

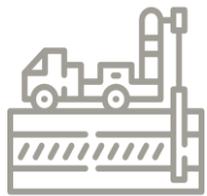
Nachhaltigkeit von PFAS-Sanierungen: Vergleich der Umweltauswirkungen von In-Situ-Barrieren und Pump & Treat

Verena Mild (Ramboll Deutschland), Dr. Lara Jacobi (Ramboll Deutschland)
Malte Rebentisch (Ramboll Deutschland) & Jarno Laitinen (Ramboll Finnland)

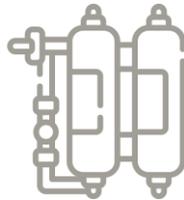
RAMBOLL

Bright ideas.
Sustainable change.

Vergleich der Nachhaltigkeit von PFAS-Sanierungen am Beispiel eines PFOS Schadens auf einem Flughafengelände in GB



Adsorptionsbarriere
mit KAK-Injektion



Pump & Treat mit
GAK-Filterung

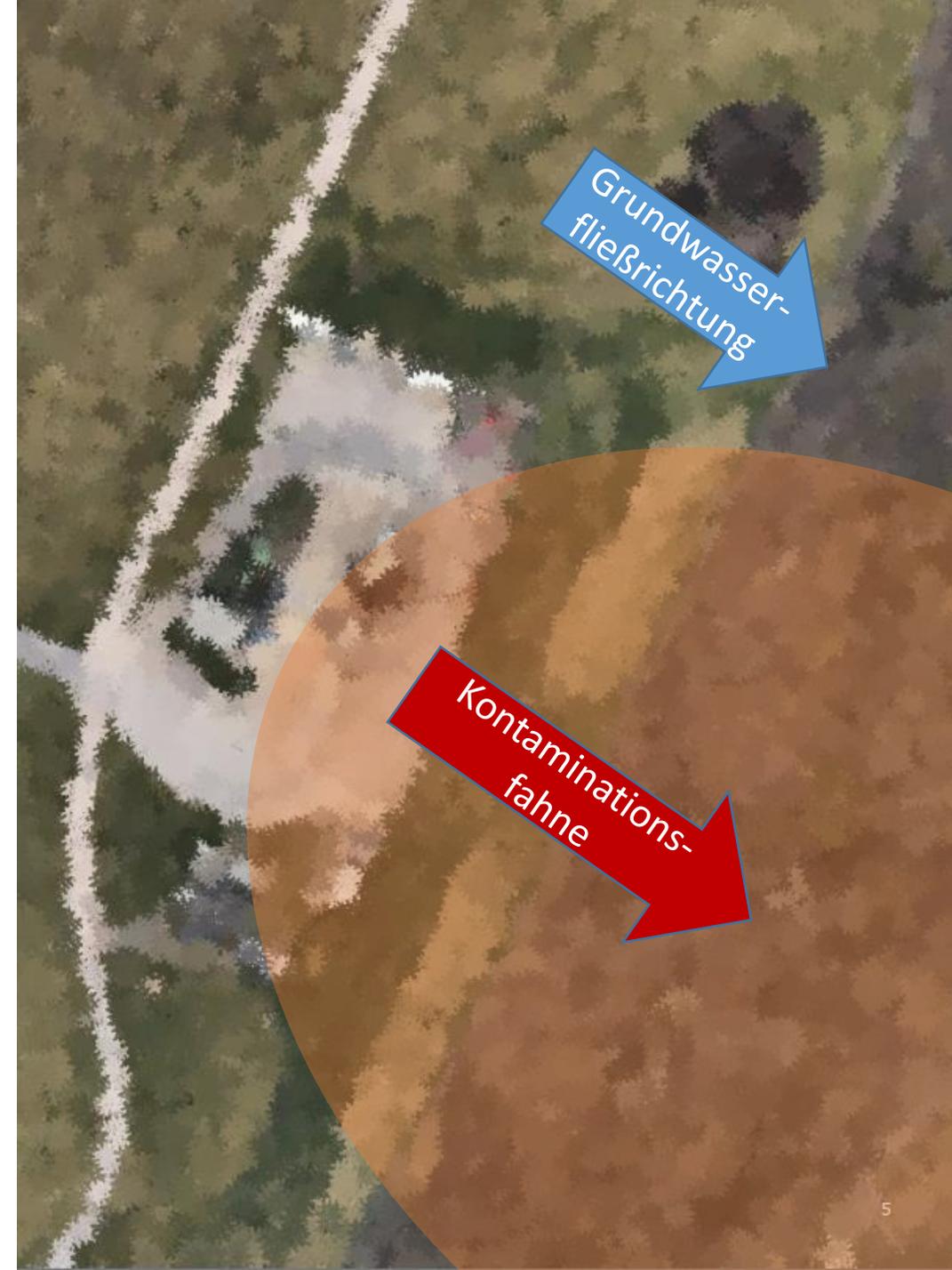


Pump & Treat mit
FF-Behandlung

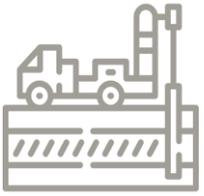
Nachhaltigkeitsbewertung: LCA (CO₂-eq), LCCA, **SURE**
by **RAMBOLL**

Standort

- Flughafen in UK
- Bekanntes PFOS-Problem 2019 identifiziert
- Freiwilliges Sanierungsprogramm - Schutz von besonders geschützten Gebieten (SSSI) außerhalb des Standorts
- Geologie: Alluvialboden auf Flussterrassenkies auf London-Ton
- Grundwasser bei ca. 2 m u. GOK
- Grundwasser kontaminiert durch Feuerwehrübungsgelände
 - Gesamtsumme von 24 PFAS ca. 215 µg/l
 - Lokal begrenzte MKW-Kontamination

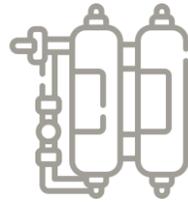


Sanierungsmethoden



Adsorptionsbarriere mit kolloidaler Aktivkohle (KAK)-Injektion

- Die Immobilisierung wird durch die Zugabe von kolloidaler Aktivkohle (KAK) in die Boden/Grundwassermatrix erreicht.



Pump & Treat mit GAK-Filterung

- Die Filtration basiert auf der Adsorption an Aktivkohle (AK), Steinkohleprodukt.
- Verbrauchte AK wird in einer Deponie entsorgt.

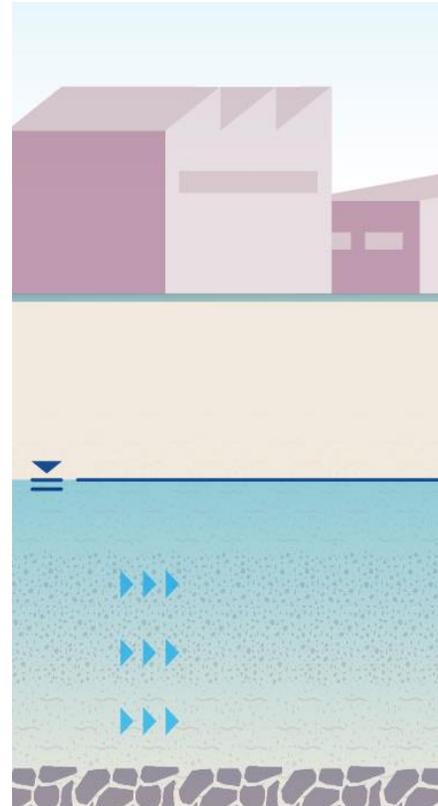


Pump & Treat mit FF-Behandlung

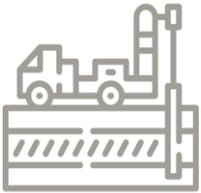
- Zusätzlicher Schritt: Aufkonzentrierung durch Schaumfraktionierung (FF).
- Restkonzentrationen ebenfalls durch AK filtriert
- Abgetrennter PFAS-Schaum und verbrauchte AK werden auf einer Deponie entsorgt.

Adsorptionsbarriere mit Kolloidaler Aktivkohle - Injektion

- Flüssige Aktivkohle: Kolloid in einer Polymerlösung suspendiert
- Partikelgrößen: 1 – 2 μm
- Ist nicht toxisch
- Injektion unter niedrigem Druck innerhalb weniger Wochen
- Bildung von durchlässiger reaktiver Barriere
- Validierungsproben



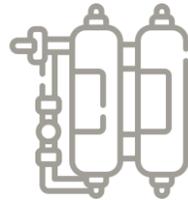
Sanierungsmethoden



Adsorptionsbarriere mit KAK-Injektion

- Die Immobilisierung wird durch die Zugabe von kolloidaler Aktivkohle (KAK) in die Boden/Grundwasser-matrix erreicht.

Dieser Ansatz wurde am Standort für die Sanierung der PFAS-Kontamination angewandt.



Pump & Treat mit GAK-Filterung

- Die Filtration basiert auf der Adsorption an Aktivkohle (AK), Steinkohleprodukt.
- Verbrauchte AK wird in einer Deponie entsorgt.

Die P&T-Lösungen basieren auf einem theoretischen Entwurf.



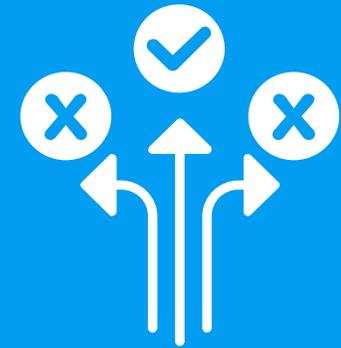
Pump & Treat mit FF-Behandlung

- Zusätzlicher Schritt: Aufkonzentrierung durch Schaumfraktionierung (FF).
- Restkonzentrationen ebenfalls durch AK filtriert
- Abgetrennter PFAS-Schaum und verbrauchte AK werden auf einer Deponie entsorgt.

Nachhaltige Sanierung ist die Beseitigung und/oder Kontrolle inakzeptabler Risiken auf sichere und rechtzeitige Weise bei gleichzeitiger Optimierung des ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Werts der Arbeit

ISO 18504:2017

Studiendesign





Einführung in die Studie

- Ziel dieser Studie war es, die Nachhaltigkeit von drei Sanierungsverfahren für PFAS-kontaminiertes Grundwasser zu vergleichen:
 - Ökobilanz CO₂-Fuß/Handabdruck (LCA)
 - Bewertung der Lebenszykluskosten (LCCA)
 - Allgemeine Nachhaltigkeitsbewertung
- Die Studie konzentrierte sich nicht auf die Bewertung der technischen Effizienz der ausgewählten Verfahren
- Alle Entwürfe der P&T Verfahren wurden auf die Hauptkomponenten beschränkt. Dies bedeutet, dass z. B. Ventile, Armaturen, elektrische Verkabelung usw. von den Entwürfen ausgeschlossen wurden.
 - Fokus auf:
 - ✓ Verbrauch Rohmaterialien
 - ✓ Energieverbrauch
 - ✓ Abfallproduktion
 - ✓ Emissionen

Umfang der Lebenszyklusanalyse (LCA)



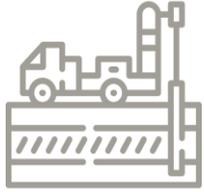
In situ: KAK-Injektion



On site: Pump & Treat

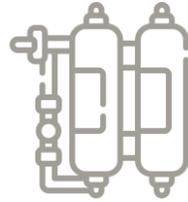


Wichtige Systemvariablen



Ruhigstellung mit KAK-Injektion

- Einmalige Injektion
- Erwartete Lebensdauer 15 Jahre
- 102 Injektionspunkte
- 33.600 kg KAK Produkt
- 1.600 l Kraftstoffverbrauch Injektion
- 3 Monitoringpegel, Tiefe 10 m
- 2 Mal pro Jahr Beprobung für Monitoring



Pump & Treat mit GAK-Filterung

- Kontinuierlicher Betrieb 15 Jahre
- 8 Entnahmebrunnen, Tiefe 8 m.
- 3 Monitoringpegel, Tiefe 10 m
- 2.300 l Kraftstoffverbrauch Installation
- Betrieb 95 %.
- 6 m³/h Pumprate
- 24.000 kg/Jahr AK-Verbrauch
- 64 000 kWh/Jahr Stromverbrauch
- 4 Mal pro Jahr O&M-Inspektion
- 2 Mal pro Jahr Beprobung für Monitoring



Pump & Treat mit FF-Behandlung

- Kontinuierlicher Betrieb 15 Jahre
- 8 Entnahmebrunnen, Tiefe 8 m.
- 3 Monitoringpegel, Tiefe 10 m
- 2.300 l Kraftstoffverbrauch Installation
- Betrieb 95 %.
- 6 m³/h Pumprate
- 8.500 kg/Jahr AK-Verbrauch
- 128 000 kWh/Jahr Stromverbrauch
- 4 Mal pro Jahr O&M-Inspektion
- 2 Mal pro Jahr Beprobung für Monitoring

Rahmenbedingungen für LCA und LCCA

- Life Cycle Assessment (LCA): Anwendung eines Cradle-to-Grave-Ansatzes
- Für die Bewertung wurde ein Referenzzeitraum von 15 Jahren zugrunde gelegt. Es wurde davon ausgegangen, dass der größte Teil des Sanierungsnutzens innerhalb dieses Zeitrahmens erreicht wird.
- Umrechnung aller Klimagase auf CO₂-Äquivalente (CO₂eq).
- LCA-Analyse basiert auf
 - ISO 14040:2006 Life Cycle Assessment,
 - ISO 14044:2006 Life Cycle Assessment Requirements and Guidelines,
 - ISO 14067:2018 Quantifying Carbon Footprint
 - EN 15804 Umweltproduktdeklarationen (EPD) für das KAK-Produkt und für Basischemikalien.
- Verwendung LCA-Software GaBi 10 Professional und den von Sphera und Ecoinvent 3.8 Datasets für den CO₂-Fußabdruck. Für fehlende Daten wurden Informationen aus der wissenschaftlichen Literatur oder Umweltproduktdeklarationen gemäß EN 15804 entnommen.
- Für die Kostenanalyse (LCCA): Ersatz Pumpen alle 5 Jahre, andere Systemkomponenten alle 10 Jahre

Unsicherheiten GAK-Verbrauchsrate

- Langfristige Referenzen zur Filtration von PFAS sind nur begrenzt verfügbar. Laut Literatur und bestehenden Fallstudien:
 - ✓ PFAS-Entfernungsraten von > 99 % wurden allgemein beobachtet.
 - ✓ Viele standort- und betriebsspezifische Aspekte haben einen Einfluss auf die GAK-Nutzungsrate
 - ✓ Die Adsorptionskapazität von GAK für PFAS schwankt zwischen 10 und 1 000 mg/kg.
 - ✓ Die typische Kontaktzeit des Filters (EBCT) liegt zwischen 10 und 30 Minuten.
 - ✓ Der Durchbruch erfolgt in der Regel nach 100 bis 20 000 behandelten Bettvolumina

- Aufgrund der großen Schwankungsbreite gemittelte und fallbezogene Annahmen:

Tabelle 1. Durchschnittswerte, die für die Dimensionierung von GAK für die P&T-Sanierung verwendet wurden.

Parameter	Wert	Einheit
Durchfluss	100	l/min
Zufluss PFAS (Summe)	50	ug/l
Zufluss DOC	15	mg/l
EBCT	30	min
Durchbruch	1 000	BV
Austausch des Filters	90	Tage
Adsorptionsfähigkeit	100	mg/kg
AK-Verbrauch	24 000	kg/a

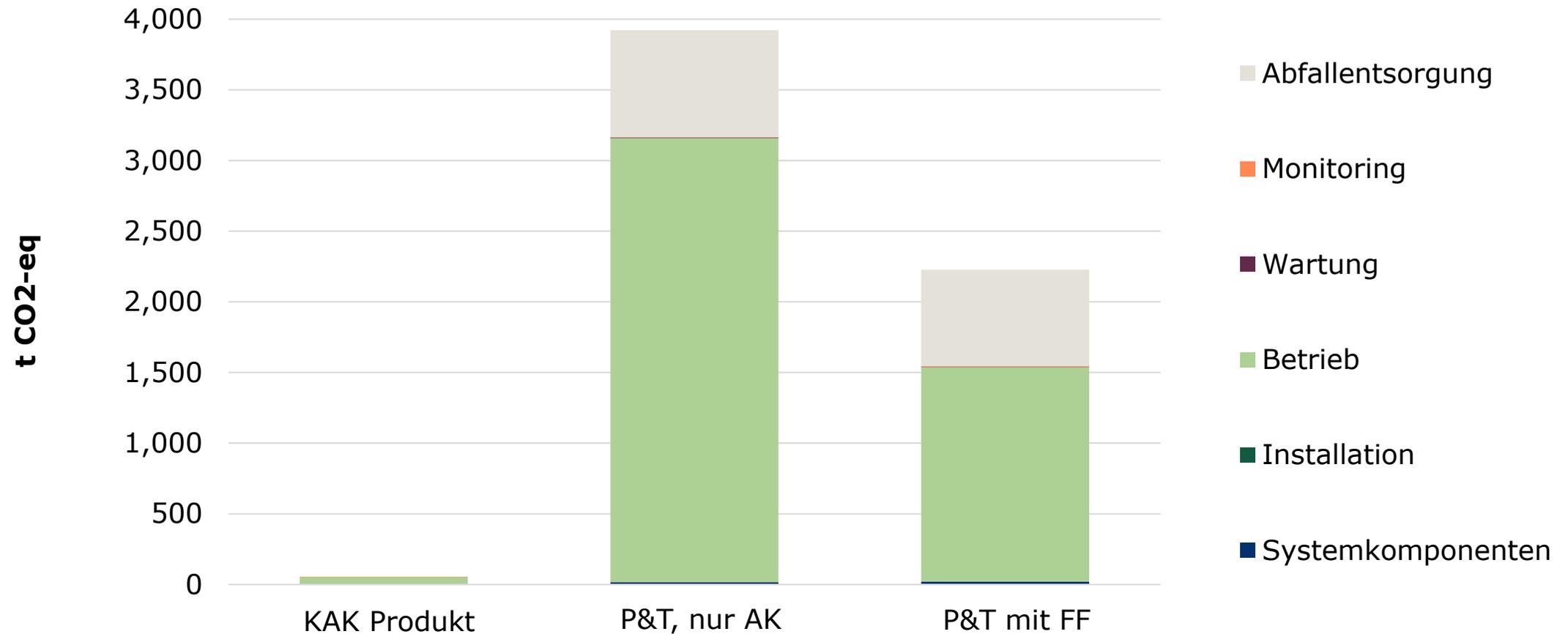


Ökobilanz CO₂- Fußabdruck (LCA)



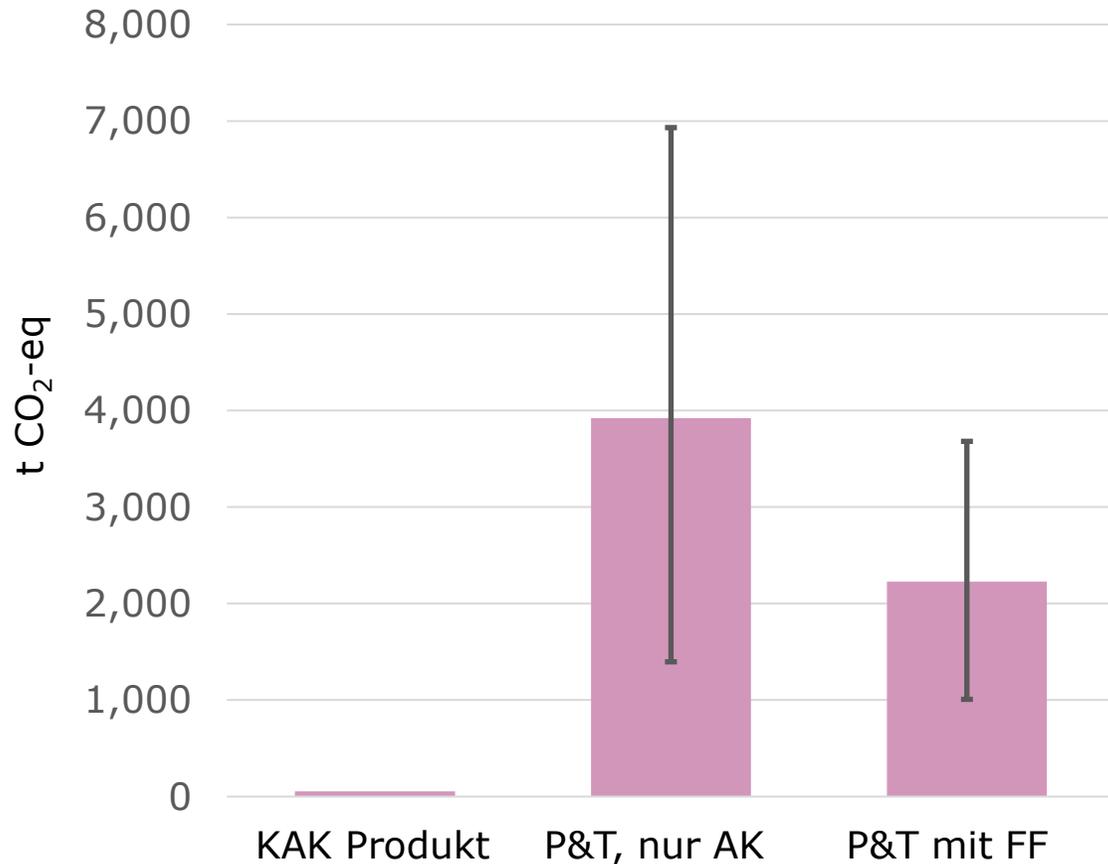
Berechneter CO₂-Fußabdruck

Metrische Tonnen (t) CO₂-eq. / 15 Jahre Betrieb



Sensibilitätsanalyse Aktivkohleverbrauch

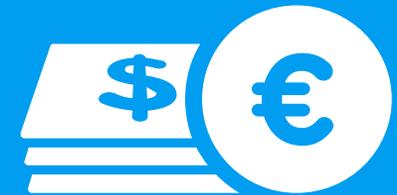
Metrische Tonnen (t) CO₂-eq. / 15 Jahre Betrieb



CO₂ Fußabdruck:

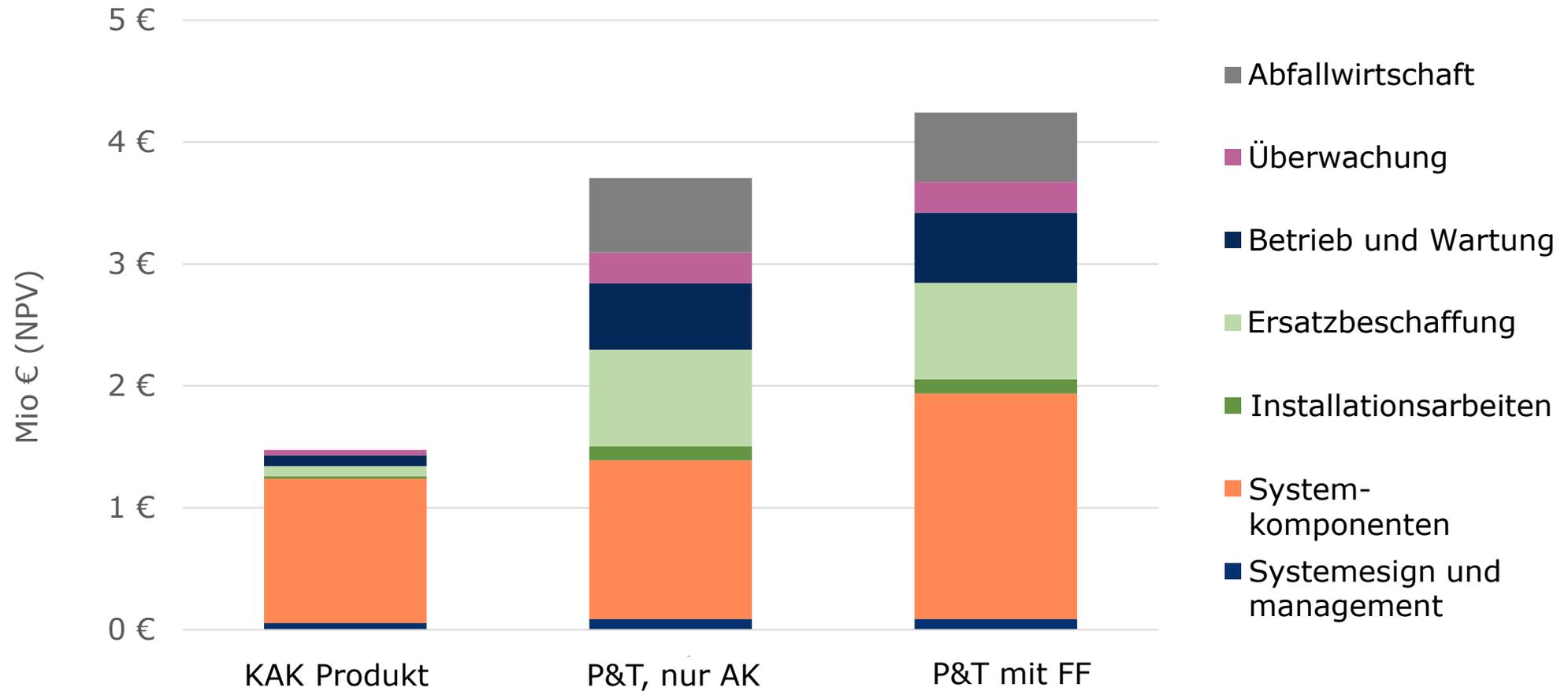
- Adsorption als wichtigster Faktor
- Tests unter standortspezifischen Bedingungen unerlässlich bei Planung
- viele Bemühungen der Optimierung
- Andererseits: hält das KAK Produkt 15 Jahre?

Bewertung der Lebenszykluskosten (LCCA)



Aufschlüsselung der Lebenszykluskosten des Projekts

Nettgegenwartswert, Mio EUR / 15 Jahre Betrieb



Bewertung der Nachhaltigkeit



Bewertung der Nachhaltigkeit

SURE von Ramboll

- SURE von Ramboll ist ein Tool für die Bewertung, Kommunikation und Berichterstattung **von nachhaltigen Sanierungsmaßnahmen (SU**sustainable **RE**mediation)
- Begleitet und dokumentiert den gesamten Entscheidungsprozess für Sanierungsmaßnahmen und unterstützt die Kommunikation der wichtigsten Entscheidungsfaktoren
- ISO 18504:2017, ASTM E2893-16 und SuRF-UK-konform
- USA: 2023 Gewinner des ESG-Innovationspreises
- Online verfügbar, für jedermann und kostenlos
- Link zum SURE Tool: <https://sure.ramboll.com>



Bewertung der Nachhaltigkeit

Prozess Multi-Faktor-Analyse

Bewertung der Nachhaltigkeit von Sanierungsoptionen in Hinblick auf **Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft anhand von Nachhaltigkeitsindikatoren** von denen jeder einen (positiven oder negativen) Nachhaltigkeitseffekt darstellt.

- Die Bewertung wurde von einem runden Tisch aus drei Sanierungsexperten von Ramboll und den Stakeholdern durchgeführt
- Die semi-quantitative Bewertung wurde anhand von 15 ausgewählten Nachhaltigkeitsindikatoren durchgeführt.
- Jeder Indikator wird nach einem Faktor 1-5 gewichtet
- Bei der Bewertung wurden quantitative Informationen verwendet, soweit sie aus der Projektbeschreibung, der Bestimmung des CO₂-Fußabdrucks oder der Kostenanalyse (LCCA) verfügbar waren.

Bewertung der Nachhaltigkeit

Ausgewählte **Bewertungskategorien** (•) und *Indikatoren* (✓)



Umwelt

- Emissionen in die Luft (Kategorie)
 - ✓ *Treibhausgase* (Indikator)
- Grundwasser und Oberflächenwasser
 - ✓ *Wasserbewegung*
- Natürliche Ressourcen und Abfall
 - ✓ *Energie- und Kraftstoffverbrauch*
 - ✓ *Primäre Ressourcen und Abfälle*
 - ✓ *Wassernutzung und -entsorgung*



Gesellschaft

- Menschliche Gesundheit und Sicherheit
 - ✓ *Langfristiges Risikomanagement*
- Ethik und Gleichstellung
 - ✓ *Wahrung des Verursacherprinzips*
- Nachbarschaft und lokale Bedingungen
 - ✓ *Bebaute Umwelt*
- Gemeinschaften und Engagement
 - ✓ *Qualität der Kommunikation*
- Ungewissheit und Beweise
 - ✓ *Grad der Unsicherheit*

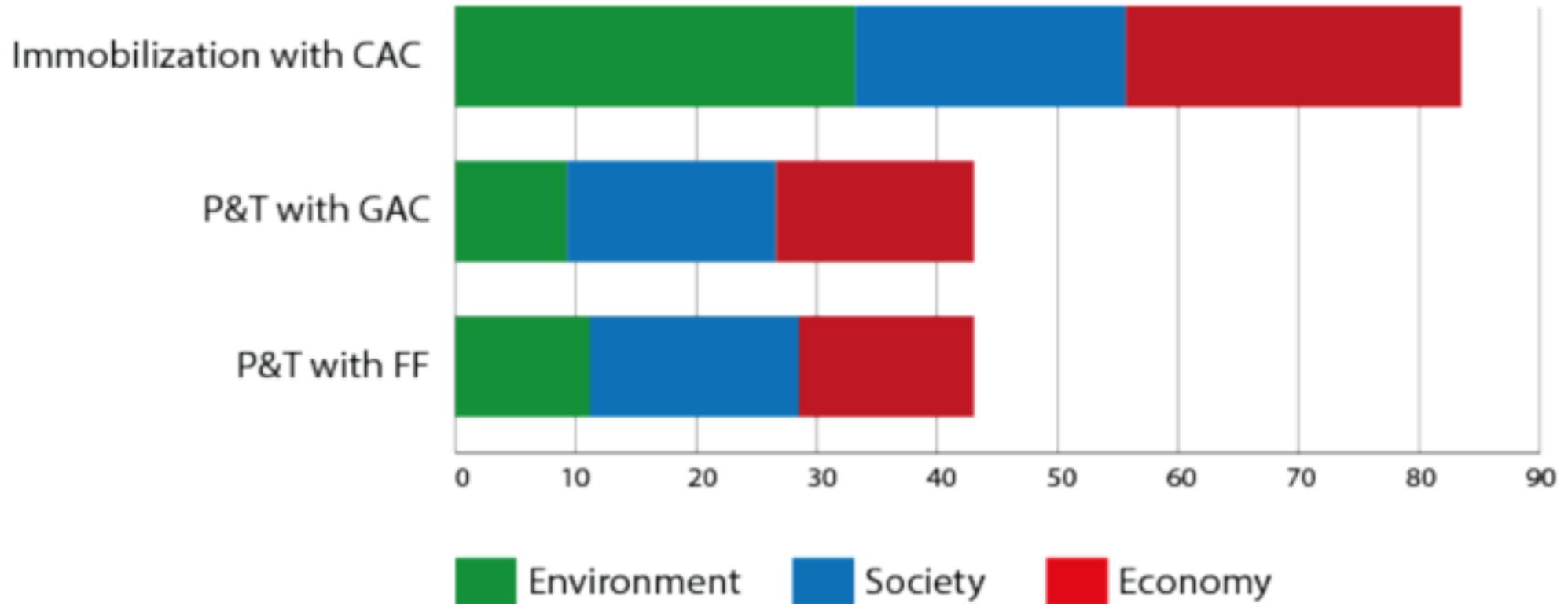


Wirtschaft

- Direkte wirtschaftliche Kosten und Nutzen
 - ✓ *Direkte Kosten und Nutzen*
- Beschäftigung und Beschäftigungskapital
 - ✓ *Schaffung von Arbeitsplätzen*
- Induzierte wirtschaftliche Kosten und Nutzen
 - ✓ *Innovation und neue Kompetenzen*
- Projektlaufzeit und Flexibilität
 - ✓ *Flexibilität bei sich ändernden Umständen*
 - ✓ *Laufende institutionelle Kontrollen*

Bewertung der Nachhaltigkeit

Gesamtpunktzahl der Nachhaltigkeitsbewertung

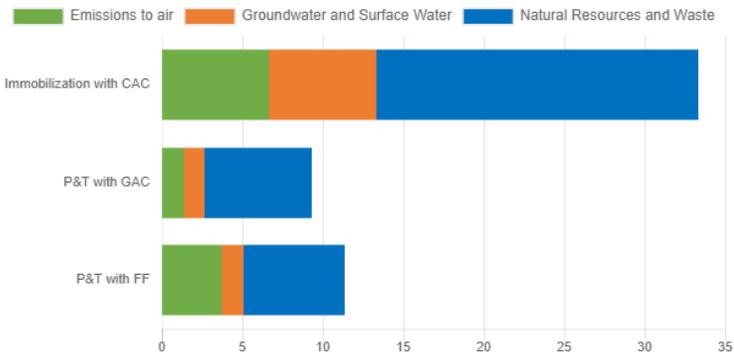


Bewertung der Nachhaltigkeit

Nachhaltigkeitsbewertung Score, Indikatorenkategorien



Umwelt

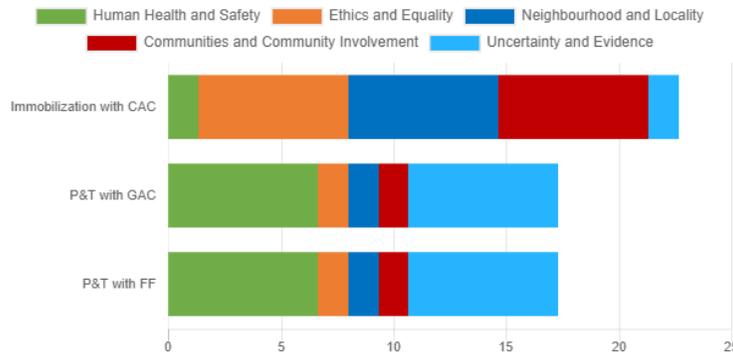


Pro KAK Adsorptionsbarriere

- Treibhausgasemissionen
- Energie- und Materialverbrauch



Gesellschaft



Pro KAK Adsorptionsbarriere

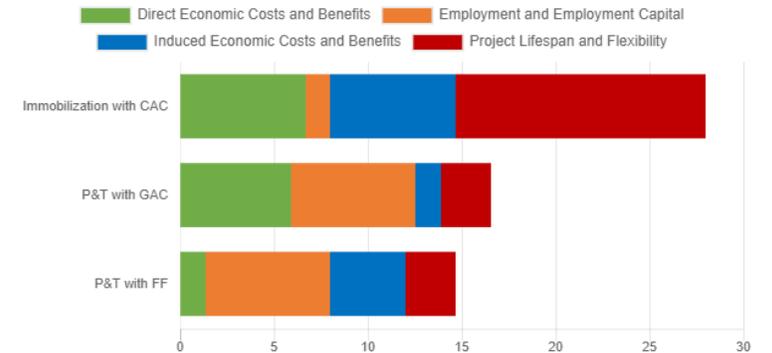
- Auswirkungen auf die bebaute Umwelt

Pro P&T

- Menge an Kontamination wird vermindert
- Technologische Unsicherheit als gering eingeschätzt



Wirtschaft



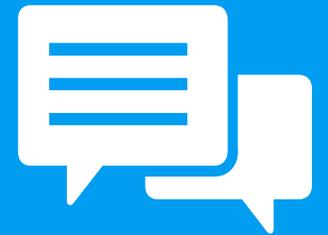
Pro KAK Adsorptionsbarriere

- Geringe Betriebskosten

Pro P&T

- Schaffung von Arbeitsplätzen

Schlussfolgerungen und wichtigste Ergebnisse



Schlussfolgerungen

Nachhaltigkeitsbewertung

- Sanierungsverfahren können bei gleicher Risikoreduktion unterschiedlich nachhaltig sein
- Wir haben die Werkzeuge, um Unterschiede der Nachhaltigkeit von Sanierungsverfahren zu beurteilen
- Ergebnisse von Nachhaltigkeitsuntersuchungen gelten immer nur für den konkret betrachteten Fall und für die Gruppe der Projektbeteiligten (Stakeholders)
- Lebenszyklusanalysen (LCA) basieren auf International Standards und Software
- Die Programme und Datenbanken werden kontinuierlich verbessert und erweitert
- Werkzeuge wie *SURE by Ramboll* leiten Projektteams durch den gesamten Beurteilungsprozess, folgen den relevanten Normen und Richtlinien und dokumentieren den Prozess
- Die Entwicklung von quantitativen Werkzeugen wie LCA und LCCA für weitere Nachhaltigkeitsaspekte bieten bei einer Kombination mit einem semiquantitativen Tool wie SURE das größte Potential für zukünftige gute Beurteilungen

Schlussfolgerungen

PFAS Sanierung

- Es gibt mehr für PFAS als Pump & Treat
- Für Pump & Treat bietet die Optimierung der Grundwasserbehandlung das größte Verbesserungspotential
- Aus Nachhaltigkeitsüberlegungen und vor dem Hintergrund ubiquitär vorhandener PFAS ist die Frage, ob standortspezifisch das Management von PFAS sinnvoller ist als eine Beseitigung
- Viele Ideen werden zurzeit ausprobiert, um in Zukunft mehr technische Möglichkeiten zu haben, der Markt wartet auf diese Lösungen
- Langzeitstudien werden die realistische Effektivität der Alternativen zeigen

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!



Verena Mild

Senior Consultant,
Ramboll Deutschland



Malte Rebentisch

Senior Managing Consultant,
Ramboll Deutschland



Dr. Lara Jacobi

Senior Consultant,
Ramboll Deutschland



Jarno Laitinen

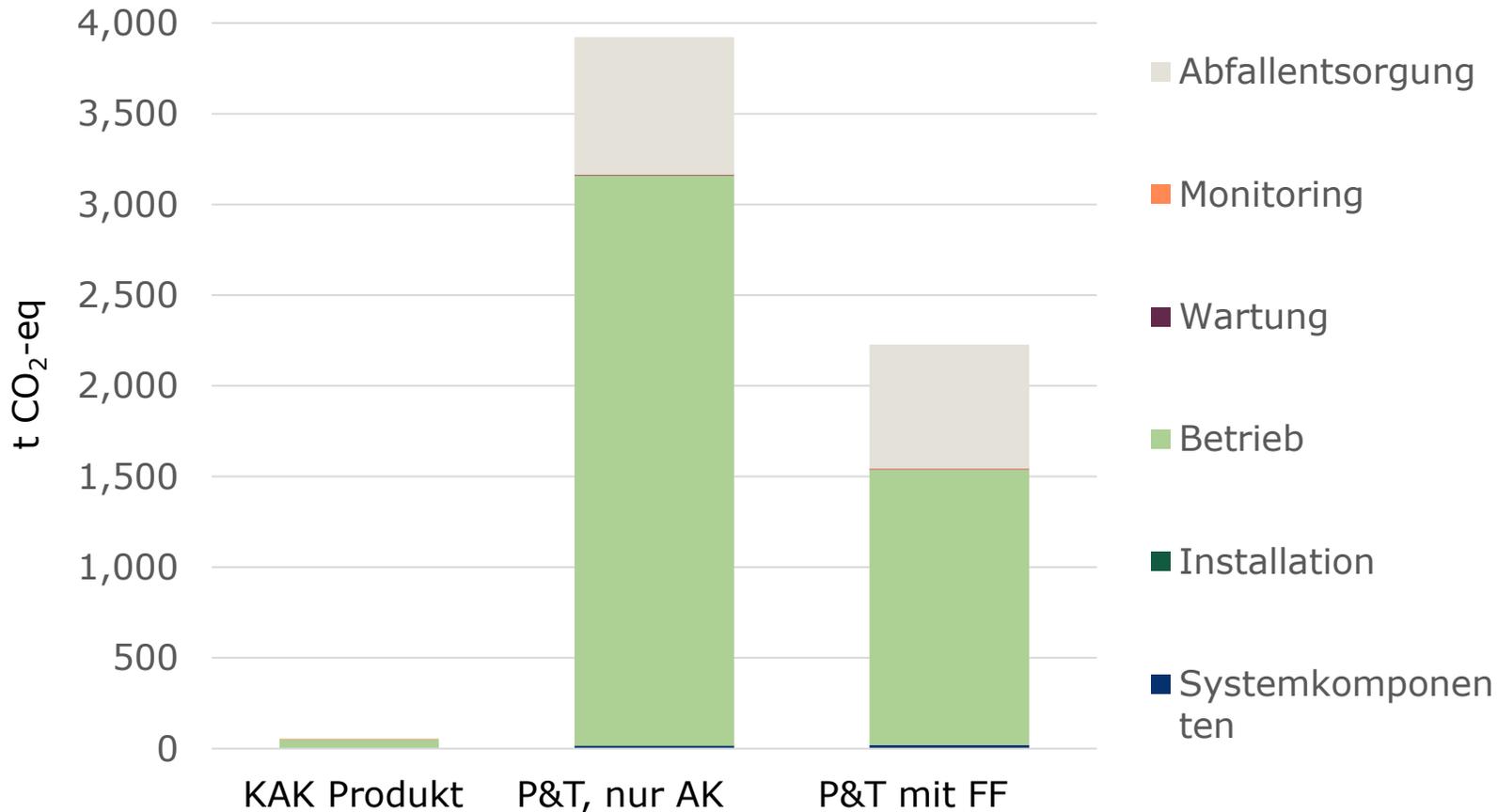
Head of Department,
Ramboll Finland

Bright
ideas.
Sustainable
change.

RAMBOLL

Berechneter CO₂-Fußabdruck

Metrische Tonnen (t) CO₂-eq. / 15 Jahre Betrieb



Fußabdruck-Kategorien

Zu den *Systemkomponenten* gehören auch die vor Ort verwendeten P&T-Geräte.

Zur *Installation* gehören die *festen Anlagen* wie Förder- und Überwachungsbrunnen, Pumpleitungen, Versorgungseinrichtungen und die für Bohrungen, Injektionen oder Ausgrabungen erforderlichen *Maschinen*.

Die *Betriebskosten* umfassen alle Verbrauchsmaterialien, wie wie PlumeStop oder AK, und Strom.

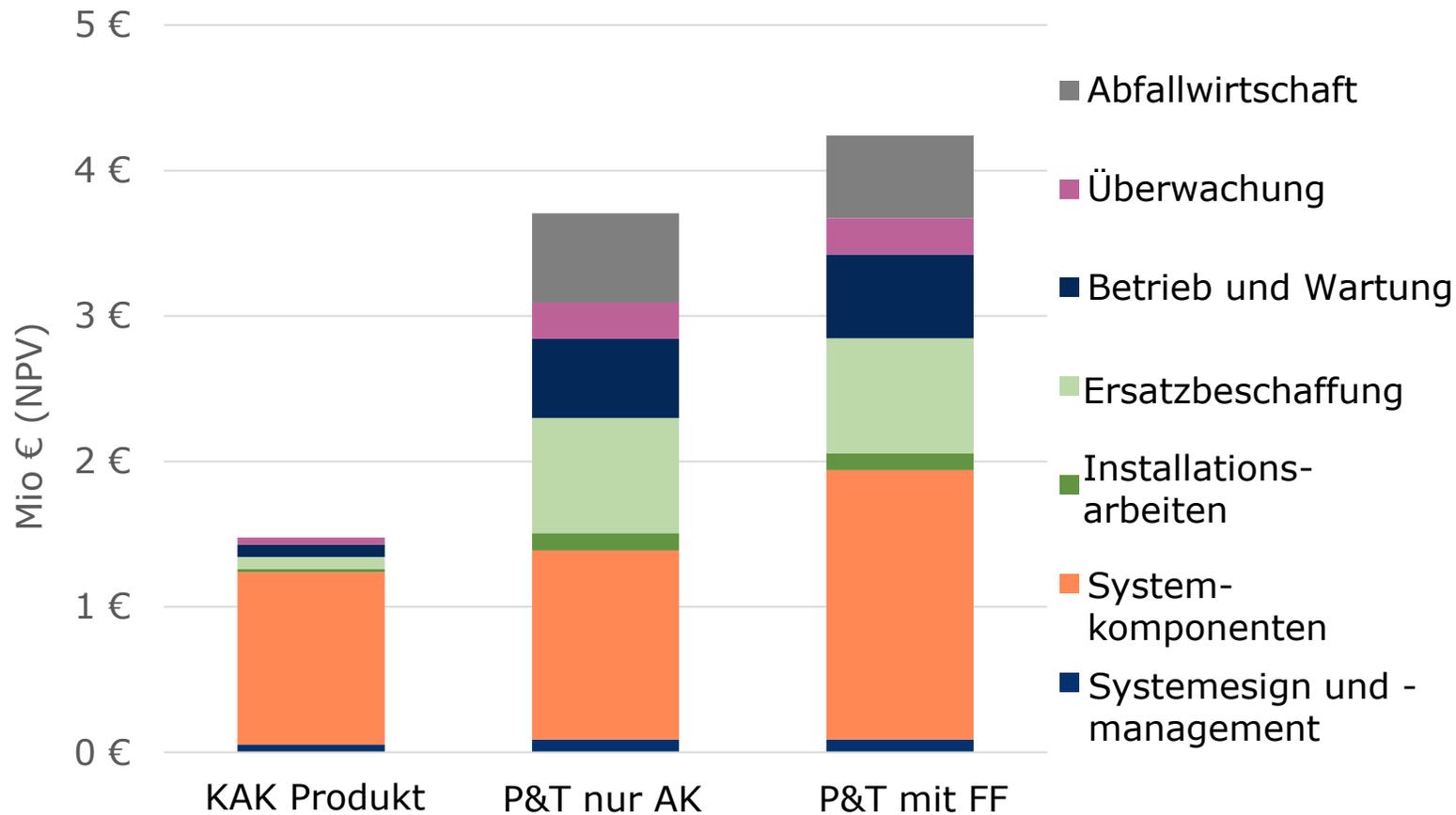
Die *Wartung* umfasst Reisen für O&M-Inspektionen.

Das *Monitoring* umfasst Reisen für Monitoring.

Die *Abfallentsorgung* umfasst die Entsorgung von AK und PFAS-Schaum und die Abwasserbehandlung

Aufschlüsselung der Lebenszykluskosten des Projekts

Nettogegegenwartswert, Mio EUR / 15 Jahre Betrieb



Lebenszykluskosten-Kategorien

Die Abfallwirtschaft umfasst die gesamte Behandlung von festen Stoffen und Abwässern.

Die Überwachung umfasst Probenahme und Analyse.

Betrieb und Wartung umfassen allgemeine Arbeiten und Wartungen.

Die Ersatzbeschaffung umfasst die Erneuerung der Ausrüstung, die verwendete AK und den Strom.

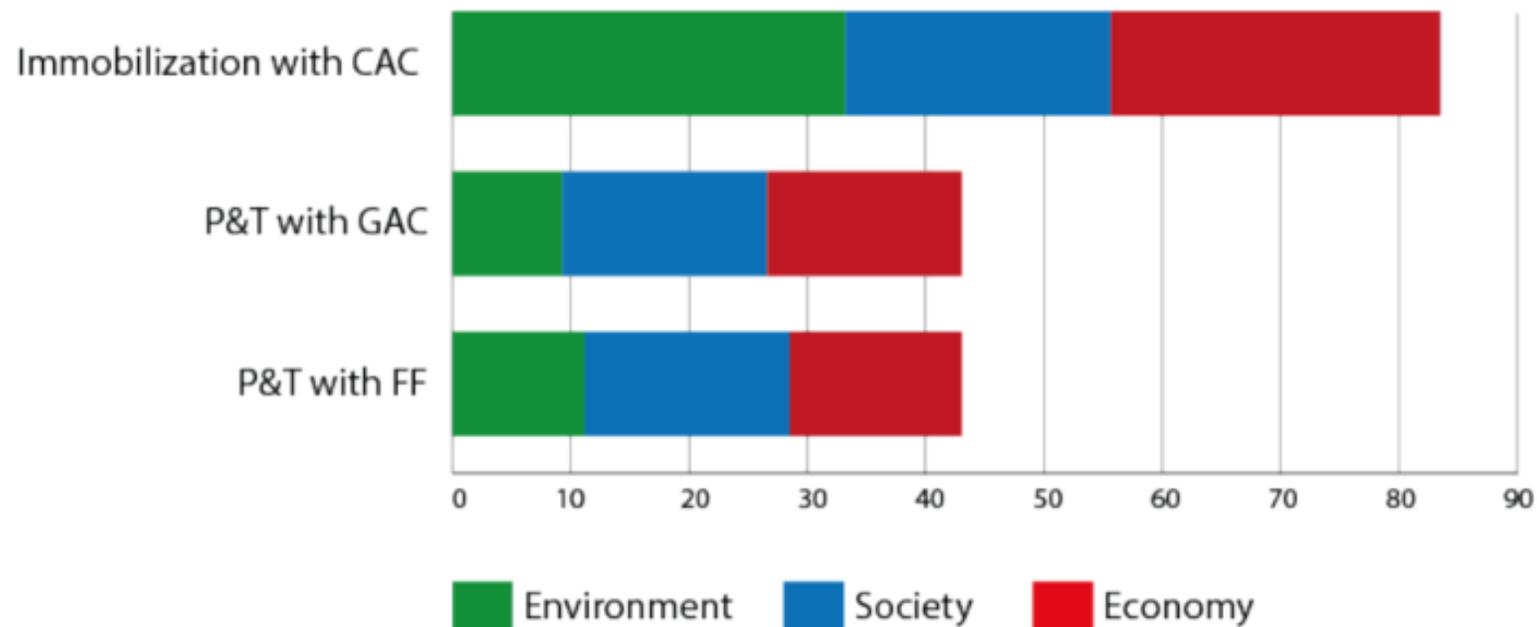
Die Installationsarbeiten umfassen die Infrastruktur des Standorts, Brunnen, Pump- und Transferleitungen sowie Installationsarbeiten

Systemkomponenten umfasst das KAK-Material und die Anwendung bzw. die P&T-Ausrüstung.

Systemdesign und -management umfasst das Design und das damit verbundene Management während der Inbetriebnahme.

Bewertung der Nachhaltigkeit

Gesamtpunktzahl der Nachhaltigkeitsbewertung



Gesamtpunktzahl der Nachhaltigkeitsbewertung

Die folgenden Folien und Diagramme zeigen die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsbewertung für jede bewertete Option, unterteilt in Nachhaltigkeitsbereiche und Indikatorkategorien.

Die Punkte werden auf einer Skala von 0 bis 100 vergeben, wobei **ein Wert von 100 eine ideale Sanierungsalternative darstellt** (d. h. eine Alternative, die bei allen bewerteten Indikatoren die maximale Punktzahl erreicht hat).

Aufgrund der Methodik der Nachhaltigkeitsbeurteilung sind die Ergebnisse als bewertungsspezifisch zu betrachten und daher nicht mit den Ergebnissen anderer (ähnlicher) Bewertungen zu vergleichen.