

Auswahl und Applikation von Pflanzenkohle für die in-situ Bodensanierung unter Berücksichtigung standortspezifischer Parameter

- KOKOSAN II-

Endbericht September 2022

Projektleitung:

Universität Wien, Department für Umweltgeowissenschaften,
Prof. Dr. Thilo Hofmann, Dr. Gabriel Sigmund, Dr. Thorsten Hüffer
Josef-Holaubek-Platz 2, UZA II, 1090 Wien

Kooperationspartner*innen:

BRIMATECH Services GmbH, Wien, DI Stefanie Prenner, Dr. Sabine Jung-Waclik
ESW Consulting Wruss ZT GmbH, Wien, DI Oliver Mann, Dr. mont. Dipl.-Ing. Klaus Wruss

Inhaltsverzeichnis:

Zusammenfassung.....	2
Projektziele	5
Projektleistungen	5
AP1 - Projektleitung und -steuerung, Literaturlauswertung, Berichtswesen	5
AP2 – Sorptionsversuche zur Untersuchung standortspezifischer Faktoren.....	5
Task 2.1: Schadstoffabhängige Kohlenauswahl	6
Task 2.2: Einfluss von Standortfaktoren auf die Schadstoffadsorption an Kohlen	8
Task 2.3: Detailuntersuchungen zur Konzentrationsabhängigen Sorptionskapazität	11
AP3 – Abschätzung der Kohlen-Applikationsrate	12
Task 3: Bestimmung der Kohlen-Applikationsrate.....	12
AP4 – Technische Arbeitshilfe und Validierung an Realproben.....	14
Task 4.1: Technische Arbeitshilfe	14
Task 4.2: Validierung der technischen Arbeitshilfe an Realproben	18
AP5 – Stakeholder-, Akzeptanz- und Kosten-Nutzen-Analyse	20
Task 5.1: Identifikation relevanter Stakeholder und deren Rollen	23
Task 5.2: Akzeptanzanalyse	24
Task 5.3: Kosten-Nutzen-Analyse.....	41
Veröffentlichung und Verbreitung der Ergebnisse	47
Anhang.....	48

Zusammenfassung

Internationale und nationale Studien zeigen, dass **Biokohle^{1,2,3} für den Einsatz zur in-situ Bodensanierung grundlegend geeignet** ist. KOKOSAN I schlussfolgerte, dass Biokohle (engl. „Biochar“) insbesondere für die Immobilisierung von **leicht- bis mittelbelasteten Altstandorten** geeignet ist, an welchen die Schadstoffquelle (Hotspot) entfernt wurde und großflächig Residualkontaminationen verblieben sind, welche die Verwendung und somit den Wert der Liegenschaft nachteilig beeinträchtigen (vgl. auch § 29 UFG). Werden diese Flächen nicht behandelt, führt dies zu ökologischen (weitere Schadstoffemission, negative Auswirkungen auf die Biodiversität) und ökonomischen (Wertverlust, beschränkte Nutzungsmöglichkeiten) Nachteilen.

Ziel des KOKOSAN-Verfahrens ist es, durch die Einmischung von Kohlen die **Mobilität und die Bioverfügbarkeit von Schadstoffen** bei leicht- bis mittelgradig kontaminierten Standorten nachhaltig und kosteneffizient zu **minimieren**. Dabei wird der Schadstoff immobilisiert und der Eintrag ins Boden- und Grundwasser wesentlich reduziert. Des Weiteren wird durch Kohle die Bodenqualität verbessert und eine Sanierung des Standortes mit einem guten gesamtökologischen Fußabdruck unterstützt. Entscheidend für die erfolgreiche Durchführung des Verfahrens ist die langanhaltende Wirkung von kohligen Bodenadditiven. Ist diese nicht gegeben, wird eine Nachbehandlung notwendig, die eine wirtschaftliche Anwendung von KOKOSAN infrage stellt. Der Einsatz von Kohle immobilisiert in erster Linie Schadstoffe und erfordert eine dem Stand der Technik entsprechenden Überwachung. Der Einsatz von Kohle kann als bodenschonende Alternative zu dem traditionellen Konzept von „Aushub und Räumung“ betrachtet werden.

Das Ziel in KOKOSAN ist also die dauerhafte Veränderung des Verhältnisses zwischen gelöstem und gebundenen Schadstoffanteil zugunsten des Letzteren. Dies wird dadurch erreicht, dass es an Kohlen zu einer starken dauerhaften Bindung (Sorptions) der Schadstoffe kommt (vgl. Kapitel 4). Eine weitere Bedeutung hat die gleichzeitige Veränderung bodenchemischer Parameter, durch welche die Spezierung und Sorption von Metallen, Metalloiden und ionisierbaren organischen Schadstoffen verändert wird. Durch das Einmischen von Kohle erhöht sich in der Regel der pH-Wert, was die Mobilität vieler Metalle verringern kann. Die Pflanzenaufnahme von Schadstoffen wird durch die Immobilisierung an Kohle hierbei verringert (Maletić et al., 2022).

¹International ist der Begriff „**Biochar**“ (deutsch: Biokohle) üblich, welcher die Herstellung durch Pyrolyse aus rezenten Biomassen wie Hackschnitzeln oder Gräsern (aber auch Gülle oder Klärschlamm) bezeichnet und diese von fossilen Kohlen abgrenzt. Aus Gründen der Etablierung in der internationalen und deutschsprachigen Literatur wird hier der gebräuchliche Begriff „**Biokohle**“ verwendet, analog zu den aktuellen Publikationen des Umweltbundesamtes (Haubold-Rosar et al., 2016) oder BMLFUW (Baumgarten et al., 2017), welcher sich in keiner Weise auf den im Nahrungsmittelbereich üblichen Begriff „Bio“ (engl. „organic“) bezieht. Pflanzenbasierte Biokohlen werden in weitere Folge entsprechend ÖNORM S 2211 als „**Pflanzenkohlen**“ bezeichnet und sind die zentrale in KOKOSAN II verwendete Biokohlenart. Pflanzenkohle-basierte, durch Dampfaktivierung hergestellte Kohlen werden zur Unterscheidung von herkömmlichen Aktivkohlen als „**Pflanzenaktivkohlen**“ bezeichnet.

²Haubold-Rosar, M., Kern Jürgen & Reinhold Jürgen, 2014. Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer "veränderter" Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-sequestrierung in Böden, Finsterwalde: Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften. <https://tinyurl.com/ndexk2b6>

³Baumgarten, Andreas, et al. "Biokohle – Potential Und Grenzen Der Anwendung in Der Land- Und Forstwirtschaft." BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT, 2017. <https://tinyurl.com/43th5e6y>

Die in KOKOSAN II entwickelte **Arbeitshilfe für die Sanierungspraxis**, ermöglicht es unter Berücksichtigung von **standortspezifischen Einflussfaktoren** die schadstoffspezifische **Art der Kohle** sowie die benötigten **Applikationsmengen** für einen konkreten Standort zu ermitteln. Die Arbeitshilfe wurde in Zusammenarbeit mit ESW Wruss an Realproben getestet und validiert. In Kapitel 1 der Arbeitshilfe wurden die Grundlagen zur in-situ Schadstoffimmobilisierung mit Pflanzenkohlen dargestellt. Kapitel 2 zeigt den **Entscheidungspfad zu Bestimmung der grundsätzlichen Eignung** des Standortes für die Schadstoffimmobilisierung mit Pflanzenkohle. Hierbei werden standortspezifische Faktoren wie beispielsweise die Einmischung und das Vorhandensein einer mobilen Schadstoffphase abgewogen. In Kapitel 3 wurden **rechtliche Grundlagen** für die Verwendung von Pflanzenkohle dargestellt, Kapitel 4 widmete sich den Mechanismen der **Schadstoffimmobilisierung**. Das Verständnis dieser Funktionsweisen resultierte in die **schadstoffabhängige Auswahl von geeigneten Kohlen in Kapitel 5**. Das abgedeckte **Schadstoffspektrum** umfasst dabei **(NSO)-PAK, Cd, Zn, Hg, Cr, Pb, As und Sb**. Für jeden dieser Schadstoffe werden zentrale Kohleeigenschaften für die Schadstoffbindung identifiziert und geeignete Kohlen benannt. In Kapitel 6 wurden Vorversuche dargestellt, um ausgewählte Kohlen und Einmischungsraten an einem gegebenen Standort zu testen.

Der KOKOSAN Ansatz wurde zusätzlich durch BRIMATECH Services GmbH einer **Stakeholder- und Akzeptanzanalyse** unterzogen, um mögliche **Implementierungsbarrieren** frühzeitig zu erkennen und gegebenenfalls entgegenwirken zu können. Diese Ergebnisse sind im letzten Kapitel dieses Berichtes Ausführlich dargestellt.

Summary

International and national studies show that biochar is suitable for use in in-situ soil remediation. KOKOSAN I concluded that biochar is particularly suitable for the immobilization of lightly to moderately polluted contaminated sites, where the pollutant source (hotspot) has been removed and large areas of residual contamination remain, which adversely affect the use and thus the value of the property (see also § 29 UFG). If these areas are not treated, this leads to ecological (further pollutant emission, negative impact on biodiversity) and economic (loss of value, limited possibilities of use) disadvantages.

The goal of the KOKOSAN process is to minimize the mobility and bioavailability of pollutants at mildly to moderately contaminated sites in a sustainable and cost-effective manner by mixing in carbonaceous sorbents. In doing so, the contaminant is immobilized and the input into soil and groundwater is significantly reduced. Furthermore, carbonaceous sorbents improve soil quality and support site remediation with a good overall ecological footprint. Crucial to the successful implementation of the process is the long-lasting effect of these soil additives. If this is not provided, post-treatment becomes necessary, calling into question the economic application of KOKOSAN. The use of biochar primarily immobilizes pollutants and requires state-of-the-art monitoring. The use of biochar can be considered as a soil-friendly alternative to the traditional concept of "dig and dump".

Thus, the goal in KOKOSAN is to permanently change the ratio of dissolved to bound pollutants in favor of the latter. This is achieved by strong permanent binding (sorption) of the pollutants to biochar and related sorbents. Another important factor is the simultaneous change in soil chemical parameters, which alters the speciation and sorption of metals, metalloids and ionizable organic pollutants. Biochar incorporation usually increases pH, which can reduce the mobility of many metals. Plant uptake of pollutants is reduced by immobilization to Biochar in this process.

The working aid for remediation practice developed in KOKOSAN II, makes it possible to determine the pollutant-specific type of carbonaceous sorbent as well as the required application quantities for a specific site, taking into account site-specific influencing factors. The working aid was tested and validated on real samples in cooperation with ESW Wruss. Chapter 1 of the working aid presented the basics of in-situ pollutant immobilization with biochar. Chapter 2 shows the decision path to determine the basic suitability of the site for pollutant immobilization with biochar. This involves weighing site-specific factors such as mixing and the presence of a mobile contaminant phase. Chapter 3 presented legal principles for the use of biochar, and Chapter 4 was devoted to the mechanisms of pollutant immobilization. This resulted in the pollutant-dependent selection of suitable sorbents in Chapter 5, where the range of pollutants covered includes (NSO)-PAH, Cd, Zn, Hg, Cr, Pb, As, and Sb. For each of these pollutants, key sorbent properties for pollutant binding are identified and suitable biochar types and related sorbents are named. Preliminary experiments were presented in Chapter 6 to test selected sorbents and application rates at a given site.

The KOKOSAN approach was additionally subjected to a stakeholder and acceptance analysis by BRIMATECH Services GmbH to identify potential implementation barriers at an early stage and to counteract them if necessary. These results are presented in detail in the last chapter of this report.

Projektziele

Aufbauend auf den Ergebnissen aus KOKOSAN I wurde in diesem Projekt eine **systematische Untersuchung des Einflusses von Standortfaktoren** auf den Einsatz von Pflanzenkohle zur Altlastensanierung durch Immobilisierung von Schadstoffen konzipiert. **Als ökologisch sinnvolle Ergänzung sollen auch auf Biomasse basierende Aktivkohlen („Pflanzenaktivkohlen“) als Verfahrensalternativen** betrachtet werden.

Die Ergebnisse aus KOKOSAN I haben gezeigt, dass die zur Erreichung eines Sanierungsziels benötigte **Applikationsrate** (Menge an Kohle, die für das Erreichen eines bestimmten Sanierungszielwertes notwendig ist) von einer Vielzahl an Faktoren abhängt, wobei die Schadstoff- und Bodeneigenschaften sowie die Schadstoffkonzentration im Boden von zentraler Bedeutung sind. Folglich wurde in KOKOSAN II **standortparameterspezifisch untersucht und in einer Arbeitshilfe für Anwender*innen zusammengefasst,**

- a) **welche Standorte für den Einsatz von Kohle geeignet/ungeeignet sind,**
- b) **wie die Art der Kohle in Abhängigkeit des Standortes ausgewählt werden muss,**
- c) **wie die Applikationsrate der Kohle standortspezifisch zu ermitteln ist.**

Die **Arbeitshilfe** wird von einem in der **Altlastenpraxis erfahreinem Labor** (ESW Consulting Wruss ZT GmbH) **auf ihre Praxistauglichkeit bewertet**, welches von Projektbeginn an in die Entwicklung der technischen Arbeitshilfe eingebunden wurde. Die Studien wurden durch eine **Stakeholder- und Akzeptanzanalyse** (BRIMATECH Services GmbH) begleitet, welche die Bereitschaft relevanter Stakeholder analysiert dieses neue Sanierungs- und Sicherungsverfahren einzusetzen und sozioökonomische Treiber sowie Barrieren für die Implementierung identifiziert hat.

Projektleistungen

AP1 - Projektleitung und -steuerung, Literaturlauswertung, Berichtswesen

Es wurden regelmäßige Treffen der Projektbearbeiter*innen zur Abstimmung der Arbeiten, dem Austausch von Daten, und der Koordination von weiteren Tätigkeiten abgehalten. Zusätzlich zu mehreren Einzelabstimmungen der Bearbeiter*innen und Abstimmungen per Email fanden COVID-bedingt virtuelle Projekttreffen statt, bei welchen über den Stand der Arbeiten informiert und inhaltliche Fragen geklärt wurden. Bedarfsabhängig fanden Besprechungen in Kleingruppen statt.

AP2 – Sorptionsversuche zur Untersuchung standortspezifischer Faktoren

Die Ergebnisse von KOKOSAN I sind die Basis auf welcher die weiterführenden Versuche in KOKOSAN II aufgebaut werden. Im Hinblick auf ihre Bedeutung in realen Altlastenstandorten sowie ihrer hohen Mobilität im Boden sind dabei Acenaphthen, ionisierbare heterozyklische

Verbindungen aus der Gruppe der im KORA Leitfaden definierten NSO-Hetero-PAK⁴ sowie Cadmium und Quecksilber von besonderer Relevanz.

Task 2.1: Schadstoffabhängige Kohlenauswahl

Ziel: Auswahl einer für die Sanierung/Sicherung der jeweiligen Schadstoffe am besten geeigneten Pflanzenkohle sowie einer geeigneten Pflanzenaktivkohle.

Durchgeführte Arbeiten: Basierend auf den Ergebnissen aus KOKOSAN I wurden Kohlen identifiziert, die für die Immobilisierung von Acenaphthen, Dibenzofuran, Dibenzothiophen, Carbazol und Phenylphenol, sowie Cadmium oder Quecksilber geeignet sein können. Zehn Kohlen wurden auf den Aschegehalt, die Kohlenstoff-, Stickstoff-, Wasserstoff- und Schwefelgehalte sowie die spezifischen Oberflächen und Porenvolumen untersucht. Die über 10 ausgewählten Kohlen wurden in Sorptions-Batchversuchen nach OECD Standard⁵ (OECD, 2000) auf ihre Eignung zu Schadstoffimmobilisierung geprüft. Die Sorptionsversuche mit den entsprechenden Schadstoff-Kohle Kombinationen ergaben die in Tabelle 1 dargestellte Kohlenauswahl für die weiteren Versuche in KOPKOSAN II.

Tabelle 1: Kohlenauswahl für(NSO)PAK, Cr und Hg. „Basna“ ist eine kommerziell erhältliche Pflanzenkohle (Weichholz, 740 °C.), SWP550 ist eine standardisierte Kohle für Forschungszwecke (Weichholz, 550 °C), SWP700 ist ebenfalls eine standardisierte Kohle für Forschungszwecke (Weichholz, 700 °C), „ithaka AK“ ist eine eigens für das Projekt erzeugte holzbasierte Pflanzenaktivkohle (Buche, 900 °C, Dampfaktiviert).

Schadstoff	Pflanzenkohle	Pflanzenaktivkohle / Pflanzenkohle
Organische Schadstoffe	Basna	ithaka AK
Cadmium	WSP550	ithaka AK
Quecksilber	SWP700	SWP550

Für die Immobilisierung der organischen Schadstoffe sind hohe spezifische Oberflächen sowie Aromatizitäten (abnehmende molares H/C Verhältnis) die wesentlichen Merkmale für eine starke Bindung, welche vorwiegend durch spezifische π - π Elektron-Donor-Akzeptor Wechselwirkungen stattfindet. Negativ geladene organische Schadstoffe werden dabei wegen der überwiegend negativ geladenen Kohle-Oberfläche tendenziell schwächer gebunden als neutrale oder positiv geladene organische Schadstoffe. Ein KI basiertes Modell zur Vorhersage der Bindung organischer Schadstoffe an Kohlen wurde in KOKOSAN II erarbeitet und stellt die erste Publikation im Rahmen des Projektes dar (siehe Kapitel 3).

Für Cd und Hg ist die Veränderung des pH durch die Kohle sowie deren Pufferleistung wesentlich für die Schwermetall-Spezifizierung, welche die Sorption beeinflusst. Bei Kationen ergibt sich hierbei durch die hohe Kationenaustauschkapazität der ausgewählten Kohlen ein hohes

⁴Berning, Anja, und Christoph Wortmann. KORA TV 2: "Gaswerke, Kokereien, Teerverarbeitung Und (Holz)-Imprägnierung", Verbundprojekt 2.3: Castrop-Rauxel, Teilprojekt 2.3a: "Entwicklung Und Erprobung Eines Exemplarischen Monitoringprogramms Für Eine BTX-PAK-Kontaminationsfahne an Einem Ehemaligen Kokerei Standort Im Hinblick Auf NA-Ansätze". <http://www.natural-attenuation.de/download/files.php?file=kora-tv2-leitfaden.pdf>

⁵Anon. Test no. 106: Adsorption -- desorption using a batch equilibrium method, Paris: OECD Publishing, 2000. <https://tinyurl.com/4ttuejhe>

Sorptionspotenzial durch elektrostatische Wechselwirkungen der Schwermetalle mit negativ geladenen Oberflächengruppen der Kohlen. Des Weiteren sind Anionen im Aschegehalt (Phosphate, Carbonate und Chlorid) für die Komplizierung und/oder Fällung der Metalle wichtig für die Immobilisierung der Schwermetalle. Hierbei wurde aus experimentellen Gründen auf Kohlen mit guter Sorptionsaffinität und geringer Freisetzung von DOC gesetzt, was für das experimentelle Design in Task 2.2 wesentlich war, da DOC einer der untersuchten und modifizierten Parameter war. Zusätzlich wurde zu Vergleichszwecken auch die kommerziell erhältliche, auf fossiler Kohle basierte Aktivkohle „NORIT® SAE SUPER“ verwendet, sodass insgesamt drei Kohlen für jeden Schadstoff näher betrachtet wurden.

In Abb. 1 ist die Schwankungsbreite aller untersuchten Kohlen in Reinstwasser sowie die vertiefend untersuchten schadstoffspezifischen Kohlen, welche in Task 2.2 unter unterschiedlichen Umweltbedingungen untersucht wurden, zu finden.

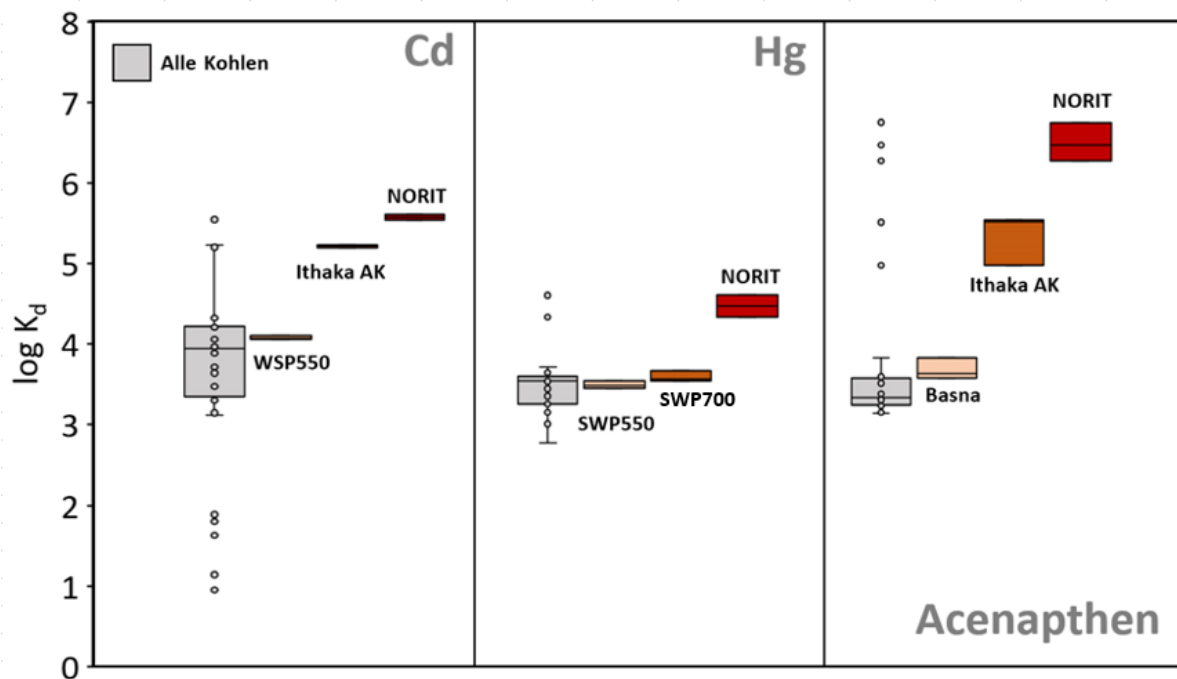


Abb. 1: Sorptionsaffinität unterschiedlicher Kohlen für die untersuchten Schadstoffe Cadmium, Quecksilber und Acenapthen, ein Vertreter der untersuchten (NSO)-PAK. Die Grauen Boxen stellen die Schwankung über alle untersuchten Kohlen dar, farbige Boxen stellen die experimentelle Schwankung aus Replikats- Messungen dar.

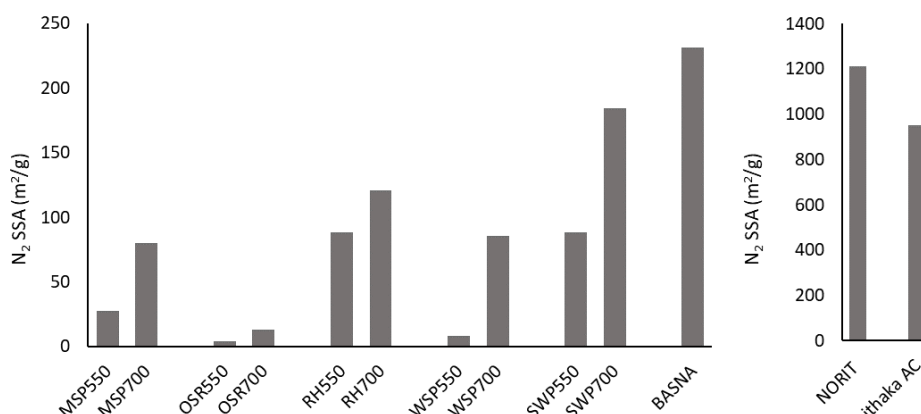


Abb. 2: Durch Stickstoff-Physorption ermittelte spezifische BET Oberflächen (N_2 SSA) der untersuchten Kohlen. Linksseitig sind Pflanzkohlen abgebildet, die beiden Materialien rechts sind Aktivkohlen.

Task 2.2: Einfluss von Standortfaktoren auf die Schadstoffadsorption an Kohlen

Ziel: Untersuchung des Einflusses von pH, Ionenstärke und DOC auf das Sorptionspotential und die Einsatzfähigkeit von Kohlen unter Einbeziehung einer statistischen Versuchsplanung.

Durchgeführte Arbeiten: Die ausgewählten Kohlen aus Task 2.1 wurden unter Verwendung der statistischen Versuchsplanung mit einem fraktioniert faktoriellen Versuchsplan durchgeführt (Box–Behnken Design nach Osorio Barajas et al., 2017⁶). Die Standortfaktoren pH, Ionenstärke, und Gehalt an gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) wurden hierbei in Kombination für jeden Schadstoff an zwei Kohlen (siehe Task 2.1) untersucht. Die ausgewählten Umweltbedingungen sind in Tabelle 2 dargestellt:

Tabelle 2: Schadstoffabhängige Parameterbereiche der Standortfaktoren im Box–Behnken Design (Werte entsprechen jeweils dem Level -1, 0, +1 im Faktoriellen Versuchsplan)

Standortfaktoren	Einheit	Parameter (NSO)PAK		
pH	-	4	6	8
DOC	mg/L	0.7	7.0	70.0
Ionenstärke	mmol/L	1	10	100

	Einheit	Parameter Cd		
pH	-	6	7	8
DOC	mg/L	0.7	7.0	70
Ionenstärke	mmol/L	1	10	100

	Einheit	Parameter Hg		
pH	-	6	7	8
DOC	mg/L	0.5	5.0	50.0
Ionenstärke	mmol/L	1	10	100

Ergebnisse zur am besten geeigneten Kohle für die Schadstoffgruppe PAC (Acenaphthen, Dibenzofuran, Dibenzothiophen, Carbazol und Phenylphenol), Cd und Hg werden in weiterer Folge für die jeweils wichtigsten Standortfaktoren gezeigt und diskutiert. In Abb. 3 ist zu erkennen, dass der Einfluss von Standortfaktoren auf unterschiedliche Schadstoffe unterschiedlich stark ist. Hierbei sind Cd, Hg, Acenaphthen, Phenylphenol und Carbazol wegen einer erhöhten Standortfaktor-abhängigen Variation besonders hervorzuheben.

⁶Osorio Barajas, et al. "Investigation of Carbon-Based Nanomaterials as Sorbents for Headspace in-Tube Extraction of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons." *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 409, 15 (2017): 3861–70. <https://doi.org/10.1007/s00216-017-0331-9>.

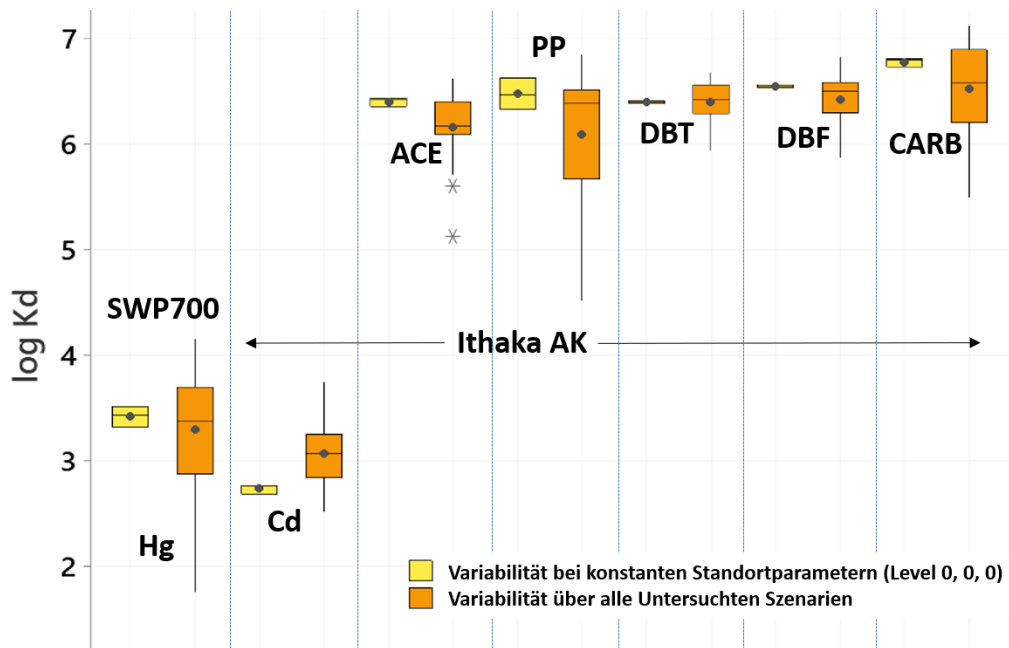


Abb. 3: Sorptionsaffinität ($\log K_d$) an Ithaka AK in Abhängigkeit von Standortfaktoren. Abkürzungen: ACE = Acenaphthen, PP = Phenylphenol, DBT = Dibenzothiophen, DBF = Dibenzofuran, CARB = Carbazol.

Für (NSO)PAK sind DOC und Ionenstärke die wichtigsten Faktoren für Variabilität in der Sorptionsaffinität. Dabei unterdrücken niedrige pH-Werte und hoher DOC die Sorption durch Konkurrenz von protoniertem DOC für Sorptionsstellen (siehe Abb. 4). Die Ionenstärke hat generell einen untergeordneten Einfluss auf (NSO)PAK Sorption. In Fällen von niedrigem pH-Wert und sehr hoher Ionenstärke kann die DOC getriebene Abnahme der Sorption aufgrund der Aussalzung von PAK entgegenwirken.

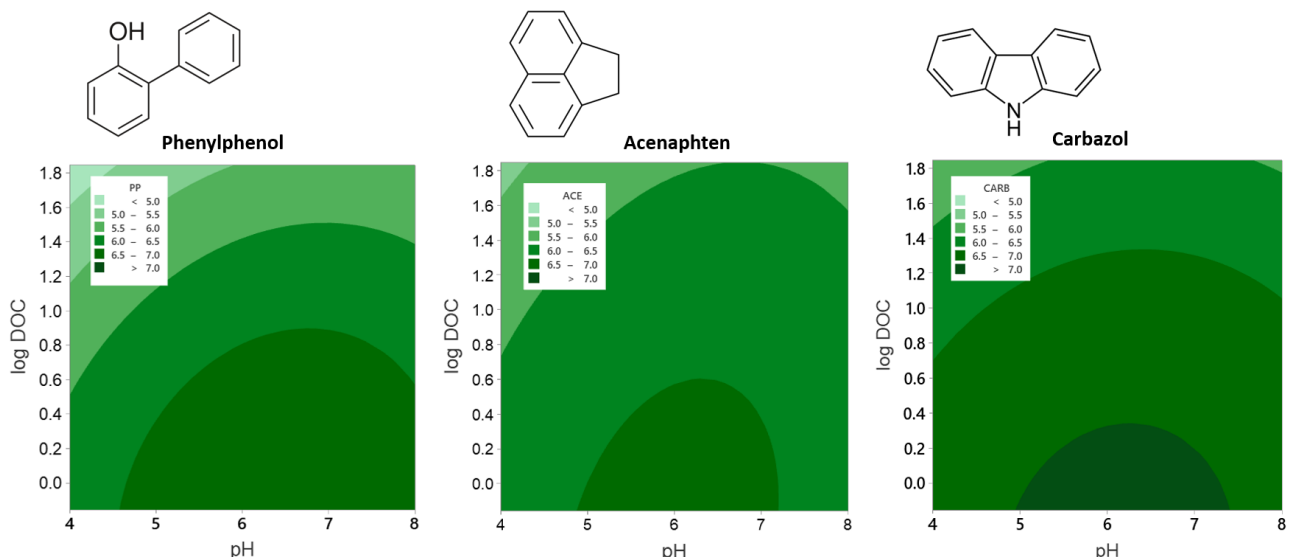


Abb. 4: Variabilität der Sorptionsaffinität ($\log K_d$) an Ithaka AK von Phenylphenol, Acenaphthen und Carbazol in Abhängigkeit von gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) und pH bei mittlerer Ionenstärke (10 mmol/L). Dunkleres Grün zeigt höhere Sorption an.

Für Cd ist der pH-Wert der wichtigste Faktor für Variabilität in der Sorptionsaffinität. Dies ist durch eine Erhöhung der Kationenaustauschkapazität an der Kohlenoberfläche sowie durch die Veränderung der Cd Spezierung zu erklären. $\text{Cd}(\text{OH})_2$, das im neutralen bis alkalischen Bereich vorliegt, wird tendenziell einfacher immobilisiert als Cd^{2+} .

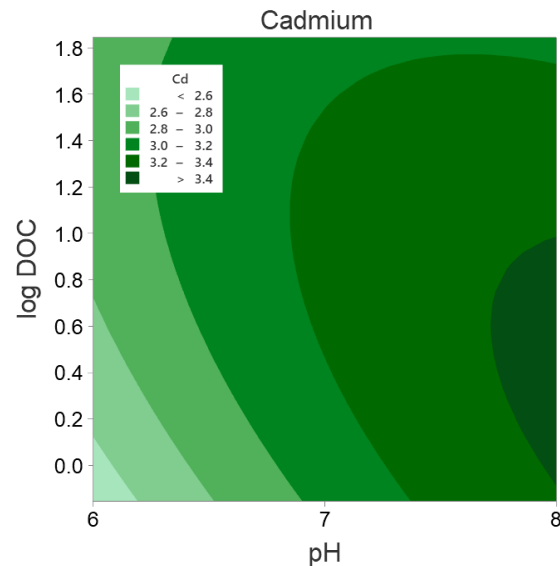


Abb. 5: Variabilität der Sorptionsaffinität ($\log K_D$) an ithaka AK von Cd in Abhängigkeit von pH und gelösten organischen Kohlenstoff (DOC) bei mittlerer Ionenstärke (10 mmol/L). Dunkleres Grün zeigt höhere Sorption an.

Hg hat eine starke Affinität für schwefelhaltige Thiol Gruppen im DOC, welche die Hg Löslichkeit steigern kann. Deshalb wird die Sorption von Hg durch niedrige pH- und DOC-Bedingungen gefördert, bei welchen durch die DOC Protonierung die Löslichkeit des verbleibenden DOC gesenkt wird. Im Gegensatz dazu bilden sich bei hohem DOC und hohem pH präferenziert sehr gut lösliche Hg-DOC-Komplexe. Zusätzlich begünstigt höhere Ionenstärke Hg Sorption aufgrund der Bildung von Hg-Chlorkomplexen.

Quecksilber

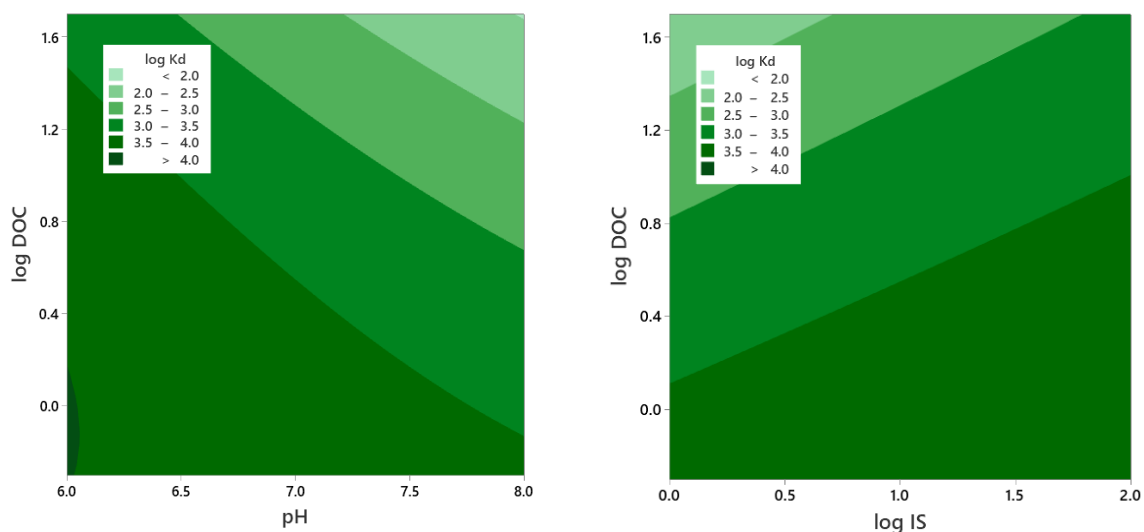


Abb. 6: Variabilität der Sorptionsaffinität ($\log K_D$) an SWP700 von Hg in Abhängigkeit von gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC), pH und Ionenstärke bzw. Cl⁻. Die linke Abbildung ist für mittlerer Ionenstärke (10 mmol/L) berechnet, die rechte Abbildung bei mittlerem pH (7). Dunkleres Grün zeigt höhere Sorption an.

Zusätzlich wurden Untersuchungen an Mischkontaminationen sowie zur Konzentrationsabhängigkeit der Sorption durchgeführt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Sorptionsaffinität von (NSO)PAK und Cd in Mischung nicht wesentlich beeinträchtigt wurde.

Task 2.3: Detailuntersuchungen zur Konzentrationsabhängigen Sorptionskapazität

Ziel: Für ausgewählte Umweltszenarien die maximale Aufnahmefähigkeit von Kohlen für ausgewählte organische Schadstoffe bestimmen.

Durchgeführte Arbeiten: Durch den Wegfall des Kooperationsaufenthaltes in Dänemark, welcher COVID bedingt nicht möglich war, wurde der Umfang von Task 2.3 reduziert und der von AP4 erweitert. Die Arbeitsziele von Task 2.3 wurden durch Literaturstudien und Laborversuche in Wien erreicht.

Mit steigender Schadstoffkonzentration sinkende Sorptionsaffinität für organische Schadstoffe ist hierbei aus Literatur und KOKOSAN 1 bekannt und wurde für KOKOSAN II kritisch beurteilt. Die Verminderung der Sorptionsaffinität bei sehr hohen Schadstoffkonzentrationen ist dabei für KOKOSAN keine wesentliche Limitierung, da KOKOSAN auf minder bis mittelbelastete Böden abzielt. In zusätzlichen Laborversuchen konnten wir des Weiteren feststellen, dass die Verminderung der Sorptionsaffinität mit steigender Schadstoffkonzentration bei erhöhten DOC-Gehalten teilweise unterdrückt wird. Die konzentrationsabhängige Sorptionskapazität ändert sich bei hohen DOC Konzentrationen also weniger als in Systemen mit niedrigem DOC.

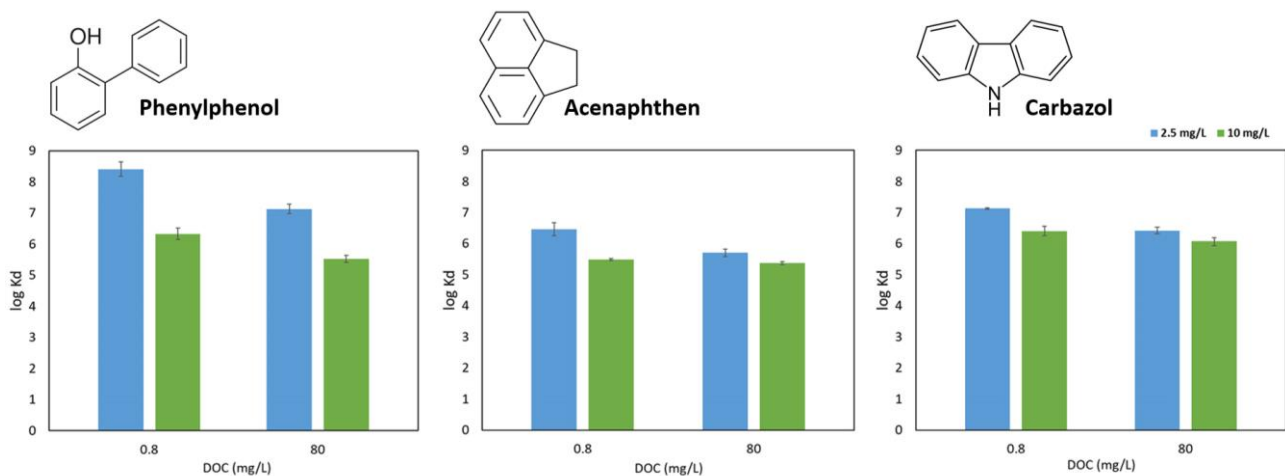


Abb. 7: Konzentrationsabhängige Sorptionskapazität von Phenylphenol, Acenaphthen und Carbazol an itihaka AK in Abhängigkeit von gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) bei mittlerem pH (7) und mittlerer Ionenstärke (10 mmol/L).

In diesem Endbericht werden zu Anschauungszwecken nur eine repräsentative Auswahl an Daten gezeigt. Der vollständige Datensatz für alle Messungen in Task AP2 sind gesammelt hier zu finden: <https://phaidra.univie.ac.at/detail/o:1604431> und in Anhang 1 näher beschrieben.

AP3 – Abschätzung der Kohlen-Applikationsrate

Nachdem in AP2 eine Vorgehensweise entwickelt wurde, um standortspezifisch eine für die Sanierung/Sicherung optimal geeignete Kohle auszuwählen, wurden in AP3 Laboruntersuchungen zur Ermittlung der für die Sanierung/Sicherung notwendigen Kohle-Applikationsrate durchgeführt und mit der aktualisierten Literaturrecherche aus AP1 kombiniert. Dadurch sollen die Schlüsselparameter identifiziert werden, welche eine Abschätzung der schadstoff- und bodenabhängigen Kohlen-Applikationsrate zur Erreichung von Sanierungszielwerten ermöglichen.

Task 3: Bestimmung der Kohlen-Applikationsrate

Ziel: Identifizierung von Schlüsselparameter zur Abschätzung der Kohlen-Applikationsrate für die Erreichung von Sanierungszielwerten im Boden.

Durchgeführte Arbeiten: In Rücksprache mit dem KOKOSAN Praxispartner ESW Consulting Wruss ZT GmbH wurden drei für österreichische Standorte relevante Bodenarten gewählt, welche sich in ihrer Textur, pH und Gehalt an organischem Kohlenstoff unterscheiden. Dabei wurden die Lufa Speyer Standardböden „2.1“, „2.3“ sowie „5M“ bestellt.⁷ Standortfaktoren wurden nicht zusätzlich modifiziert, da sich die Böden bereits in ihren intrinsischen pH, und DOC Gehalten stark unterscheiden.

Für Cd und (NSO)PAK wurden Mischkontaminationsszenarien untersucht, wobei die Schadstoffkonzentration und die Kohlen-Applikationsrate verändert wurden. Die beiden verwendeten Kohlen waren Ithaka AK und BASNA. Für Hg wurde die Schadstoffkonzentration weniger variiert und SWP700 verwendet, da in Task 2.2 festgestellt wurde, dass die Schadstoffkonzentration bei Umweltrelevanten Szenarien keinen Einfluss auf Hg Sorption hatte. Reine Bodensysteme ohne Einmischung wurden als Kontrollen mituntersucht. Die untersuchten Kohlen-Applikationsrate und verwendeten Schadstoffkonzentrationen sind in Tabelle 3 gelistet:

Tabelle 3: Verwendete Kohlen-Applikationsrate und Schadstoffkonzentrationen. Dabei wurden mindestens vier Schadstoffkonzentrationen für jeden Schadstoff untersucht.

Schadstoffkonzentration (mg/kg Boden)			Kohle Applikationsrate (%)	
(NSO)PAK	Cd	Hg	Ithaka AK	Basna und SWP700
10 bis 7500	5 bis 1500	170 bis 550	0.5 – 1 – 5	1 – 5 – 10

Eine erhöhte Schadstoffimmobilisierung konnte bei allen untersuchten Szenarien beobachtet werden. Für (NSO)PAK war die Verbesserung der Immobilisierung Bodenunabhängig (siehe Abb. 8). Die Steigerung der Sorption nahm dabei anfangs (Boden → 1% → 5%) stärker zu, als bei der höchsten Applikationsrate (5% → 10%). Eine Applikationsrate von 5% wird daher für die untersuchten Szenarien als präferabel angesehen.

⁷Datenblatt mit Bodeneigenschaften online einsehbar unter <https://tinyurl.com/8ty9jsb6>

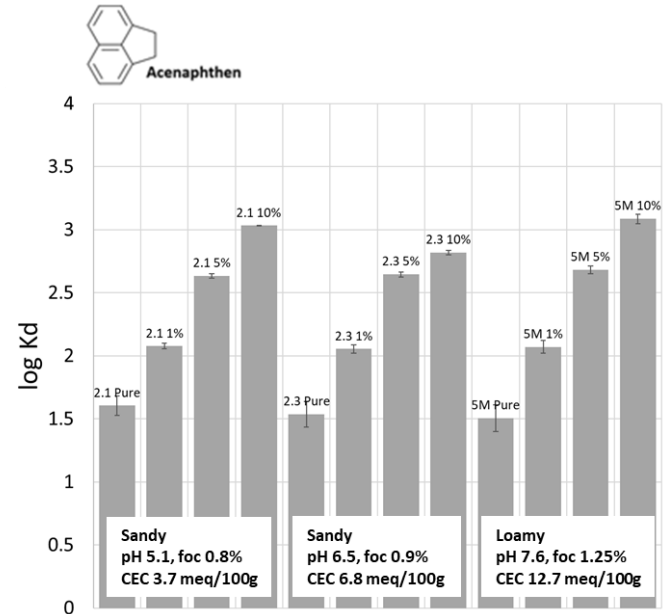
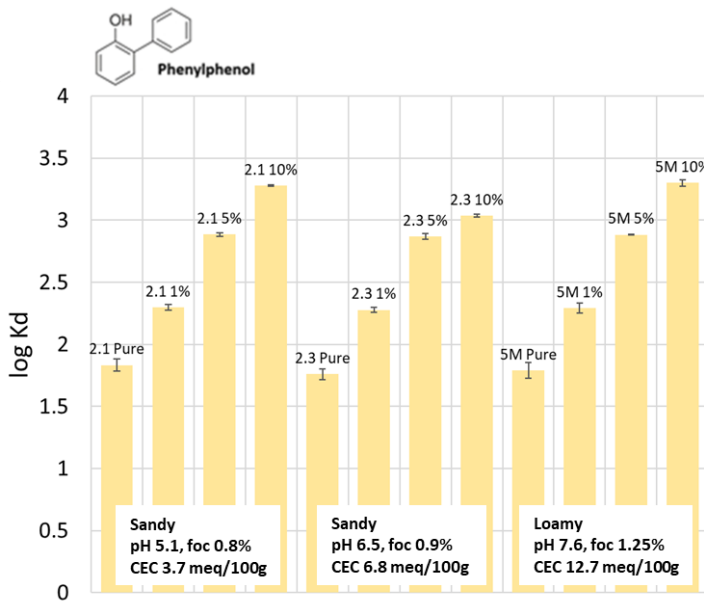


Abb. 8: Immobilisierung von zwei ausgewählten (NSO)PAK durch BASNA Applikation für die drei untersuchten Böden bei mittlerer Schadstoffbelastung (10-100 mg/kg). Böden von links nach rechts entsprechen Lufa Standard Böden (2.1, 2.3, 5M). Ähnliche Trends wurde für alle untersuchten (NSO)PAK beobachtet.

Die Sorption von Cd war in Boden 5M am stärksten, was durch einen erhöhten pH, einem hohen Tonanteil und einer einhergehenden hohen Kationenaustauschkapazität zu erklären ist. Entsprechend konnte die Kohlen-Applikation bei sauren und sandigeren Böden eine stärkere Verbesserung der Immobilisierung erzielen (z.B. Boden 2.1 in Abb. 9).

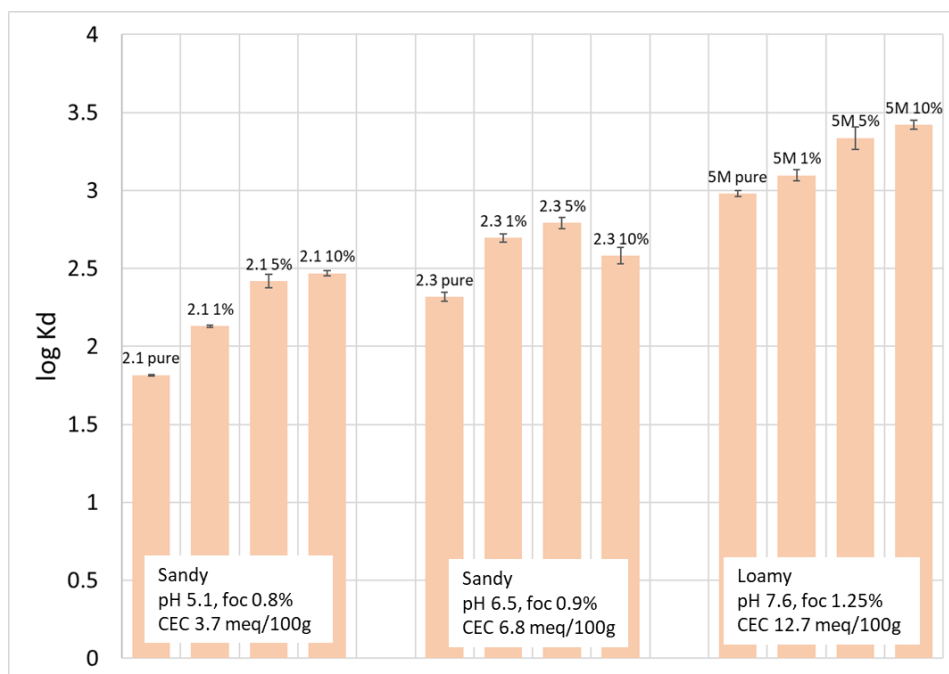


Abb. 9: Cd Immobilisierung durch BASNA Applikation. Böden von links nach rechts entsprechen Lufa Standard Böden (2.1, 2.3, 5M).

Die Sorption von Hg war ebenfalls im tonhaltigen 5M Boden am stärksten. Die Applikation von SWP700 bewirkt im sandigen Boden (2.1) eine Erhöhung der Sorption um das 15-fache. Dies ist durch eine Erhöhung der Kationenaustauschkapazität und pH im sauren Boden zu erklären und war deshalb ein Effekt, der bei weniger sauren und tonigeren Böden wesentlich schwächer war (siehe Abb. 10).

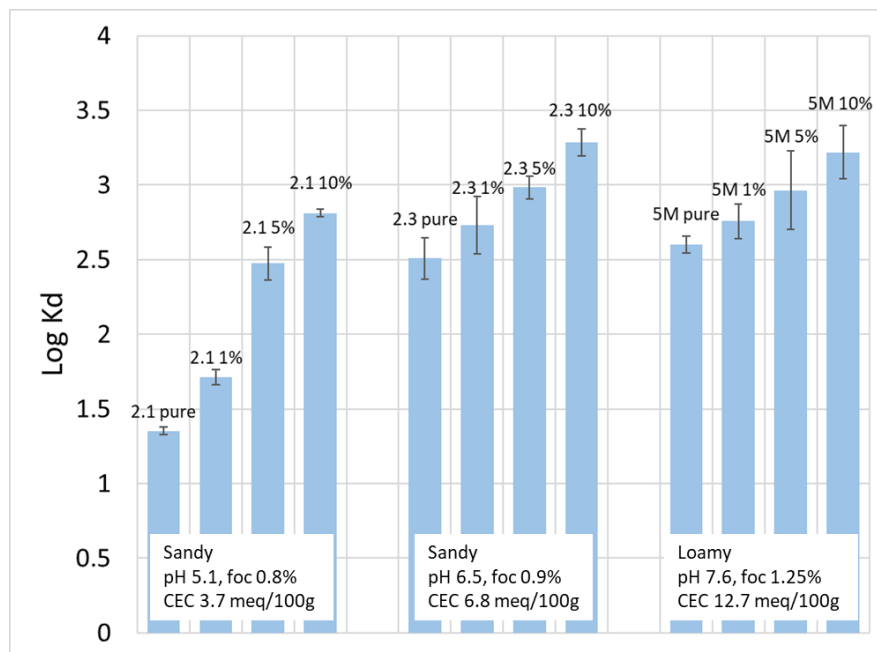


Abb. 10: Hg Immobilisierung durch SWP700 Applikation. Böden von links nach rechts entsprechen Lufa Standard Böden (2.1, 2.3, 5M).

Bei den untersuchten Schwermetallen ergibt sich daher die Notwendigkeit einer sehr standortspezifischen Entscheidung, ob und wieviel Kohle zur Erreichung eines Zielwertes eingemischt werden muss.

In diesem Endbericht werden zu Anschauungszwecken nur eine repräsentative Auswahl an Daten gezeigt. Der vollständige Datensatz für alle Messungen in Task AP3 sind gesammelt hier zu finden: <https://phaidra.univie.ac.at/detail/o:1604431> und in Anhang 1 näher beschrieben.

AP4 – Technische Arbeitshilfe und Validierung an Realproben

In AP4 wurden die Ergebnisse aus KOKOSAN I und KOKOSAN II unter Berücksichtigung der Aktualisierung der Literaturstudie in einer Arbeitshilfe für Anwender*innen zusammengefasst (Task 4.1) und die in der Arbeitshilfe vorgeschlagene Vorgehensweise an Realproben validiert (Task 4.2). Die Arbeitshilfe wird auf der Homepage der Fördergebers (BMK) oder der Abwicklungsstelle (Kommunalkredit Public Consulting GmbH) veröffentlicht. Zusätzlich ist die Vollständige Arbeitshilfe im Anhang dieses Endberichtes zu finden.

Task 4.1: Technische Arbeitshilfe

Ziel: Erstellung einer praxisorientierten technischen Arbeitshilfe für a) die Bewertung der Eignung eines Standortes für die Sanierung/Sicherung mit Pflanzenkohle, b) die Auswahl der Pflanzenkohle für einen spezifischen Standort und c) die Bestimmung der Kohlen-Applikationsrate zur Erreichung von Sanierungszielwerten im Boden.

Durchgeführte Arbeiten: In Kapitel 1 der Arbeitshilfe wurden die Grundlagen zur in-situ Schadstoffimmobilisierung mit Pflanzenkohlen dargestellt. Kapitel 2 zeigt den **Entscheidungspfad zu Bestimmung der grundsätzlichen Eignung** des Standortes für die Schadstoffimmobilisierung mit Pflanzenkohle. Hierbei werden standortspezifische Faktoren wie beispielsweise die Einmischung und das Vorhandensein einer mobilen Schadstoffphase abgewogen (siehe nächste Seite). In Kapitel 3 wurden **rechtliche Grundlagen** für die Verwendung von Pflanzenkohle dargestellt, Kapitel 4 widmet sich den Mechanismen der **Schadstoffimmobilisierung**. Das Verständnis dieser Funktionsweisen resultiert in die **schadstoffabhängige Auswahl von geeigneten Kohlen in Kapitel 5**. Die dort angeführte Tabelle basiert auf umfangreichen Laborversuchen im Projekt KOKOSAN II und hebt wichtige Kohleeigenschaften für den jeweiligen Schadstoff hervor. Das breite **Schadstoffspektrum** umfasst dabei **(NSO)-PAK, Cd, Zn, Hg, Cr, Pb, As und Sb**. Für jeden dieser Schadstoffe werden zentrale Kohleeigenschaften für die Schadstoffbindung identifiziert und geeignete Kohlen benannt. Im folgenden Schritt wurden mögliche **Einmischungsraten** vorgeschlagen. In Kapitel 6 wurden Vorversuche dargestellt, um ausgewählte Kohlen und Einmischungsraten an einem gegebenen Standort zu testen. Die Probennahme am belasteten Standort wird hierbei ebenso diskutiert wie die Durchführung von Schüttelversuchen zur Auswahl von geeigneten Applikationsraten. Das **Schüttelverfahren** gemäß DIN 19529 ist dabei mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2:1 anzuwenden. Nach erfolgreicher Bestimmung einer geeigneten Kohle und der Applikationsrate können die Ergebnisse aus dem Schüttelversuch in einem Perkulationsversuch validiert werden. Dies ist bei komplexen Standortverhältnissen zu empfehlen. Die **Säulenversuche werden** gemäß DIN 19528 und der „Arbeitshilfe zur Abschätzung der Sickerwasserbelastungen an kontaminierten Standorten“ durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit ESW Consulting Wruss ZT GmbH und dem Umweltbundesamt wurde die Arbeitshilfe bezüglich Verständlichkeit, Praxisrelevanz und Anwendungsfreundlichkeit optimiert. Hierzu fanden mehrere Gespräche mit Fachexpert*innen statt.

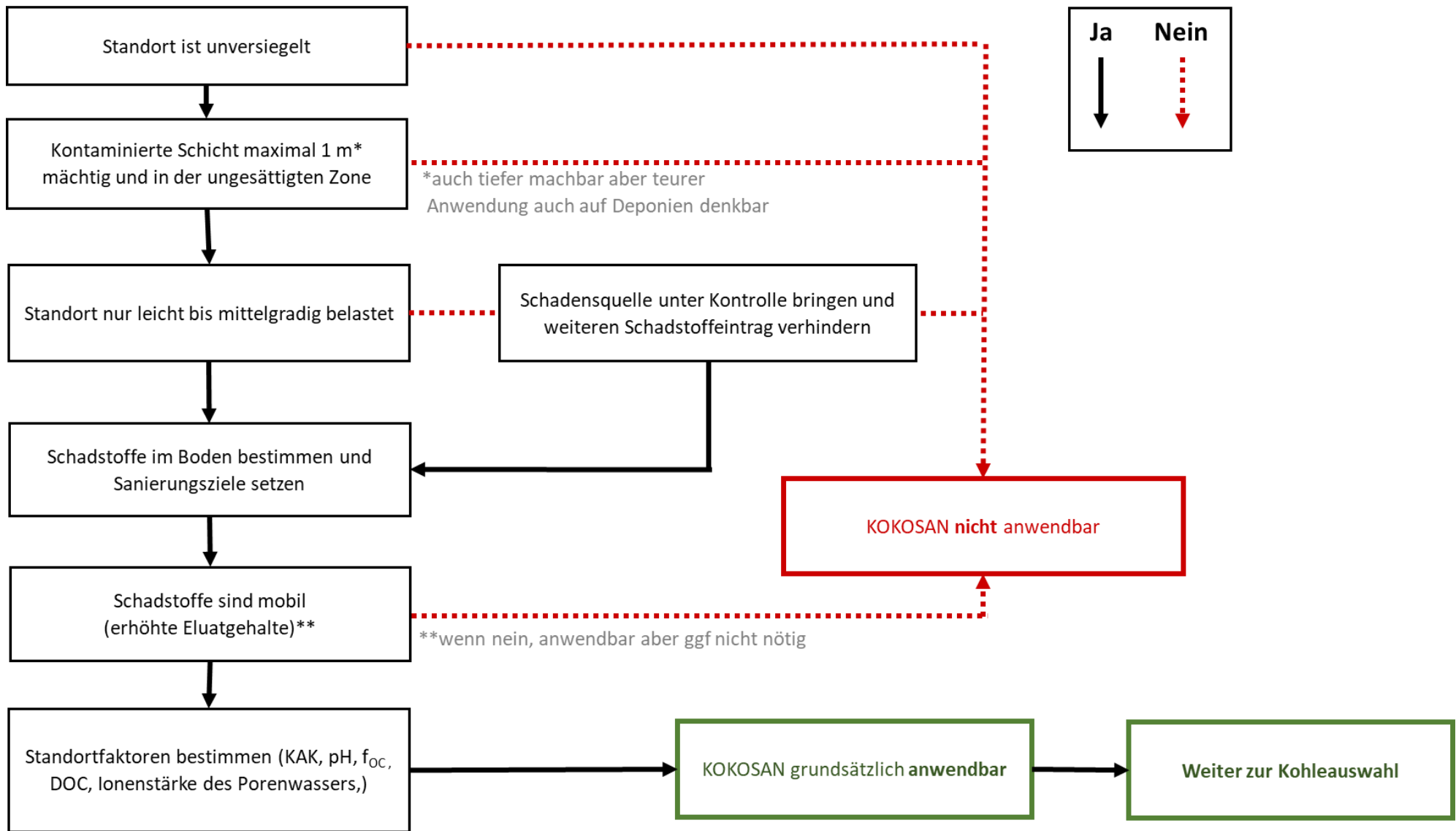


Tabelle 4: In KOKOSAN II ermittelte Applikationsraten für übliche Schadstoffe.

Schadstoff	Limitierende Standortbedingungen	Standortfaktoren limitieren Machbarkeit	Funktionsweise der Kohle	Günstige Kohleeigenschaften	Kohlenbeispiel	Applikationsrate (Gewicht %)
(NSO)-PAK	DOC > 20 mg/L	mäßig	π - π Bindung, hydrophobe Effekte, für polare Stoffe auch H-Bindung,	Aromatizität, spezifische Oberfläche	Dampfaktivierte Holzkohle, Hochtemperatur (> 500°C)-Holzpflanzenkohle	0.5% - 5%
Cd	pH < 7.5	nein	Kationenaustausch, Ausfällung, Oberflächen-Komplexierung	Hoher pH-Wert, KAK, P-Gehalt t	Dampfaktivierte Holzkohle, Hochtemperatur (> 500°C)-Holzpflanzenkohle	0.5% - 5%
Zn	pH < 7.5, pH > 9	bei hohem pH ja	Kationenaustausch, Ausfällung	Hoher pH-Wert, KAK, Mineral- oder Aschegehalt	Dampfaktivierte Holzkohle, Hochtemperatur (> 500°C)-Holzpflanzenkohle	0.5% - 5%
Hg	viel Cl und DOC	mäßig	Thio-/Sulfidgruppen Komplexe, Kation- π , Redoxreaktionen	Aromatizität, S-Gehalt	Hochtemperatur Holzpflanzenkohle (S limitierend)	1% - 5%
Cr	pH > 7, pH > 12	bei hohem pH ja	Redoxreaktionen, Ausfällung	Aromatizität, spezifische Oberfläche	Dampfaktivierte Holzkohle, Hochtemperatur (> 500°C)-Holzpflanzenkohle	0.5% - 5%
Pb	pH > 8, pH > 12	bei hohem pH ja	Thio-/Sulfidgruppen Komplexe, Redoxreaktionen, Ausfällung	KAK, P-Gehalt	Dampfaktivierte Holzkohle, Hochtemperatur (> 500°C)-Holzpflanzenkohle	0.5% - 5%
As	pH > 8.5	bei hohem pH ja	Elektrostatische Interaktionen, Redoxreaktionen	Mineralische Oxide, hoher pH-PZC	Ca/Mg modifizierte Holzpflanzenkohle	0.5% - 2%
Sb	4 < pH > 12	bei hohem pH ja	Sphärische Komplexe, Redoxreaktionen	Mineralische Oxide	Ca/Mg modifizierte Holzpflanzenkohle	0.5% - 5%

Task 4.2: Validierung der technischen Arbeitshilfe an Realproben

Ziel: Validierung der in Task 4.1 entwickelten technischen Arbeitshilfe an kontaminierten Realproben zusammen mit dem externen Kooperationspartner ESW Consulting Wruss ZT GmbH.

Durchgeführte Arbeiten: Es wurden insgesamt 14 Proben zu Validierung der Arbeitshilfe ausgewählt. Die Auswahl umfasste realkontaminierte Böden mit As, Pb, Cd, Sd, Cr, Ni, Cu, Hg sowie (NSO)PAK, welche in 1:2 Schüttelversuchen nach DIN 19529:2015-12 bei unterschiedlichen Kohle-Applikationsraten untersucht wurden. Ausgewählte Proben wurden zusätzlich in 1:10 Schüttelversuchen nach ÖNORM EN 12457-4:2003 untersucht. Drei dieser Böden und die Anwendung von Kohle zur Schadstoffimmobilisierung wurden vertiefend in Perkolationsversuchen nach ÖNORM EN 14405:2017 validiert. Die betreffenden Böden waren 1. mit PAK und NSO PAK, 2. mit As und Sb sowie geringe Mengen an Cu, Ni, Pb, sowie 3. mit As, Sb, Pb, Cu, Mo, Ni verunreinigt.

Die Schüttelversuche der vier PAK und NSO-PAK kontaminierten Böden zeigen grundsätzlich eine sehr gute Immobilisierung der Schadstoffe durch Pflanzenkohle, Dampfaktivierte Holzkohle sowie die kommerzielle Aktivkohle. Bei drei von vier Proben wurden alle Schadstoffe so stark immobilisiert, dass die erzielten Eluat-Werte unterhalb der Nachweisgrenzen waren (100% Immobilisierung). Eine der vier Proben hatte wesentlich höhere Belastungen, um in den Laborversuchen eine erhöhte PAK Belastung zu untersuchen, die über die meisten für KOKOSAN zu erwartenden Belastungssituationen hinausgeht.

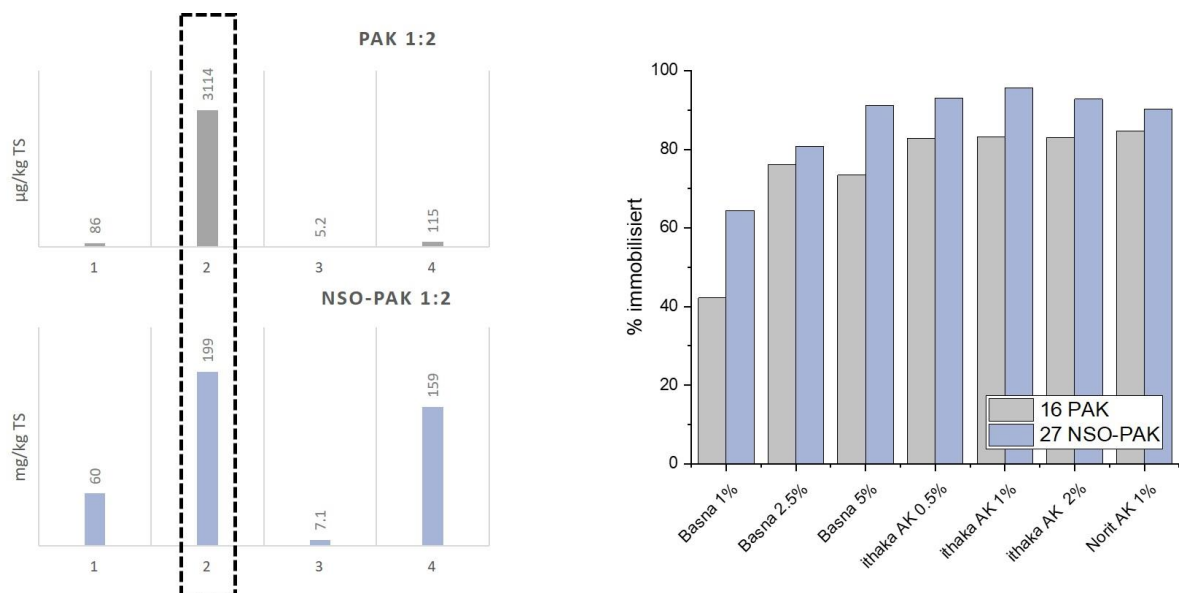


Abb. 11: Links: PAK und NSO PAK gesamtgehalte der vier Untersuchten Realproben. Links die Ergebnisse für Probe 2 da bei allen anderen Proben eine vollständige Immobilisierung durch alle Kohlen erfolgte).

Wie in der rechten Seite in Abb. 11 zu erkennen ist, war hierbei die Immobilisierung durch die kommerzielle Aktivkohle („Norit“) sehr ähnlich mit jener durch die dampfaktivierte Holzkohle („Ithaka AK“). Die nicht modifizierte (Holz)pflanzenkohle „Basna“ konnte bei erhöhten Applikationsraten (5% statt 1-2%) dieselbe Schadstoffimmobilisierung erzielen.

Pflanzenkohlen sind also grundsätzlich sehr gut für die Schadstoffimmobilisierung in PAK kontaminierten Böden geeignet. Wenn CO₂ Emissionen in künftigen Sanierungskonzepten mitbeachtet werden, kann sich hierbei trotz der etwas schwächeren Immobilisierungsleistung durch Pflanzenkohle eine Präferenz für Pflanzenkohle ergeben, da eine höhere Einmischungsrate auch eine höhere Kohlenstoffsenke/negativ Emission bedeuten würde. Die gute Immobilisierungsleistung durch Kohlen für PAK sowie NSO-PAK wurde im Perkolationsversuch mit der am schwersten belasteten Probe bei relativ niedriger Beimengung einer Holzbasierten Pflanzenkohle bestätigt (Abb. 12).

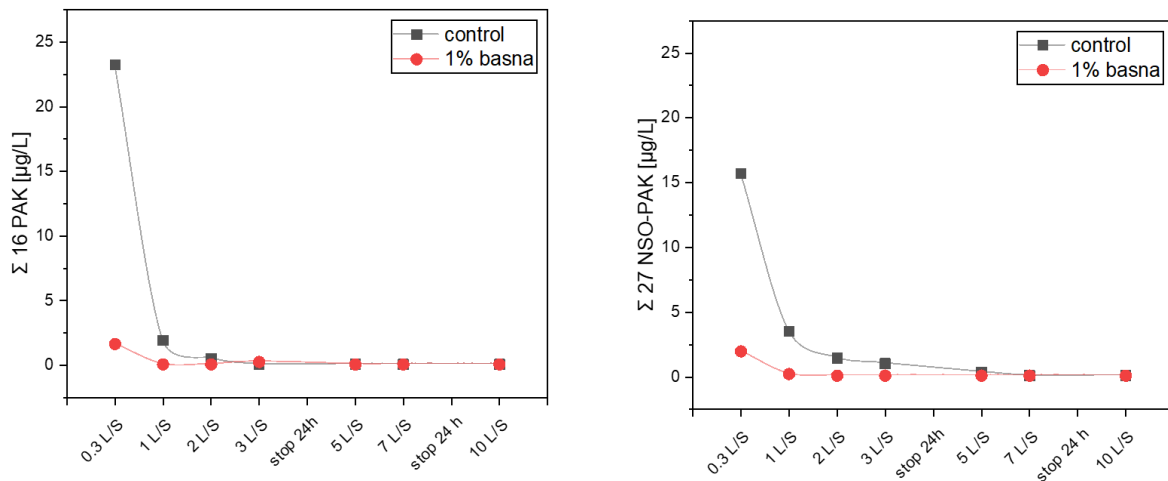


Abb. 12: Perkolationsversuche mit mittelschwer PAK und NSO-PAK kontaminierter Realprobe bei 1% Beimengung einer kommerziellen Holzbasierten Pflanzenkohle (Basna).

Die Immobilisierungsleistung für Metalle und Metalloide war sehr Schadstoff- und Kohle abhängig. Kationische Metalle wurden grundsätzlich gut immobilisiert. Metalloide wie As wurden durch „klassische“ Kohlen mobilisiert; dies ist -bedingt durch eine Änderung der Spezierung hin zu mobileren Anionischen Spezies durch die Erhöhung des pH wertes durch die Kohlen. Ein Phänomen das auch bei Pb und sehr hohen pH-Werten um 12 beobachtet wurde. Der untersuchte Dolomit-Pflanzenkohle Verbundstoff zeigte sich hingegen gut geeignet um zeitgleich anionische Metalloide wie As und Cr sowie kationische Metalle wie Mo und Cu zu immobilisieren. Auch das ungeladene Sb konnte durch den Verbundstoff immobilisiert werden, einzig Pb wurde wie oben geschildert durch den hohen pH des Verbundstoffes re-mobilisiert. Exemplarisch sind hierzu Ergebnisse eines entsprechenden Perkolationsversuches mit einer realkontaminierten Probe gezeigt.

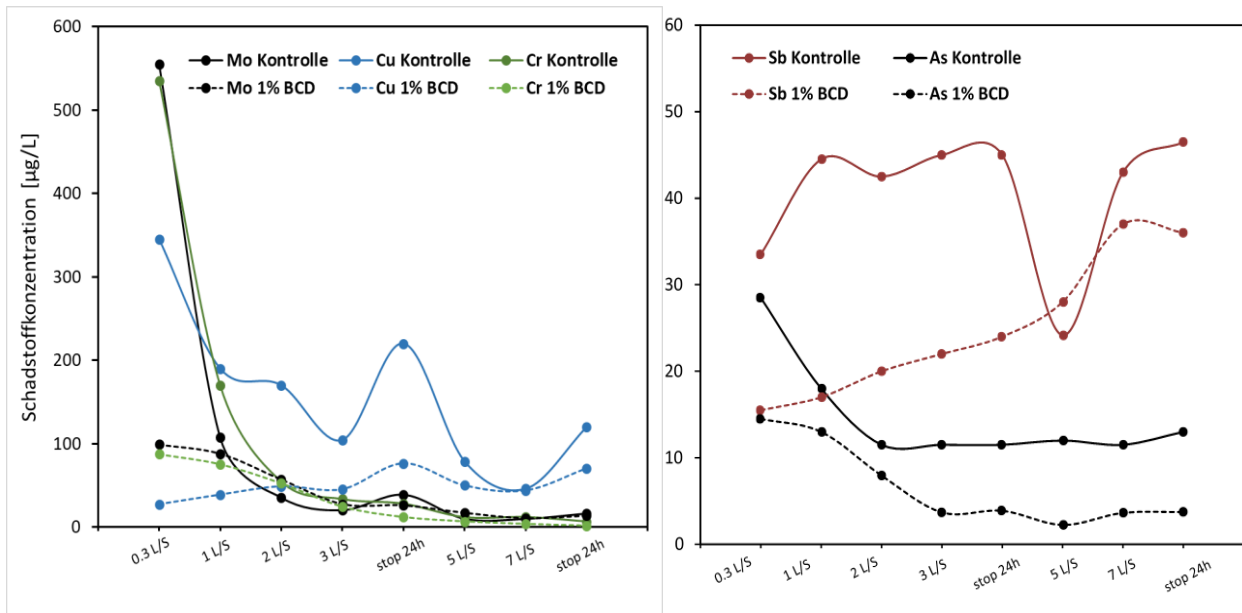


Abb. 13: Perkolationsversuche mit As, Cr, Sb, Cu, Pb, sowie Sb und As kontaminierter Realprobe bei 1% Beimengung einer kommerziellen Holzbasierter Pflanzenkohle (Basna).

Zusammenfassend wurde die Arbeitshilfe erfolgreich iterativ verbessert und validiert sodass der im Anhang ersichtliche Leitfaden eine wertvolle Hilfestellung für Anwender*innen darstellt, um für einen gegebenen Standort die grundsätzliche Eignung, Kohlenauswahl und Applikationsrate abzuschätzen und die entsprechende Auswahl im Labor zu verifizieren, bevor das KOKOSAN Verfahren an einem gegebenen Standort eingesetzt wird.

AP5 – Stakeholder-, Akzeptanz- und Kosten-Nutzen-Analyse

Um die Sichtweisen von relevanten Expert*innen, die nicht direkt am Projekt beteiligt sind, einzubeziehen, wurden in AP5 qualitative Interviews mit ausgewählten Stakeholder*innen durchgeführt. Dabei wurde die Einsatzbereitschaft für KOKOSAN erhoben sowie Treiber und Barrieren, die bei der Implementierung des KOKOSAN-Verfahrens, aber auch bei anderen innovativen Sicherungsverfahren förderlich oder hinderlich sein könnten, identifiziert. Auf diese Weise können mögliche Barrieren bereits in einem frühen Stadium der Prozessentwicklung mitberücksichtigt werden. Die Erkenntnisse aus Expertengesprächen und aus der Literatur wurden abschließend für die Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) sowie einer modifizierten Kostenwirksamkeitsanalyse (mKWA) herangezogen, um KOKOSAN mit einem bereits etablierten Verfahren gegenüberzustellen. Hierzu wurden drei Ansätze kombiniert: Datenbank- und Literaturrecherche, Projektinterne Workshops, Qualitative problemzentrierte Interviews in Kombination mit dem Experteninterview.



Abb. 14: Methodik einer qualitativen Interviewführung.

Das **problemzentrierte Interview** ist eine semi-strukturierte Interviewtechnik, die der positivistischen Perspektive entspricht. Diese Interviewform zielt darauf ab, eine möglichst umfassende und vollständige Sammlung von Informationen zu einem vorab definierten Problembereich zu erlangen⁸ (siehe **Abb. 14**~~Error! Reference source not found.~~). Im Rahmen des **Expert*inneninterviews** wird das umfassende Wissen von Expert*innen, welches zur Problemlösung sowie zur Erkenntnis und Begründung von Problemursachen sowie Lösungsprinzipien befähigt, auf besondere Einzelfragen angewendet.⁹

Extended Technology Acceptance Model (ETAM) zur Erhebung der Akzeptanz für eine bestimmte Technologie. Dabei werden vier Komponenten als signifikante Faktoren für die wahrgenommene „usefulness“ und „ease of use“ herangezogen. Dies sind der persönliche Kontakt, das wahrgenommene Risiko, mögliche Bedenken gegenüber der Technologie sowie die wahrgenommene Selbstwirksamkeit (siehe Abb. 15).¹⁰

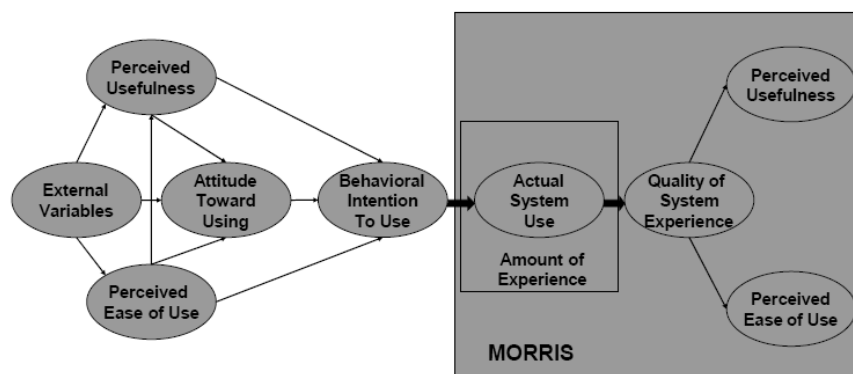


Abb. 15: Extended Technology Acceptance Model (ETAM).

⁸Witzel, Andreas. "The Problem-Centered Interview." *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research*, 2000. <https://doi.org/10.17169/fqs-1.1.1132>

⁹Pfadenhauer M. in Buber R. & Holzmüller H. *Qualitative Marktforschung*. Wiesbaden, 2009.

¹⁰Morris, Michael Grant. *A Longitudinal Examination of Information Technology Acceptance: The Influence of System Experience on User Perceptions and Behavior*. Indiana University, 1996.

Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) zur Bewertung von alternativen Verfahren und zur Darstellung der jeweiligen Relation zwischen den Gesamtkosten und -nutzen (siehe Abb. 16). Dabei wurden die erwarteten Kosten (CAPEX, OPEX) des innovativen Sanierungsverfahrens sowie eines alternativen Verfahrens dem jeweiligen erwarteten wirtschaftlichen, ökologischen sowie sozialen Nutzen gegenübergestellt. Die KNA dient somit als wichtige Entscheidungshilfe, um Erfolge und eventuell auftretende Risiken gegenüberzustellen und frühzeitig zu erkennen.

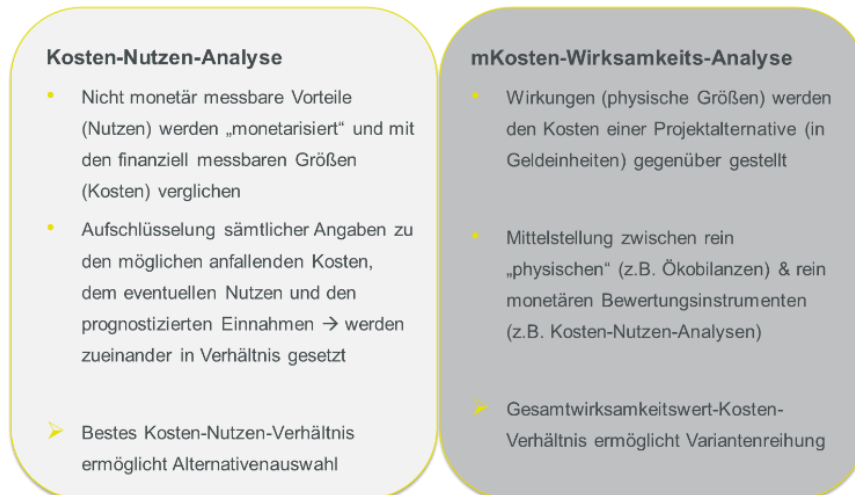


Abb. 16: Methodik der Kosten-Nutzen-Analyse sowie der modifizierten Kostenwirksamkeitsanalyse.

Modifizierte Kostenwirksamkeitsanalyse (mKWA) als umweltökonomisches Bewertungssystem zur Definition von realistischen Alternativen unter gegebenen Rahmenbedingungen (siehe Abb. 16). Diese werden in weiterer Folge mit Hilfe der mKWA einer Reihung unterzogen, um die beste Variante zu ermitteln¹¹.

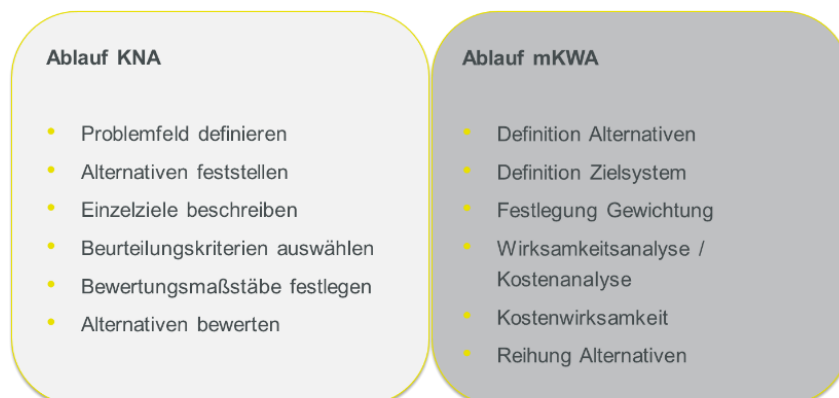


Abb. 17: Ablauf einer Kosten-Nutzen-Analyse sowie einer modifizierten Kostenwirksamkeitsanalyse.

¹¹Ortmann, Moritz, and Gernot Döber. "Umweltökonomische Bewertung Von Sanierungsmaßnahmen - Umweltbundesamt." Umweltbundesamt, 2010. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0159.pdf>.

Task 5.1: Identifikation relevanter Stakeholder und deren Rollen

Ziel: Identifikation relevanter Stakeholder und Beschreibung ihrer Rollen

Durchgeführte Arbeiten: Durch die Nutzung von projektinternem Know-how sowie verfügbaren Informationen aus der Literatur wurde eine erste Verfahrensbeschreibung von Sanierungs-/Sicherungsverfahren erstellt sowie Stakeholder*innen identifiziert und deren Rollen in der Entscheidungsfindung analysiert. In qualitativen Interviews mit drei projektexternen Experten vom Umweltbundesamt sowie in projektinternen Workshops wurden diese ersten Ergebnisse ergänzt und bei Bedarf adaptiert. In den Expertengesprächen konnten erste wichtige Einblicke in die Erfahrungen mit dem Einsatz von innovativen Sicherungsverfahren gewonnen werden.

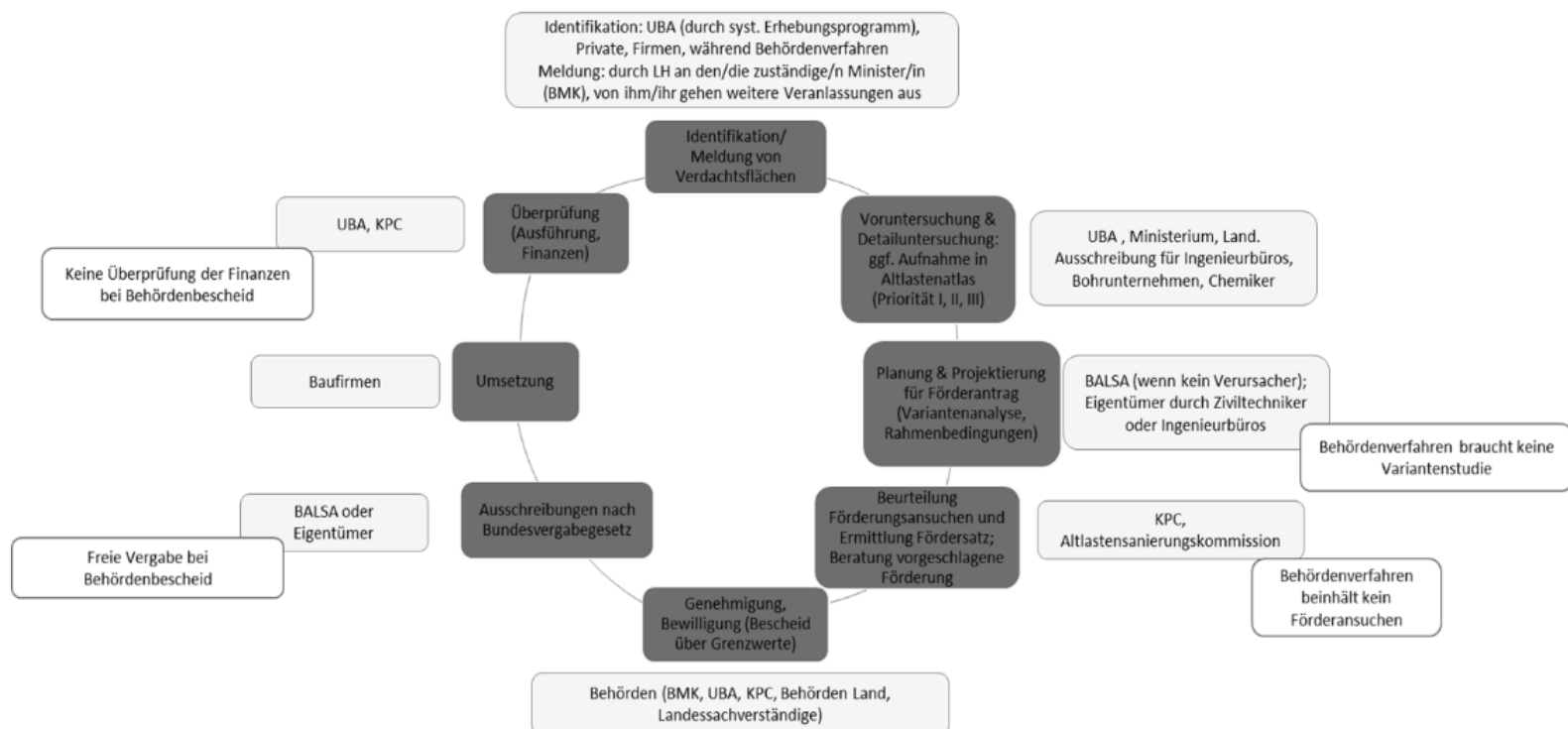


Abb. 18: Identifizierte Stakeholder sowie deren Rolle im Entscheidungsprozess und Verfahrensablauf von Sanierungs-/Sicherungsverfahren.

Als relevante Stakeholder*innen konnten Behörden (z.B. BMNT, Länder, Landessachverständige), sonstige Behörden (z.B. UBA, AGES), KPC, Altlastensanierungskommission, Bedarfsträger & Eigentümer (ÖBB, Bundesforste), Planung & Projektierung (z.B. Terra Umwelttechnik, G.U.T., WPA Ingenieure), Ausführung (z.B. Porr, Strabag), Forschung (z.B. BOKU, Montanuniversität Leoben) und Kohlehersteller (z.B. Donauchemie, Sonnenerde) identifiziert werden. Das ermittelte erweiterte Stakeholder*innen Netzwerk ist in Tabelle 5 ersichtlich

Tabelle 5: Identifizierte Stakeholder*innen aus dem Wertschöpfungsnetzwerk von KOKOSAN.

Interessengruppe	Institution	Rolle
Sonstige Behörden	AGES, UBA, Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz, Landwirtschaftsabteilungen, Gewässerabteilungen, Raumplanungsorgane, ...	Beratung Bundesministerium in bodenrelevanten Themenbereichen
Forschung	BOKU (Institut für Bodenforschung, Institut für Umweltbiotechnologie), Universität Wien (Department für Umweltgeowissenschaften), AIT, ithaka institute, Montanuniversität Leoben, ...	Forschung im Bereich Pflanzenkohle, innovative Sanierungs-/Sicherungsverfahren, Bodenschutz, Prozesse im Boden
Zertifizierte Pflanzenkohlehersteller	Sonnenerde, EnergieWerk Ilg, Basna (Serbien; für KOKOSAN verwendet), ...	Produktion von Pflanzenkohle, EBC zertifiziert
Konventionelle Aktivkohlehersteller	Donau Carbon, Norit, Osaka Gas, Calgon Carbon, Haycarb, ...	Produktion von Aktivkohle, hauptsächlich aus Kokosnussschalen und fossilen Kohlen
Fachverbände / Vereine	ÖVA, ÖWAV, ...	Koordination und Informationsaustausch in den Bereichen Altlasten & Abfall
Fachverbände / Vereine	European Biochar Industry Consortium (EBI), Fachverband Pflanzenkohle (D), ÖBIKA (AT), ...	Unterstützung Einsatz von Pflanzenkohle, Beratung für Wissenschaft, Praxis und politische Entscheidungsträger, Vernetzung und Kooperationen
Zertifizierung	EU Biochar Certificate, International Biochar Initiative, ...	Zertifizierungen, Erstellung von Richtlinien, Standards
Sanierungsorientierte Standortentwickler	ecoplus (NÖ), ...	Ökologische Standortentwicklung, Erstellung Leitfäden, Flächenrecycling
Abfallentsorger mit Bodensanierungsprojekten	Brantner Green Solutions, Saubermacher, ...	Sanierung-/ Sicherung von Altlasten

Die Ergebnisse von T5.1 dienen als Ausgangspunkt für die Akzeptanzanalyse in Task 5.2.

Task 5.2: Akzeptanzanalyse

Ziel: Erfassung der Bereitschaft zum Einsatz von Pflanzenkohle als innovatives Sanierungsverfahren.

Durchgeführte Arbeiten: Für die qualitativen Interviews wurde ein Interviewleitfaden (siehe Anhang 2) ausgearbeitet. Für die Erstellung des Leitfadens wurden neben Aspekten der ETAM-Methodik auch Faktoren der mKWA-Variantenanalyse herangezogen. Vor der Durchführung der qualitativen Interviews wurde nochmals eine ausführliche Literaturrecherche durchgeführt. Für die Auswahl der Interviews wurde basierend auf den in T5.1 dargestellten Gruppen einerseits auf die darin identifizierten Stakeholder*innen, andererseits auf das breite Netzwerk von Brimatech in unterschiedlichen Branchen sowie jenem der Projektpartner zurückgegriffen. Insgesamt wurden im Rahmen der Akzeptanzanalyse 13 Interviews durchgeführt (siehe **Anhang 3**). Mit den Ergebnissen aus den Interviews und der Literaturrecherche wurde eine Anforderungsanalyse für neue Sanierungsverfahren im Allgemeinen und das KOKOSAN Verfahren im Speziellen durchgeführt. Ökonomische, politische, rechtliche und technische Treiber und Barrieren wurden erhoben sowie potentielle Anreize für die Implementierung von neuen Sanierungsverfahren erfasst. Darauf aufbauend wurden im Rahmen eines projektinternen Workshops

sozioökonomische Standortparameter ergänzend zu den Standortparametern von AP2 und AP3 für die KNA und mKWA in T5.3 abgeleitet. Abschließend wurden potenzielle Konkurrenzverfahren sowie mögliche Standorte für einen Einsatz für KOKOSAN identifiziert.

Identifizierte Voraussetzungen für einen Einsatz von KOKOSAN

Im Rahmen der Interviews wurden diverse Voraussetzungen für den Einsatz von KOKOSAN bzw. auch für andere innovative Sicherungsverfahren identifiziert. Sind Voraussetzungen speziell nur für KOKOSAN relevant, wurden diese am Satzende mit „KOKOSAN“ gekennzeichnet. Im Folgenden werden die identifizierten Voraussetzungen genauer dargestellt und beschrieben. Stellungnahmen des KOKOSAN-Projektteams sind in *kursiver Schrift* gekennzeichnet. Detailliertere Informationen sind in **Anhang 4** dargestellt.

- **Notwendigkeit einer genauen Beschreibung des Verfahrens**

Dafür sind laut Expert*innen folgende Informationen erforderlich:

- Standortspezifische Einflussfaktoren
- Wirkungsweise: Langzeitstabilität, Schadstoffimmobilisierung, Reduktion der Pflanzenverfügbarkeit
- Technische Details der Pflanzenkohle (KOKOSAN)
- Einbringungsmöglichkeiten in den Boden (KOKOSAN)
- Zu erwartende Kosten

→ *Diese Parameter wurden in der Arbeitshilfe soweit dem Projektteam derzeit möglich, mitberücksichtigt. Zu erwartende Kosten und Nutzen können aus den Ergebnissen der KNA (siehe **Anhang 5 bis Anhang 8**) entnommen werden.*

- **Sicherstellung der Immobilisierung (KOKOSAN)**

Durch andere Aktivitäten am Standort dürfe die Immobilisierung nicht wieder nachlassen (z.B. landwirtschaftliche Nutzung).

→ *Laboruntersuchungen aus KOKOSAN I und anderen Studien belegen die hohe Sorptionskapazität und Affinität von Pflanzenkohle für eine Vielzahl von Schadstoffen.*

- **Nachweis der Langzeitperformance (KOKOSAN)**

Es müsse nachweisbar sein, wie sich die Stabilität der Pflanzenkohle sowie die Immobilisierung der Schadstoffe durch die Pflanzenkohle in den nächsten 10, 20, 50, 100 Jahren nach einem Einsatz des KOKOSAN-Verfahrens verhalten werden.

→ *Eine Untersuchung der Langzeitperformance ist nicht Gegenstand von KOKOSAN II. Vorhandene Studien zeigen eine Abhängigkeit der Langzeitperformance von der Wahl der Pflanzenkohle, der Bodenbeschaffenheit, von verschiedenen Bodenprozessen, der Einbringungsart sowie der Art der Schadstoffe. Üblicherweise ist Pflanzenkohle über 100 Jahre stabil. Bei der Wahl von KOKOSAN für eine Altlastensicherung bedarf es auf jeden Fall einem Monitoring.*

- **Nachweis der Reduktion der Pflanzenverfügbarkeit (KOKOSAN)**
 Es müsse nachweisbar sein, dass durch den Einsatz von KOKOSAN die Verfügbarkeit der Schadstoffe für die Pflanzen reduziert wird.
 → Eine Untersuchung der Reduktion der Pflanzenverfügbarkeit ist nicht Gegenstand von KOKOSAN II. Publikationen zur Verringerung der Pflanzenverfügbarkeit unter Mitarbeit der Projektleitung sind vorhanden.

- **Einhaltung relevanter Grenzwerte**
 Wie beispielsweise Grenzwerte der ÖNORM S2088-1 oder des ALSAG.
 → Durch die derzeitigen Rahmenbedingungen, welche das Heranziehen von Gesamtgehalten vorschreiben, werden innovative Verfahren wie KOKOSAN gebremst.

- **Planbare, steuerbare und sichere Technologie**
 Für einen vermehrten, zukünftigen Einsatz des KOKOSAN-Verfahrens, aber auch anderen innovativen Sicherungsverfahren, müsse die dahinterliegende Technik gut planbar, steuerbar sowie sicher sein.
 → Es handelt sich bei KOKOSAN um eine prinzipiell gut planbare und steuerbare Technologie. Methodik, Herstellung und Probleme von Pflanzenkohle sind ausreichend bekannt. Im Bereich der Einbringung gibt es noch ungeklärte Aspekte, die genauer zu untersuchen sind.

- **ALSAG-neu und weitere rechtliche Anpassungen**
 Ein Inkrafttreten des ALSAG-neu wird als wichtige Voraussetzung und förderlicher Faktor für den Einsatz von Sicherungsverfahren erachtet (siehe dazu auch „rechtliche und politische Treiber“). Zudem könnten weitere rechtliche Anpassungen (z.B. UFG) zu Gunsten von Sicherungsverfahren einen Einsatz von KOKOSAN oder anderen innovativen Verfahren fördern.

- **Angemessenes Kosten-Nutzen-Verhältnis**
 Anwender wollen technische Lösungen, welche rasch und zu angemessenen Preisen implementierbar sind.
 → Die Ergebnisse der KNA (siehe **Anhang 5**) zeigen eindeutig ein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis (0,58) für das KOKOSAN-Verfahren. Für das gewählte Beispiel konnte der Nutzen als fast doppelt so hoch wie die Kosten berechnet werden.

- **Kostensicherheit**
 Kosten sollten vorab schon gut abschätzbar und planbar sein.
 → Anfallende Kosten für das KOKOSAN-Verfahren wurden für einen ausgewählten Standort im Rahmen der durchgeführten KNA (siehe **Anhang 5**) erhoben. In Anlehnung daran können zukünftig für weitere Standorte die Kosten abgeleitet werden.

- **Förderinstrumente für Technologieforschung**
 Auch wenn bereits Forschungsergebnisse zu spezifischen Sicherungsverfahren vorliegen, könnten neue Erkenntnisse geschaffen, Verfahren weiterentwickelt und somit die Akzeptanz erhöht werden.
 → Förderungen bspw. über KPC zu gewissen Problemstellungen möglich. Ob diese dem gewünschten Umfang entsprechen, wurde im Rahmen von KOKOSAN II nicht erhoben.

- **Erstellung von Risikotabellen und adäquate Risikokommunikation**

Die Erstellung einer Risikotabelle ist aus Sicht der Interviewpartner wünschenswert. Diese solle ausdifferenzierte Parameter wie beispielsweise Wechselwirkungen mit Pflanzen, eine mögliche Re-Mobilisierung im Vorhinein in Abhängigkeit des Nachnutzungszwecks, etc. beinhalten. Da in Österreich gegenüber neuen Verfahren oft eine gewisse Skepsis vorhanden ist, braucht es laut externer Expert*innen auch eine adäquate Risikokommunikation mit Fokus auf die Nachnutzer. Dabei ist deutlich zu machen, dass eine Immobilisierung unbedenklich ist und eine positive Wirkung erzielt werden kann.

→ Die Ergebnisse aus KOKOSAN II und eventuell aus einem Folgeprojekt KOKOSAN III könnten zur Erstellung einer Risikotabelle sowie zur Risikokommunikation herangezogen werden. Dies ist allerdings nicht Gegenstand von KOKOSAN II

- **Interesse & Bereitschaft aller Beteiligten an der Umsetzung von Innovation**

Es braucht Interesse und Bereitschaft von Stakeholdern wie beispielsweise innovativen Sanierungsunternehmen, die neben etablierten Pfaden auch neue Wege gehen wollen; innovativen Amtssachverständige, die der Umsetzung innovativer Verfahren zustimmen; Wissenschaftler*innen, die eine wissenschaftliche Begleitung von Variantenstudien und Sanierungen durchführen und an der technischen Umsetzung ihrer Erkenntnisse mitarbeiten. Diese Bereitschaft ist mittels adäquaten Kommunikationsstrategien seitens des Projektteams sicher zu stellen.

- **Vorhandensein eines „Bindeglieds“ zwischen Forschung und Sanierungsanwendung**

Als Beispiel dafür wurden in den Interviews Planungsbüros, welche die Lücke zwischen wissenschaftlichen Ergebnissen und praktischer Anwendung schließen wollen, genannt.

→ Eventuell könnten in diesem Zusammenhang Förderungen als Anreiz angedacht werden.

Wahrgenommene Treiber & Barrieren

Neben wichtigen Voraussetzungen für einen Einsatz von KOKOSAN und auch anderen innovativen Sicherungsverfahren, wurden während den qualitativen Experteninterviews auch wahrgenommene Treiber und Barrieren erhoben. Die Identifikation förderlicher sowie hinderlicher Faktoren zu einem frühen Zeitpunkt in der Verfahrensentwicklung erlaubt die Mitberücksichtigung dieser Aspekte und wenn nötig, eine gezielte Anpassung des Verfahrens. Sind Treiber und Barrieren speziell nur für KOKOSAN relevant, wurden diese entsprechend am Satzende mit „KOKOSAN“ gekennzeichnet. Stellungnahmen des KOKOSAN-Projektteams sind in *kursiver Schrift* gekennzeichnet. Innerhalb des KOKOSAN II Projektes wurden die erhobenen Treiber und Barrieren bei der Entwicklung der Arbeitshilfe weitestgehend mitberücksichtigt.

Treiber

Beginnend mit den wahrgenommenen Treibern, haben die verschiedenen Gesprächspartner im Zusammenhang mit KOKOSAN speziell **Umweltvorteile** hervorgehoben. Dazu gehören:

- **Pflanzenkohle als Kohlenstoffsенke bzw. zur Kohlenstoffsequestrierung (KOKOSAN)**
- **Ganzheitliche Lösungsmethode (KOKOSAN)**
In Kombination mit einer Immobilisierung stelle KOKOSAN eine ganzheitliche Behandlungsmethode dar, da folgende Aspekte zusätzlich ermöglicht werden:
 - Revitalisierung der Mikroflora des Bodens
 - Förderung des mikrobiologischen Abbaus von organischen Schadstoffen
- **Lokale, zirkuläre Nutzung von nachwachsenden Ressourcen (KOKOSAN)**
Im Optimalfall werden für die Herstellung von Pflanzenkohlen regional verfügbare, nachwachsende Rohstoffe am Ende einer kaskadischen Nutzung verwendet (z.B. Altholz) und somit ein Beitrag zur Kreislaufwirtschaft geleistet.
- **Flächenrecycling**
Das Thema Flächenverbrauch gewinnt in Österreich zunehmend an Bedeutung. Durch den Einsatz von KOKOSAN für die Immobilisierung von leicht- bis mittelbelasteten Altstandorten, an welchen die Schadstoffquelle (Hotspot) bereits entfernt wurde und großflächig Restkontaminationen verblieben sind, könnten solche Flächen wieder einer Nutzung zugeführt werden.
→ Für die Art der Nutzung wäre jedenfalls eine standortspezifische Beurteilung notwendig.
- **Nachhaltigkeit im Vergleich zu konventioneller Aktivkohle (KOKOSAN)**
Zentral bei der Kohleherstellung sei die Regionalität der verwendeten Rohstoffe, die Verarbeitung sowie der Herstellungsprozess. Einige Interviewpartner haben auf den schlechten CO₂-Fußabdruck von konventioneller Aktivkohle hingewiesen, da diese Kohlen hauptsächlich in Entwicklungsländern (z.B. Indien, Indonesien) in intransparenten Herstellungsprozessen produziert werden.
→ In dieser Hinsicht wäre es unbedingt erforderlich, das Bewusstsein der potenziellen Anwender*innen zu schärfen.

Auch einige **ökonomische Treiber** konnten während den Gesprächen identifiziert werden:

- **Geringe Kosten des KOKOSAN-Verfahrens (KOKOSAN)**
Die Kosten des KOKOSAN-Verfahrens werden gegenüber derzeit etablierten Verfahren als gering eingeschätzt. KOKOSAN stelle somit eine kostengünstige Alternative zu anderen Verfahren dar.
→ Schätzungen zu erwartenden Kosten können aus der KNA entnommen werden (siehe Anhang 5).
- **Wertsteigerung von Grundstücken**
Durch die Wiedernutzbarmachung ist von einer Wertsteigerung der behandelten Grundstücke auszugehen.

- **Erwarteter Preisfall für Pflanzenkohle (KOKOSAN)**

Aufgrund der zunehmenden Verwendung von Pflanzenkohle in anderen Sektoren (z.B.: Landwirtschaft, Baugewerbe) und der daraus resultierenden größeren Marktverfügbarkeit werden die Preise für Pflanzenkohle laut Expert*innen in naher Zukunft voraussichtlich sinken.

Bezugnehmend auf **technische Treiber** sahen die interviewten Expert*innen zwei mögliche förderliche Faktoren:

- **Gezielte Steuerung der Pflanzenkohle-Eigenschaften (KOKOSAN)**

Durch unterschiedliche Herstellungsverfahren und Ausgangsmaterialien könnten verschiedene Eigenschaften bei Pflanzenkohlen erzielt werden.

- **Verfahrenskombinationen ("treatment trains")**

Bei einer Kombination von unterschiedlichen Verfahren könne KOKOSAN für die Sicherung von Umfeldbelastungen eingesetzt werden.

Im Bereich der **rechtlichen und politischen Treiber** wurde in fast allen Gesprächen die erwartete Umsetzung der ALSAG Novelle genannt:

- **Neue Chancen durch ALSAG-neu**

- Mehr Pflichten und Zwangsrechte für Behörden werden erwartet.
- Nicht förderfähige Altlasten werden innerhalb einer bestimmten Zeit saniert oder gesichert werden müssen.
- Eine stärkere Berücksichtigung von geringer kontaminierten Flächen wird erwartet.
- Ein Nutzungsbezug werde hergestellt und anstelle des reinen Vorsorgeprinzips komme das Reparaturprinzip verstärkt zum Tragen.
- Nicht nur eine Sanierung oder Sicherung wäre förderbar, sondern auch eine Voruntersuchung.

- **Überzeugungsarbeit durch Landessachverständige**

Landessachverständige könnten durch Ihre Rolle als Entscheidungsträger den Einsatz des KOKOSAN-Verfahrens sowie anderen innovativen Sicherungsverfahren fördern.

Sonstige Treiber, die von Expert*innen wahrgenommen werden:

- **Alternative zu Aushub und Deponierung**

Nach Angaben der befragten Expert*innen gibt es derzeit einen Trend weg von Räumungen und hin zu anderen Sanierungs- oder Sicherungsmethoden. In diesem Fall könne KOKOSAN als alternative Behandlungsmethode eingesetzt werden.

- **Genügend Standorte für einen Einsatz von Pflanzenkohle vorhanden (KOKOSAN)**
Auch Standorte außerhalb des ALSAG könnten spannend für KOKOSAN sein.
→ *Siehe Tabelle mit möglichen Standorten (Tabelle 6).*
- **Einbindung und Nutzung bestehender Expertennetzwerke (KOKOSAN)**
 - Netzwerk solle die Leute zusammenbringen, die mit Pflanzenkohle arbeiten (z.B. Hersteller, Händler, Lieferanten, Techniker, wissenschaftsnahe Institutionen, ÖVA, ÖBIKA, Fachverband Pflanzenkohle, EBI, etc.)
 - Förderung einer stärkeren Marktdurchdringung könnte ermöglicht werden.
 - Die Expertennetzwerke könnten die technische Arbeitshilfe aktuell halten.

Barrieren

Die interviewten Expert*innen sahen für KOKOSAN nicht nur förderliche Faktoren, sondern auch mögliche Barrieren, welche im Folgenden dargestellt sind. Beginnend mit **ökologischen Barrieren** sahen die Gesprächspartner die nachfolgend angeführten hinderlichen Faktoren:

- **Nachhaltigkeit derzeit kein Evaluierungskriterium**
Aspekte der Nachhaltigkeit würden derzeit von zuständigen Sachverständigen nicht als Evaluierungskriterien einbezogen.
- **CO2-Bilanz wird nicht als Hauptverkaufsargument gesehen**
- **Biomasse möglicherweise als limitierender Faktor (KOKOSAN)**
Biomasse sei keine unendliche Ressource wie beispielsweise Solarenergie.
→ *Pflanzenkohle kann aus biogenen Reststoffen hergestellt werden. In diesem Fall besteht keine Abhängigkeit von Primärressourcen. Werden Primärressourcen verwendet, kommt es auf das Ausmaß der Nutzung an. Hierfür wäre eine Nachfolgestudie (KOKOSAN III) interessant, um verfügbare Stoffe und konkurrierende Nutzungen genauer zu analysieren.*

Aus **ökonomischer** Perspektive wurden folgende **Barrieren** genannt:

- **Niedrige Grundstückspreise**
Kosten für Grundstücke seien teilweise günstiger als die Kosten für Altlasten inklusive derer Sanierung.
- **Wahl der Einbringungsmethode (KOKOSAN)**
Gewisse Technologien zur Einbringung von Pflanzenkohle seien sehr teuer, wie zum Beispiel Strahldüsen, Mixing-in-place oder Spezial-Tiefbaumethoden.
→ *Einbringungsmethode nicht Gegenstand von KOKOSAN II, könnte aber eventuell in einem Nachfolgeprojekt (KOKOSAN III) genauer behandelt werden.*

- **Langfristiges Monitoring**
Nach einem Einsatz des KOKOSAN-Verfahrens sei ein langfristiges Monitoring notwendig. Dies könne mitunter erhebliche Kosten verursachen.
→ *Dauer sowie Art und folglich Kosten für Monitoring müssen standortspezifisch angepasst werden. Ein Monitoring ist auch für andere Sicherungsverfahren notwendig.*
- **Abhängigkeit von Förderungen**
Oft werde nur saniert oder gesichert, wenn eine Förderung vorhanden ist.
- **Aktivkohle als Konkurrenz**
Aktivkohlen seien günstiger als Pflanzenkohlen erhältlich.
→ *Diese Preisdifferenz ist mitunter auf die wenig nachhaltigen Herstellungsprozesse von konventioneller Aktivkohle in Entwicklungsländer zurückzuführen (siehe dazu auch „Ökologische Treiber). Zentral sind Zertifizierungen und Bewusstseinsbildung.*

Im Bereich der **technischen Barrieren** konnten etliche hinderliche Faktoren identifiziert werden. Einige dieser wahrgenommenen Barrieren sind jedoch aus technischer Sicht bereits gelöst und wurden mit einer entsprechenden Stellungnahme vom KOKOSAN-Projektteam versehen.

- **Aufwand für Einbringung**
Abhängig von der Verfahrensauswahl und Einbringungstiefe könnte ein erhöhter Aufwand für die Einbringung erforderlich sein.
→ *Einbringungsmethode nicht Gegenstand von KOKOSAN II.*
- **Gezieltes Einbringen der Pflanzenkohle**
Es könne schwierig sein, die Pflanzenkohle gezielt dorthin zu bekommen, wo sie benötigt wird. Dabei müssten Wegigkeiten innerhalb des Bodenkörpers sowie die Bodenphysik mitberücksichtigt werden.
→ *International wird Aktivkohle schon eingesetzt. Da die Einbringungsverfahren für Pflanzenkohle dieselben wie für Aktivkohle sind, kann sich KOKOSAN auf diese Erfahrungen stützen. Einbringungsmethoden sind jedoch nicht Gegenstand von KOKOSAN II, könnte aber eventuell in einem Nachfolgeprojekt (KOKOSAN III) genauer behandelt werden.*
- **Bebaute Standorte / urbane Bereiche**
Ein Einsatz in bereits bebauten Gebieten wird als kostenintensiv und für flächenhafte Anwendungen sehr aufwändig gesehen.
→ *Die Kosten im urbanen Raum sind generell höher als in weniger oder nicht bebauten Gebieten. Bei Pflanzenkohle belaufen sich bei einer einfachen Einmischung die Kosten derzeit auf ca. 31 -32€ pro Tonne zu behandelndem Boden. Im Vergleich dazu belaufen sich die Kosten für Räumungen und Deponierungen im Mittel auf 186 €/t für die Entsorgung nicht deponierbarer Abfälle. Im Sinne eines langfristigen Bodenschutzes ist die in-situ Behandlung einer Deponierung vorzuziehen. Das Problem eines höheren Aufwandes für flächenhafte Anwendungen besteht auch für andere Methoden.*

- **Reinheitsgrad der Pflanzenkohle**
 Befürchtung einer Schadstoffbelastung der Pflanzenkohle mit PAKs in Abhängigkeit der Prozessparameter des gewählten Herstellungsverfahrens.
 → Eine mögliche Schadstoffbelastung kann durch Prozesskontrolle vermieden werden. Es gibt für Pflanzenkohlen europaweite PAK-Grenzwerte, die eingehalten werden müssen. Das EBC gilt als Qualitätsstandard für die Pflanzenkohle Produktion. Basierend darauf gibt es in Österreich die ÖNORM S221.
- **Restrisiko einer Auswaschung von Schadstoffen**
 Auch wenn in Säulenversuchen die Wahrscheinlichkeit einer Auswaschung von Schadstoffen in Gewässer nicht nachgewiesen werden kann, verbleibe ein Restrisiko für Sachverständige.
 → Säulenversuche sind Stand der Technik und werden in der Altlastensanierung regelmäßig angewandt. Gewisse Parameter, wie beispielsweise eine mögliche Bodenaustrocknung können nicht mitberücksichtigt werden, deswegen gibt es aber ein Monitoring bei der Durchführung von Sicherungen.
- **Kontamination bleibt vor Ort**
 → Tatsache bei Sicherungen, weswegen auch ein Monitoring verpflichtend ist. Im Fall von KOKOSAN ermöglicht die Pflanzenkohle die Immobilisierung von Schadstoffen sowie zu einem geringen Teil auch den mikrobiologischen Abbau von organischen Schadstoffen. Dadurch sind die Schadstoffe zum Großteil nicht mehr bioverfügbar oder mobil. Die Relevanz ist abhängig von der Nachnutzung.
- **Gefahr von Hautkontakt oder Verschlucken**
 Es bestehe möglicherweise die Gefahr, dass ein Hautkontakt mit schadstoffbeladener Pflanzenkohle stattfindet oder Teile davon (von Kindern) verschluckt werden. Speziell bei einem Einsatz für Park- und Erholungsflächen müsse ein Nachweis erbracht werden, dass die an die Pflanzenkohle gebundenen Schadstoffe keine negativen Wirkungen aufweisen.
 → Ein Einsatz von Pflanzenkohle zielt darauf ab, Emissionen nach unten hin (ins Grundwasser) zu vermindern. Für die Nachnutzung einer Altlast als Erholungsfläche muss ein Sanierungskonzept entsprechend der vorhandenen Kontamination und dem Standort erstellt werden. In der Regel wird in solchen Fällen eine Deckschicht aufgebracht. Pflanzenkohle kann hier sinnvoll ergänzend zur Verringerung der Emissionen ins Grundwasser eingesetzt werden. Ein Kontakt mit schadstoffbeladener Pflanzenkohle ist in jedem Fall weniger problematisch als ein direkter Kontakt mit dem Schadstoff.
- **Aktivkohle als Konkurrenz (Wirksamkeit)**
 Die Pflanzenkohle solle von der Wirksamkeit nicht schlechter als Aktivkohle sein. Ein Nachweis dazu sei wünschenswert.
 → Pflanzenkohlen sind im Unterscheid zu Aktivkohlen weder chemisch noch physikalisch aktiviert. Pflanzenkohlen weisen daher andere Eigenschaften als die am Markt etablierten Aktivkohlen auf. Beispielsweise ist die Sorptionsstärke für organische Schadstoffe von der spezifischen Oberfläche der Kohlen abhängig, welche bei Aktivkohlen bis zu zehnfach höher als jene von Pflanzenkohle sein kann. Entsprechend ist die Sorptionsaffinität zu Aktivkohlen bei ungeladenen organischen Schadstoffen tendenziell stärker. Bei ionisierbaren

Schadstoffen ist die Sorptionsaffinität komplexer und hängt von mehreren Faktoren ab (z.B. von funktionellen Gruppen an der Kohlenoberfläche, pH-Wert, Ionenstärke im Porenwasser). Hier kann es zu Situationen kommen, in denen Pflanzenkohlen besser sind als Aktivkohlen. Für Metalle und Metalloide, bei denen Speziierung und Ausfällung wichtige Faktoren für die Immobilisierung sind, sind Pflanzenkohlen oftmals besser für die Immobilisierung geeignet als Aktivkohlen. Pflanzenkohle wird im Projekt KOKOSAN mit einer dampfaktivierten Aktivkohle auf Basis von Holz aus nachhaltig bewirtschafteter Forstwirtschaft verglichen, welche allerdings im Vergleich zu den am Markt üblichen Aktivkohlen bisher ein ökologisches Nischenprodukt darstellt.

Auf **rechtlicher und politischer** Ebene konnten auch einige **Barrieren** während der Experteninterviews erhoben werden:

- **Genehmigungspflicht für Substanzeinbringung in Boden**
Genehmigungsverfahren seien oft sehr langwierige Prozesse.
→ *Grundlegend wird mit Pflanzenkohle ein Hilfsstoff in den Boden eingebracht, welcher genehmigungspflichtig ist. Für den Einsatz von Pflanzenkohlen in der Altlastensanierung gibt es derzeit keine spezifischen gesetzlichen Regelungen in Österreich, sodass dies im Einzelfall beurteilt und genehmigt werden muss. EBC-zertifizierte Pflanzenkohle stellt keine Gefährdung für Böden oder Grundwasser dar, wenn der Einsatz zur Immobilisierung und Bodenverbesserung im gesetzlichen Rahmen erfolgt. Hieraus ist aus Sicht von Expert*innen abzuleiten, dass eine Genehmigung des Einsatzes von Pflanzenkohle zur Altlastensanierung in Österreich grundsätzlich möglich sein sollte. Eine Zulassung als Düngemittel von Pflanzenkohle ist in Österreich über §9a Düngemittelgesetz möglich.*
- **Überzeugung von Landessachverständigen**
Landessachverständige als Entscheidungsträger werden als wichtige Instanz gesehen. Wenn diese nicht vom Verfahren überzeugt sind, könne ein Einsatz schwierig werden.
- **Strenge Vorgaben des WRG und AWG**
Im Speziellen das darin verankerte Vorsorgeprinzip. WRG und AWG fördern laut Gesprächspartner derzeit vermehrt Aushub & Deponierung.

Wahrgenommene **sonstige Barrieren** sind im Folgenden angeführt:

- **Übersetzung Forschung in die Praxis**
Forschende würden häufig keine wirtschaftlichen Interessen verfolgen, sondern das Interesse liege in der wissenschaftlichen Wertschöpfung (= Publikationen). Es brauche Forscher*innen mit Interesse an angewandter Forschung, die darüber hinaus auch dazu bereit sind, die Umsetzung der Ergebnisse voranzutreiben.
- **Nachfrage am Markt**
Skepsis, ob Nachfrage am Markt bestehend ist.
→ *In den Interviews war die Bereitschaft zum Einsatz von KOKOSAN durchwegs hoch bis sehr hoch, wenn die Rahmenbedingungen einen Einsatz erlauben.*

- **Nachnutzungsmöglichkeiten durch immer noch vorhandene Kontamination**

Wenn nur Sicherungsmethoden eingesetzt werden, dann gibt es bei etwaiger Nachnutzung nach wie vor das Thema der Belastung. Gewisse Nachnutzungsmöglichkeiten könnten dadurch verhindert werden.

→ *Wie bei allen Sicherungsmaßnahmen ist eine Nachnutzung mit den Behörden zu diskutieren und im Sanierungskonzept zu berücksichtigen. Es könnte beispielsweise eine Deckschicht aufgebracht werden.*

Identifizierte ökologische, ökonomische, politische, rechtliche sowie technische Treiber und Barrieren für einen Einsatz des KOKOSAN-Verfahrens wurden während der Veranstaltung „ÖVA Mittagstisch“ (siehe auch Kapitel „Dissemination“) validiert und priorisiert. Die Ergebnisse dazu sind in Abb. 19 dargestellt. Als die relevantesten Barrieren für einen Einsatz von KOKOSAN wurden Aktivkohle (Kosten und Wirksamkeit), die derzeitige Situation, dass Sachverständige Nachhaltigkeit nicht als Evaluierungskriterium miteinbeziehen, und die momentan nicht als Hauptverkaufsargument herangezogenen CO₂-Bilanzen eingestuft. Bei den Treibern wurden der Einsatz lokaler Ressourcen, die Revitalisierung der Mikroflora des Bodens sowie geringe Verfahrenskosten am höchsten priorisiert.



Abb. 19: *Einschätzung der Relevanz von Barrieren & Treiber durch Stakeholder des KOKOSAN Wertschöpfungsnetzwerks (ÖVA Mittagstisch).*

KPIs zur Beurteilung von KOKOSAN und anderen innovativen Sicherungsverfahren

Key Performance Indikatoren (KPIs) sind Leistungsindikatoren, welche Aufschluss darüber geben, ob ein zuvor festgelegter Bereich die vorgegeben Ziele erreicht hat. Im Rahmen des Projektes wurden KPIs für das KOKOSAN-Sicherungsverfahren (gekennzeichnet mit „KOKOSAN“) sowie für innovative Sicherungsverfahren im Allgemeinen erhoben. Dafür wurden die Ergebnisse der qualitativen Experteninterviews sowie der Literaturrecherche herangezogen. Die identifizierten KPIs wurden auch in der Arbeitshilfe aufgenommen und sind in Tabelle dargestellt.

Tabelle 6: KPIs für KOKOSAN sowie für anderen innovativen Sicherungsverfahren.

KPIs		Operationalisierung / Definition
Kosten		Kosten [in EUR] pro saniertem/gesichertem Volumen [m ³].
Langzeitperformance		Performance über einen längeren Zeitraum [Monate, Jahre].
	Stabilität der Pflanzenkohle (KOKOSAN)	Die Stabilität von Pflanzenkohle bezieht sich auf ihre Fähigkeit, biotischem und abiotischem Abbau (chemische Oxidation, photochemische Oxidation, anorganische Pyrolyse usw.) in der Bodenumgebung zu widerstehen. ¹²
	Immobilisierung der Schadstoffe (KOKOSAN)	Immobilisierung ist, durch die Zugabe von Pflanzenkohle die Mobilität der Schadstoffe im Untergrund bzw. im ausgehobenen Material soweit zu verringern, dass langfristig unter spezifischen Standortbedingungen keine erheblichen Umweltauswirkungen mehr bestehen. ¹³
Reduktion der Pflanzenverfügbarkeit		Pflanzenverfügbarkeit bezeichnet das Maß der Verfügbarkeit der Schadstoffe für die Pflanzen [mg/Frischgewicht]. ¹⁴
Wassergüte		Schadstoffe im Wasser [mg/l]; qualitative Beschreibung der Auswirkungen möglich, z.B. Reduktion gewisser Funktionen. ¹⁵
Kohlenstofffußabdruck		Einsparungen an klimawirksamen Gasen [CO ₂ eq].
Nachnutzungspotential		Durch Sicherung/Sanierung nutzbar gemachte Fläche [m ²].
Wertsteigerung von sanierten/gesicherten Flächen		Gewinn [in EUR] pro sanierter/gesicherter Fläche [m ²].
Zeitdauer der Sanierung / Sicherung		Stunden, Tage, Wochen, Jahre.

Am häufigsten wurden während den Experteninterviews die KPIs „Kosten“ und „Langzeitperformance“ genannt.

Potenzielle Standorte für den Einsatz von KOKOSAN

In den durchgeführten Interviews wurden auch potentielle Standorte für einen Einsatz des KOKOSAN-Verfahrens erfragt. Dabei wurden eingetragene Altlasten, mögliche Altlasten sowie auch Anwendungsbereiche außerhalb des ALSAG genannt. Die Ergebnisse dazu sind in **Tabelle 6** dargestellt, wobei für jeden genannten potenziellen Standort die dort vorhandenen Schadstoffe, eine Standortbeschreibung sowie eine Stellungnahme des KOKOSAN-Projektteams ersichtlich sind. Auf Basis dieser Parameter wurde anschließend von den technischen Projektpartnern in einem zweistufigen Validierungsprozess die Eignung für KOKOSAN abgeleitet.

¹²Jie Wang, et al., "Analysis of the Long-Term Effectiveness of Biochar Immobilization Remediation on Heavy Metal Contaminated Soil and the Potential Environmental Factors Weakening the Remediation Effect: A Review," *Ecotoxicology and Environmental Safety* 207: p. 111261, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111261>.

¹³Franz Aschauer, et al. "Immobilisierung Von Schadstoffen an Kontaminierten Standorten," 2021, <http://www.altlastenmanagement.at/home/documents/publikationen/2012/OEVA-TAH1%20Immobilisierung.pdf>.

¹⁴Lexikon der Geowissenschaften (s.a.). Pflanzenverfügbarkeit. <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/>. Zugriff 07.06.2021.

¹⁵Über EBC-Zertifikat geklärt <https://www.european-biochar.org/en/certificate>.

Tabelle 6: Potenzielle Standorte für einen Einsatz von KOKOSAN.

Farbcodierung	
Einsatz möglich Konkurrenz - Einsatz vielleicht möglich - Einsatz nicht möglich	
Eingetragene Altlasten	
Altlast K26: Holzimpregnierung Leitgeb¹⁶	Schadstoffe: Teeröl (PAKs)
	Beschreibung: Der Altstandort liegt brach und ist mit Gras und Buschwerk bewachsen. Mit Ausnahme eines ungenutzten Stellwerks-/Bahnwärterhauses der ÖBB befinden sich keine Gebäude und Anlagen mehr auf dem Gelände.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Ja.
	Stellungnahme des Projektteams: Erhebliche Kontamination bis zu 10 m ins Grundwasser. Einsatz von Pflanzenkohle in Funnel & Gates möglich. Stabilisierung von mäßig kontaminierten Randbereichen denkbar, damit der Boden nicht ausgehoben und deponiert werden muss.
Altlast O56: Tontaubenschießplatz Treffling¹⁷	Schadstoffe: Metalle (Blei); PAKs (aber hohes Adsorptionsvermögen am Standort)
	Beschreibung: Hauptsächlich oberflächliche Kontamination.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Ja, aber zum Teil Rodung notwendig.
	Stellungnahme des Projektteams: Sanierung mit KOKOSAN und Nachnutzung mit Großflächen-PV-Anlage realisierbar. Einmischung und Rückverfüllung vor Ort möglich. Auswahl der richtigen Pflanzenkohle ist entscheidend. Ein großes Problem bei der technischen Umsetzung ist die Kontamination im Wald (Rodung?).
Altlast K27: Katz & Klump¹⁸	Schadstoffe: Teeröl (PAKs); Metalle (Quecksilber, Chrom)
	Beschreibung: Der südöstliche Teil des Altstandortes wird als Betriebsgebiet einer Spedition genutzt, der übrige Teil stellt noch immer den Produktionsstandort des Holzverarbeitungsbetriebes dar.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Vielleicht.
	Stellungnahme des Projektteams: Erhebliche Kontamination bis weit ins Grundwasser. Einsatz von Pflanzenkohle in Funnel & Gates möglich. Stabilisierung von mäßig kontaminierten Randbereichen denkbar. Die Mischung aus PAK und Schwermetallen könnte die Auswahl der Pflanzenkohle erschweren. Sanierung durch die Nutzung erschwert.
Gesicherte Altlast K6: BBU Blei- und Zinkhütte Arnoldstein¹⁹	Schadstoffe: Metalle (Blei, Arsen, Cadmium, Zink, Antimon); Anorganische Schadstoffe (Fluorid, Sulfat)
	Beschreibung: Zwischen 1994 und 2001 erfolgten mehr als 40 Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Vielleicht, aber ggf. nicht mehr notwendig
	Stellungnahme des Projektteams: Evaluierung erforderlich, ob ein Einsatz mit Pflanzenkohle noch zielführend wäre. Kontamination mit vielen verschiedenen Metallen könnte Probleme bei der Auswahl der Pflanzenkohle bereiten. Eine Umschließung und/oder Oberflächenabdichtung wurde bereits durchgeführt.
Altlast N73: Holzimpregnierung Rütgers Gerasdorf²⁰	Schadstoffe: Teeröl (PAKs)
	Beschreibung: Aktuell wird der südliche Teil des Altstandortes als Lagerplatz (Baustoff- und Getreidelager) mit Lagerhallen, Baumarkt, Tankstelle und Verwaltungsgebäuden genutzt. Der nördliche Teil des Altstandortes liegt zum Teil brach bzw. wird ein Teil als unbefestigtes Baustofflager genutzt. Im nordwestlichen Randbereich befinden sich ein Betriebsgebäude mit versiegeltem Außenlager sowie eine Pferdekoppel des nördlich angrenzenden Reitstalls.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Die gesättigte Bodenzone ist kein Ziel-Einsatzbereich für KOKOSAN; methodisch aber denkbar.
	Stellungnahme des Projektteams: Gesättigte Bodenzone; Hotspot ausheben und mäßig kontaminierte Bereiche stabilisieren. Einsatz von Pflanzenkohle in Funnel & Gates möglich.
	Schadstoffe: Metalle (Blei, Zink, Cd, Hg)

¹⁶<https://www.altlasten.gv.at/atlas/verzeichnis/Kaernten/Kaernten-K26.html>

¹⁷<https://www.altlasten.gv.at/atlas/verzeichnis/Oberoesterreich/Oberoesterreich-O56.html>

¹⁸<https://www.altlasten.gv.at/atlas/verzeichnis/Kaernten/Kaernten-K27.html>

¹⁹<https://www.altlasten.gv.at/atlas/verzeichnis/Kaernten/Kaernten-K6.html>

²⁰<https://www.altlasten.gv.at/atlas/verzeichnis/Niederoesterreich/Niederoesterreich-N73.html>

Altlast ST32: Halde Schrems ²¹	Beschreibung: Die Altablagerung befindet sich im Siedlungsgebiet von Schrems und wird sowohl südlich als auch nördlich des Talbachs für Wohnzwecke inkl. Hausgärten genutzt. Ein Teil der Hausgärten ist auch von der Kontamination betroffen. Der südöstliche Teil der südlichen Halde wird landwirtschaftlich genutzt (Grünland), wobei ein Teilbereich auch weidewirtschaftlich genutzt wird. Auf einem kleinen Teil wird Forstwirtschaft betrieben (Christbaumzucht). Die nachgewiesenen hohen Bleikonzentrationen in Wurzel- und Blattgemüsen belegen einen hohen Schadstofftransfer vom kontaminierten Boden in die Pflanze und somit eine hohe Pflanzenverfügbarkeit von Blei.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Vielleicht.
	Stellungnahme des Projektteams: Stabilisierung mäßig kontaminierter Flächen. Denkbare Forschungsfläche für Langzeitstabilität und Pflanzenverfügbarkeit bzw. Einsatz unterschiedlicher Pflanzenkohlen bei der Christbaumzucht.
Altlast N53: Teerfabrik Rütgers - Angern ²²	Schadstoffe: Teeröl (PAKs), Arsen
	Beschreibung: Sofortmaßnahmen bereits durchgeführt: Bodenaustausch; Hausgärten (ca. 5000m ²) immer noch verunreinigt.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Nein.
	Stellungnahme des Projektteams: Großflächige erhebliche Kontamination. Kontamination vermutlich in der gesättigten Bodenzone und zum Teil versiegelt.
Mögliche Altlasten	
Bahnschwellen- imprägnierungs- anstalten und Lagerflächen	Schadstoffe: PAKs
	Beschreibung: Stark PAK kontaminiert (oberflächlich). Meistriesige Flächen, auf denen schon seit mehreren Jahrzehnten Bahnschwellen gelagert werden. Bisher wurde in den meisten Fällen nichts dagegen gemacht.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Ja, wenn der Hotspot saniert wurde.
	Stellungnahme des Projektteams: Pflanzenkohle ist gut geeignet, um PAKs und NSOs zu adsorbieren. Die Kontamination sollte aber mit der Kapazität der Pflanzenkohle abgestimmt sein. Sehr hohe Kontaminationen müssen aber sicherlich ausgehoben und behandelt werden.
Schießplätze	Schadstoffe: PAKs, Schwermetalle (Blei)
	Beschreibung: Derzeit wenige Lösungsmöglichkeiten, daher wäre ein Einsatz von KOKOSAN interessant.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Ja.
	Stellungnahme des Projektteams: Im Moment würde der Boden oberflächlich abgezogen und deponiert werden (eventuell mit entsprechender Vorbehandlung). Beim Einsatz von KOKOSAN muss die Pflanzenkohle sehr gut mit der Metallkontamination abgestimmt werden. Dann könnte eine Humusaufgabe aufgebracht und die Fläche eventuell als Weidefläche oder Grünland genutzt werden.
Gaswerke oder Kokereien	Schadstoffe: PAKs
	Beschreibung: PAKs sind häufig an kohlenstoffreiche Partikel gebunden, betrifft speziell hochmolekulare PAKs.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Vielleicht.
	Stellungnahme des Projektteams: Pflanzenkohle ist gut geeignet, um PAKs und NSOs zu adsorbieren. Die Kontamination sollte aber mit der Kapazität der Pflanzenkohle abgestimmt sein. Bei sehr hohen Kontaminationen muss der Boden sicherlich ausgehoben und behandelt werden. Wenn in der darunter liegenden ungesättigten Bodenzone noch eine mäßige Kontamination vorliegt, könnte diese eventuell mit KOKOSAN stabilisiert werden. Oft ist aber auch schon das Grundwasser betroffen, dann ist KOKOSAN keine Option.
Metallverarbeitende Betriebe	Schadstoffe: Oberflächennahe (Schwer-)Metallkontaminationen
	Beschreibung: PAKs sind häufig an kohlenstoffreiche Partikel gebunden, betrifft speziell hochmolekulare PAKs.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Vielleicht. Einzelfallüberprüfung der Konzentrationen und Zusammensetzung der Metallkontamination notwendig.
	Stellungnahme des Projektteams: Versuche zeigen, dass die Pflanzenkohle in Bezug auf die Metallkontamination sehr gut abgestimmt werden muss.
Gaswerke oder Kokereien	Schadstoffe: PAKs
	Beschreibung: PAKs sind häufig an kohlenstoffreiche Partikel gebunden, betrifft speziell hochmolekulare PAKs.

²¹<https://www.altlasten.gv.at/atlas/verzeichnis/Steiermark/Steiermark-ST32.html>

²²<https://www.altlasten.gv.at/atlas/verzeichnis/Niederosterreich/Niederosterreich-N53.html>

	<p>Einsatz von KOKOSAN möglich? Vielleicht.</p> <p>Stellungnahme des Projektteams: Pflanzenkohle ist gut geeignet, um PAKs und NSOs zu adsorbieren. Die Kontamination sollte aber mit der Kapazität der Pflanzenkohle abgestimmt sein. Bei sehr hohen Kontaminationen muss der Boden sicherlich ausgehoben und behandelt werden. Wenn in der darunter liegenden ungesättigten Bodenzone noch eine mäßige Kontamination vorliegt, könnte diese eventuell mit KOKOSAN stabilisiert werden. Oft ist aber auch schon das Grundwasser betroffen, dann ist KOKOSAN keine Option.</p>
Ehemalige Bergbauhalden	Schadstoffe: divers
	Beschreibung: -
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Nein.
	Stellungnahme des Projektteams: -
Mögliche Anwendungsbereiche außerhalb des ALSAG	
Diffus belastete Standorte	Schadstoffe: PAKs
	Beschreibung: Diffuse Kontaminationen können über BORIS (in projektinternen Recherchen wurden keine passenden Standorte gefunden) oder andere weiterführende Recherchen gesucht werden.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Ja.
	Stellungnahme des Projektteams: Pflanzenkohle ist gut geeignet, um PAKs und NSOs zu adsorbieren.
Gebiete entlang der Autobahn	Schadstoffe: divers
	Beschreibung: Mittels Pflanzenkohle könnten Schadstoffe immobilisiert werden.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Ja.
	Stellungnahme des Projektteams: PAK, Blei, Zink und Cadmium sind sehr häufig entlang von Autobahnen zu finden. Die Pflanzenkohle muss mit der Metallkontamination sehr gut abgestimmt werden.
Versickerungsbecken	Schadstoffe: Abwässer
	Beschreibung: Zur Versickerung anfallender Abwässer sind Versickerungsbecken (Versitzbecken) zu errichten, z.B. bei Autobahnen, Parkplätzen, Supermärkten, Eisenbahntunneln.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Ja.
	Stellungnahme des Projektteams: Zur effektiven Filterung der Abwässer als Schutz für das Grundwasser sind sog. Humuspassagen zu errichten. Die Standzeit der Humuspassagen könnte durch Beimengung von Pflanzenkohle deutlich verlängert werden.
Standorte, an denen große Mengen an fossilen Energieträgern verbrannt werden	Schadstoffe: PAKs, Schwermetalle
	Beschreibung: In solchen Industrieregionen können erhöhte PAK Werten im Boden vorkommen, die aber noch aus früheren Zeiten stammen (z.B.: ehemalige Schwerindustrieregionen), da jetzt alle österreichischen Anlagen über eine Abgasaufbereitung verfügen. Außerhalb Österreichs eventuell das „Schwarze Dreieck“ (DE, PL, CSK) - Kohleabbau und Schwerindustrie.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Ja.
	Stellungnahme des Projektteams: Nur unversiegelte Flächen.
Görtschitztal	Schadstoffe: HCB
	Beschreibung: Anreicherung von Hexachlorbenzol im Görtschitztal wurde 2014 bekannt. Sehr großflächige Verunreinigung, daher stellt ein Bodenaustausch keine Möglichkeit dar.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Ja.
	Stellungnahme des Projektteams: Organische Kontaminanten werden wahrscheinlich gut immobilisiert. Studie zur Pflanzenverfügbarkeit könnte dort gut durchgeführt werden.
Erreichung einer besseren Deponieklasse	Schadstoffe: -
	Beschreibung: Es gibt Fälle, in denen die Gesamtgehalte eines Aushubs zur Deponierung zwar entsprechen, aber Überschreitungen der Eluatwerte zu einer schlechteren Deponieklasse führen, wie z.B. Reststoff oder Massenabfall. Durch Behandlung des Bodens (auf der Baustelle) mit Pflanzenkohle und Senkung der Eluatwerte könnte dieses Material wieder auf einer Baurestmasse abgelagert werden, wodurch kein ALSAG mehr zu zahlen wäre und die Gesamtkosten gesenkt würden. Der zusätzliche Eintrag von TOC sollte kein Problem sein, da es sich nachweislich um elementaren Kohlenstoff handelt.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Ja.
	Stellungnahme des Projektteams: Die Behörde muss dieser Behandlung vor Deponierung zustimmen. Langzeitstabilität ist hier bei der Bewertung sicherlich ein großes Thema.

Garten Flächen	Schadstoffe: divers
	Beschreibung: Eine Verringerung der Pflanzenverfügbarkeit sowie eine (Wieder-)Nutzbarmachung sind wichtig.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Technisch möglich, aber meist nicht präferiert.
	Stellungnahme des Projektteams: Vermutlich wird ein Austausch durchgeführt werden, da es sich in den meisten Fällen um eher kleinere Flächen handelt. Außerdem werden Gartenbesitzer lieber mehr Geld für den Austausch bezahlen, als die kontaminierte Fläche zu immobilisieren.
Landwirtschaftliche Flächen	Schadstoffe: PAKS
	Beschreibung: Eine Verringerung der Pflanzenverfügbarkeit sowie eine (Wieder-)Nutzbarmachung für landwirtschaftliche Zwecke sind wichtig.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Ja.
	Stellungnahme des Projektteams: Sinnvoll bei sandigen, sauren Böden mit geringem Nährstoffrückhalt. Der Einsatz von Pflanzenkohle verbessert die Fruchtbarkeit und vermindert zusätzliche Pestizidfrachten ins Grundwasser. Die Sinnhaftigkeit ist abhängig von der gewählten Pflanzenkohle. Generell ist in diesem Bereich aber noch einiges an Forschungsarbeit notwendig.
Landwirtschaftliche Flächen	Schadstoffe: Uran
	Beschreibung: Durch die häufige Anwendung von uranhaltigen Phosphatdüngern in der Landwirtschaft sind etliche Böden deutlich mit Uran belastet und stellen eine Gefährdung für das Grundwasser dar, besonders wenn dieses wieder als Trinkwasserquelle genutzt werden soll.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Vielleicht.
	Stellungnahme des Projektteams: Eine großflächige Sicherung zum Schutz des Grundwassers durch den Einsatz von Pflanzenkohle wäre denkbar. Pflanzenkohle scheint Uran sehr gut zu binden.
Behandlung off-site oder in Mieten	Schadstoffe: divers
	Beschreibung: Verbindung mit einer Behandlung off-site oder in Mieten. Der biologische Abbau auf Zeit kann dadurch verbessert werden.
	Einsatz von KOKOSAN möglich? Vielleicht.
	Stellungnahme des Projektteams: Es ist eine fallspezifische Abklärung notwendig, ob eine derartige Behandlung nach AWG erlaubt ist.

Laut Expert*innenenschätzung beläuft sich die Gesamtanzahl der mit Schwermetall- und/oder PAK belasteten Altstandorte in Österreich auf max. 150-200 (derzeit sind ca. 70 im Altlastenatlas verzeichnet). Ungefähr die Hälfte dieser Altlasten befinden sich in der ungesättigten Zone und sind leicht- bis mittelbelastet, aber dennoch mit Sanierungsbedarf. Wie viele davon wirklich für einen Einsatz von KOKOSAN geeignet sind (z.B. Gefahr für das Grundwasser vorhanden, aber keine unmittelbare Gefahr einer Schadstoffaufnahme durch Menschen/Pflanzen, nicht bebaut, etc.) ist sehr schwer abschätzbar. Es wird von max. 30 geeigneten Altstandorten ausgegangen.

Mögliche Konkurrenzverfahren

Im Rahmen der qualitativen Interviews wurden auch mögliche Konkurrenzverfahren zu KOKOSAN analysiert. Die Resultate sind in **Tabelle 7** dargestellt. Je nach Datenverfügbarkeit ist jeweils eine Beschreibung des genannten Verfahrens sowie eine Stellungnahme des Projektteams angeführt. Ausgehend von diesen Informationen wurde von den technischen Expert*innen im KOKOSAN-Projektteam in einem zweistufigen Validierungsprozess eine tatsächliche Konkurrenz zu KOKOSAN abgeleitet.

Tabelle 7: Mögliche Konkurrenzverfahren zu KOKOSAN.

Farbcodierung	
Konkurrenz – Konkurrenzsituation möglich – Keine Konkurrenz	
Alternative Sanierungs-/Sicherungsverfahren	
Aushub und Deponierung ("dig & dump")	Beschreibung: Sinnvoll für kleinere Flächen. Rechtssicherheit für Nachnutzung ist gegeben. Jedoch auch als "Verschiebung des Problems" wahrgenommen.
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Ja.
	Stellungnahme des Projektteams: ABER: Keine Konkurrenz bei erheblichen Kontaminationen! In diesem Fall wird ein Aushub und eine anschließende Deponierung präferiert.
Pflanzenöl	Beschreibung: Schadstofffraktion wird in-situ mit Hilfe von Enzymen und Mikroorganismen abgebaut.
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Ja.
Phytoremediation	Beschreibung: Einsatz bei Restkontamination mit Schwermetallen (z.B. Cd, Pb), passende Pflanzenarten müssen gewählt werden. Derzeit schwierig Kunden dafür zu finden.
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Ja.
Stabilisierung mit Kalk, Tonmineralien oder Rotschlamm	Beschreibung: Die Oberfläche der Pflanzenkohle hat eine permanent negative Ladung und hohe Kationenaustauschkapazität. Pflanzenkohle und Kalk puffern pH-Wert nach oben, was zu einer verringerten Mobilität der Schwermetalle führt.
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Ja.
	Stellungnahme des Projektteams: Kalk könnte ein Thema bei Schwermetall-Belastungen im sauren Bereich sein (siehe Treffling).
MNA	Beschreibung: Mit dieser in-situ-Methode sollen natürlich vorkommende und nachweisbare Prozesse im Boden und Grundwasser die Masse und Konzentration der Schadstoffe verringern.
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Ja.
Überschüttung	Beschreibung: Beispielsweise mit Aushubmaterial.
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Ja. Könnte als Alternative zur MNA eingesetzt werden.
Pump & Treat	Beschreibung: Wasserlösliche Schadstoffe werden dem Boden indirekt über das Grundwasser entzogen, das über Brunnen abgepumpt und anschließend in einer geeigneten Anlage behandelt wird.
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Vielleicht.
	Stellungnahme des Projektteams: Statt Aktivkohle könnte dampfaktivierte Pflanzenkohle eingesetzt werden. Im Vergleich dazu wird Standard-Pflanzenkohle schneller gesättigt, wodurch ein solcher Betrieb sehr kostenintensiv wäre.
Aktivkohle	Beschreibung: Im Einsatz beispielsweise bei Aktivkohlefenstern bei Schäden mit chlorierten Kohlenwasserstoffen, als Filter für Gewässer.
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Vielleicht.
	Stellungnahme des Projektteams: Statt Aktivkohle könnte dampfaktivierte Pflanzenkohle eingesetzt werden. Im Vergleich dazu wird Standard-Pflanzenkohle schneller gesättigt, wodurch ein solcher Betrieb sehr kostenintensiv wäre.
Funnel & Gate	Beschreibung: Grundwasserströme werden mit ihren Kontaminationen durch eine dichte Wand (Funnel) gesperrt, trichterförmig gesammelt und einem oder mehreren Gates (Toren) zugeleitet. In den Gates befinden sich die Materialien zur Wasserbehandlung, passend zur jeweiligen Verschmutzung.
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Vielleicht.
	Stellungnahme des Projektteams: Statt Aktivkohle könnte dampfaktivierte Pflanzenkohle eingesetzt werden. Im Vergleich dazu wird Standard-Pflanzenkohle schneller gesättigt, wodurch ein solcher Betrieb sehr kostenintensiv wäre.
In-situ Verfahren mit diversen Chemikalien / Oxidationsmitteln	Beschreibung: Im Einsatz bei Schwermetallbelastungen. Heikle Verfahren, die Fragestellungen aufwerfen wie beispielsweise: Was passiert mit den Chemikalien im Boden? Welche ungewollten Reaktionen können ausgelöst werden?
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Vielleicht.

	Stellungnahme des Projektteams: Solche Verfahren werden häufig in der gesättigten Bodenzone durchgeführt, in diesem Fall stellen sie keine Konkurrenz für KOKOSAN dar, da dies kein Ziel-Einsatzbereich ist. In der ungesättigten Bodenzone könnte eine Konkurrenz auftreten.
Einsatz von Schwefelsäure-Eisen	Beschreibung: Zur Behandlung von mit PAKs kontaminierten Standorten.
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Vielleicht.
	Stellungnahme des Projektteams: Solche Verfahren werden häufig in der gesättigten Bodenzone durchgeführt, in diesem Fall stellen sie keine Konkurrenz für KOKOSAN dar, da dies kein Ziel-Einsatzbereich ist. In der ungesättigten Bodenzone könnte eine Konkurrenz auftreten.
Vertikale Dichtelemente, Einkapselungen	Beschreibung: Umschließungen zur seitlichen Sicherung von Altlasten. Solche Verfahren werden häufig in der gesättigten Bodenzone eingesetzt.
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Nein.
	Stellungnahme des Projektteams: KOKOSAN wird in der gesättigten Bodenzone nicht eingesetzt.
Bioventing, Bodenluftabsaugung	Beschreibung: Oft in Kombination: Bodenluftabsaugung (primäre Sanierungsphase, Entfernung flüchtiger Komponenten) und Bioventing (sekundäre Sanierungsphase, Abbau weniger flüchtiger Komponenten).
	Konkurrenz zu KOKOSAN aus Sicht des Projektteams? Nein.

Task 5.3: Kosten-Nutzen-Analyse

Ziel: Analyse des innovativen Sanierungsverfahrens mit Pflanzenkohle unter Berücksichtigung der Kosten und des soziökonomischen Nutzens.

Durchgeführte Arbeiten: Um KOKOSAN einem bereits etablierten Verfahren in der KNA und mKWA gegenüberzustellen, wurde auf Basis von Interviews, projektinternen Workshops sowie in Abstimmung mit dem Fördergeber ein Alternativverfahren für einen Variantenvergleich ausgesucht. Im Zuge dessen wurde auch ein Standort für die Durchführung der beiden Analysen gewählt.

Basierend auf den Ergebnissen aus T5.1 und T5.2 wurden in weiterer Folge Kostenstellen sowie Nutzenkategorien für die KNA erarbeitet. Dabei wurde ein spezieller Fokus sozioökonomische Standortparameter sowie KPIs gelegt. In projektinternen Meetings sowie in Gesprächen mit externen Expert*innen (z.B. UBA) wurden diese iterativ adaptiert und ergänzt. Für die Dateneingabe in die KNA wurden einerseits Werte aus den durchgeführten Laborversuchen in KOKOSAN II, Literaturangaben (im Speziellen das „Informationsblatt Altlastensanierung“ von der KPC²³) sowie Erkenntnisse aus Interviews herangezogen. Die dadurch generierte KNA wurde anschließend nochmals projektintern und -extern validiert, um eine finale Version zu erstellen.

Für die mKWA wurde das Leermodell der KPC²⁴ herangezogen. Dafür wurde das vorgegebene Zielsystem mit den Zielformulierungen und Zielkriterien übernommen. Zu einigen Zielformulierungen werden im Anhang Erläuterungen gegeben. Für die Durchführung der mKWA wurden Ergebnisse aus der KNA, projektinternen Laborversuchen, der Literatur sowie aus Interviews herangezogen. Zudem wurde, wie auch bei der KNA, ein mehrstufiger Prozess gewählt, bei dem verschiedene projektinterne sowie -externe Feedbackschleifen durchgeführt wurden.

²³https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user_upload/media/umweltfoerderung/Dokumente_Betriebe/Altlasten/Detaillinfo_Kostenkatalog_Altlastensanierung.pdf

²⁴<https://www.umweltfoerderung.at/betriebe/variantenuntersuchung.html>

Für einen Variantenvergleich wurde das bereits etablierte Verfahren „Aushub & Deponierung“ ausgesucht, da dieses Verfahren in Österreich das derzeit am häufigsten zur Anwendung kommende darstellt. Die fiktive Gegenüberstellung der Verfahren „KOKOSAN“ und „Aushub & Deponierung“ wurde für die Altlast 056,²⁵ den Tontaubenschießplatz Treffling, durchgeführt. Die Wahl zugunsten dieser Altlast beruht einerseits auf den dort vorzufindenden Schadstoffen, nämlich Blei und PAKs. Bezüglich der PAKs ist jedoch für diesen spezifischen Fall festzuhalten, dass laut Prioritätenklassifizierung durch das hohe Adsorptionsvermögen der Böden keine Gefährdung (Auswaschung, Aufnahme durch Pflanzen) zu erwarten ist. Andererseits wurde dieser Standort bereits in KOKOSAN I involviert.

Kosten-Nutzen-Analyse

Für die Erstellung der KNA wurden ergänzend zu den Standortparametern von AP2 und AP3 in einem projektinternen Workshop sozioökonomische sowie ökologische Standortparameter ausgewählt, welche im Folgenden angeführt sind:

- Kohlenstoffsinkenpotential
- Transportwege
- Deponierung von Aushubmaterial
- Steigerung mikrobielle Aktivität und biologischer Abbau im Boden
- Stabilisierung Nährstoffhaushalt im Boden und verbesserter Nährstoffrückhalt
- Beitrag zur Kreislaufwirtschaft
- Entfernung Kontaminant
- Wertsteigerung einer Fläche
- Pflanzenkohle regionalen Ursprungs
- Akzeptanz für Verfahren

Ein Überblick der Ergebnisse aus der durchgeführten KNA ist in Tabelle 8 dargestellt. Die ausführlichen Ergebnisse sind in Anhang 5 bis Anhang 8 nachzulesen.

²⁵ <https://www.altlasten.gv.at/atlas/verzeichnis/Oberoesterreich/Oberoesterreich-056.html>

Tabelle 8: Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse (Kurzversion)

				Jahr 1	Jahr 1-10	Jahr 1-50+
	CAPEX	Vorleistungen (<i>Erkundungsmaßnahmen, Beprobung & Analytik, Haufwerkanalyse, Variantenuntersuchung, Planung</i>)		288 800 €		
		Herstellungsmaßnahmen (<i>Baustelleneinrichtung</i>)		200 160 €		
		Durchführungsmaßnahmen (<i>Roden & Wurzelstöcke, Erwerb der PK, Einbringung PK</i>)		777 850 €		
		Wiederherstellungsmaßnahmen (<i>Rekultivierung</i>)		182 000 €		
		Nebenleistungen (<i>Örtliche Bauaufsicht, Örtliche Aufsicht Chemie, Unvorhergesehenes</i>)		108 950 €		
	OPEX	Monitoring			5 000 €	
		Unvorhergesehenes			100 €	
	Ökologisch	Nachhaltige Kohlenstoffsenke	3 607 tCO2eq			90 172 €
		Keine Transportwege für Deponierung Aushubmaterial & Material zur Wiederverfüllung	7 tCO2eq	179 €		
		Keine Deponierung von Aushubmaterial	17 850 t	367 710 €		
		Steigerung der mikrobiellen Aktivität und biologischer Abbau im Boden durch Revitalisierung der Mikroflora	91 000 m ²			17 618 €
		Stabilisierung des Nährstoffhaushaltes im Boden durch erhöhte Wasserhaltekapazität und verbesserten Nährstoffrückhalt				
		Beitrag zur Kreislaufwirtschaft durch Verwendung von organischen Ausgangsstoffen am Ende einer kaskadischen Nutzung (z.B. Holz)	2 457 t	290 769 €		
	Sozio-ökonomisch	Wertsteigerung einer Fläche	91 000 m ²	1 330 789 €		
		PK regionalen Ursprungs	1 229 t	614 250 €		

Aushub & Deponierung

				Jahr 1		
	CAPEX	Vorleistungen (<i>Erkundungsmaßnahmen, Beprobung & Analytik, Haufwerkanalyse, Variantenuntersuchung, Planung</i>)				438 800 €
		Herstellungsmaßnahmen (<i>Baustelleneinrichtung</i>)				670 794 €
		Durchführungsmaßnahmen (<i>Roden & Wurzelstöcke, Aushub & Verladen, Behandlung Aushub, Reststoffdeponie inkl. Transport</i>)				3 254 900 €
		Wiederherstellungsmaßnahmen (<i>Wiederverfüllen, Rekultivierung</i>)				324 800 €
		Nebenleistungen (<i>Örtliche Bauaufsicht, Örtliche Aufsicht Chemie, Unvorhergesehenes, Altlastenbeitrag</i>)				538 470 €
	Ökologisch	Kontaminant wird entfernt			91 000 m ²	17 618 €
	Sozio-ökonomisch	Wertsteigerung einer Fläche			91 000 m ²	1 330 789 €
		Akzeptanz für Verfahren gegeben			1 Aufklärungsarbeit	

Das Verfahren „Aushub & Deponierung“ weist deutlich mehr Kostenstellen auf, als „KOKOSAN“. Vor allem die zusätzlichen Kostenstellen Aushub & Verladen, Behandlung von Aushub, Reststoffdeponie inkl. Transport und Altlastenbeitrag tragen zu ungefähr zwei Drittel der Gesamtkosten bei. Für KOKOSAN fallen als zusätzliche Kostenstellen der Erwerb sowie die Einbringung von Pflanzenkohle an. Zudem sind bei diesem Verfahren auch laufende Kosten in Form von Monitoring Kosten mit zu berücksichtigen.

Aus der Perspektive des Nutzens zeigt sich auch ein klarer Vorteil von „KOKOSAN“ gegenüber „Aushub & Deponierung“. Insbesondere im Bereich des ökologischen Nutzens kann „KOKOSAN“ mit mehr positiven Eigenschaften punkten. Dazu zählen beispielsweise Einsparungen von Transportwegen, die Funktion von Pflanzenkohle als Kohlenstoffsenke, keine Deponierung des Aushubmaterials, eine Steigerung der mikrobiellen Aktivität sowie der Stabilisierung des Nährstoffhaushaltes im Boden oder auch ein möglicher Beitrag zur Kreislaufwirtschaft. Der einzige ökologische Vorteil der Methode „Aushub und Deponierung“ gegenüber „KOKOSAN“ wurde in der Entfernung der Kontamination gesehen.

Die Relation zwischen den Gesamtkosten und -nutzen der beiden Verfahren ist in **Tabelle 9** dargestellt. Aufgrund der geringen Kosten von „KOKOSAN“ sowie der Vielzahl an ökologischen Vorteilen, konnte für dieses Verfahren im Gegensatz zu „Aushub & Deponierung“ ein besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis errechnet werden.

Tabelle 9: Relation Gesamtnutzen und -kosten der Verfahren "KOKOSAN" und "Aushub & Deponierung".

Verfahren	CAPEX	OPEX	Nutzen	KN-Verhältnis
KOKOSAN	€ 1 557 760	€ 5 100	€ 2 711 487	0,58
Aushub & Deponierung	€ 5 227 764	€ 0	€ 1 348 407	3,88

Da sich am Standort Treffling ein Großteil der Kontamination in (teilweise stark) bewaldetem Gebiet befindet, wurde für das „KOKOSAN“-Verfahren auch eine Rodung miteinkalkuliert. Ohne der Kosten für Rodung würde das Kosten-Nutzen-Verhältnis mit 0,43 noch vorteilhafter ausfallen.

Modifizierte Kostenwirksamkeitsanalyse (mKWA)

Ein Überblick zu den Ergebnissen aus der durchgeführten mKWA ist in Abb. 20 zu sehen. Die detaillierten Ergebnisse sowie Erklärungen zu getroffenen Annahmen und Änderungen im mKWA Leermodell sind in **Anhang 9** angeführt.

Bezeichnung der Altlast: Altlast O56 Tontaubenschießplatz Treffling
Gesamtfläche der Altlast in m²: 91 000

Variante	Bezeichnung	Ges. Wirksamkeit W	Kosten K in 1.000 €	W/K
Variante 1	KOKOSAN	7 174	1 563	45,90
Variante 2	Aushub & Deponierung	7 492	5 228	14,33

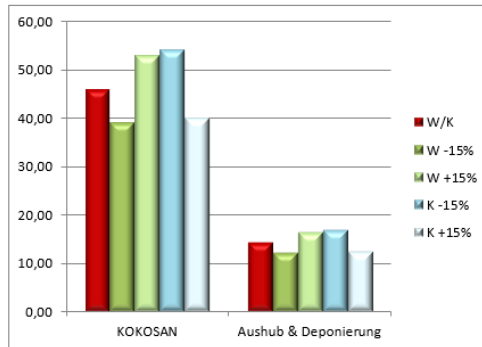


Abb. 20: Ergebnisse der modifizierten Kostenwirksamkeitsanalyse.

Die Resultate zeigen eine eindeutige Präferenz für „KOKOSAN“. Im Falle der mKWA ist dies, im Gegensatz zur KNA, nur auf die Kosten zurückzuführen. In Bezug auf die Wirksamkeit zeigt das Verfahren „Aushub & Deponierung“ geringfügig bessere Werte.

Im Folgenden werden die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren in den drei Oberzielen Ökologie, Flächenentwicklung und Projektstabilität näher ausgeführt.

Tabelle 10: Unterschiede zwischen "KOKOSAN" und "Aushub & Deponierung" in der mKWA.

	KOKOSAN	Aushub & Deponierung
ÖKOLOGIE		
<i>Primäre Umwelteffekte</i>		
• Effekt an der Quelle (Blei, PAK)	Schadstoffquelle zu 75% entfernt oder zur Gänze immobilisiert	Schadstoffquelle zur Gänze entfernt
• Effekte am Schutzgut (Boden)	Umweltzustand übertrifft das Sanierungsziel sehr deutlich	Umweltzustand entspricht anthropogen unbeeinflussten Verhältnissen
<i>Sekundäre Umwelteffekte</i>		
• Effekt auf weitere Schutzgüter (Grundwasser, Oberflächengewässer):	Umweltzustand ist signifikant verbessert	Umweltzustand entspricht dem lokalen Hintergrund
• Klimarelevanz		CO2 Emissionen durch Transport Aushubmaterial und Wiederverfüllung
• Abfall		17.850 t Aushub
• Ressourcen		17.850 t Bodenmaterial wird deponiert
• Verwertung	2.457 t Holz (am Ende einer kaskadischen Nutzung) für die Herstellung von Pflanzenkohle	
FLÄCHENENTWICKLUNG		
In diesem Bereich konnten für die beiden Verfahren keine Unterschiede festgestellt werden.		

PROJEKTSTABILITÄT		
<i>Dauer laufende Maßnahmen</i>		
	10 Jahre Monitoring	1 Jahr Projektphase
<i>Projektsicherheit</i>		
<ul style="list-style-type: none"> • Erfahrungsstand 	Für die gegebene Standortsituation liegen für Österreich noch keine Langzeiterfahrungen mit dem Verfahren in großmaßstäblicher Anwendung vor	Verfahren ist auf standortspezifischer Situation langjährig erprobt und bewährt
<ul style="list-style-type: none"> • Eintrittswahrscheinlichkeit von Störfällen 	Im Rahmen des Regelbetriebes (auch Bau) können Störfälle nicht ausgeschlossen werden	Die Wahrscheinlichkeit von Störfällen (Bau und Betrieb) ist sehr gering oder praktisch ausgeschlossen
<ul style="list-style-type: none"> • Auswirkungen von Störfällen 	Mögliche Störfälle können das Erreichen des Sanierungsziels beeinträchtigen und weitere Schutzgüter gefährden	Mögliche Störfälle sind einfach beherrschbar und beeinträchtigen weder das Sanierungsziel noch weitere Schutzgüter wesentlich

Die Ergebnisse der KNA sowie der mKWA zeigen zum jetzigen Zeitpunkt eine sozioökonomische sowie auch eine ökologische Vorteilhaftigkeit des KOKOSAN-Verfahrens. Dies ist vor allem auf den höheren ökologischen Nutzen sowie die geringeren Investitionskosten von KOKOSAN zurückzuführen. Daher kann festgehalten werden, dass eine Weiterentwicklung des KOKOSAN-Verfahrens aus sozioökonomischer sowie aus ökologischer Perspektive sinnvoll wäre. Auch die durchgeführten Interviews zeigten ein durchweg positives Interesse an dem Verfahren.

Für die zukünftige Weiterentwicklung kann auf Basis der Analyseergebnissen eine Strategie zur Implementierung des innovativen Sicherungsverfahrens KOKOSAN erstellt werden. Dabei sollten identifizierte Barrieren und Voraussetzungen mitberücksichtigt werden, um eine möglichst hohe Akzeptanz erzielen zu können. Diese Aspekte wurden bereits weitestgehend bei der Erstellung der Technischen Arbeitshilfe berücksichtigt. Zudem können die Ergebnisse von AP5 als erste Inputparameter für eine zukünftig geplante Ökobilanzierung des Verfahrens in einem möglichen Nachfolgeprojekt „KOKOSAN III“ herangezogen werden. Derzeit noch offene Fragen zum Verfahren, wie beispielsweise mögliche Einbringungsmethoden, wären ebenfalls in einem Folgeprojekt zu adressieren.

In KOKOSAN II werden relevante Stakeholder des Wertschöpfungsnetzwerks von Pflanzenkohlen sowie der Altlastensanierung/-sicherung identifiziert und mittels qualitativen problemzentrierten und Expert*inneninterviews eingebunden. Dabei wird deren Bereitschaft dieses neue Sanierungsverfahren einzusetzen erhoben, wahrgenommene Treiber und Barrieren identifiziert sowie Voraussetzungen für einen Einsatz von KOKOSAN analysiert. Die Erkenntnisse fließen in eine Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) sowie in eine modifizierte Kostenwirksamkeitsanalyse (mKWA) mit ein. In beiden dieser Analysen wird KOKOSAN einem etablierten Verfahren gegenübergestellt. In der KNA wird ein spezieller Fokus auf ökologische Kriterien gelegt.

Veröffentlichung und Verbreitung der Ergebnisse

Im Rahmen der Interviews wurde das KOKOSAN II Projekt sowie die jeweils aktuellen Forschungsergebnisse an die Interviewpartner kommuniziert. Ergebnisse des Projektes wurden der Fachöffentlichkeit auf folgenden Veranstaltungen präsentiert:

- **Recy & DepoTech**, Leoben, Österreich, November 2020 und 2022. Virtueller Vortrag „Pflanzenkohle für die in-situ Bodensanierung von Restkontaminationen“ durch Gabriel Sigmund 2020. Poster Vorstellung zur technische Arbeitshilfe ebenfalls durch Gabriel Sigmund 2022.
- **European Geosciences Union General Assembly (EGU 2021)**, Wien, Österreich, April 2021. Virtueller Vortrag „Importance of site-specific factors for the immobilization of contaminants using biochar and wood-based activated carbon“ durch Sampri Chaudhuri.
- **Jahrestagung der Wasserchemischen Gesellschaft (WASSER 2021)**, Deutschland, Mai 2021. Virtueller Vortrag „KI für die Sorptionsvorhersage von ionisierbaren organischen Schadstoffen an kohlige Sorbentien“ durch Gabriel Sigmund.
- **ÖVA Mittagstisch**, Wien, Österreich, Juni 2021. Virtueller Vortrag „Pflanzenkohle in der Altlastensanierung - Ist das sinnvoll?“ durch Thilo Hofmann und Stefanie Prenner. Zweiter Mittagstisch im Juni 2022 zur Vorstellung der technischen Arbeitshilfe im Virtuellen Vortrag „Forschung im Altlastensektor an der Universität Wien: Forschungsschwerpunkte und das Projekt KOKOSAN“ durch Gabriel Sigmund.

Ergebnisse aus KOKOSAN wurden auch in führenden Fachzeitschriften veröffentlicht:

Ein Beitrag zur Vorhersage von Sorption von polaren und ionisierbaren organischen Schadstoffen an kohlige Materialien wurde im Fachjournal „Environmental Science & Technology“ Open Access veröffentlicht: G Sigmund; M Gharasoo, T Hüffer, T Hofmann, "A deep learning neural network approach for predicting the sorption of ionizable and polar organic pollutants to a wide range of carbonaceous materials", <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06287>.

Ein Beitrag zum Einfluss von Umweltfaktoren auf die Immobilisierung von Quecksilber an Pflanzenkohle wurde im Fachjournal „Environmental Science & Technology“ Open Access veröffentlicht: Sampri Chaudhuri, Gabriel Sigmund, Sharon E. Bone, Naresh Kumar, Thilo Hofmann „Mercury removal from contaminated water by wood-based biochar depends on natural organic matter and ionic composition“, <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01554>.

Ein Beitrag zum Vergleich zwischen Pflanzenkohle und kommerzieller Aktivkohle für die Immobilisierung von PAK und NSO-PAK in realkontaminierten Böden wurde im Fachjournal „Environmental Pollution“ Open Access veröffentlicht: Carlotta Carlini, Sampri Chaudhuri, Oliver Mann, Daniel Tomsik, Thorsten Hüffer, Nicolas Greggio, Diego Marazza, Thilo Hofmann, Gabriel Sigmund „Benchmarking biochar with activated carbon for immobilizing leachable PAH and heterocyclic PAH in contaminated soils“, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121417>.

Die technische Arbeitshilfe für Anwender*innen in der Sanierungspraxis wird durch den Fördergeber veröffentlicht.

Anhang

Anhang 1: Navigation der in PHAIDRA hinterlegten Rohdaten

Die in KOKOSAN II Generierten Rohdaten sind unter <https://phaidra.univie.ac.at/detail/o:1604431> jederzeit zentral abrufbar. Hierbei muss rechts auf der Webseite der Download Button gewählt werden um die Entsprechende Microsoft Excel Datei im .xlsx Format herunterzuladen. Diese Excel Datei beinhaltet mehrere Reiter, welche im Folgenden kurz zur Orientierung beschreiben werden.

Reiter „Abbreviations used“: Im ersten Reiter sind sämtliche verwendende Abkürzungen zu finden, dies beinhaltet Abkürzungen für die verwendeten Kohlen, wie beispielsweise SWP700. Im Excel file ist hierzu zu finden:

SWP700 Biochar produced from soft wood pellets pyrolyzed at 700 °C, UK biochar Research Centre

Also eine Pflanzenkohle, welche aus Weichholz bei 700°C im UK biochar research Centre hergestellt wurde.

Reiter „2.1“: Hier sind alle Daten aus Task 2.1 zu finden, also alle Screening werte zur Sorption von Schadstoffen an die reinen Kohlen im Reinstwasser (links im Reiter), sowie die Charakterisierungsdaten für die einzelnen Kohlen (rechts oben im Reiter)

Reiter „2.2 part 1“: Hier sind alle Sorptionsdaten zu Einzelschadstoffen in Abhängigkeit von Umweltparametern (pH, DOC, Ionenstärke) gelistet, welche in Task 2.2. in einem Box-Behnken Design untersucht wurden.

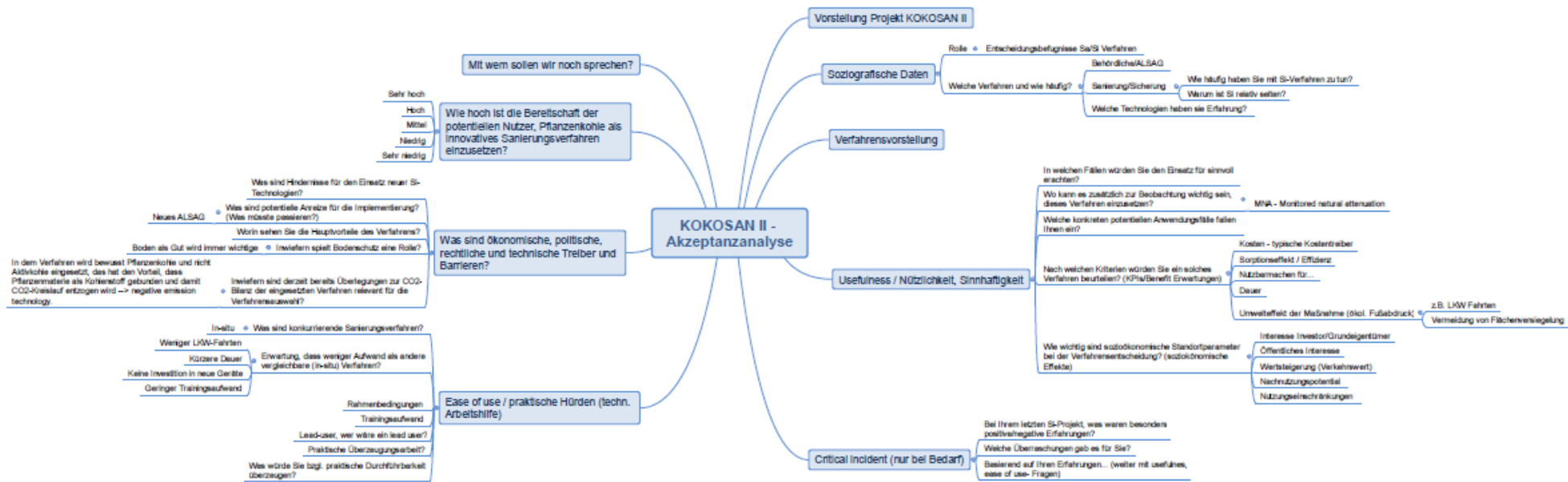
Reiter „2.2 part 2“: Hier sind alle Sorptionsdaten zu Schadstoffgemischen in Abhängigkeit zueinander dargestellt welche im Task 2.2 durchgeführt wurden um mögliche Konkurrenz für Sorptionsstellen zu untersuchen.

Reiter „3“: Hier sind die Sorptionsdaten zu den Untersuchungen unterschiedlicher Kohle-applikationsraten in Böden in AP3 dargestellt.

Reiter „4.2 part 1“: Hier sind alle Realproben-basierten Schüttelversuche welche in AP4 durchgeführt wurden dargestellt.

Reiter „4.2 part 2 percolation“: Hier sind alle Realproben-basierten Perkolationsversuche welche in AP4 durchgeführt wurden dargestellt.

Reiter 2.2 extra DoE Pb, Sb, As: Hier sind zusätzliche Untersuchungen zum Einfluss von Umweltfaktoren auf die Sorption von Pb, Sb und As gelistet



Anhang 2: Interviewleitfaden für Akzeptanzanalyse.

Anhang 3: Organisationen der interviewten Expert*innen.

Stakeholdergruppe	Organisation
Planung, Projektierung & Ausführung	Terra Umwelttechnik
Planung, Projektierung & Ausführung	Keller-Grundbau GmbH
Planung, Projektierung	G.U.T. Linz
Planung, Projektierung	BALSA
Behördenvertreter / Landessachverständige	Land Niederösterreich
Behördenvertreter / Landessachverständige	Land Kärnten
Behördenvertreter / Landessachverständige	Land Steiermark
Sonstige Behörden	AGES, Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz
Sonstige Behörden	Umweltbundesamt
Fachverbände / Vereine	FV Pflanzenkohle
Fachverbände / Vereine; Forschung	FV Pflanzenkohle; ithaka institute
Forschung	IFA Tulln
Consulting	ESW Consulting Wruss

Anhang 4: Identifizierte Voraussetzungen für einen Einsatz von KOKOSAN und anderen innovativen Sicherungsverfahren.

Genannte Voraussetzungen	Anmerkungen Interviewpartner	Stellungnahme KOKOSAN Projektteam	Relevante Publikationen
Notwendigkeit einer genauen Beschreibung des Verfahrens	Standortspezifische Einflussfaktoren	<i>Die Sorptionskapazität und daher auch die Immobilisierung sind in Abhängigkeit von spezifischen Standortfaktoren in der technischen Arbeitshilfe dargestellt. Informationen zu Langzeitstabilität und Pflanzenverfügbarkeit (nicht Gegenstand des Projektes) wurden aus einer Literaturswertung herangezogen und im Bericht erwähnt.</i>	
	Wirkungsweise (Langzeitstabilität der PK, Immobilisierung der Schadstoffe, Reduktion der Pflanzenverfügbarkeit)	<i>Technische Details der PK sind in der technischen Arbeitshilfe angeführt. Dafür wurden Qualitätskriterien aus dem EBC herangezogen sowie sorptionspezifische Parameter (z.B. spez. Oberfläche).</i>	
	Technische Details der PK	<i>In der technischen Arbeitshilfe sind die Einbringungsmöglichkeiten dargestellt. Die Kohle kann (a) oberflächlich durch adaptierte Pflug- und Durchmischungsverfahren aus der Landwirtschaft in den kontaminierten Boden eingemischt, oder (b) der Boden on-site behandelt werden. Kontaminationen in tieferen Bodenschichten lassen sich (c) durch „Deep Soil Mixing“ mit Hilfe von sich überschneidenden Bohrungen im Boden oder (d) dem Einsatz von Strahldüsen aus der Tiefbaupraxis behandeln. Die beiden letzten Einbringmöglichkeiten sind mit einem erhöhten Kostenaufwand verbunden.</i>	
	Einbringungsmöglichkeiten in den Boden	<i>Schätzungen zu erwartenden Kosten können aus der KNA entnommen werden.</i>	
	Zu erwartende Kosten		
Sicherstellung der Immobilisierung (=Sorptionskapazität der PK)	Durch andere Aktivitäten am Standort darf die Immobilisierung nicht wieder nachlassen – bspw. durch intensive landwirtschaftliche Nutzung.	<i>Laboruntersuchungen aus KOKOSAN I belegen die hohe Sorptionskapazität und Affinität von PK für eine Vielzahl von Schadstoffen. Die an PK gebundenen Schadstoffe werden durch die Eigenschaften der PK immobilisiert und sind zum Großteil nicht mehr bioverfügbar oder mobil.</i>	*Alfonso et al., 2017 - "Strategies for rehabilitating mercury-contaminated mining lands for renewable energy and other self-sustaining re-use strategies". *Shen et al., 2016 - "Long-term impact of biochar on the immobilisation of nickel (II) and zinc (II) and the revegetation of a contaminated site". *Sun et al., 2014 - "Biochars derived from various crop straws: Characterization and Cd(II) removal potential". *Zimmerman et al., 2004 - "Addition of carbon sorbents to reduce PCB and PAH bioavailability in marine sediments: physicochemical tests". *etc.
Nachweis der Langzeitperformance (Stabilität, Immobilisierung)	Was passiert in x Jahren?	<i>Langzeitperformance ist abhängig von der PK, Bodenbeschaffenheit, Bodenprozesse, Einbringungsart sowie Art der Schadstoffe. Üblicherweise ist PK über 100 Jahre stabil, Publikationen dazu sind vorhanden (nicht Gegenstand von KOKOSAN II). Es gibt einen labilen Pool, der ca. 10-20% ausmacht und in den ersten paar Jahren abgebaut werden kann. Generell bedarf es einem Monitoring.</i>	*Cross and Sohi, 2013 - "A method for screening the relative long-term stability of biochar". *Wang et al., 2016 - "Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects". *Lehmann et al., 2009 - "Stability of Biochar in Soil". *Wang et al., 2021 - "Analysis of the long-term effectiveness of biochar immobilization remediation on heavy metal contaminated soil and the potential environmental factors weakening the remediation effect: A review"
Nachweis der Reduktion der Pflanzenverfügbarkeit		<i>Publikationen zur Verringerung der Pflanzenverfügbarkeit sind vorhanden (nicht Gegenstand von KOKOSAN II).</i>	*De Chen et al, 2018 - "Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals – A meta-analysis".

			*Puga et al, 2015 - "Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium". *etc.
Einhaltung der Grenzwerte	z.B. ÖNORM S2088-1, ALSAG	<i>Gesamtgehalte vs. Eluatwerte: durch die derzeitigen Rahmenbedingungen, welche das Heranziehen von Gesamtgehalten vorschreiben, werden innovative Verfahren wie KOKOSAN gebremst.</i>	
ALSAG neu und weitere rechtliche Anpassungen (z.B. UFG, FörderungsRL)	Restkontaminationen zulassen, wenn sich diese nicht weiter ausbreiten und keine erhebliche Gefahr davon ausgeht.		
Risikotabelle	Für Parameter wie beispielsweise eine mögliche Remobilisierung im Vorhinein in Abhängigkeit des Nachnutzungszwecks, Wechselwirkung mit Pflanzen, etc.	<i>Die von den Stakeholdern genannten Risiken werden alle adressiert. Laut Expertenschätzung ist eine ausdifferenzierte Risikotabelle aber für KOKOSAN nicht rentabel (Aufwand im Vergleich zu dem erwarteten Nutzen zu hoch).</i>	
Risikokommunikation mit Fokus auf die Nachnutzer	Skepsis gegenüber neuen Verfahren in Österreich oft vorhanden. Es muss plausibel vermittelt werden, dass eine positive Wirkung erzielt werden kann.	<i>Praxiserprobte Erfahrungen sind wichtige Voraussetzung für Akzeptanz. Ergebnisse aus KOKOSAN II und eventuell aus KOKOSAN III können zur Risikokommunikation herangezogen werden.</i>	
Planbare, steuerbare und sichere Technologie		<i>Methodik, Herstellung und Probleme von PK bekannt. Es ist eine gut planbare und steuerbare Technologie. Die Einbringung muss noch genauer untersucht werden (eventuell in einem Folgeprojekt - KOKOSAN III).</i>	
Angemessenes Verhältnis von Kosten und Nutzen	Anwender wollen rasche technische Lösungen und einen wirtschaftlichen Erfolg.	<i>Schätzungen zu erwartenden Kosten können aus der KNA entnommen werden.</i>	
Kostensicherheit		<i>Schätzungen zu erwartenden Kosten können aus der KNA entnommen werden.</i>	
Förderinstrumente, die Technologieforschung fördern		<i>Förderungen bspw. über KPC zu gewissen Problemstellungen möglich.</i>	
Interesse & Bereitschaft aller Beteiligten an der Umsetzung von Innovation	z.B. Innovative Sanierungsunternehmen, die neben etablierten Pfaden auch neue Wege gehen wollen. Innovative Amtssachverständige, die der Umsetzung innovativer Verfahren zustimmen. Wissenschaftler*innen, die eine wissenschaftliche Begleitung von Variantenstudien und Sanierungen durchführen und an der technischen Umsetzung ihrer Erkenntnisse mitarbeiten. etc.		
„Bindeglied“ zwischen Forschung und Sanierungsanwendung	z.B. Planungsbüros, die die Lücke zwischen wissenschaftlichen Ergebnissen und praktischer Anwendung schließen wollen	Eventuell Förderungen als Anreiz andenken.	
Farbcodierung: Allgemeingültig für innovative Sicherungsverfahren.			

Anhang 5: Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse - Kosten für KOKOSAN.

CAPEX KOKOSAN						
Investitionskosten (Jahr n=1)	Annahmen / Berechnungsgrundlage	Anzahl	Einheit	spez. Kosten	Gesamtkosten	Referenz
<i>Vorleistungen</i>						
Erkundungsmaßnahmen stark kontaminierte Fläche		13	Tage	750 €	9 750 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	10x10m Raster	250	Schürfe			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Tiefenprofil	0-10	cm			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
		10-20	cm			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
		20-30	cm			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Schürfe pro Tag (Handschaufel und/oder Handbohrer aufgrund der geringen Tiefe)	20				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Anzahl der Tage	13				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Beprobung und Analytik stark kontaminierte Fläche (Pb, Sb, As, PAK im Gesamtgehalt und Eluat)					85 800 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Analyseproben der Schürfe	750		100 €		Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Erstellung Qualitätsplan	1		3 000 €		Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Vollanalysen (1 á 1500 t Aushub)	8		600 €		Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Beurteilungsnachweise	2		1 500 €		Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Erkundungsmaßnahmen weniger kontaminierte Fläche		8	Tage	750 €	6 000 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	20x20m Raster	165	Schürfe			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Tiefenprofil	0-10	cm			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Schürfe pro Tag (Handschaufel und/oder Handbohrer aufgrund der geringen Tiefe)	20				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Anzahl der Tage	8				Expertenschätzung KOKOSAN-Team

Haufwerkanalyse kontaminierte Fläche	weniger		3	Tage	750 €	2 250 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
		<i>Haufwerke á 1000 t</i>	10				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
		<i>Analysen je Haufwerk auf die einstufrungsrelevanten Parameter</i>	5				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
		<i>Mischprobe je Haufwerk auf Vollanalyse</i>	1				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
		<i>Dauer Haufwerkbeobachtung</i>	0,25	Tage			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
		<i>Anzahl der Tage</i>	3				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Variantenuntersuchung			1	PA	35 000 €	35 000 €	Informationsblatt Altlastensanierung (KPC, 2020)
Planung			1	PA	150 000 €	150 000 €	KPC, 2020 (Informationsblatt Altlastensanierung); Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Herstellungsmaßnahmen							
Baustelleneinrichtung			1	PA		200 160 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
		<i>15% der gesamten Auftragssumme</i>					Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Durchführungsmaßnahmen							
Roden, Wurzelstöcke						155 000 €	Informationsblatt Altlastensanierung (KPC, 2020)
Erwerb der Pflanzenkohle			1 229	t	500 €	614 250 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team; Altlastenatlas; KOKOSAN II Antrag; Prioritätenklassifizierung (UBA, 2007)
		<i>Applikationsrate</i>	3	%			Expertenschätzung KOKOSAN-Team (basierend auf Untersuchungen KOKOSAN II)
		<i>Altlastenfläche</i>	91 000	m ²			Altlastenatlas
		<i>Altlastenvolumen O56</i>	2 500	m ³			Altlastenatlas
		<i>Umrechnungsfaktor - 1m³ Boden =</i>	1,5				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
		<i>Kosten</i>	500	€/t			KOKOSAN II Antrag
		<i>Einbringungstiefe</i>	0,3	m			Prioritätenklassifizierung (UBA, 2007)
		<i>Altlastenmenge</i>	40 950	t			Berechnung

Einbringung der Pflanzenkohle		1 229	t	7 €	8 600 €	KOKOSAN II Antrag
	<i>Einfache Einmischung</i>					
Wiederherstellungsmaßnahmen						
Rekultivierung				2 €	182 000 €	KPC, 2020 (Informationsblatt Altlastensanierung)
	<i>Altlastenfläche</i>	<i>91 000</i>	<i>m²</i>			Altlastenatlas
Nebenleistungen						
Ablösen, Entschädigung und Abgeltungen					0 €	Nicht abschätzbar
Örtliche Bauaufsicht		1	PA	70 000 €	70 000 €	KPC, 2020 (Informationsblatt Altlastensanierung)
Örtliche Aufsicht Chemie				750 €	15 750 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	<i>Dauer</i>	<i>21</i>	<i>Tage</i>			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Unvorhergesehenes				2%	23 200 €	KPC, 2020 (Informationsblatt Altlastensanierung)
Summe					1 557 760 €	
OPEX KOKOSAN						
Beweissicherung	Zeitraum Jahre n		Einheit	spez. Kosten	Gesamtkosten	Referenz
Monitoring	10				5 000 €	Expertenschätzung UBA
	<i>Test der dauerhaften Immobilisierung nach 10 Jahren</i>	<i>5 000</i>	<i>€</i>			
Unvorhergesehenes				2%	100 €	KPC, 2020 (Informationsblatt Altlastensanierung)
Summe					5 100 €	
Irrelevante Kostenstellen für KOKOSAN am Standort Treffling						
Investitionskosten						
Vorleistungen						
Beprobung und Analytik	Nur für A&D, damit beurteilt werden kann, auf welche Deponie das Material gelagert werden muss.					
Herstellungsmaßnahmen						
Brunnen, Pumpen	Bei Sicherung mit PK nicht notwendig; Kein Grundwasser im Sicherungsbereich.					

Spundwand	Bei Sicherung mit PK nicht notwendig; Einmischungstiefe nur 30cm.
Grundwasserhaltung	Bei Sicherung mit PK nicht notwendig; das Grundwasser liegt tiefer als 30cm.
Durchführungsmaßnahmen	
Aushub und Verladen	Bei Sicherung mit PK nicht notwendig.
Behandlung Deponie inkl. Transport	Bei Sicherung mit PK nicht notwendig.
Behandlung nicht deponierbarer Anteil inkl. Transport	Bei Sicherung mit PK nicht notwendig.
Wiederverfüllen	Bei Sicherung mit PK nicht notwendig.
Altlastenbeitrag Reststoffdeponie	Bei Sicherung mit PK nicht notwendig.

Anhang 6: Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse - Kosten für Aushub & Deponierung.

CAPEX AUSHUB & DEPONIERUNG						
Investitionskosten (Jahr n=1)	Annahmen / Berechnungsgrundlage	Anzahl	Einheit	spez. Kosten	Gesamtkosten	Referenz
Vorleistungen						
Erkundungsmaßnahmen stark kontaminierte Fläche		13	Tage	750 €	9 750 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	10x10m Raster	250	Schürfe			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Tiefenprofil	0-10	cm			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
		10-20	cm			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
		20-30	cm			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Schürfe pro Tag (Handschaufel und/oder Handbohrer aufgrund der geringen Tiefe)	20				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Anzahl der Tage	13				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Beprobung und Analytik stark kontaminierte Fläche (Pb, Sb, As, PAK im Gesamtgehalt und Eluat)					85 800 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team

	Analyseproben der Schürfe	750		100 €		Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Erstellung Qualitätsplan	1		3 000 €		Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Vollanalysen (1 á 1500 t Aushub)	8		600 €		Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Beurteilungsnachweise	2		1 500 €		Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Erkundungsmaßnahmen weniger kontaminierte Fläche		8	Tage	750 €	6 000 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	20x20m Raster	165	Schürfe			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Tiefenprofil	0-10	cm			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Schürfe pro Tag (Handschaufel und/oder Handbohrer aufgrund der geringen Tiefe)	20				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Anzahl der Tage	8				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Haufwerkanalyse weniger kontaminierte Fläche		3	Tage	750 €	2 250 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Haufwerke á 1000 t	10				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Analysen je Haufwerk auf die einstufigsrelevanten Parameter	5				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Mischprobe je Haufwerk auf Vollanalyse	1				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Dauer Haufwerkbeprobung	0,25	Tage			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	Anzahl der Tage	3				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Variantenuntersuchung		1	PA	35 000 €	35 000 €	Informationsblatt Altlastensanierung (KPC, 2020)
Planung		1	PA	300 000 €	300 000 €	Informationsblatt Altlastensanierung (KPC, 2020); Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Herstellungsmaßnahmen						
Baustelleneinrichtung					670 794 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	15% der gesamten Auftragssumme					Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Durchführungsmaßnahmen						

Roden, Wurzelstöcke		1	PA	155 000 €	155 000 €	Informationsblatt Altlastensanierung (KPC, 2020)
Aushub und Verladen		17 850	t	4 €	71 400 €	Altlastenatlas; Prioritätenklassifizierung (UBA, 2007); Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	<i>Altlastenfläche</i>	<i>91 000</i>	<i>m²</i>			Altlastenatlas
	<i>Fläche stark kontaminierter Bereich</i>	<i>25 000</i>	<i>m²</i>			Prioritätenklassifizierung (UBA, 2007)
	<i>Aushubtiefe stark kontaminierter Bereich</i>	<i>0,3</i>	<i>m</i>			Prioritätenklassifizierung (UBA, 2007)
	<i>Aushubvolumen stark kontaminierter Bereich</i>	<i>7 500</i>	<i>m³</i>			Berechnung
	<i>Fläche weniger kontaminierter Bereich</i>	<i>66 000</i>	<i>m²</i>			Prioritätenklassifizierung (UBA, 2007)
	<i>Aushubtiefe weniger kontaminierter Bereich</i>	<i>0,1</i>	<i>m</i>			Prioritätenklassifizierung (UBA, 2007)
	<i>1/3 des weniger kontaminierten Volumens können vor Ort bleiben</i>	<i>2 200</i>	<i>m³</i>			Expertenschätzung KOKOSAN-Team in Anlehnung an Prioritätenklassifizierung (UBA, 2007) d 8
	<i>Aushubvolumen weniger kontaminierter Bereich</i>	<i>4 400</i>	<i>m³</i>			Berechnung
	<i>Umrechnungsfaktor - 1m³ Boden =</i>	<i>1,5</i>				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Behandlung gefährlicher Abfall stark kontaminierter Bereich (nicht deponierbar)		3 750	t		762 000 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	<i>Gefährlicher Abfall Bodenschicht 0-10 cm in stark kontaminiertem Bereich</i>	<i>3 750</i>	<i>t</i>			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	<i>Erstellung Rezeptur für Stabilisierung</i>	<i>12 000</i>	<i>€</i>			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	<i>Stabilisierungskosten pro t</i>	<i>200</i>	<i>€</i>			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Behandlung Aushub stark kontaminierter Bereich (nicht deponierbar)		3 750	t	150 €	562 500 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	<i>Aushub Bodenschicht 10-20cm in stark kontaminiertem Bereich</i>	<i>3 750</i>	<i>t</i>			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	<i>Stabilisierungskosten pro t</i>	<i>150</i>	<i>€</i>			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Behandlung Aushub wenig kontaminierter Bereich (nicht deponierbar)		6 600	t	150 €	990 000 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team

	<i>2/3 des wenig kontaminierten Bereichs müssen vorbehandelt werden</i>	6 600	t			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	<i>Stabilisierungskosten pro t</i>	150	€			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Reststoffdeponie inkl. Transport (Aushubmaterial nach Behandlung und direkt deponierbarer Anteil)		17 850	t	40 €	714 000 €	Informationsblatt Altlastensanierung (KPC, 2020); Expertenschätzung KOKOSAN-Team; Prioritätenklassifizierung (UBA, 2007)
	<i>Direkt deponiefähiges Material aus stark kontaminiertem Bereich (20-30 cm) aufgrund der Analyse des Tiefenprofils</i>	3 750	t			Expertenschätzung KOKOSAN-Team in Anlehnung an Prioritätenklassifizierung (UBA, 2007)
	<i>Deponiefähiges Material nach Behandlung</i>	14 100				Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	<i>Eluatgehalt Blei (0-10 cm)</i>	max. 27	mg/kg TM			Prioritätenklassifizierung (UBA, 2007)
	<i>Grenzwerte für Blei Gehalte im Eluat für die Annahme von Abfällen auf Reststoffdeponien</i>	10	mg/kg TM			DVO 2008, Anhang 1
Wiederherstellungsmaßnahmen						
Wiederverfüllen				8 €	142 800 €	Informationsblatt Altlastensanierung (KPC, 2020); Altlastenatlas
	<i>Ersatz der ausgehobenen Altlastmenge</i>	17 850	t			Altlastenatlas
Rekultivierung				2 €	182 000 €	Informationsblatt Altlastensanierung (KPC, 2020); Altlastenatlas
	<i>Altlastenfläche</i>	91 000	m ²			Altlastenatlas
Nebenleistungen						
Ablösen, Entschädigung und Abgeltungen					0 €	Nicht abschätzbar
Örtliche Bauaufsicht		1	PA	70 000 €	70 000 €	Informationsblatt Altlastensanierung (KPC, 2020)
Örtliche Aufsicht Chemie				750 €	15 750 €	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
	<i>Dauer</i>	21	Tage			Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Unvorhergesehenes				2%	85 010 €	Informationsblatt Altlastensanierung (KPC, 2020)
Altlastenbeitrag Reststoffdeponie		17 850	t	20,6 €	367 710 €	ALSAG-Betrag gem. §6

Summe					5 227 764 €	
Irrelevante Kostenstellen für Aushub & Deponierung am Standort Treffling						
Investitionskosten						
<i>Vorleistungen</i>						
Bohrungen	Bohrungen wurden im Rahmen der Vorerkundung bereits durchgeführt. Da die Sanierung nur bis 30cm (Kontamination liegt nur oberflächlich vor) angedacht ist, sind keine Großlochbohrungen notwendig.					
<i>Herstellungsmaßnahmen</i>						
Brunnen, Pumpen	Kein Grundwasser im Sanierungsbereich.					
Spundwand	Aushubtiefe nur 30cm, Spundwand erst bei größeren Aushubtiefen notwendig (>1m).					
Grundwasserhaltung	Das Grundwasser liegt tiefer als 30 cm.					
<i>Durchführungsmaßnahmen</i>						
Siebung	Technischer Aufwand zu groß, um Siebung auf <2mm durchzuführen. Für die Charakterisierung gemäß DVO werden die Proben ungesiebt in einem 1:10 Eluat analysiert.					
Laufende Betriebskosten und Beweissicherung.						
Keine laufenden Kosten nach Durchführung der Sanierungsmaßnahmen						

Anhang 7: Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse - Nutzen für KOKOSAN.

NUTZEN KOKOSAN							
Nutzen	Berechnungsgrundlage	Annahmen	Anzahl	Einheit	spez. Kosten	Gesamtkosten	Referenz [Abgerufen am 10.11.2021]
Ökologisch ("green remediation")							
Nachhaltige Kohlenstoffsenke	Verhinderte CO ₂ Emissionen		3 607	tCO ₂ eq	€ 25	€ 90 172	BPB, 2020
		<i>xt Pflanzkohle * x% C-Anteil x 3,67 = t CO</i>					Sonnenerde, s.a.
	Verhinderte CO ₂ Emissionen		7,2	tCO ₂ eq	€ 25	€ 179	BPB, 2020
							Expertenschätzung KOKOSAN-Team

Keine Transportwege für Deponierung Aushubmaterial & Material zur Wiederverfüllung							Google Maps
							Toll Collect, 2017
							Verkehrsrundschau, 2011
	Aushub	Distanz zur nächsten Reststoffdeponie (Asten)	22	km			Google Maps
		Altlast	17 850	t			Kostenrechnung
		LKW-Ladungen	661				Berechnung
		Summe der benötigten Fahrzeugkilometer	14 542	km			Berechnung
		CO ₂ Ausstoß durch Transport Aushub	15	tCO ₂ eq			Berechnung
		Kraftstoffverbrauch	4 799	l			Berechnung
	Wiederverfüllung	Distanz zum nächsten Erdbauunternehmen (Herbert Grabner)	9	km			Google Maps
		Ersatz der ausgehobenen Altlastmenge	17 850	t			
		LKW-Ladungen	661				
		Summe der benötigten Fahrzeugkilometer	5 949	km			
		CO ₂ Ausstoß durch Transport Aushub	6	tCO ₂ eq			
		Kraftstoffverbrauch	1 963	l			
	Pflanzkohle	Distanz zu Sonnenerde	300	km			Google Maps
		Pflanzkohle	1229	t			Kostenrechnung
LKW-Ladungen (LKW wird bei Rückfahrt für Transport von anderen Gütern verwendet)		46				Expertenschätzung KOKOSAN-Team	

		Summe der benötigten Fahrzeugkilometer	13 650	km			Berechnung	
		CO ₂ Ausstoß durch Transport PK	14	tCO ₂ eq			Berechnung	
		Kraftstoffverbrauch	4 505	l			Berechnung	
	Kennzahlen LKW	Kraftstoffverbrauch LKW (Diesel)	0,33	l/km			Toll Collect, 2017	
		CO ₂ eq pro Verbrennung von einem Liter Diesel (unter Berücksichtigung des Herstellungsprozesses)	3,17	kg			Verkehrsrundschau, 2011	
		LKW-Transportlast	27	t			Expertenschätzung KOKOSAN-Team	
Keine Deponierung von Aushubmaterial	Einsparung Deponievolumen		17 850	t	€ 21	€ 367 710	Informationsblatt Altlastensanierung (KPC, 2020)	
Steigerung der mikrobiellen Aktivität und biologischer Abbau im Boden durch Revitalisierung der Mikroflora	Verbesserung des Bodens		91 000	m ²	€ 0,19	€ 17 618	UBA, 2012	
Stabilisierung des Nährstoffhaushaltes im Boden durch erhöhte Wasserhaltekapazität und verbesserten Nährstoffrückhalt		Zahlungsbereitschaft für renaturierte Auenlandschaft pro ha	1 936	€			UBA, 2012	
		Zahlungsbereitschaft für renaturierte Auenlandschaft pro m ²	0,19	€			UBA, 2012	
Beitrag zur Kreislaufwirtschaft durch Verwendung von organischen Ausgangsstoffen am Ende einer kaskadischen Nutzung (z.B. Holz)	Einsparung von Primärressourcen		2 457	t	€ 118	€ 290 769	Landwirtschaftskammer Österreich, 2021	
							Energieberatung Hessefort, s.a.	
								Holzenergiezentrum, s.a.
		Kosten für 1 fm Fi/Ta, A, B, C, 1a, FMO OÖ	60	€				Landwirtschaftskammer Österreich, 2021
		Masse 1fm Fichte	0,51	t			Energieberatung Hessefort, s.a.	

		<i>Kosten für 1 t Fi/Ta, A, B, C, 1a, FMO OÖ</i>	118	€			
		<i>Umrechnungsfaktor: 1 kg Steinkohle = 2 kg Scheitholz</i>	2				Holzenergiezentrum, s.a.
		<i>Benötigte Primärressourcen für Herstellung von PK für O56</i>	2 457	t			
Sozio-ökonomisch							
Wertsteigerung einer Fläche	Verkaufswert der Fläche		91 000	m ²	€ 14,62	€ 1 330 789	Verkaufsinsurat, 2016; Altlastenportal
		<i>O56 Altlast Wert pro m2</i>	0,38	€			Verkaufsinsurat, 2016
		<i>Katzbach, 1444, 1445/1: Widmung als LW&FW Fläche; Wert pro m2</i>	15	€			OÖ Nachrichten, 2015
		<i>Altlastenfläche O56</i>	91 000	m ²			Altlastenportal
Pflanzkohle regionalen Ursprungs	Förderung der inländischen Wirtschaft		1 229	t	€ 500	€ 614 250	KOKOSAN II Antrag
		<i>Pflanzkohle wird von dem österr. Unternehmen Sonnenerde bezogen</i>	1 229	t			
Summe						€ 2 711 487	

Anhang 8: Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse - Nutzen für Aushub & Deponierung.

NUTZEN AUSHUB & DEPONIERUNG							
Nutzen	Berechnungsgrundlage	Annahmen	Anzahl	Einheit	spez. Kosten	Gesamtkosten	Referenz [Abgerufen am 10.11.2021]
Ökologisch							
Kontaminant wird entfernt	Verbesserung des Bodens		91 000	m ²	€ 0,19	€ 17 618	UBA, 2012
		Zahlungsbereitschaft für renaturierte Auenlandschaft pro ha	1 936	€			
		Zahlungsbereitschaft für renaturierte Auenlandschaft pro m ²	0,1936	Euro			UBA, 2012
Sozio-ökonomisch							
Wertsteigerung einer Fläche	Verkaufswert der Fläche		91 000	m ²	€ 14,62	€ 1 330 789	Verkaufsinserat, 2016; Altlastenportal
		O56 Altlast Wert pro m2	0,38	€			OÖ Nachrichten, 2015
		Katzbach, 1444, 1445/1: Widmung als LW&FW Fläche; Wert pro m2	15	€			Verkaufsinserat, 2016
		Altlastenfläche O56	91 000	m ²			OÖ Nachrichten, 2015
Akzeptanz für Verfahren gegeben	Einsparung von Kosten für Aufklärungsarbeit zur Steigerung der Akzeptanz		1	Arbeit		€ 30 000	Expertenschätzung KOKOSAN-Team
Summe						€ 1 348 407	

Anhang 9: Ergebnisse der modifizierten Kostenwirksamkeitsanalyse.

Altlast O56: Tontaubenschießplatz Treffling

Nr.	Gewicht	Teilziel 2	Effekt, Maßnahme	Referenz	Einheit Ref.	Check	Variante 1			Variante 2		
							KOKOSAN			Aushub & Deponierung		
							Teilgewicht	ungewichteter WW	gewichteter WW	Teilgewicht	ungewichteter WW	gewichteter WW
1.1.1	20	Effekte an der Quelle	Effekt auf Blei durch KOKOSAN Effekt auf PAK durch KOKOSAN			■	10	75	750	10	100	1 000
							10	75	750	10	100	1 000
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
1.1.2	15	Effekte am Schutzgut	Effekt auf den Boden durch KOKOSAN			■	15	66	990	15	100	1 500
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
1.1.3	5	Eintrittsdauer Effekt	Eintritt Wirksamkeit des Sicherungsverfahrens			■	5	100	500	5	100	500
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0

1.2.1	4	weitere Schutzgüter	Effekt auf das Grundwasser durch KOKOSAN				2	66	132	2	100	200
			Effekt auf das Oberflächengewässer durch KOKOSAN				2	66	132	2	100	200
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
							0	0	0	0	0	0
1.2.2	4	Klimarelevanz	Transport und Betrieb, CO2 in Tonnen	21	t CO2		2	100	200	2	0	0
			Sonstige, CO2-äquiv. in Tonnen	0	t CO2-äquiv.		2	0	0	2	0	0
1.2.3	4	Energie	Verbrauchte Energie in kWh	67620	kWh		4	100	400	4	0	0
1.2.4	4	Abfall - Entstehung	Menge in t/a	17850	t		2	100	200	2	0	0
			Abfall - Verwertung	Holz am Ende einer kaskadischen Nutzung für Herstellung von PK	2457	t		2	100	200	2	0
1.2.5	2	Ressourcen	Primärressourcen	17850	t		2	100	200	2,00	0	0
				0			0,00	0	0	0,00	0	0
				0			0,00	0	0	0,00	0	0
				0			0,00	0	0	0,00	0	0
				0			0,00	0	0	0,00	0	0
1.2.6	2	Lokales Ökosystem	Auswirkung auf Flora/Fauna				1	100	100	1	100	100
			Umweltzust. bez. auf nicht altlastenrel. Schadstoffe				1	100	100	1	100	100
2.1.1	7	öffentliches Interesse					7	50	350	7	50	350
2.1.2	3	Interesse der Investoren bzw. Grundeigentümer					3	50	150	3	50	150

2.2	5	Wertsteigerung				5	67	333	5	67	333
2.3.1	2	Flächenausmaß mit Nachnutzungspotenzial	Sanierte Flächen	91000	m²	2	100	200	2	100	200
2.3.2	3	tatsächliches Reduktionspotenzial Flächenverbrauch	konkret nutzbar			3	0	0	3	0	0
3.1.1	3	Belastung Anrainer	Bauphase			1	50	50	1	50	50
			Betriebsphase			2	100	200	2	100	200
3.1.2	3	Nutzungseinschränkungen	Bauphase			1	67	67	1	67	67
			Betriebsphase			2	100	200	2	100	200
3.2	4	Dauer laufender Maßnahmen				4	80	320	4	98	392
3.3.1	2	Erfahrungsstand	0			2	0	0	2	100	200
3.3.2	2	Störfälle	Minimierung Eintrittswahrscheinlichkeit			1	50	50	1	100	100
			Minimierung Auswirkungen			1	50	50	1	100	100
			Alternative Beurteilung			2	0	0	2	0	0
3.3.3	2	Arbeitnehmerschutz	Belastung AN			1	50	50	1	50	50
			Gefährdung AN			1	100	100	1	100	100
			Alternative Beurteilung			2	0	0	2	0	0
3.3.4	2	Technische Stabilität und Flexibilität	Beurteilungsvariante 1			2	100	200	2	100	200
			Beurteilungsvariante 2			2	0	0	2	0	0
3.3.5	2	Rechtlich-ökonomische Stabilität und Flexibilität	Beurteilungsvariante 1			2	100	200	2	100	200
			Beurteilungsvariante 2			2	0	0	2	0	0
	100					100	Gew. Gesamtw. W:	7 174	100	Gew. Gesamtw. W:	7 492
							Gesamtkosten K:	€ 1 563 000		Gesamtkosten K:	€ 5 228 000
							W/K =	45,90		W/K =	14,33

Änderungen im sowie Erklärungen zum mKWA Leermodell

- Primäre Umwelteffekte
 - Eintrittsdauer Effekte
 - KOKOSAN: Minimierung der Zeitspanne von der „Einbringung der PK“ (anstatt „Baubeginn“) bis zur Erreichung des Sanierungsziels.
- Sekundäre Umwelteffekte
 - Klimarelevanz
 - CO₂-Emissionen KOKOSAN: 0; tatsächlich kann sogar CO₂ eingespart werden (-3.593 t CO₂eq), das Leermodell erkennt jedoch ein negatives Vorzeichen bei der Eingabe nicht.
 - CO₂-Emissionen A&D: Transport Aushubmaterial, Transport Wiederverfüllung
 - Energie
 - Für beide Verfahren ist der Energieaufwand für die Bauarbeiten vor Ort ungefähr gleich, weswegen nur der Kraftstoffverbrauch angeführt wird.
 - Ressourcen
 - KOKOSAN: 0; keine Primärressourcen werden verbraucht, weil die Pflanzenkohle am Ende einer kaskadischen Nutzung von Holz hergestellt wird (=Sekundärressource: Stoffe, die in einer Kaskade zum zweiten oder wiederholten Mal genutzt werden).
- Standortentwicklung
 - Öffentliches Interesse
 - Annahme Projektteam: Es gibt keine Regionalentwicklungsprojekte in dieser Region.
 - Interesse der Investoren bzw. Grundeigentümer
 - Annahme Projektteam: Interessen der Grundeigentümer unverändert.
- Projektsicherheit
 - Eintrittswahrscheinlichkeit von Störfällen
 - KOKOSAN: Keine Erfahrungswerte für Langzeitstabilität vorliegend.
 - Auswirkungen von Störfällen
 - KOKOSAN: Keine Erfahrungswerte für Langzeitstabilität vorliegend.

