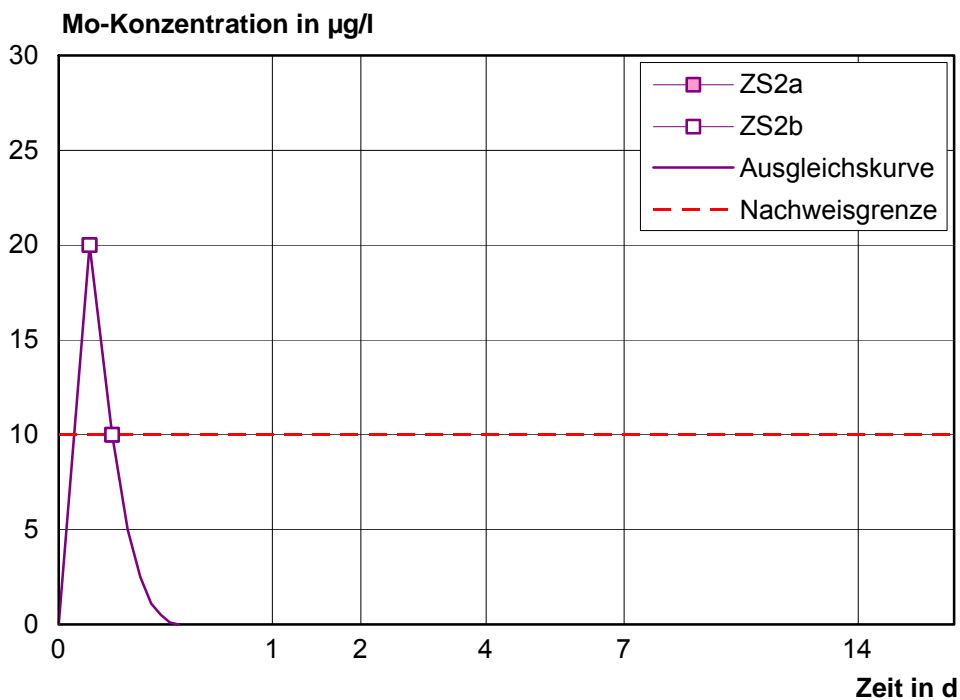


Bild B97: Molybdänkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 (w/z = 0,69)

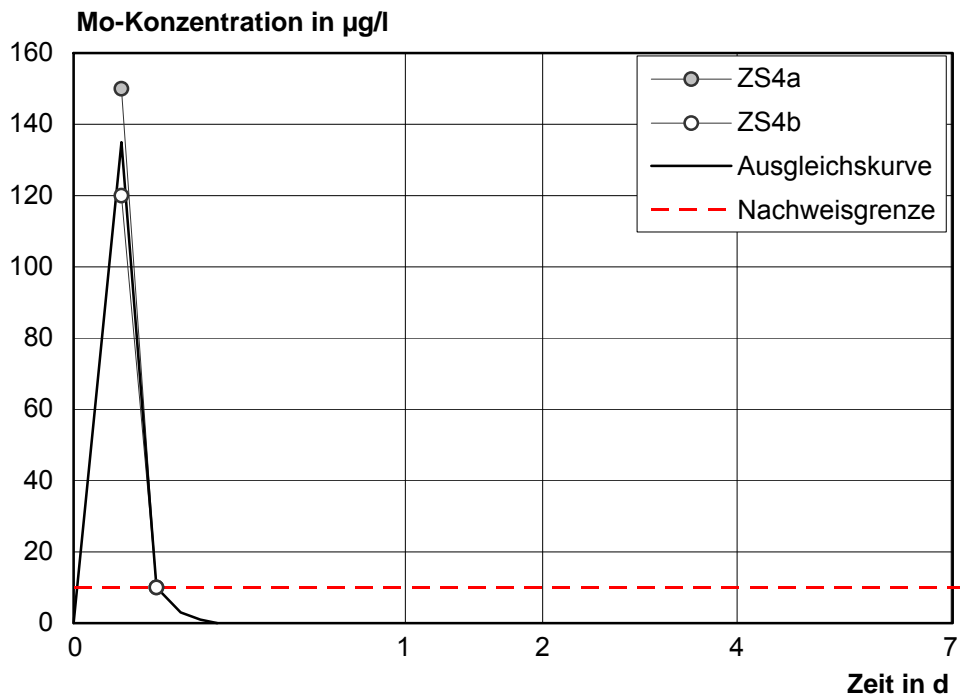


Bild B98: Molybdänkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS4 (w/z = 1,0)

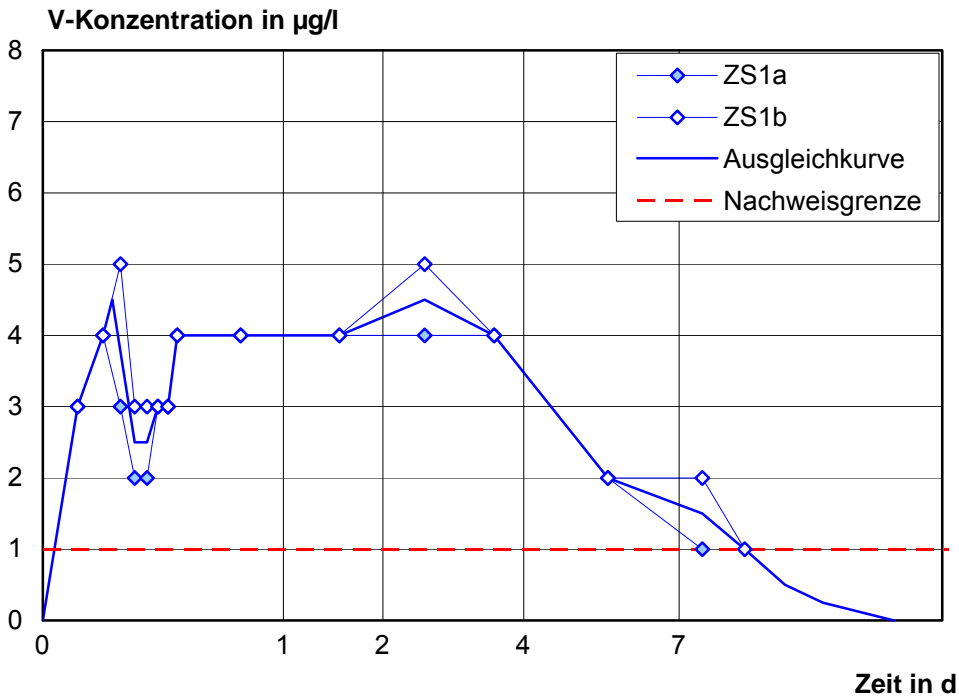


Bild B99: Vanadiumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS1 ($w/z = 1,0$)

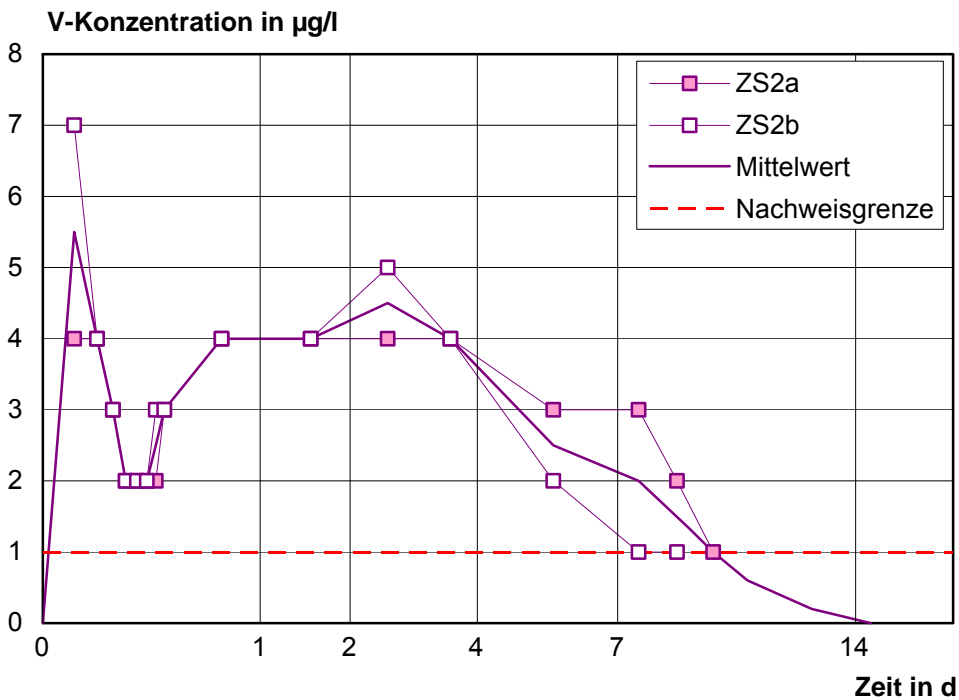


Bild B100: Vanadiumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 ($w/z = 0,69$)

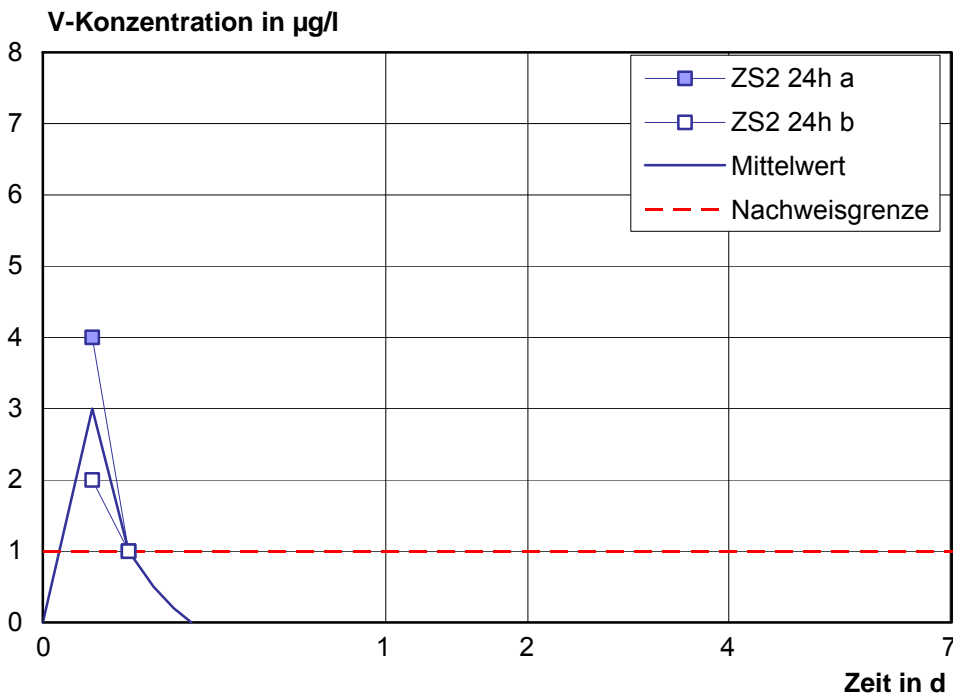


Bild B101: Vanadiumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS2 ($w/z = 0,69$) bei späterem Versuchsstart (24 h Aushärtezeit)

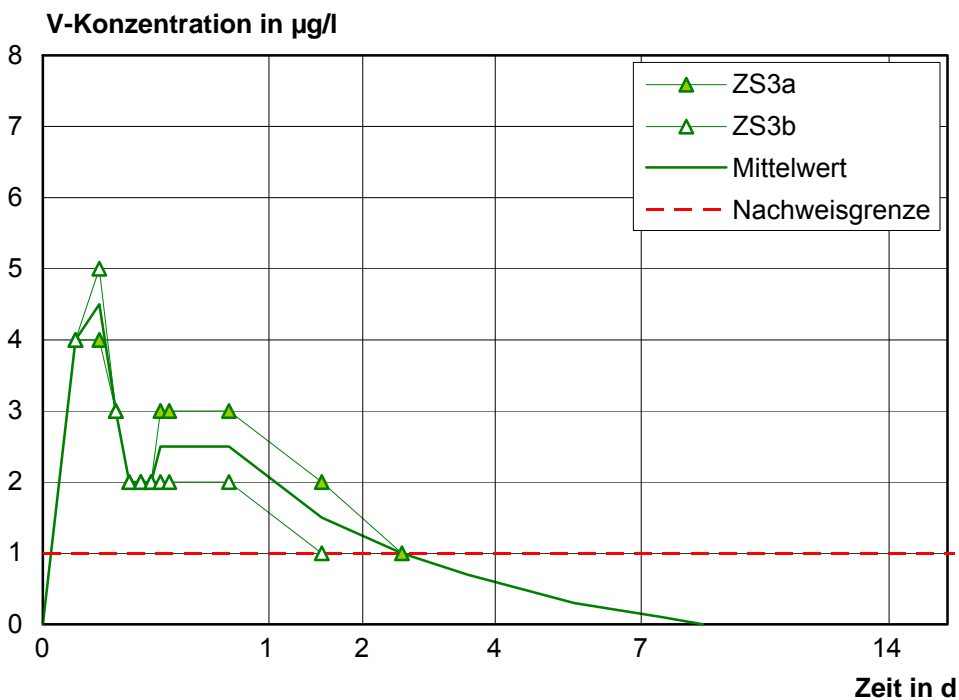


Bild B102: Vanadiumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS3 ($w/z = 1,0$)

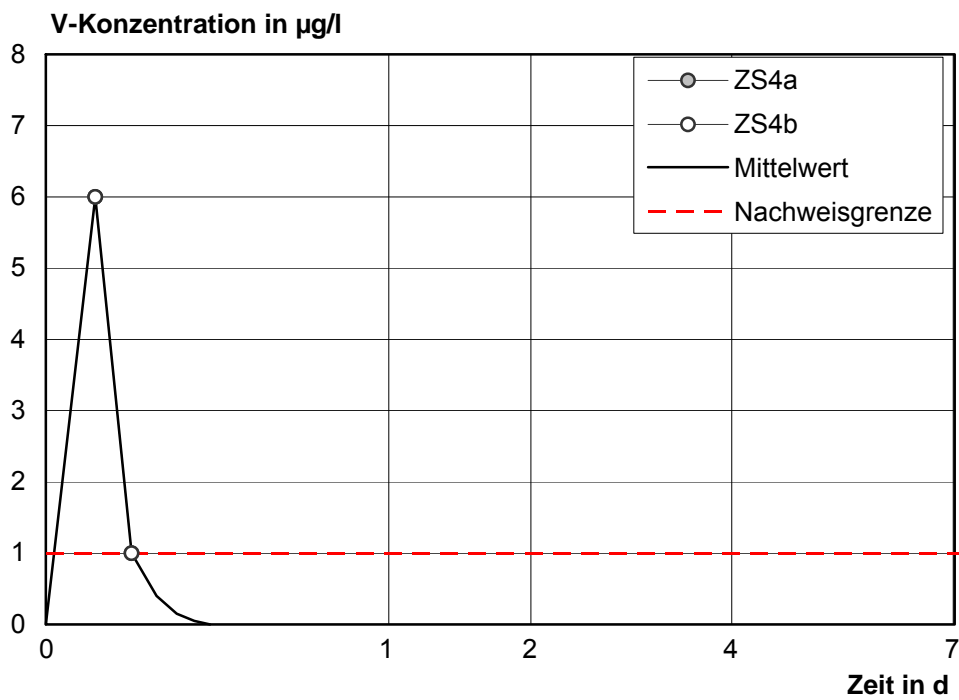


Bild B103: Vanadiumkonzentration im inversen Säulenversuch an der Zementsuspension ZS4 (w/z = 1,0)