7 Auswahl, Darstellung und Bewertung möglicher Sanierungsvarianten

7.1 Verfahrensvorauswahl

Die nachfolgenden Auswertungen beziehen sich auf das Schutzgut Grundwasser. Für den Wirkungspfad Boden-Pflanze ist derzeit keine Korrelation zwischen den Bodengehalten oder -eluaten und der Speicherung in den Feldfrüchten möglich. Hierzu finden z. Zt. zahlreiche Forschungsaktivitäten statt. Für die Auswahl möglicher Sanierungsvarianten für den Wirkungspfad Boden-Pflanze fehlen derzeit die Grundlagen.

Prinzipiell wird bei den Sanierungsverfahren für den Wirkungspfad Boden-Grundwasser zwischen Dekontaminationsverfahren und den Sicherungsverfahren unterschieden:

- Ziel von Dekontaminationsverfahren ist die Entfernung der Schadstoffe aus den betroffenen Kompartimenten. Bei den Boden-Dekontaminationsverfahren kann zwischen *In-situ* und *Ex-situ*-Verfahren unterschieden werden. *In-situ*-Verfahren bewirken eine Schadstoffreduzierung direkt im Untergrund, ohne wesentliche Eingriffe in das Bodengefüge. *Ex-situ*-Verfahren setzen den Aushub kontaminierter Bodenbereiche voraus.

- Ziel von Sicherungsmaßnahmen ist die Unterbindung der weiteren Ausbreitung von Schadstoffen, ohne diese zu beseitigen.

Sicherungs- und Dekontaminationsverfahren werden nach BBodSchG als gleichrangig eingestuft.

In der nachfolgenden Tabelle 3 sind Sanierungsverfahren für schädliche Bodenveränderungen aufgelistet, die sich nicht mehr im Forschungsstadium befinden.

Die dargestellten Verfahren werden in Tabelle 4 nach ihrer grundsätzlichen Eignung zur Sanierung der Boden- oder Grundwasserverunreinigungen mit PFC bewertet und die Gründe für eine Einschränkung oder das Ausscheiden angegeben.

Da die Schadstoffe sowohl in der ungesättigten als auch in der gesättigten Bodenzone vorkommen, erfolgt die Darstellung auch getrennt nach diesen beiden Kompartimenten.

Tabelle 3: Übersicht zu gängigen und sich in einer fortgeschrittenen Entwicklungsphase befindenden Sanierungsverfahren und Ausführungstechniken (Beispiele für Techniken sind kursiv und eingerückt dargestellt)

Sanierungsverfahren	
A Dekontamination Schadensherd	**B Sicherung Schadensherd**
A 1 Bodenaustausch A 1.1 Aushub über dem Grundwasser *Baugrube* A 1.1 Aushub im Grundwasser *Baugrube mit Wasserhaltung* *Großlochbohrungen* *Spundwandwaben* *Verbaukästen*	**B 1 Bautechnische Sicherung** B 1.1Horizontale Abdichtung *Oberflächenabdeckung* *Oberflächenabdichtung* B 1.2 Vertikale Abdichtung *Dichtwände*
A 2 Reinigung des Bodens über dem Grundwasser (ohne Bodenaustausch) A 2.1 Mikrobiologische Verfahren *Bodenspülung* *Bioventing* A 2.2 Phytoremidiation A 2.3 Pneumatische Verfahren *Bodenluftabsaugung* A 2.4 Thermische Verfahren *Dampfinjektion bzw. TUBA*	**B 2 Reinigung des abströmenden Grundwassers** B 2.1 Pump-and-Treat B 2.2 Reinigungswände *Funnel-and-Gate* *Reaktive Wand* *Drain-and-Gate* *Mikrobiologisch aktive Wand* *(Bio-Barriere, Bioscreen)*
A 3 Reinigung des Bodens im Grundwasser (ohne Bodenaustausch) A 3.1 Mikrobiologische Verfahren *Hydraulischer Spülkreislauf* *Sauerstoffinjektionstechniken* *Biosparging* *Melasseinjektion* *Grundwasserzirkulationsbrunnen (GZB)* *Enhanced Natural Attenuation (ENA)* A 3.2 Pneumatische Verfahren *Air-Sparging* A 3.3 Chemische Verfahren *Chemische Oxidation bzw. ISCO* *Chemische Reduktion bzw. ISCR* *Nanoeisen* A 3.4 Extraktionsverfahren (in Entwicklung) A 3.5 Thermische Verfahren A 3.6 Hydroschock-Verfahren (in Entwicklung) A 3.7 Elektrokinetische Verfahren(in Entwicklung)	**B 3 Immobilisierung** B 3.1 Einbindung Schadstoffe in Matrix B 3.2 Chemische Umwandlung
C Natürlicher Rückhalt (Natural Attenuation)	

Tabelle 4: **Vorauswahl der technisch grundsätzlich geeigneten Verfahren**

	Verfahren	Erläuterung	Grundsätzlich einsetzbar	Begründung
A	**Dekontamination Schadensherd**			
A 1	**Bodenaustausch**			
A 1.1	Austausch über Grundwasserbereich	Der belastete Boden wird gegen unbelasteten Boden ausgetauscht. Aushubtechniken: - Baugrube Entsorgungswege: - Deponie - Verwertung (thermische Dekontamination) - Bodenwäsche mit verschiedener Behandlung des Feinkornanteils Bodenbehandlung: - In-situ-Elution	**ja**	
A 1.2	Austausch im Grundwasserbereich	Der belastete Boden wird gegen unbelasteten Boden ausgetauscht.	nein	Die PFC-Schadstoffquelle liegt im ungesättigten Bodenbereich, nicht im Grundwasser. Deshalb entfällt das Verfahren.
A 2	**Reinigung des Bodens über Grundwasserbereich (ohne Bodenaustausch)**			
A 2.1	(Mikro)Biologische Verfahren	Anregung des mikrobiologischen Abbaus von Schadstoffen durch Zugabe von Nährstoffen in Boden (Bodenspülung) oder Erhöhung des Sauerstoffgehalts in Bodenluft (Bioventing). Oft in Zusammenhang mit Bodenluftabsaugung verwendet.	nein	PFC sind mikrobiologisch nicht abbaubar. Offensichtlich sind lediglich holzzersetzende Pilze, da sie hierfür radikalisch wirkende Enzyme (Ligninperoxidase) bilden, in der Lage, PFC zumindest teilweise abzubauen [D 9]. Dies erfordert jedoch eine erhebliche Zugabe von Holz als Primärsubstrat, mit grob geschätzt einer Volumenverdopplung de behandelten Bodens. Da derzeit unklar ist, welche Endkonzentration der Schadstoffe erreicht werden können und auch ob eine vollständige Mineralisierung er-

	Verfahren	Erläuterung	Grundsätzlich einsetzbar	Begründung
				folgt, ist die Forcierung des Abbaus mit Hilfe von Pilzen (und auch Bakterien) keine Option.
A 2.2	Phytosanierung	Aufnahme der Schadstoffe durch Wurzeln, Umsetzung und Abbau der Schadstoffe im Pflanzenkörper.	nein	*Siehe Erläuterungen in nachfolgendem Text unter Tabelle.*
A 2.3	Pneumatische Verfahren	Absaugen von belasteter Bodenluft in der ungesättigten Zone. Ein Ausgasen und somit Abreinigen des Schadensherdes wird beschleunigt.	nein	Bei der Bodenluftabsaugung werden die gasförmig vorliegenden Schadstoffe aus der ungesättigten Bodenzone abgesaugt. Wegen des sehr geringen Dampfdrucks der PFC treten diese kaum in die Gasphase. Das Verfahren ist daher ungeeignet
A 2.4	Thermische Verfahren	Injektion eines Dampf-Luftgemischs zur Verdampfung leicht flüchtiger Stoffe. Alternativ Einsatz fester Wärmequellen. Absaugung der verdampften Schadstoffe über die Bodenluft.	nein	Diese Verfahren wurden entwickelt um Schadstoffe, die als Produktphasen vorliegen, mittels Erhitzen in die Gasstrom zu überführen und sie aus dem Gasraum abzusaugen (Bodenluftabsaugung). Wegen des hohen Siedepunktes der PFC und deren fehlende Tendenz, in die Gasphase überzugehen, ist dieses Verfahren nicht anwendbar. Zudem liegen PFC nicht als Produktphasen vor.

	Verfahren	Erläuterung	Grundsätzlich einsetzbar	Begründung
A 3	**Reinigung des Bodens im Grundwasserbereich (ohne Bodenaustausch)**			
A 3.1	Mikrobiologische Verfahren	Anregung des mikrobiologischen Abbaus von Schadstoffen durch Zugabe von Nährstoffen oder Elektronenakzeptoren in Grundwasser. Es stehen eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung: - Hydraulischer Spülkreislauf - Sauerstoffinjektion - Biosparging - Melasseinjektion - Grundwasserzirkulation - Emulsified Zero-Valent-Iron (EZVI)	nein	PFC sind mikrobiologisch nicht abbaubar. Verfahren mit Zugaben von Nährstoffen und Elektronenakzeptoren sind nicht anwendbar. Emulsified Zero-Valent Iron (EZVI) (nFe0, Tenside, Speiseöl, Wasser). Das Sanierungsverfahren beruht auf der Injektion einer Mischung von abiotischen und biotischen Reagenzien, hauptsächlich zum reduktiven Abbau von chlorierten Verbindungen. Das PFC aber weder mikrobiell abbaubar sind, noch einem signifikanten Abbau an nullwertigen Eisenoberflächen unterliegen, ist dieses Verfahren nicht anwendbar.
A 3.2	Pneumatische Verfahren	Einbringen von Luft in die gesättigte Zone zum Ausstrippen von leichtflüchtigen Stoffen (Air-Sparging). Diese werden in der ungesättigten Bodenzone abgesaugt. Durch das Air-Sparging kann –je nach Schadstoff- der mikrobiologische Abbau beschleunigt werden.	nein	Die PFC weisen einen sehr geringen Dampfdruck auf und können daher nicht in die Gasphase überführt werden. Airsparging scheidet daher aus.
A 3.3	Chemische Verfahren	In den Untergrund meist über Lanzen eingebrachte Oxidationsmittel oder Reduktionsmittel (ISCO bzw. ISCR, Nanoeisen) zersetzen in rein chemischen Reaktionen die Schadstoffe zu den Endprodukten Kohlendioxid und Wasser.	nein	Das ISCO-Verfahren wäre im Prinzip in-situ anwendbar. PFC sind nur unter extremen Bedingungen oxidierbar, die unter natürlichen Bedingungen im Untergrund nicht herstellbar sind. Außerdem würde eine sehr hohe Aufsalzung (hier im Wesentlichen Sulfat) im Grundwasser eintreten. ISCO zur In-situ-Anwendung scheidet daher aus. *(Weitere detaillierte Erläuterungen in nachfolgendem Text unter Tabelle)*

	Verfahren	Erläuterung	Grundsätzlich einsetzbar	Begründung
				Die PFC sind gegenüber einer Reduktion ISCR stabil und können so nicht abgebaut werden. Das Verfahren scheidet daher aus. *(Weitere detailierte Erläuterungen in nachfolgendem Text unter Tabelle)*
A 3.4	Extraktionsverfahren	Erzeugen eines unterirdischen Spülkreislaufs, Einbringen von Lösungsvermittlern (z. B. Tenside, Alkohole, Mikroemulsionen), die Schadstoffe vom Bodenkorn lösen	nein	Das Verfahren wurde entwickelt, um Schadstoffe, die im wassergesättigten Bereich als hydrophobe Produktphasen vorliegen zu mobilisieren und auszuspülen. Das ist bei PFC nicht der Fall, PFC sind schon Tenside, das Verfahren somit nicht geeignet.
A 3.5	Thermische Verfahren	Injektion von Dampf-Luftgemischs zur Verdampfung leicht flüchtiger Stoffe. Mit Schadstoffen beladener Wasserdampf wird in der Bodenluft abgesaugt	nein	Diese Verfahren wurden entwickelt um Schadstoffe, die in dem Grundwasserleiter als Produktphasen vorliegen mittels Erhitzen in die Gasstrom zu überführen und sie aus dem Gasraum abzusaugen (Bodenluftabsaugung). Wegen des hohen Siedepunktes der PFC und deren fehlende Tendenz, in die Gasphase überzugehen, ist dieses Verfahren nicht anwendbar. Zudem liegen PFC nicht als Produktphasen vor.
A 3.6	Hydroschock-Verfahren	Einbringen kinetischer Energie in Grundwasserbereich (Rüttler, Druckluftimpulse, Akustikimpulse) und dynamische Mobilisierung der Schadstoffe, die gezielt abgepumpt werden.	nein	Nur für NAPL (nicht mit Wasser mischbare Flüssigkeiten, z. B. Ölphasen) geeignet.
A 3.7	Elektrokinetische Verfahren	Einbringen von Elektroden in die gesättigte Zone, Anlegen einer Spannung. Schadstoffe wandern entsprechend ihrer Ladung zur Kathode/Anode, wo sie gesammelt und entfernt werden.	nein	Nur für Geringleiter geeignet. Im vorliegenden Fall ungeeignet, da Verunreinigung in hydraulisch gut durchlässigem Aquifer liegt (hydraulischer Schadstofftransport würde die elektrokinetisch induzierte Schadstoffwanderung überlagern.

	Verfahren	Erläuterung	Grundsätzlich einsetzbar	Begründung
B	**Sicherung Schadensherd**			
B 1	**Bautechnische Sicherung**			
B 1.1	Horizontale Sicherung	Aufbringen einer Oberflächenabdichtung (z. B. Asphaltdecke) zur Verhinderung der Versickerung von Niederschlagswasser.	**(ja)**	PFC sind teilweise schon in den Grundwasserbereich vorgedrungen, das Verfahren deshalb nur unter Einschränkungen geeignet.
B 1.2	Vertikale Sicherung (Dichtwand)	Der Schadensherd wird mittels einer Dichtwand umschlossen. Aus der Einkapselung wird Grundwasser zur Erzeugung eines nach innen gerichteten hydraulischen Gradienten entnommen. Die einzukapselnde Fläche wird i.d.R. aus Gründen der Wirtschaftlichkeit mit einer Oberflächenabdichtung versehen.	**nein**	Die Schadstoffquelle der PFC befindet sich im ungesättigten Bodenbereich. Eine vertikale Sicherung würde somit im Vergleich zur horizontalen Sicherung keinen Vorteil bieten, wäre aber in jedem Fall wirtschaftlich ungünstiger.
B 2	**Reinigung des abströmenden Grundwassers**			
B 2.1	Pump-and-Treat	Im Abstrom des Schadensherdes werden ein oder mehrere Entnahmebrunnen errichtet. Ein Abströmen der Grundwasserverunreinigung wird verhindert.	**ja**	*Siehe Erläuterungen in Text unter Tabelle.*
B 2.2	Reinigungswand/ Funnel-and-Gate	Schadstoffbelastetes Grundwasser wird mittels einer Dichtwandanordnung („funnel“) gezielt durch einen oder mehrere Reaktoren („gate“) geleitet (funnel-and-gate). In den Reaktoren werden die Schadstoffe abgereinigt (z. B. über Eisen (0), Aktivkohle). Bei Reaktiven Wänden ist das Reaktormaterial flächig in die Wand eingebracht und wird flächig von belastetem Grundwasser durchströmt.	**ja**	Funnel-and-gate.

	Verfahren	Erläuterung	Grundsätzlich einsetzbar	Begründung
		Bei mikrobiologisch aktiven Wänden werden Sauerstoff oder Nährstoffe in das Grundwasser infiltriert und der mikrobiologische Abbau aktiviert.		
B 3	**Immobilisierung**			
B .3.1	Einbindung Schadstoffe in Matrix (Verfestigung, Stabilisierung)	Einbindung der Schadstoffe in der Bodenmatrix durch Einbringen eines Bindemittels (z. B. über Injektionslanzen) in den Boden. Die Schadstoffe werden von dem Bindemittel umhüllt und der Kontakt mit dem Wasser unterbunden.	nein	*Siehe Erläuterungen in Text unter Tabelle.* Injektionsverfahren wären zudem in der ungesättigten Bodenzone nicht durchführbar, da es nicht möglich ist, die Reagenzien hinreichend homogen zu verteilen.
B 3.2	Chemische Umwandlung	Anorganische Schadstoffe werden in nahezu unlösliche Verbindungen umgewandelt.	nein	Nur für einige Schwermetalle, nicht für PFC geeignet.
C	**Natürlicher Rückhalt**			
	Monitored Natural Attenuation (MNA)	Kontrolle des unter natürlichen Bedingungen stattfindenden Rückhalts oder Abbaus von Schadstoffen im belasteten Grundwasserabstrom.	(ja)	PFC sind nicht abbaubar. Ein kontrollierbares Belassen von Schadstoffahnen bei stabiler räumlicher Ausdehnung nach Verhältnismäßigkeitsprüfung ist zu prüfen.

Erläuterungen zu A 2.2 „Phytosanierung“

Bei der Phytosanierung wird der kontaminierte Boden mit Hilfe von Pflanzen saniert. Die Pflanzen nehmen die Schadstoffe in hoher Rate auf und setzen die Schadstoffe im Pflanzenkörper um. Dies ist bei den PFC nicht möglich bzw. der Abbau erfolgt in geringem Maße.

Die schadstoffbelasteten Pflanzen müssen somit geerntet und fachgerecht entsorgt werden. Die Phytosanierung würde dann eher einem „Extraktionsverfahren“ entsprechen, was im Prinzip für die Sanierung auch denkbar wäre und deshalb nachfolgend geprüft wird.

Die Effektivität einer solchen Phytosanierung wird durch eine Reihe von Parametern begrenzt. Dazu zählen die erforderliche Sanierungsdauer, die zu entsorgende produzierbare kontaminierte Biomasse, die begrenzte Wurzeltiefe (entspricht der sanierbaren Bodentiefe), die chemischen Bodeneigenschaften sowie die klimatischen Bedingungen [D 18].

Aufgrund ihrer erhöhten Löslichkeit werden PFC aus dem Boden von den Pflanzen aufgenommen. Da die durch PFT kontaminierten Pflanzen zum Verbrauch nicht geeignet sind und entsorgt werden müssen, ist die Phytosanierung nur dann sinnvoll, wenn durch die pflanzliche Aufnahme eine Anreicherung der Schadstoffe in der Pflanze erfolgt (sogenannte Phytoextraktion). Durch die nachfolgende Verbrennung der Pflanzen kann eine Energiegewinnung und gegebenenfalls eine weitere Konzentrierung der Schadstoffe erzielt werden kann. Da die Aufnahme in der Regel mit der Schadstoffkonzentration im Boden zunimmt, kann eine signifikante Anreicherung nur bei erhöhten Konzentrationen im Boden stattfinden. Selbst bei Pflanzen wie das deutsche Weidelgras, das eine hohe PFC-Anreicherung aufweist, nimmt die Sanierung sehr lange Zeiträume in Anspruch. Weisen beispielsweise die oberen 30 cm Boden (d.h. ca. 4.000 t/ha Boden [D 18] eine Belastung von 50 mg/kg PFOA auf , wären bei einer Anreicherung von 54 mg/kg und einem Ertrag von 10 t/ha/a [D 18] ca. 370 Jahre nötigt, um die Kontamination zu entfernen. In der Realität würden viele Faktoren die Sanierung weiter verlangsamen, unter anderen die abnehmende pflanzliche Aufnahme bei abnehmenden Schadstoffkonzentrationen, die schlechtere Aufnahmekapazität bei manchen PFC-Arten (PFOA werden besser aufgenommen als PFOS) und eventuell die Notwendigkeit, die Fruchtfolge einzuhalten.

Nach den Ergebnissen des Vor-Ernte-Monitorings nehmen die Pflanzen bevorzugt die kurzkettigen PFC (PFBA und PFPeA) auf. Die vorläufigen Geringfügigkeitsschwellenwerte sind hier am höchsten, so dass und die Sanierungswirkung in Bezug auf das Grundwasser am geringsten. Da außerdem während des langen erforderlichen Sanierungszeitraumes die Schadstoffe mit den Niederschlägen eher in das Grundwasser verfrachtet werden würden, als durch die Pflanzen extrahiert, ist die Phytosanierung keine machbare Sanierungsoption.

Für die langfristige landwirtschaftliche Wiedernutzmachung belasteter Ackerflächen sollte jedoch Phytosanierung berücksichtigt werden.

Von Regenwürmern ist auch eine hohe PFC-Aufnahme bekannt, Regenwürmer setzen im oberen Bereich bei der Nahrungsaufnahme viel organische Substanz um. Somit könnte auch diese zur Extraktion geeignet sein. Es gibt jedoch keine Fangmethoden (Vibration, Formaldehyd, Senf), um die Würmer in ausreichendem Maße aus dem Boden wieder zu entfernen.

Erläuterungen zu A 3.3 „Chemische Verfahren“

Der chemische Abbau kann reduktiv oder oxidativ erfolgen. Das Verfahren basiert auf der Injektion von Reagenzien, die spontan mit den Schadstoffen reagieren und im Idealfall zu deren Mineralisierung führen. Der Nachweis der Mineralisierung spielt daher eine wichtige Rolle [D1].

Für die *chemische Reduktion* werden verschiedenen Reagenzien wie z.B. nullwertiges Eisen[1], Vitamin B12 oder 2-Hydroxyprop-2-yl-Radikale eingesetzt. In Laborversuchen konnte nachgewiesen werden, dass PFC reduktiv defluoriert werden können, jedoch in deutlich unterschiedlichem Maße. Während die verzweigten PFOS-Verbindungen komplett entfernt wurden, hatte das Verfahren keine Wirkung auf lineare PFOS [D15]. Andere Veröffentlichungen weisen das Verfahren als ungeeignet aus [D1]. Darüber hinaus werden meist extreme Reaktionsbedingungen benötigt, so dass das Verfahren nicht in-situ angewendet werden kann. Wegen der fehlenden Effizient wird das Verfahren insgesamt ausgeschlossen.

Im Rahmen der *chemischen Oxidation* wurden unterschiedliche Reagenzien getestet, die in der Lage sind, die PFC bis zu CO_2 und HF zu mineralisieren. Erfahrungen aus der Trinkwasseraufbereitung [D1] zeigen, dass die üblichen Oxidationsmittel (Ozon, Permanganat, UV/H_2O_2) unter den gegebenen Randbedingungen hinsichtlich der Entfernung von PFC ineffektiv sind [D9].

Die Verwendung von Fenton’s Reagenzien sowie, Eisen-, Peroxid- oder thermisch aktiviertes Persulfat führten in Laborversuchen zu einer Entfernung von ≥ 97,5 % PFOS. Die Effizienz der Defluorierung von PFOS ist bei einer thermischen Aktivierung am höchsten. Ein niedriger pH-Wert und erhöhte Persulfatkonzentrationen beschleunigen die Reaktion. Bei der Aktivierung von Wasserstoffperoxid durch Katalysatoren (Eisen und Mangan) entstehen verschiedene Radikale. PFOA kann durch die erzeugten Superoxide und Hydroperoxide, jedoch nicht durch Hydroxyl-Radikale entfernt werden [D3].Der Abbau von PFOA mit aktiviertem Persulfat erfordert extreme Reaktionsbedingungen, die *in-situ* oder bei großen Durchsatzmengen (P&T) nicht wirtschaftlich anwendbar [D 9] bzw. realistisch sind.

Die Verfahren zur chemische Reduktion oder Oxidation von PFC sind aus den genannten Gründen nicht anwendbar. Die Anwendung auf belastetes Wasser in kleineren Mengen oder das bei der Bodenwäsche anfallende Feinkorn ist jedoch denkbar.

---

1 Nullwertiges Eisen wurde auch in Kombination mit 350°C-subkritischem Wasser angewendet und erzielte nur einen Teilabbau der PFC [D 14].

Erläuterungen zu B 3.1 „Einbindung Schadstoffe in Matrix (Verfestigung, Stabilisierung)“

Bei der Verfestigung/Stabilisierung werden dem Boden Reagenzien beigemischt, so dass die Schadstoffe eingebunden werden und nachher nicht mehr eluierbar sind. Hinsichtlich verwendbarer Reagenzien liegen bisher nur wenige Erkenntnisse vor. Ein kommerziell verfügbares Substrat, RemBind™, besteht aus Pulveraktivkohle, Aluminiumhydroxid und Kaolinton. Die Zugabe von chemischen Koagulationsmitteln (Eisen, Calcium- oder Aluminiumoxide, Polyaluminiumchloride, Polyamine, Polydimethylamine, Diallyldimethyl, Ammoniumchlorid, Tanninbasierte kationische Polymere) verbessert die Einbindung. Durch die Verfestigung/Stabilisierung wird die Eluierbarkeit von PFOS/PFOA um max. 99 % reduziert. Die Einbindung der kürzerkettigen PFC wurde nicht untersucht.

Es gibt keine Informationen zu der Langzeitbeständigkeit insbesondere hinsichtlich der Verwitterungsstabilität gegenüber natürlichen Einflüssen und im Durchwurzelungsbereich.

Wegen der fehlenden Informationen zur Sorption der kürzerkettigen PFC und zur Dauerhaftigkeit der PFC-Einbindung wird das Verfahren als nicht geeignet bewertet.

Zusammenfassung der vorausgewählten, grundsätzlich geeigneten Verfahrensvarianten (ohne Betrachtung der Verhältnismäßigkeit):

1. Bodenaustausch im ungesättigten Bereich
2. Horizontale Sicherung
3. Pump-and-Treat
4. Reinigungswand/ Funnel-and-Gate

Die genannten Verfahren werden in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben und die Kosten grob geschätzt. Zur Kostenschätzung wird für jedes Verfahren die für die Standortverhältnisse kostenwirksamste Ausführungstechnik hergeleitet.

7.2 Vorgehensweise bei Kostenschätzungen

Bei den Kostenschätzungen wird zwischen Investitions- und Betriebskosten unterschieden:

- Investitionskosten sind einmalig zu entrichten. Reinvestitionskosten für Anlagenteile mit einer Nutzungsdauer von über 5 Jahren zählen zu den Investitionskosten. Hierzu zählen auch einmalige anfallende Kosten, die keine Sachinvestitionen darstellen (z. B. Planungskosten).

- Betriebskosten fallen in der Betriebsphase regel- oder unregelmäßig wiederkehrend an. Reinvestitionskosten für Anlagenteile mit einer Nutzungsdauer von unter 5 Jahren zählen zu den Betriebskosten.

Die Betriebskosten werden nach der Barwertmethode nach LAGA kapitalisiert. Sanierungsverfahren mit nicht absehbarer Sanierungsdauer werden für einen Zeitraum von 25 Jahren abgeschätzt. Im vorliegenden Fall wurden zur Ermittlung des Kostenbarwertes eine langjährige Inflation mit 3 % und eine langjährige reale Preissteigerung mit 2 % angesetzt. Aus den Berechnungen ergibt sich bei einem Zeitraum von 25 Jahren ein entsprechender Diskontierungsfaktor. Das Produkt aus dem Diskontierungsfaktor und den jährlich anfallenden Kosten ergibt den Kostenbarwert.

Die Kostenschätzungen basieren auf zum Zeitpunkt der Gutachtenerstellung aktuellen Preisen. Künftige Kostenveränderungen in dem sich konjunkturell schnell verändernden Altlastensanierungsmarkt können nicht berücksichtigt werden. Die Kostenschätzungen dienen ausschließlich zur Auswahl des Sanierungsverfahrens und entsprechen nicht Kostenschätzungen nach HOAI.

Zu den geschätzten Nettokosten addiert sich die Mehrwertsteuer von derzeit 19 %.

7.3 Sanierungsvariante 1 „Bodenaustausch im ungesättigten Bereich“

7.3.1 Vorauswahl der Ausführungstechnik/ Beschreibung der Sanierungsvariante

Der Auftrag mit PFC-haltigen Schlämmen hat den Pflughorizont und die darunter liegenden Unterböden nachgewiesen flächenhaft bis 0,6 m Tiefe verunreinigt. Diese Böden müssten ausgehoben und gegen unbelastete Böden ersetzt werden. Es gibt Hinweise, dass die Belastungen auch in tiefere Bereiche verfrachtet wurden. Diese würden bei dem nachfolgend betrachteten Aushub nicht erfasst.

Die belasteten Böden sind zu entsorgen bzw. zu dekontaminieren.

Zur Entsorgung oder Dekontamination ist nachfolgend eine Vorauswahl der Möglichkeiten beschreiben:

- Entsorgung auf Deponien
  Die Entscheidung erfolgt im Einzelfall anhand der Eluatwerte. Folgende Entscheidungskriterien werden wahrscheinlich relevant sein: Dichtungssystem der Deponie, Art und Umfang der Sickerwasserbehandlung der Deponie, getrennte Ablagerung in oberen Deponiebereichen, Sofortige Abdeckung nach der Ablagerung auf der Deponie.
  Es ist zu erwarten, dass eine mögliche positive Entscheidung mit der quasi sofortigen Abdeckung der angelieferten PFC-haltigen Böden verbunden sein müsste, da die Sickerwasserreinigungen im Regelfall nicht auf die Reinigung von PFC ausgelegt sind. Dies ist aber schwer zu realisieren, weshalb die Deponiebetreiber mit hoher Wahrscheinlichkeit die Ablagerung ablehnen werden.

- Entsorgung in Monobereichen im Landkreis
  Eine Alternative zur Entsorgung könnte die Ablagerung in Monobereichen im Landkreis sein. Diese bedarf wegen der großen, zu lagernden Mengen einer abfallrechtlichen Genehmigung, wahrscheinlich mit den materiellen Anforderungen der Einrichtung einer neuen Deponie. Insofern erscheint die Realisierbarkeit derzeit nicht wahrscheinlich.

- Bodenbehandlungsanlagen
  Bodenbehandlungsanlagen arbeiten entweder mechanisch durch Fraktionstrennung oder biologisch. Beides ist bei den PFC-verunreinigten Böden nicht möglich.

- Thermische Dekontamination (Hochtemperaturverbrennung)
  Bei der thermischen Dekontamination handelt sich dabei um eine Verbrennung unter aeroben Bedingungen [D 17]. Gem. 17. BImSchV sind in Sonderabfallbehandlungsanlagen bei

mehr als 1 % Halogen mindestens 1.100 °C und 2 s Verweilzeit erforderlich. Es konnte gezeigt werden, dass die PFC unter diesen Bedingungen vollständig eliminiert werden . In Versuchen mit Klärschlamm konnte nach einer Behandlung bei 850 °C und 2 s Verweilzeit kein PFOA und PFOS mehr in den Stoffströmen nachgewiesen werden (LANUV, NRW). Das thermische Verfahren ist daher geeignet [D 1]. Anmerkung: Es ist möglich und üblich in den HT-Anlagen auch belastete Flüssigkeiten/Wasser in den Ofen zu versprühen und so ebenfalls zu verbrennen. In den Öfen sind sehr hohe energetische Reserven vorhanden, die eine solche Verbrennung ermöglichen.

- Bodenwäsche
  Die Bodenwäsche besteht im Wesentlichen aus einer Klassierung und Abtrennung des Feinkorns, das entsorgt werden muss. Im vorliegenden Fall handelt es sich um feinkörnige Böden, sodass diese zum größten Teil ausgewaschen und entsorgt werden müssten. Die Bodenwäsche scheidet somit als (Vor-) Behandlungsoption aus.

- On-site Bodenbehandlung durch Elution
  Bei der On-site Bodenbehandlung durch Elution wird der PFC-belastete Oberboden abgetragen. Das entstehende Planum auf den weitgehend ebenen Flächen muss mit Gefälle profiliert werden. Darauf wird eine dichtende Kunststoffdichtungsbahn verlegt und verschweißt und darauf der belastete Boden wieder eingebaut. Die PFC werden durch die Versickerung von Niederschlägen langsam ausgewaschen, migrieren auf der Oberfläche der Kunststoffdichtungsbahn entlang dem Gefälle zu einer zu errichtenden Sammelstation (Pumpensumpf). Dort wird das belastete Sickerwasser abgepumpt und über Aktivkohle gereinigt oder entsorgt. Das Verfahren ist prinzipiell machbar, ein weiterer Eintrag in das Grundwasser wird damit sicher vermieden. Nachteilig ist, dass die so zu sanierende Fläche über lange Zeiträume nicht genutzt werden kann. Gegenwärtig ist davon auszugehen, dass die Elution mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen kann. Dieses Verfahren wurde schon in Nordrhein-Westfalen, allerdings hier unter günstigen morphologischen und geologischen Verhältnissen realisiert.

Im vorliegenden Fall grundsätzlich machbar sind folgende Entsorgungs-/ Dekontaminationsmöglichkeiten für den ausgehobenen Boden:

- Hochtemperaturverbrennung (Boden und auch Wasser)
- On-site-Bodenbehandlung durch Elution

7.3.2 Abgeschätzte Sanierungskosten

Nachfolgend werden die Kosten für eine Fläche von 10.000 m² abgeschätzt. Die Kosten können auf dieser Grundlage hochgerechnet werden.

A) Bodenaustausch und Hochtemperaturverbrennung

Bei dieser Variante wird der Boden bis 0,6 m Tiefe ausgehoben, in Container verladen und diese zu einer Hochtemperaturverbrennung (HT) transportiert. Der ausgehobene Boden wird durch angelieferten, unbelasteten Boden ersetzt. Derzeit übliche Rückvergütungen für angelieferte Böden sind in der Kostenschätzung mit berücksichtigt.

Es liegen Untersuchungsergebnisse vor, die zeigen, dass auch Verlagerungen der PFC in größere Tiefen erfolgt sind. Die geschätzten Kosten stellen in einem solchen Fall die Mindestkosten dar.

Tabelle 5: Kostenschätzung Variante 1A „Bodenaustausch“ (Fläche 10.000 m²)

Pos.	Leistung	Menge	Einheits-preis [EUR]	Gesamt-preis [EUR]
1	**Bauleistungen**			
1.1	Baustelleneinrichtung	1	30.000	30.000
1.2	Lösen, Laden Boden bis 0,6 m Tiefe; m³	6.000	4	24.000
1.3	Liefern und Einbau Z0-Boden (REKU), m³	6.000	6	36.000
2	Entsorgung			
2.1	Hochtemperaturverbrennung inkl. Transport, to	9.600	450	4.320.000
3	Baunebenkosten			
3.1	Engineering (15% von Investkosten)	5%	4.400.000	220.000
3.2	Unvorhersehbares (20% von Investkosten)	20%	4.400.000	880.000
Gesamtsumme für 10.0000 m² bzw. 1 ha (€/netto)				**5.510.000**

B) On-site-Bodenbehandlung durch Elution

Bei der On-site-Bodenbehandlung erfolgen zunächst ein Aushub mit seitlicher Lagerung des Bodens bis 0,6 m Tiefe und danach eine Profilierung der Fläche. Das Profil wird so angelegt, dass Niederschlagswasser zu den seitlichen Rändern fließen muss. Auf das Feinplanum wird eine Kunststoffdichtungsbahn 2,5 mm mit darüber liegender Drainmatte verlegt und verschweißt. Die seitlichen Ränder werden als Gräben angelegt, in die ein Drainrohr in einem Drainkörper verlegt und nach oben hin mit einem Geovlies geschützt wird. Das Drainwasser fließt zu einem Sammelschacht, aus dem das Sickerwasser entnommen und einer kleinen Reinigungsanlage zugeführt wird. (Anmerkung: Die Möglichkeit, das Wasser zu sammeln wurde

verworfen, da der Sickerwasseranfall unregelmäßig erfolgt.) Das gereinigte Wasser wird über einen Sickerbrunnen wieder in den Grundwasserleiter zugegeben.

Es gibt Hinweise, dass zumindest teilweise eine Verlagerung der PFC in größere Tiefen erfolgt ist. Die tiefer liegenden Bodenbereiche werden durch die Kunststoffdichtungsbahn gegen versickerndes Niederschlagswasser abgeschirmt, bleiben aber unverändert erhalten.

Tabelle 6: Kostenschätzung Variante 1B „On-site-Bodenbehandlung durch Elution“ (Fläche 10.000 m²)

Pos.	Leistung	Menge	Einheits-preis [EUR]	Gesamt-preis [EUR]
1	**Bauleistungen**			
1.1	Baustelleneinrichtung	1	30.000	30.000
1.2	Umlagern Boden bis 0,6 m Tiefe, m²	6.000	4	24.000
1.3	Herstellen Planum, m²	10.000	1	10.000
1.4	HDPE-Dichtungsbahn 2,5 mm liefern und verlegen, m²	10.000	20	200.000
1.5	Drainmatte liefern und verlegen, m²	10.000	9	90.000
1.6	Drainrohr mit Drainkörper und Vlies, m	400	50	20.000
1.7	Sammelschacht, Stk.	1	10.000	10.000
			Summe Pos. 1	**384.000**
2	**Pumpe, Leitungen, Wasserreinigung**			
2.1	Entnahmepumpe, Stk.		1	5.000
2.2	Rohrleitung und Kabel, m	50	200	10.000
2.3	Wasserreinigungsanlage inkl. EMSR, Stk.	1	135.000	135.000
2.4	Versickerungsbrunnen inkl. Schacht, Stk.	1	10.000	10.000
			Summe Pos. 2	**160.000**
3	**Betriebskosten/Jahr**			
3.1	Betrieb	1	12.000	12.000
3.2	Reparatur (3% von Invest)	1	4.000	4.000
3.3	Analytik	1	2.000	2.000
3.4	Strom	1	15.000	15.000
3.5	Wasseraktivkohle	1	2.000	2.000
			Summe Pos. 3	**35.000**
	Betriebskosten (Gesamtsumme/15 Jahre)			**485.000**
4	**Baunebenkosten**			
4.1	Engineering (15% von Investkosten)	5%	544.000	27.200
4.2	Unvorhersehbares (20% von Investkosten)	20%	544.000	108.800
			Summe Pos. 4	**136.000**
Gesamtsumme für 10.0000 m² bzw. 1 ha (€/netto)				**1.165.000**

U:\DE0124\2015\DE0115_000069_RA-BAD_PFC-Belastungen_LRA-RA\0120_TL_Netzplannr\80_Berichte_Anl\Endfassung\150930_PFC-Rastatt_BE_End.doc

Zusammenfassend ist die On-site-Bodenbehandlung durch Elution mit rd. 1,1 Mio. € netto/ 1 ha Fläche kostengünstigster, als der Bodenaustausch mit Entsorgung. Bei der Behandlung durch Elution existiert ein Kostenrisiko bei Verlängerung der prognostizierten Behandlungsdauer. Diese kann zurzeit mit dem vorliegenden Kenntnisstand nicht mit ausreichender Genauigkeit abgeschätzt werden.

7.4 Sanierungsvariante 2 „Horizontale Sicherung“

7.4.1 Vorauswahl der Ausführungstechnik/ Beschreibung der Sanierungsvariante

Für die Abdichtung der Oberfläche des Bodens zur Unterbindung der Elution durch Niederschläge wird dem Boden eine wasserdichte Kunststoffdichtungsbahn (KDB) aufgebracht. Um diese gegen Witterungseinflüsse zu schützen, muss auf die Kunststoffdichtungsbahn (KDB) eine Erdschicht aufgebracht werden. In der Regel erfolgt die als Rekultivierungsschicht (gleich wie bei der Abdeckung von Deponien). Ferner ist eine Wasserfassung (Oberflächenwasser, Sickerwasser) und -ableitung erforderlich. So behandelte Areale stehen nicht mehr für eine Nutzung zu Verfügung. Die Haltbarkeit der KDB, die sonst für Deponiedichtungen eingesetzt werden, ist auf mindestens 100 Jahre ausgelegt und getestet.

7.4.2 Abgeschätzte Sanierungskosten

Nachfolgend werden die Kosten für eine Fläche von 10.000 m^2 abgeschätzt. Die Kosten können auf dieser Grundlage hochgerechnet werden.

Der Ackerschlag wird eingeebnet und verdichtet. Dies führt zu einer Zerstörung der Bodenstruktur. Danach erfolgt eine Profilierung der Fläche. Auf das Feinplanum wird eine Kunststoffdichtungsbahn 2,5 mm verlegt, verschweißt und eine Drainmatte darüber gelegt. Die seitlichen Ränder werden als Sickergräben als Rigolen angelegt, in die ein Drainrohr mit einem Drainkörper verlegt und nach oben hin mit einem Geovlies geschützt werden. Das Drainwasser versickert seitlich in das Grundwasser. Die abgedichtete Fläche wird mit einer Rekultivierungsschicht überschüttet.

Tabelle 7: Kostenschätzung Variante 2 „Horizontale Sicherung“ (Fläche 10.000 m²)

Pos.	Leistung	Menge	Einheits-preis [EUR]	Gesamt-preis [EUR]
1	**Bauleistungen**			
1.1	Baustelleneinrichtung	1	30.000	30.000
1.2	Umlagern Boden bis 0,6 m Tiefe, m²	6.000	4	24.000
1.3	Herstellen Planum, m²	10.000	1	10.000
1.4	HDPE-Dichtungsbahn 2,5 mm liefern und verlegen, m²	10.000	20	200.000
1.5	Drainmatte liefern und verlegen, m²	10.000	9	90.000
1.6	Drainrohr mit Drainkörper und Vlies, m	400	50	20.000
1.7	Boden liefern und einbauen, m³	3.000	6	18.000
			Summe Pos. 1	**392.000**
4	**Baunebenkosten**			
4.1	Engineering (15% von Investkosten)	5%	544.000	27.200
4.2	Unvorhersehbares (20% von Investkosten)	20%	544.000	108.800
2	**Baunebenkosten**			**100.000**
Gesamtsumme für 10.0000 m² bzw. 1 ha (€/netto)				**492.000**

Die Kosten für die horizontale Sicherung liegen bei rd. 0,5 Mio. € netto/ 1 ha Fläche.

7.5 Sanierungsvariante 3 „Pump-and-Treat“

7.5.1 Vorauswahl der Ausführungstechnik/ Beschreibung der Sanierungsvariante

Das Prinzip aktiver hydraulischer Sanierungs- oder Sicherungsmaßnahmen ist die Entnahme von kontaminiertem Grundwasser über Förderbrunnen, das anschließend entsprechend der Art seiner Schadstofffracht gereinigt und entweder in den Grundwasserleiter zur Einrichtung eines Spülkreislaufs wieder reinfiltriert oder dem Vorfluter zugeführt bzw. in die Kanalisation abgeleitet wird.

Im Folgenden wird die geeignete Verfahrenstechnik zur Reinigung des entnommenen PFC-verunreinigten Wassers ausgewählt.

Chemische Verfahren

Bei den chemischen Verfahren werden die Schadstoffe zerstört und mineralisiert.

- Oxidationsmittel (Ozon, Permanganat, UV/H_2O_2)

  Erfahrungen aus der Trinkwasseraufbereitung [D 1] zeigen, dass die üblichen Oxidationsmittel (Ozon, Permanganat, UV/ H_2O_2) unter den gegebenen Randbedingungen hinsichtlich der Entfernung von PFC ineffektiv sind [D 7].

  - Technisch nicht geeignet

- Starke Oxidationsmittel (Fentons Reagenz/ aktivierte Persulfate)

  Im Rahmen der chemischen Oxidation wurden im Rahmen von F+E unterschiedliche Reagenzien getestet, die in der Lage sind, die PFC bis zu CO_2 und HF zu mineralisieren. Die Verwendung von Fenton's Reagenzien sowie von Eisen-, Peroxid- oder thermisch aktiviertem Persulfat führten in Laborversuchen zu einer Entfernung von ≥ 97,5 % PFOS. Die Effizienz der Defluorierung von PFOS ist bei der thermischen Aktivierung am höchsten. Ein niedriger pH-Wert und erhöhte Persulfatkonzentrationen beschleunigen die Reaktion. Bei der Aktivierung von Wasserstoffperoxid durch Katalysatoren (Eisen und Mangan) entstehen verschiedene Radikale. PFOA kann durch die erzeugten Superoxide und Hydroperoxide, jedoch nicht durch Hydroxyl-Radikale entfernt werden [D 3]. Der Abbau von PFOA mit aktiviertem Persulfat erfordert extreme Reaktionsbedingungen, die bei großen Durchsatzmengen (P&T) nicht wirtschaftlich anwendbar sind [D 9].

  - Technisch nicht geeignet

- SISCOR

  Ein Verfahren (SCISOR™; smart combined in situ oxidation ans reduction) ist eine patentierte Kombination von Oxidationsreagenzien und Zusatzstoffen mit der eine PFOS-Mineralisierung von max. 99,8 % PFOS und 99,5 % PFOA in Laborversuchen mit kontaminierten Grundwasser erzielt werden konnte. Die optimale standortspezifische „Rezeptur" der Chemikalien ist für jedes Projekt durch Vorversuche zu ermitteln [D 2]. Bislang ist offen, ob fluorhaltige Metabolite entstehen, die mir den Routineanalyseverfahren nicht bestimmbar sind. Das Verfahren befindet sich noch im Versuchsstadium.

  - Versuchsstadium, nicht geeignet

- UV-Oxidation

  Die fotokatalytische Oxidation (UV-Strahlung in Kombination mit verschiedenen Katalysatoren wie wässriges Perjodat, Eisen, Phosphorwolframsäure oder Titandioxide) wurde bei F+E-Arbeiten im Labor getestet und ergab eine PFOA-Eliminierung von 70 – 96 %. Andere PFC-Verbindungen wurden mit niedriger Effizienz entfernt. Die Halbwertszeit der Reaktion ist jedoch mit 24 h sehr lang [D 17]. Titanoxide als Katalysator ergaben Halbwertszeit von 60 h; darüber hinaus konnten mit diesem Katalysator nur perfluorierte Carbonlsäuren, nicht aber Sulfonsäuren abgebaut werden. Die Wirksamkeit vom TiO2 kann durch die Zugabe von Phosphorwolframsäure oder die Verwendung einer Ni-Cu-Beschichtung verbessert werden; damit werden die Halbwertszeiten deutlich auf 45 - 90 Min. reduziert [D 17]. Da der Abbaugrad nicht ausreichend hoch und die Frage einer eventuellen Metabolitenbildung noch ungeklärt ist, scheidet dieses Verfahren als Wasserreinigungsverfahren aus.

  - ➢ Technisch nicht geeignet

- Elektrochemische Verfahren

  Bei elektrochemischen Verfahren erfolgt eine Mineralisierung durch direkte Oxidation und Zerstörung der PFC an der Anode. Im Labor (F+E-Arbeiten) wurde dieses Verfahren mit Bor-dotierten Diamant-Elektroden unter verschiedenen Bedingungen (Stromstärke, pH-Wert, Art des Elektrolyten, Elektroden-Abstand) getestet. In Laborversuchen konnte eine Mineralisierung der PFC bis zu 97 % anhand der Freisetzung von Fluorid erreicht werden kann. Problematisch sind Nebenreaktionen wie die AOX-Bildung. Diese beruht vor allem auf der Fixierung von Chlor (nicht Fluor) in organischen Verbindungen. Dadurch können AOX-Konzentrationen entstehen, die eine Einleitung des behandelten Wassers in die Kanalisation verbieten. Daneben kann es zur Bildung von Perchlorat (ClO4-) und, sofern Brom vorliegt, zur Bildung von Bromat (BrO3-) kommen. Da das elektrochemische Verfahren allein von der Menge des zu behandelnden Wassers und nicht von der Konzentration der Schadstoffe abhängt, ist lediglich eine Anwendung auf Konzentrate wirtschaftlich. Vor allem wegen der unerwünschten AOX-Bildung scheidet dieses Verfahren bei Pump-and-Treat aus.

  - ➢ Technisch nicht geeignet

- Plasmaverfahren

  Bei dem Plasmaverfahren wird ein ionisiertes Gas (Plasma), das neben Ionen und Elektronen auch chemische Radikale und weitere elektronisch angeregte Teilchen sowie kurzwellige Strahlung enthält, in einem elektromagnetischen Feld gezündet. In Kontakt mit dem Plasma reagieren die Radikale mit den im Wasser gelösten Schadstoffen und die durch das Plasma erzeugte Strahlung wirkt über photochemische Prozesse auf die Schadstoffe ein. Dabei werden die Schadstoffe durch Oxidation mineralisiert. Dieses Verfahren wurde bereits zur Behandlung von cyanidhaltigem Wasser erfolgreich getestet [D 11]. Zur Behandlung der PFC liegen jedoch noch keine Daten vor; das Verfahren wird daher ausgeschlossen.

  - ➢ Keine Daten/F+E zu PFC vorhanden, nicht geeignet

Physikalische Verfahren

Bei den Physikalischen Verfahren werden die Schadstoffe zerstört und mineralisiert oder abgetrennt.

- Ultraschallverfahren

  Ultraschallwellen (mechanische Wellen mit einer Frequenz von 200-618 kHz) können eine Kavitation (Bildung und Auflösung von dampfgefüllten Hohlräumen (Dampfblasen) in Flüssigkeiten) verursachen. Die erzeugten Gasblasen kollabieren und dabei entstehen sehr hohe Drücke und Temperaturen an der Blasenoberfläche, die den pyrolytischen Abbau der PFC erlauben [D 9]. Laborversuche zeigten, dass dieses Verfahren unabhängig von der Schadstoffkonzentration (PFOS, PFOA) effektiv sein kann [D 9], es wurde jedoch bislang in keinem praxisnahen Fall angewendet. Das Verfahren wird daher nicht weiter berücksichtigt.

  - ➢ Keine Daten/F+E zu PFC vorhanden, nicht geeignet

- Photolyse (UV-Strahlung)

  Bei Laborversuchen (F+E-Arbeiten) wurden höhere PFC-Abbauraten mit Vakuumultravioletten (VUV) als mit Ultraviolett-C-Licht (UV-C) erzielt. Die notwendige Reaktionszeit ist jedoch auch bei VUV relativ lang (photolytische Halbwertszeit: 90 Minuten). Weiterhin ist die Photolyserate durch die Konkurrenzabsorption von UV-Strahlen durch das Lösungsmittel (hier Grundwasser) oder andere Matrixkomponenten in der praktischen Anwendung weiter vermindert. Insgesamt erwies sich dieses Verfahren als sehr energieaufwendig und verhältnismäßig langsam [D 17], daher gibt es für dieses Verfahren bisher keine praxisnahe Anwendung. Das Verfahren wird daher nicht weiter berücksichtigt.

  - ➢ Technisch nicht geeignet

- Membranverfahren (Nanofiltration, Umkehrsomose)

  Bei der Membranfiltration passiert das zu behandelnde Wasser sowie weitere Wasserinhaltsstoffe die Membran, während die PFC zurückgehalten werden und sich aufkonzentrieren. Das Konzentrat und Spülwasser muss separat entsorgt oder behandelt werden. Die beiden Membranverfahren Nanofiltration (200-300 Dalton Molecular Cut Off) und Umkehrosmose (100 Dalton Molecular Cut Off) unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Porendurchmesser der Membranen. Je kleiner der Porendurchmesser, desto höher ist der Energieaufwand für das Verfahren. Kleinere Membranen tendieren auch eher zur Verblockung durch den Aufwuchs von Biofilmen. Die PFC-Eliminierungsgrade liegen bei ≤ 95 % (Nanofiltration) [D 1] und ≤ 99 % (Umkehrosmose) [D 14] [D 8]. Da die PFC positiv geladen sind, kann die Leistung der Filtration durch Elektrifizierung der Membrane erhöht werden [D 16]. Es müssen jedoch die aufwendige Vor- und Nachbehandlung des zu behandelnden Wassers berücksichtigt werden (zumindest bei der Umkehrosmose kommt es zu einer weitgehenden Entsalzung des Grundwassers, was eine spätere Salzzugabe erforderlich machen würde). Derzeit wird dieses Verfahrens bei der Altlastensanierung als nicht wirtschaftlich

angesehen [D 1] [D 7].

Im vorliegenden Fall müsste mindestens eine Nanofiltration eingesetzt werden. Nach [D 21] fällt bei der Nanofiltration in üblichen Anlagen im kontinuierlichen Betrieb eine mit PFC aufkonzentrierte Abwassermenge (Retentat) von 10 bis 25% an, die entsorgt oder gereinigt werden muss. Versuche hierzu werden zurzeit im Zusammenhang mit der Trinkwasseraufbereitung in Wasserwerken im Raum Rastatt/Baden-Baden durchgeführt.

- ➢ **Technisch geeignet**, anfallendes und zu entsorgendes Abwasser ist zu beachten.

- Trennverfahren (Flow Through Capacitor Verfahren, FTC)

  Ein weiteres Trennverfahren besteht darin, dass das zu behandelnde Wasser durch ein Plattenkondensatormodul (Flow Through Capacitor Verfahren; FTC) geleitet wird, wobei die PFT an den durch Strom geladenen Oberflächen abgeschieden und dadurch aus dem Wasserstrom entfernt werden. In Laborversuchen konnte der PFC-Gehalt um 90 % reduziert und im vorliegenden Fall eine Restkonzentrationen < 0,3 µg/L erreicht werden [D 13]. Der Eliminierungsgrad ist jedoch derzeit nicht ausreichend hoch um das Verfahren wirtschaftlich einzusetzen. Außerdem stellt sich die Frage eines Einsatzes mit hohen Durchsatzmengen.

  - ➢ Versuchsstadium, nicht geeignet

- Sorptionsverfahren (Aktivkohle, PerflorAd, Ionenaustauscher)

  Aktivkohle
  Bei der Sorption ist Aktivkohle das am meisten verwendete Sorptionsmittel und wurde bisher bei vielen Praxisfällen eingesetzt. Die PFC-Beladekapazität ist verhältnismäßig gering und variiert im Bereich 0,1 - 0,01 % [D 4]. Unterschiedliche Aktivkohlen können hinsichtlich der Beladekapazität sehr stark variieren. Nachteilig ist das Vorhandensein von erhöhten DOC-Gehalten (Erfahrungswert: ab ca. 4 mg/L). Der DOC kann die PFC aus ihren Bindungsplätzen auf der Aktivkohle verdrängen und die Beladekapazität weiter verringern. Geeignete Verfahrensführungen („Opferfilter“ vor der eigentlichen Sorption) können zu Einsparungen führen. Darüber hinaus ist die Absorptionskapazität vor allem von der Kettenlänge der PFC-Verbindungen abhängig; langkettige Verbindungen sorbieren besser als kurzkettige und Sulfonsäuren besser als Carbonsäuren. Dies bedeutet, dass vor allem PFBA am ehesten bei der Aktivkohle durchbricht. Aktuell ist die Sorption das Verfahren der Wahl zur Sanierung von PFC trotz der dafür erforderlichen großen Volumina an Sorptionsmaterial und des verhältnismäßig häufigen Austausches.

  Anlagerung an Eisenschlamm
  Problematisch kann sich der Gehalt am gelöstem Eisen (> 0,2 mg/L) oder gelöstem Mangan (> 0,6 mg/L) erweisen. In diesem Fall wäre eine Enteisenung/Entmanganung vorzuschalten. An dem entstehenden Metallschlamm sorbieren die PFC zu einem Teil, so dass der Schlamm entsprechend zu hohen Kosten entsorgt werden muss. Eine Verdickung des Schlamms (Kammerfilterpresse) ist dann meist von wirtschaftlichem Vorteil.

- PerflourAD
  Um insbesondere auch die kurzkettigen PFC besser zurückhalten zu können, wurde das Adsorptionsmaterial PerflourAd entwickelt. Dieses basiert auf zellulosehaltigen porösen Biomaterialien (z. B. Holz, Hanf), deren Oberfläche chemisch so verändert werden (Kationisierungsprozess), dass sie anionische Schadstoffe (PFC) adsorbieren. Durch seine hohe Spezialisierung bindet es vor allem kurzkettige PFC. Wegen der Kosten ist es eher in Kombination mit Aktivkohle geeignet. PerflourAd kann im Durchflussreaktor als Sorptionsmaterial, aber auch im Rührreaktor angewendet werden [D 5]. PerflourAd ist daher ein prinzipiell geeignetes Sorptionsmittel [D 6].

  Sorption Ionenaustauscher
  Neben den oben genannten Sorptionsmitteln gibt es andere Adsorptionsmaterialien, wie beispielsweise Ionentauscher. Die Effektivität der Ionenaustauschharze hängt von vielen Eigenschaften des aufzubereitenden Wassers ab, unter anderen der Konzentration anderer Anionen, vom Molekulargewicht der zu sorbierenden Stoffe (die Effizienz nimmt bei zunehmendem Molekulargewicht ab) und von der Kettelänge (langkettige PFC werden präferenziell entfernt) [D 9]. Am Markt stehen verschiedene Harze (patentierte Produkte oder natürliche Ionenaustauscher wie z. B. Zeolite) zur Verfügung [D 9]. In einem Pilotversuch ergab das Ionenaustauschharz deutlich schlechtere Leistungen als parallel getestete Aktivkohlen [D 4]. Dies hat sich wiederholt bestätigt.

  - **Technisch geeignet**, für die Kostenschätzung wird die Aktivkohlesorption betrachtet. Andere Adsorptionsmaterialien weisen teilweise höhere Beladungskapazitäten, aber langsamere Adsorptionskinetik und höhere Kosten im Vergleich zur Aktivkohle auf. Im Falle einer technischen Planung muss im Einzelfall geprüft werden, ob durch Kombination der einzelnen Sorptionsmaterialen eine Effizienzsteigerung erreicht werden kann.

  Flockung und Fällung
  Eine Flockung mit anschließender Abschöpfung oder Fällung ist denkbar, hierzu existieren keine Daten bzw. Anwendungsbeispiele.

  - Keine Daten/F+E zu PFC vorhanden, nicht geeignet

<u>Biologische Verfahren</u>

PFC sind mikrobiell nicht abbaubar, biologische Verfahren können daher nicht angewendet werden.

- Technisch nicht geeignet

Zusammenfassend sind folgende Verfahren technisch und hinsichtlich der technischen Reife für die Reinigung von PFC-haltigem Wasser geeignet:

- Nanofiltration
- Aktivkohleadsorption

Da kein Vorfluter zur **Ableitung von gereinigtem Grundwasser** genutzt werden kann, muss das Reinwasser entweder in die öffentliche Kanalisation eingeleitet oder wiederversickert werden. Da die Kanaleinleitung mit signifikanten Betriebskosten verbunden wäre und bei einer Wiederversickerung der Wasserhaushalt ausgeglichen ist, wird im Folgenden die **Wiederversickerung/ Wiedereinleitung** des gereinigten Grundwassers für die Auswahl und Auslegung der Aufbereitungstechnik zu Grunde gelegt. Eine Wiederversickerung über Versickerungsmulden oder Rigolen wäre wegen der großen Wassermengen nicht mit einem verhältnismäßigen Aufwand durchführbar, weswegen eine Einleitung in das Grundwasser über so genannte Versickerungsbrunnen erfolgen sollte.

7.5.2 Abgeschätzte Sanierungskosten

Um die Sanierungskosten besser auf die Einzelfälle anwenden zu können, wurden die Investitions- und Betriebskosten für die Nanofiltration und Aktivkohleadsorption in Abhängigkeit der Durchsatzmenge berechnet. Die Betriebskosten werden dabei als Gesamtbetriebskosten je m^3 Wasser/ Stunde ausgegeben.

Bei beiden Verfahren wurde bei den Berechnungen deutlich, dass die Konzentrationshöhe in dem vorliegenden Konzentrationsbereich unterhalb 25 µg/l für die Kosten keine wesentliche Rolle spielt. Für die Berechnungen insbesondere bei der Nanofiltration wurde eine PFC-Konzentration von bis zu 25 µg/l berücksichtigt.

<u>Nanofiltration</u>

Nach [D 21] fällt bei der Nanofiltration in üblichen Anlagen im kontinuierlichen Betrieb eine mit PFC aufkonzentrierte Abwassermenge von 10 bis 25% an, die entsorgt werden muss. Dies würde bedeuten, dass bei einer Entnahme von z. B. 50 m^3/h eine Menge bis zu von 12,5 m^3/h behandelt oder entsorgt werden müsste.

Die Behandlung könnte durch Aktivkohleadsorption oder HT-Verbrennung erfolgen. Eine HT-Verbrennung erfolgt durch Einspritzen von Flüssigkeiten in die Hochtemperaturöfen. Der energetische Überschuss in den Öfen erlaubt ein solches Vorgehen kontinuierlich. Die Kosten für

die Verbrennung liegen grob geschätzt bei ca. 200 €/ m^3. Die Aktivkohleadsorption ist im Vergleich, auch unter Berücksichtigung der Investitionskosten, günstiger. Zu prüfen ist das Erfordernis zur Entfernung von Antiscalant-Stoffen, welche die Kristallisation von Salzen im Nanofilter verhindern sollen, vor der Einleitung in das Grundwasser.

Bei der Nanofiltration findet eine nahezu vollständige Entsalzung des Wassers statt. Bei Mischung des gereinigten Konzentrats mit dem entsalzten Wasser ist annähernd die ursprüngliche hydrochemische Zusammensetzung wieder hergestellt. Grundsätzlich sind zur Verifizierung der Schätzkosten Analysen und Laborversuche mit mehreren Membrantypen erforderlich.

Nachfolgend sind aus [D 21] abgeleitete Investitions- und Betriebskosten dargestellt. Dabei wurden für die Entnahmemenge 25 m^3/h zwei weitere Filter und für die Entnahmemenge 100 m^3/h drei weitere Filter berücksichtigt, sodass eine Konzentrat-Restmenge kleiner 5 m^3/h verbleibt.

Bei den Investitionskosten wurden nach Erfahrungswerten für die Brunnenauslegung und Leitungsverläufe folgende Annahmen getroffen:

- Versickerungs- oder Entnahmebrunnen bis max. 20 m Tiefe mit Brunnenschacht und Anschlüssen: 30.000 € (netto)/ Stk.
- Pro Entnahmebrunnen je zwei Versickerungsbrunnen
- Entnahmebreite je Brunnen: ca. 50 m
- Elektro-/Steuer-/Wasserleitungen: 200 € (netto) / lfm.

U:\DE0124\2015\DE0115_000069_RA-BAD_PFC-Belastungen_LRA-RA\0120_TL_Netzplannr\80_Berichte_Anl\Endfassung\150930_PFC-Rastatt_BE_End.doc

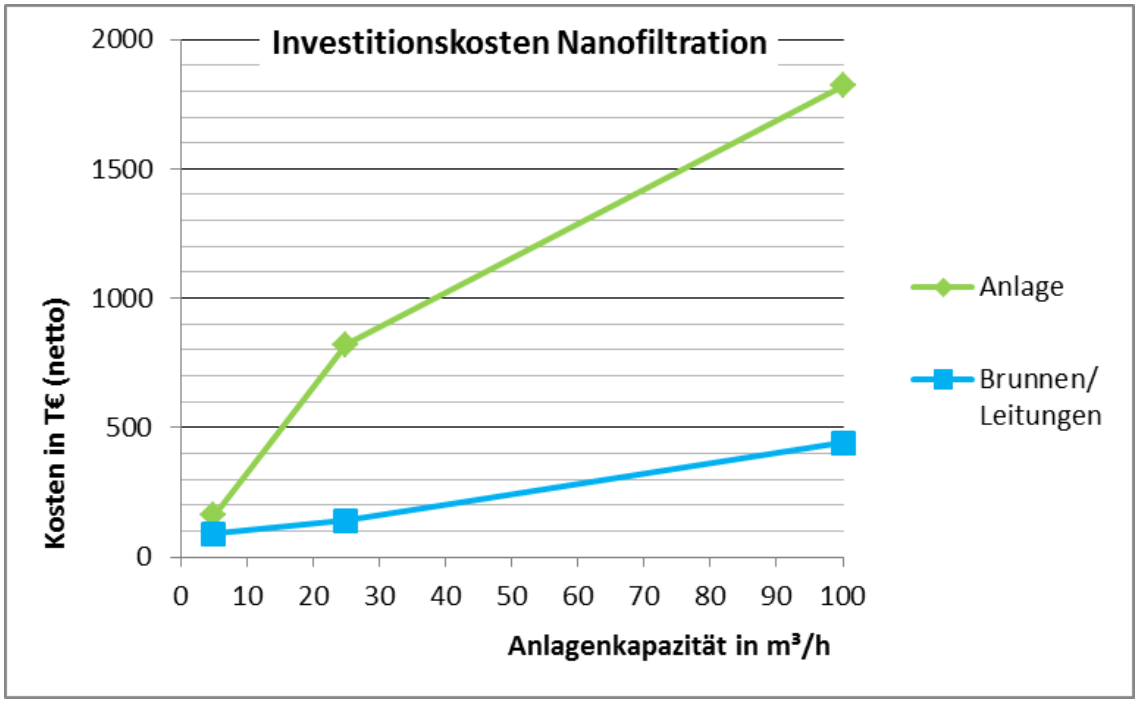

Abbildung 13: Kostenschätzung zu Variante 3 „Pump-and-Treat“ – Investitionskosten Nanofiltration

Die Betriebskosten liegen nach Literaturdaten, [u. a. D 21] bei der Nanofiltration zwischen rd. 0,30 bis 0,60 T€/m³. Hierzu addieren sich zwischen 0,10 bis 0,40 T€ für die Reinigung des Konzentrates.

Aktivkohleadsorption

Bei den Investitionskosten wurden nach Erfahrungswerten für die Brunnenauslegung und Leitungsverläufe folgende Annahmen getroffen:

- Versickerungs- oder Entnahmebrunnen bis max. 20 m Tiefe mit Brunnenschacht und Anschlüssen: 30.000 € (netto)/ Stk.
- Pro Entnahmebrunnen je zwei Versickerungsbrunnen
- Entnahmebreite je Brunnen: ca. 50 m
- Elektro-/Steuer-/Wasserleitungen: 200 € (netto) / lfm.

Bei den Betriebskosten sind folgende Leistungen berücksichtigt:

- Aktivkohleverbrauch
- Stromverbrauch
- Wartungskosten
- Reparaturkosten
- Ingenieurkosten für gutachterliche Begleitung
- Analysekosten Eigen-/ Fremdüberwachung

Anlagenauslegung:

- Brunnenpumpen – Mehrschichtfilter – Wasseraktivkohle

Bei den Investitionskosten wurden nach Erfahrungswerten für die Brunnenauslegung und Leitungsverläufe folgende Annahmen getroffen:

- Versickerungs- oder Entnahmebrunnen bis max. 20 m Tiefe mit Brunnenschacht und Anschlüssen: 30.000 € (netto)/ Stk.
- Pro Entnahmebrunnen je zwei Versickerungsbrunnen
- Entnahmebreite je Brunnen: ca. 50 m
- Elektro-/Steuer-/Wasserleitungen: 200 € (netto) / lfm.

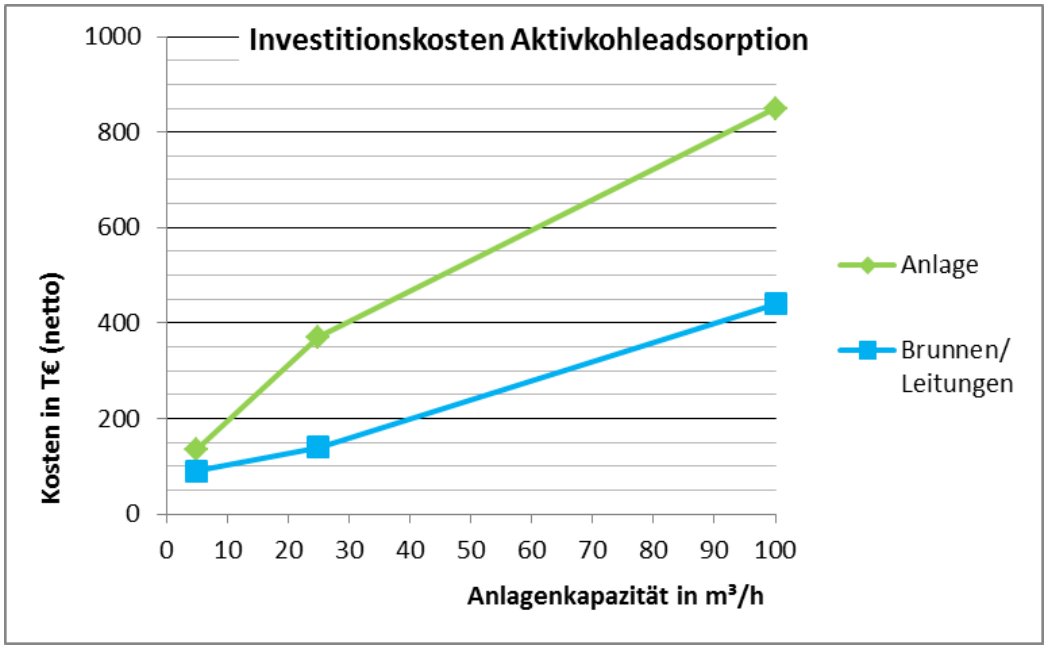

Abbildung 14: Kostenschätzung zu Variante 3 „Pump-and-Treat“ – Investitionskosten Aktivkohleadsorption

Der Kostenschätzung zur Aktivkohleadsorption wurde eine Sorptionskapazität von 0,05% zu Grunde gelegt. Eine solche Kapazität für PFC ist nach Erfahrungen und nach Literaturangaben erreichbar. Ein Risiko besteht bei Verdrängungen der PFC durch Störstoffe. Deshalb sind zur Verifizierung der Schätzkosten Laborversuche mit Originalwasser bei mehreren Aktivkohletypen erforderlich.

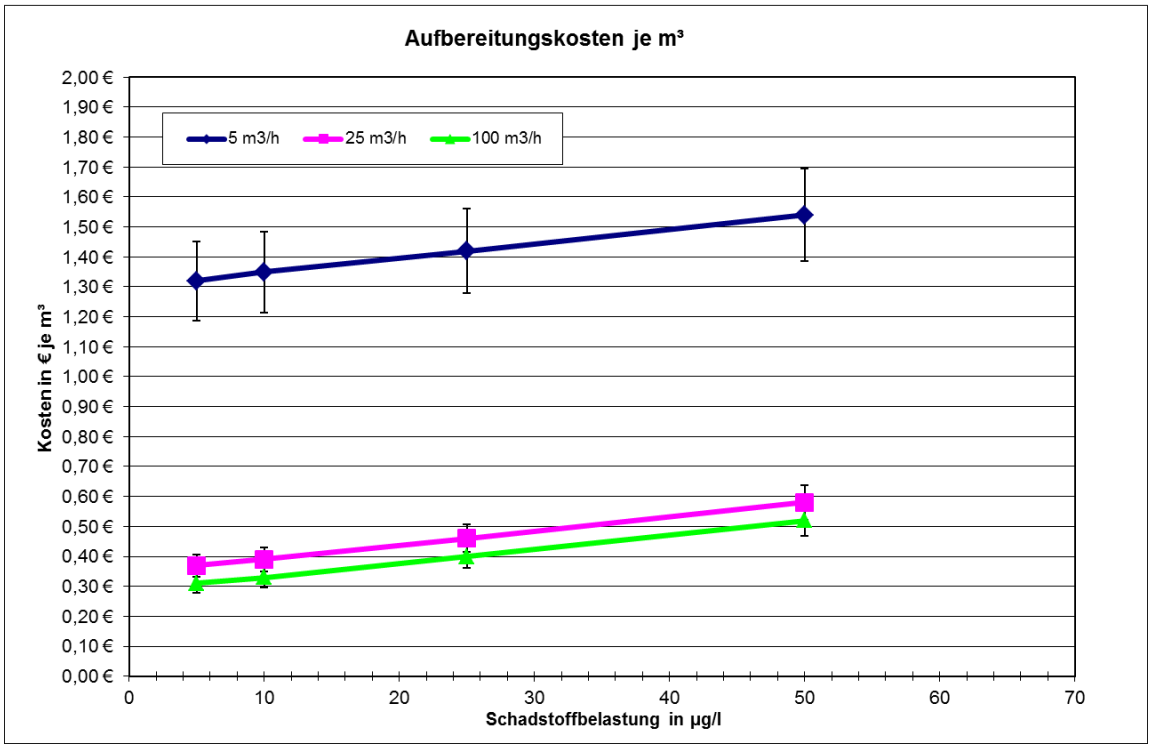

Abbildung 15: Kostenschätzung zu Variante 3 „Pump-and-Treat“ – Betriebskosten Aktivkohleadsorption

Zusammenfassend liegen die Investitionskosten bei der Nanofiltration über denen der Aktivkohleadsorption. Auch die Betriebskosten sind günstiger.

7.6 Sanierungsvariante 4 „Reinigungswand / Funnel-and-Gate“

7.6.1 Vorauswahl der Ausführungstechnik/ Beschreibung der Sanierungsvariante

Bei Permeablen Reaktiven Barrieren (PRB) oder in der häufig besser bekannten Verfahrensvariante Funnel-and-Gate wird das Grundwasser einem „Gate“ zugeleitet, in dem sich ein Reaktor befindet. Das Verfahren führt zu einer Sicherung, nicht aber zur einer Dekontamination der Schadensquelle.

Da keine Reagenzien (ähnlich dem nullwertigen Eisen) bekannt sind, die zu einer In-situ-Mineralisierung der PFC führen, bleiben als Reaktorfüllungen nur Sorptionsmaterialen übrig.

Das Verfahren "Funnel-and-Gate" verfolgt den Grundgedanken einer Sanierung des unmittelbaren belasteten Grundwasserabstroms. Die Grundwasserverunreinigung wird dabei an Leitwänden (Dichtwänden), dem sogenannten "funnel" grundwasserhydraulisch gezielt, aber ohne aktive Pumpmaßnahmen, auf einen oder mehrere besonders gestaltete Durchflussbereiche (Reaktoren, "gates") passiv zugeleitet. In diesen Reaktoren werden dem Schadstoff entsprechend gezielt Abreinigungsmaßnahmen (in diesem Fall Aktivkohle-Adsorption) durchgeführt. Aufgrund der Beschränkung der Reaktionszone auf einen vergleichsweise kleinen Raum muss die Ausbildung der gates durch entsprechende Konstruktionen einen periodischen Austausch des Reaktormaterials ermöglichen.

Zur Festlegung der Lage und der Länge des funnel sowie Anzahl, der Größe und Positionierung der gates sind die regionale Grundwasserströmung, zeitlich variierende Grundwasserspiegelstände bzw. Grundwasserfließrichtungen sowie hydraulische Durchlässigkeiten des Grundwasserleiters zu berücksichtigen. Im vorliegenden Fall wurde nach Erfahrungswerten aus vergleichbaren Projekten (z. B. Gaswerk Karlsruhe) abgeschätzt, dass die hydraulische Wirksamkeit erreicht werden kann, wenn das Längenverhältnis zwischen Leitwand und Reaktor 1 : 15 beträgt. Bei einer Länge des Systems von rd. 220 m wurden im vorliegenden Fall 7 Reaktoren mit einem Durchmesser von 2 m veranschlagt. Das heißt, je 30 m Länge ist ein Reaktor zu platzieren. Das System ist konstruktiv zur Tiefe begrenzt und bis Tiefen von bis zu 15 m einsetzbar. Der Bau tieferer Reaktoren ist prinzipiell machbar, dies sind jedoch Sonderbauwerke, die individuell konzipiert werden müssen.

Die Reinigung des belasteten Wassers in den Reaktoren erfolgt durch Adsorption der PFC auf Aktivkohle. Es ist notwendig in Versuchen die Eignung verschiedener Aktivkohlen und die Standzeiten zu untersuchen. In einer risikoneutralen Kostenschätzung wurde von einer Durchflussmenge von ca. 4 m^3/h je Reaktor, von einer Schadstoffkonzentration von 25 µg/l und einer Beladekapazität von 0,05% ausgegangen. Danach müsste das Reaktormaterial ca. alle 7 Jahre ausgetauscht werden.

7.6.2 Abgeschätzte Sanierungskosten

Der Betriebszeitraum ist zeitlich nicht begrenzt. Die Betriebskosten wurden als Kostenbarwert auf einen Zeitraum von 25 Jahren berechnet. Die Kostenschätzung ist detailliert in Tabelle 5 dargestellt. Die Kosten wurden für 100 m Länge errechnet.

Tabelle 8: Kostenschätzung Variante 4 "Funnel-and-Gate" (100 m Länge)

Pos.	Leistung	Menge	Einheits-preis [€/Menge]	Gesamtpreis Investition [€, netto]	Gesamtpreis Betrieb [€, netto]
1	**Bauleistungen**				
1.1	Baustelleinrichtung	1	250.000	250.000	
1.2	Beobachtungsmessstellen	6	12.000	72.000	
1.3	lfm. Reaktor (Gate)	45	8.000	360.000	
1.4	m^3 Befüllung mit Aktivkohle	84	1.400	118.000	
1,5	m^2 Dichtwandherstellung	1410	300	423.500	
Summe Pos. 1				**1.223.000**	
2	**Betriebskosten/Jahr**				
2.1	Analytik	1	10.000		10.000
2.2	Ingenieurleistungen	1	12.000		12.000
2.3	Austausch Aktivkohle (10 x in 25 Jahren)	0,4	250.000		100.000
Summe Pos. 2					**122.000**
3	**Baunebenkosten/ Unvor-hersehbares**				
3.1	Engineering (15% von In-vestkosten)	5%	1.233.000	**61.000**	
3.2	Unvorhersehbares (20% von Investkosten)	20%	1.233.000	**246.000**	
Summe Pos. 4				**307.000**	
Gesamtsumme Investitionskosten (€, netto)				**1.540.000**	
Gesamtsumme Betriebskosten/Jahr (€, netto)					**772.500**
Gesamtsumme Betriebskosten/25 Jahre (€, netto)					**2.700.000**

Summe "Funnel-and-Gate" 100 m Länge (€, netto)	**4.240.000**

Zusammenfassend liegen die Kosten je 100 m Funnel-and-Gate (15m Tiefe und 25 Jahre Betriebszeit bei rd. 4 Mio. € netto.

U:\DE0124\2015\DE0115_000069_RA-BAD_PFC-Belastungen_LRA-RA\0120_TL_Netzplannr\80_Berichte_Anl\Endfassung\150930_PFC-Rastatt_BE_End.doc