



Verfahren zur Steigerung des Schadstoff- austrages bei Bodenluftabsaugungen

Modellvorhaben Mühlacker

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
<u>1 Vorbemerkung und Zielsetzung</u>	<u>7</u>
<u>2 Versuchsübersicht und Messtechnik</u>	<u>8</u>
2.1 Verfahrensprinzip und Versuchsziel	8
2.1.1 Das verdichtete Absaugraster	8
2.1.2 Geodesorb-Verfahren	8
2.1.3 Bodenerwärmung durch Hochfrequenz-Energie	8
2.2 Vorbereitende Maßnahmen	10
<u>3 Verdichtung des Absaugrasters</u>	<u>11</u>
3.1 Versuchsaufbau	11
3.2 Versuchsdurchführung	12
3.3 Versuchsergebnisse	12
3.3.1 Darstellung der Ergebnisse	12
3.3.2 Einzelmessungen	13
3.3.3 Vergleich zwischen volumenstrom- und unterdruckgesteuerter Absaugung	14
3.3.4 Vergleich verschiedener Absaugvarianten zwischen der Absaugung aus KP 2 und P 2 und aus allen Pegeln	15
3.3.5 Auswirkungen der aktiven Belüftung	18
3.4 Kostenbetrachtung	19
<u>4 Geodesorb-Verfahren</u>	<u>21</u>
4.1 Versuchsaufbau	21
4.2 Versuchsdurchführung	23
4.3 Versuchsergebnisse	23
4.3.1 Temperaturverlauf von Boden und Bodenluft	23

4.3.2 Verlauf von Volumenstrom, Unterdruck und C_{ORG} -Gehalten der abgesaugten Bodenluft	25
5 Hochfrequenztechnologie	27
5.1 Versuchsaufbau	27
5.2 Versuchsdurchführung	30
5.3 Versuchsergebnisse	30
5.3.1 Temperaturverlauf von Boden und Bodenluft	30
5.3.2 Verlauf von Volumenstrom, Unterdruck und C_{ORG} -Gehalten der abgesaugten Bodenluft	33
5.4 Arbeitsschutz	35
5.4.1 Geltende Vorschriften und Grenzwerte	35
5.4.2 Messungen der Feldstärke	35
6 Vergleichende Bewertung des Geodesorb- und Hochfrequenzversuches	38
6.1 Energieverbrauch und Erwärmung	38
6.2 Entwicklungsmöglichkeiten	40
6.3 Kostenbetrachtung	41
7 Einsatzmöglichkeiten der vorgestellten Verfahren	42
7.1 Verdichtung des Absaugrasters	42
7.2 Geodesorb-Verfahren	42
7.3 HF-Verfahren	42

Zusammenfassung

An der ehemaligen Sonderabfalldeponie "Eckenweiher Hof" bei Mühlacker, einem Modellvorhaben des Landes Baden-Württemberg, wurden 1997 umfangreiche Feldversuche zur Optimierung der Bodenluftabsaugung durchgeführt. Die Untersuchungen sollten zu einer Beurteilung der eingesetzten Technologien bezüglich ihrer technischen Eignung, Wirtschaftlichkeit und möglicher Einsatzgebiete führen.

Der Schwerpunkt des vorliegenden Berichtes liegt neben der Versuchsbeschreibung und Versuchsdurchführung in der kritischen Auswertung und Beurteilung der Versuchsergebnisse hinsichtlich einer Anwendungsempfehlung für zukünftige, vergleichbare Sanierungen bzw. für das weitere Vorgehen bei der laufenden Sanierung.

Am Modellvorhaben Mühlacker wurden drei Verfahren erprobt, die eine Austragssteigerung der flüchtigen Kontaminanten (CKW und BTXE) erreichen sollen, nämlich

- das verdichtete Absaugraster
- das Geodesorb-Verfahren,
- die Bodenerwärmung durch Hochfrequenztechnologie (HF).

Der Versuch "Verdichtetes Absaugraster" hat gezeigt, dass mit den beiden ursprünglich vorhandenen Sanierungspegeln der gesamte Bereich eines der vier Deponiebecken gut erreicht wurde. In gering durchlässigem Untergrund wie in den am Standort vorhandenen porösen Galvanikschlämmen, sollten die Absaugpegel mindestens 4" Ausbaudurchmesser besitzen, die zur Verdichtung des Absaugrasters zusätzlich niedergebrachten 2"-Pegel zeigten einen raschen Anstieg des Saugwiderstandes über die Versuchsdauer.

Die Verdichtung des Absaugrasters ist bei dringlichen Sanierungsarbeiten zu empfehlen. Am Standort konnte eine Steigerung des Austrages auf das 1,8-fache gegenüber dem Saugbetrieb der beiden vorhandenen Pegel erreicht werden. Hierzu war eine Steigerung der Verdichterleistung auf das nahezu doppelte gegenüber der Zwei-Brunnen-Sanierung erforderlich. Bei den Versuchen hat sich gezeigt, dass es nicht günstig ist, hierbei das Absaugvolumen aus allen Bereichen gleich zu halten, um für eine möglichst gleichmäßige Erfassung zu sorgen. Das Anlegen des gleichen Unterdruckes an alle Pegel hat sich als wesentlich effektiver erwiesen. Offensichtlich wird die Luft ansonsten an weniger durchlässigen Bereichen "vorbei"-gesaugt.

Das Einbringen von passiv betriebenen Belüftungspegeln ist eine wirksame Maßnahme, den Austrag der vorhandenen zwei Sanierungspegel um 25 % bei gleicher Verdichterleistung zu steigern.

Mit der aktiven Belüftung konnte im gering durchlässigen Boden keine Steigerung des Austrages erzielt werden, vielmehr erfolgte durch die Frischlufteinpressung eine Verdünnung des Bodenluftstromes, so dass die Konzentration und damit der Austrag zurückging. Es wurde in einem Versuch bei Überschreiten eines Überdruckes von 125 mbar ein Punkt erreicht, bei dem eine schlagartige Lockerung erzielt wurde, was sich in einer sprunghaften Ergiebigkeitssteigerung zeigte. Diese Lockerung blieb erhalten und wurde durch gesteigerte Frischluftanteile bei einer anschließend durchgeführten Versuchsreihe mit passiver Belüftung bestätigt.

Das neuentwickelte Geodesorb-Verfahren wurde erstmalig im Feld eingesetzt. Der Bodenkörper wird nach dem Wärmetauscherprinzip erwärmt. Hierdurch steigt der Dampfdruck der Kontaminanten an, so dass Adsorptionskräfte zwischen Bodenmatrix und Schadstoffen bzw. Diffusionswiderstände schneller überwunden werden können. Es sollte eine Austragssteigerung sowie Mobilisierung der Restkontaminationen flüchtiger Schadstoffe erreicht werden.

Das "Geodesorb-Verfahren" brachte die erzeugte Wärme effektiv in den Boden ein. Die Versuchsauswertung hat gezeigt, dass die Wärmeverluste im Feldversuch durch Bodenluftabsaugung im Vergleich zu den Verlusten aufgrund von Wärmeleitung klein waren.

Auch das HF-Verfahren wurde bisher noch nicht in Ablagerungsgut und in Tiefen größer 3 m angewandt. Durch Anlegen eines hochfrequenten elektromagnetischen Feldes an den Bodenkörper wird eine Bodenerwärmung erzielt. Der Einsatz der "Hochfrequenztechnologie" führte zu einem deutlichen Anstieg der Boden- und Bodenlufttemperatur und damit verbunden zu einem Anstieg des Schadstoffaustrages. Die Erzeugung des hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeldes im Boden bedingt hohe Anforderungen an die Anlagentechnik und besondere Arbeitsschutzvorkehrungen.

Aufgrund der unterschiedlichen Größen der Versuchsfelder können die beiden Versuche zur Bodenerwärmung nicht unmittelbar miteinander verglichen werden. Die maximal erreichte, über verschiedene Tiefen gemittelte Bodentemperatur betrug beim Geodesorb-Verfahren 40° C, beim HF-Verfahren 51° C. Die maximale Bodenlufttemperatur lag bei der Hochfrequenztechnologie um 24 K, beim Geodesorb-Verfahren um 23 K über der Referenztemperatur. Die Anlagenverfügbarkeit des Geodesorb-Verfahrens war deutlich höher als die des HF-Verfahrens. Dies kann beim technisch komplexeren HF-Verfahren auf Ausfälle einzelner Bauteile sowie auf Schwierigkeiten bei der Kühlung der Generatoren während der heißen Sommermonate zurückgeführt werden. Es mußten große Energiemengen zur Versorgung der el. betriebenen Kühlaggregate aufgebracht werden. Hiermit ist der spezifisch höhere Energieverbrauch gegenüber dem Geodesorb-Verfahren zu erklären.

Es wurden durch die Bodenerwärmung nachweislich Restmengen an CKW im Untergrund weiter reduziert, sowie Komponenten mobilisiert, die vorher nicht in der Bodenluft nachweisbar waren. Ab einer Bodenlufttemperatur von etwa 40 °C wurden im abgesaugten Bodenluftstrom C₉ und C₁₀-Aromaten sowie Spuren von Chlorbenzolen nachgewiesen.

Der Einsatz eines der getesteten Verfahren sollte bei Sanierungsuntersuchungen im Rahmen der Vorplanung bzw. während laufender Sanierungen in Abhängigkeit von den jeweiligen Standortvoraussetzungen überprüft werden, um die Sanierungsdauer zu verkürzen und dadurch evtl. Kosten einzusparen.

1. Vorbemerkung und Zielsetzung

Die Sanierung der ehemaligen Sonderabfalldeponie Eckenweiherhof in Mühlacker wird als Modellvorhaben des Landes Baden-Württemberg betrieben. Die Deponie wurde in den Jahren 1968 bis 1976 überwiegend mit Galvanikschlamm, Lack- und Farbbremsen, Ölabscheiderrückständen sowie teilweise mit Bauschutt verfüllt. Die Ablagerung ist in vier ca. 6 m tiefe, als "naturdicht" angenommene Becken unterteilt, die jedoch nicht verhindern konnten, dass die in erheblichen Mengen enthaltenen Chlorkohlenwasserstoffe in tiefer gelegene Bereiche absickerten. Die von Schichtwasserhorizonten durchzogene, bis zu 36 m Tiefe reichende ungesättigte Zone, sowie die darunterliegenden zwei Grundwasserstockwerke in den Dunkelroten Mergeln bzw. Grundgipsschichten sind mit CKW kontaminiert.

Seit 1993 wird eine kontinuierliche Bodenluftabsaugung sowohl aus den Becken als auch aus der ungesättigten Zone unterhalb der Deponiesohle betrieben. Die Abluftabreinigung erfolgt über eine katalytische Oxidationsanlage.

Bei Bodenluftabsaugmaßnahmen ist nach dem Absaugen der Kontaminationsspitzen ein Rückgang der Bodenluftkonzentration zu erwarten. Durch den Frachtrückgang verteuert sich die Abluftbehandlung pro kg entferntes CKW stetig. Das Modellvorhaben wurde als geeignet angesehen, verschiedene Maßnahmen zur Austragssteigerung nach dem zu erwartenden Frachtrückgang zu erproben.

Achtzehn Firmen, die durch innovative Techniken aufgefallen waren oder ihr Know-How bei bereits abgeschlossenen Sanierungen unter Beweis gestellt hatten, wurden zu einem Ideenwettbewerb aufgefordert. Nach Gesprächen wurden von sechs Firmen Konzepte vorgelegt, die am Standort realisierbar waren. Schließlich kamen 1997 drei ausgewählte Verfahren in Feldversuchen zum Einsatz, mit folgender Zielsetzung:

- Erprobung von innovativen Sanierungstechniken zur Austragssteigerung durch Bodenerwärmung
- Beurteilung der Wirksamkeit und Einsetzbarkeit der Verfahren
- Beurteilung des finanziellen Aufwandes
- Entwicklungs- und Anwendungsmöglichkeiten.

2. Versuchsübersicht und Messtechnik

2.1 Verfahrensprinzip und Versuchsziel

2.1.1 Das verdichtete Absaugraster

Durch die Erhöhung der Zahl der Absaugpegel sollten zum einen eventuell bisher nicht erreichte Schadensherde der Absaugung zugänglich gemacht, zum anderen verschiedene Absaugvarianten getestet werden. Es sollte das optimale Verhältnis zwischen erreichter Austragsteigerung und dem dafür notwendigen technischen und wirtschaftlichen Mehraufwand gefunden, aber auch die Grenzen der Austragsteigerung ermittelt werden.

2.1.2 Geodesorb-Verfahren

Durch Wärmeübertragung wird der Untergrund erwärmt. Entsprechend der Partialdruckerhöhung gehen darin enthaltene flüchtige Schadstoffkomponenten in die Gasphase über und werden von der Bodenluftabsaugung ausgetragen. Es sollte der erforderliche Energieeintrag für das Erreichen einer bestimmten Temperaturdifferenz gegenüber dem unbeeinflussten Deponiekörper ermittelt werden.

2.1.3 Bodenerwärmung durch Hochfrequenz-Energie

Ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld (13,56 MHz) wird an den Untergrund angelegt. Teils durch die ständige Neuausrichtung dielektrischer Medien, insbesondere des Bodenwassers, teils durch ohmsche Verluste wird Wärme unmittelbar in der Bodenmatrix erzeugt. Auch in diesem Versuch sollte der Energieeintrag ermittelt werden. Darüberhinaus sollte die sich unter dem Temperatureinfluss verändernde chemische Zusammensetzung des abgesaugten Schadstoffgemisches untersucht werden.

Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau der ehemaligen Sonderabfalldéponie und die Lage der Versuchsfelder.

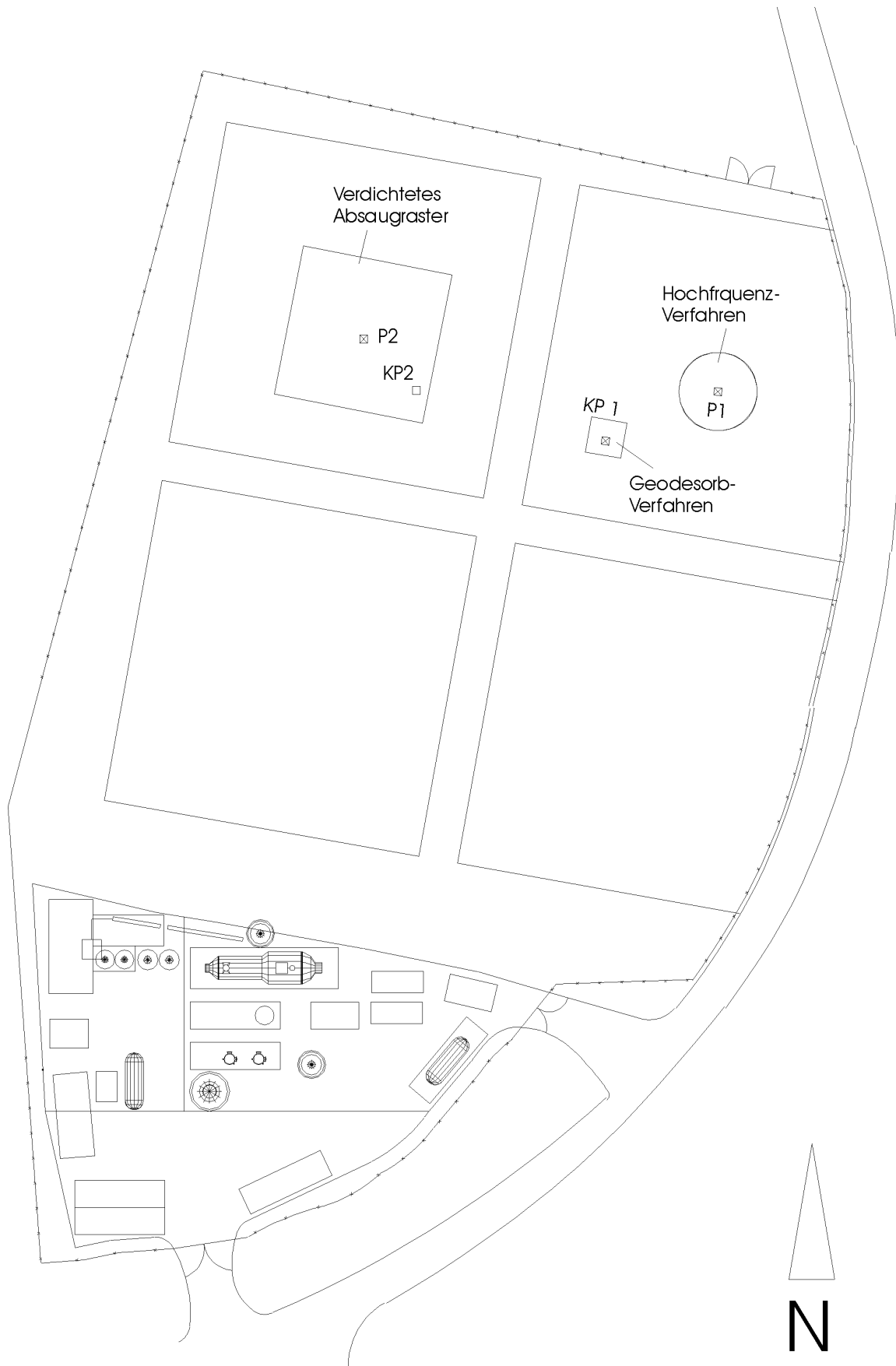


Abb. 1: Lageplan und Schnitt durch die Becken mit Einsatzbereichen der Verfahren

2.2 Vorbereitende Maßnahmen

Vor der Durchführung der Versuche wurde die bestehende Absauganlage umgerüstet. Die Hauptzuleitungen aus den Becken zum Rohrsammler wurden mit SPS-gesteuerten Mass-Flow-Controllern versehen. Ebenfalls on-line abrufbar wurden Sensoren für Unterdruck und Temperatur (Pt 100) in den Zuleitungen fest installiert. Die aus den Pegeln abgesaugte Bodenluft war nahezu wasserdampfgesättigt, somit konnte der abgesaugte Bodenluftstrom genau eingestellt werden. Durch die Möglichkeit, die Volumenströme fest einzustellen, war auch gewährleistet, daß die Belastung für die nachgeschaltete katalytische Oxidationsanlage relativ konstant gehalten werden konnte.

Aus den Hauptzuleitungen gelangt Bodenluft vom Rohrsammler über beheizte Probegutzuleitungen zu einem Kohlenwasserstoffanalysator der Firma J.U.M. Engineering. Zur Messung einer Meßstelle benötigt der FID (**F**lamm**I**onisations**D**etektor) ca. 6 - 9 min. Dieses Intervall setzt sich aus dem Spülen der beheizten Zuleitungen und der eigentlichen Meßzeit, über die der Mittelwert gebildet wird, zusammen. Die FID-Meßwerte werden, ebenso wie Druck, Temperatur und Volumenstrom der abgesaugten Bodenluft, auf einem PC gesammelt und weiterverarbeitet. Zur Überprüfung des FID-Wertes wurden Bodenluft-Proben gezogen, die im Labor auf 11 CKW einschließlich Vinylchlorid sowie BTEX untersucht wurden.

Zusätzlich zur Vorortanalytik mittels FID wurden beim HF-Versuch Luftproben auf Aktivkohleröhrchen gezogen und auf folgende Schadstoffgruppen analysiert:

- chlorierte Kohlenwasserstoffe
- aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX)
- Chlorbenzole
- halogenfreie Lösungsmittel
- Kohlenwasserstoffe (GC-FID).

3. Verdichtung des Absaugrasters

3.1 Versuchsaufbau

Im Becken 2 wurden die Einrichtungen für das verdichtete Absaugraster installiert (s. Abb. 2). Die bisherige Bodenluftabsaugung erfolgte über die Pegel P 2 und KP 2. Für den Versuch wurden im Dezember 1996 elf zusätzliche Absaugpegel sowie vier Belüftungspegel eingebracht. Die Bohrungen reichen bis in 4,5 - 5 m Tiefe und sind als 2"-Pegel ausgebaut. Die Filterstrecke befindet sich ausschließlich in den abgelagerten Schlammschichten.

Die Pegel waren zu 3 bzw. 4 Hauptzuleitungen zusammengefaßt: Die Saugpegel S 2/1 bis 2/4; S 2/6 bis 2/8 zusammen mit P 2 und KP 2; S 2/9 bis 2/12 sowie die Druckpegel D 5/1 bis 5/4. Zur Frischlufteinspeisung an den Druckpegeln war ein zusätzlicher Verdichter erforderlich. Auch der Frischluftvolumenstrom wurde computerunterstützt gesteuert.

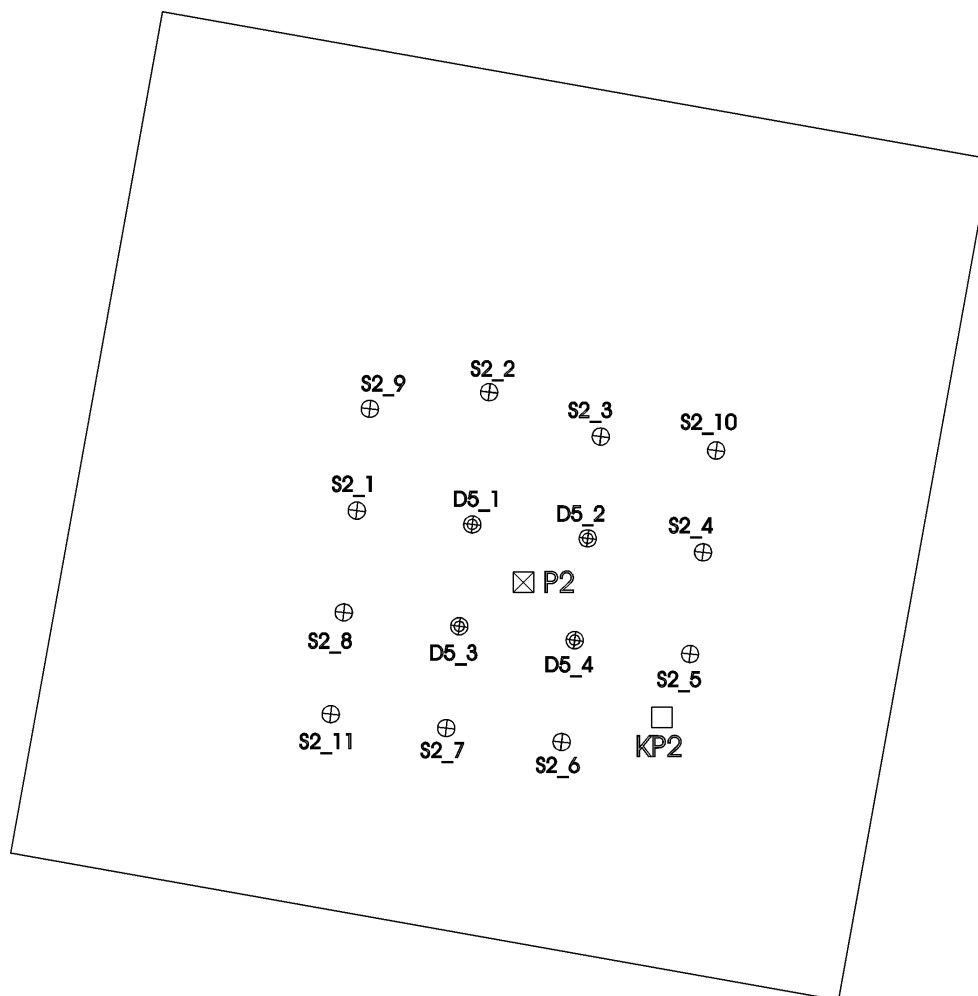


Abb. 2: Lage der Bohrungen im Becken 2

3.2 Versuchsdurchführung

Vom 17.02. - 09.04.97 wurde das Versuchsprogramm "Verdichtetes Absaugraster" betrieben. Folgende Varianten wurden mit den zusätzlichen Absaugbrunnen in dieser Reihenfolge durchgeführt:

- Konventionelle Absaugung aus allen Absaugpegeln oder den bisherigen Sanierungsbrunnen KP 2 und P 2 mit variablen Versuchsparametern Volumenstrom und Unterdruck (Belüftungspegel geschlossen).
- Absaugung verbunden mit passiver Belüftung und stufenweiser Veränderung des angelegten Unterdruckes (Belüftungspegel offen).
- Absaugung verbunden mit aktiver Belüftung und stufenweiser Erhöhung der Frischlufteinpeisung (Belüftungspegel druckseitig an den Seitenkanalverdichter angeschlossen)

Die Lage der Belüftungspegel war so gewählt, dass die eingepresste Luft auch tatsächlich durch die Sanierungsbrunnen erfasst und abgesaugt wurde, damit keine Schadstoffverschleppung stattfand. Um das zu verhindern, musste an den äußeren Pegeln ein permanenter Unterdruck messbar oder angelegt sein.

Nach der Einstellung der vorgegebenen Volumenstromwerte über die Massflowcontroller wurde abgewartet, bis alle Parameter (Volumenstrom, Temperatur, Unterdruck P_U , Kohlenstoffanalysator FID) konstante Werte aufwiesen. Je nach Variationsbreite dauerte dies zwischen einem Tag (bei Umstellung der Anordnung) und ca. 30 Minuten (bei Variation der Parameter). War der Unterdruck als Versuchseinstellung vorgegeben, wurde der betreffende Volumenstrom solange nachgeregelt, bis der gewünschte Unterdruck erreicht war.

Die Proben für die Laboranalyse wurden entnommen und die zugehörigen Betriebsparameter notiert. Desweiteren wurde zur Überprüfung der bisherigen Zwei-Brunnen-Sanierung bei verschiedenen Absaugvolumenströmen die Unterdrücke der geschlossenen Einzelpegel notiert. Auch Messungen zur Ergiebigkeit der Einzelpegel wurden durchgeführt.

3.3 Versuchsergebnisse

3.3.1 Darstellung der Ergebnisse

Jede Versuchsreihe mit gleichem Unterdruck pro abgesaugtem Strang wird als erzielter Gesamtvolumenstrom über dem anliegenden Unterdruck, sowie als Austragsleistung über der Absaugleistung dargestellt. Für die Einstellungen mit gleichem Absaugvolumen pro Strang bei sich frei einstellendem Unterdruck macht nur die Auftragung der Leistungen Sinn.

Der Energiebedarf dieses Verfahrens besteht nur aus der aufzubringenden Verdichterleistung für die Absaugung der Saugpegel. Sie berechnet sich bei der Absaugung aus dem anliegenden Unterdruck und der erreichten Förderleistung pro Strang und muss für alle Stränge aufsummiert werden:

$$P_{\text{Verdichter}} = \sum |p_{U,i} \cdot V_i| \quad [1 \text{ mbar} \cdot \text{m}^3/\text{h} = 0,027 \text{ W}]$$

Bei der aktiven Belüftung wird zusätzlich der Anteil der Verdichterleistung zur Frischlufteinpeisung hinzuaddiert.

Eine manuelle Volumenstrommessung an jedem Einzelstrang liefert aufgrund des Rohrdurchmessers von 5 cm keine brauchbaren Werte. Deshalb werden für die Auswertung die on-line erfassten Werte der Volumenstromregelung der 3 Hauptstränge verwendet.

Der Austrag summiert sich analog als

$$\text{Austrag} = \sum C_{\text{org},i} \cdot V_i \quad [\text{ppm} \cdot \text{m}^3/\text{h}]$$

Für die Beurteilung des Austragverhaltens wirkt sich erschwerend aus, dass Anfang 1997 ein drastischer Konzentrationsrückgang der CKW-Gesamtkonzentration als Ergebnis der laufenden Bodenluftsanierung aus den Becken zu verzeichnen war. Damit lagen die parallel durchgeführten Laboranalysen an CKW und BTEX auf relativ niedrigem Konzentrationsniveau. Der FID hingegen ermittelt die Anzahl der brennbaren C-Atome und stellt somit einen Summenparameter für die ausgetragene organische Kontamination dar. Dieser Wert wurde den Austragsberechnungen zugrundegelegt.

3.3.2 Einzelmessungen

Die Messung der Unterdrücke in allen Pegeln während der Absaugung von P 2 und KP 2 zeigte, dass die bisherige Sanierung das Becken 2 vollständig erfasst hat.

Die Durchlässigkeit der neuen Saugpegel nahm während der Phase von konventioneller Absaugung und passiver Belüftung langsam ab. Im Mittel waren bei der Nachmessung um 43 % höhere anzulegende Unterdrücke erforderlich, um den Vergleichsvolumenstrom von 5 m³/h zu erreichen.

Im gleichen Zeitraum sinkt der Mittelwert der FID-Messung über alle Saugpegel um 17 % ab (von 85 nach 67 ppm). Bei dieser ungewichteten Mittelung ist die unterschiedliche Ergiebigkeit der Einzelpegel nicht berücksichtigt. Auch diese Messungen bestätigen die rückläufigen Austräge aus dem Becken 2. Die CKW-Konzentrationen lagen während des Versuches unter 25 mg/m³.

Bei gleichem angelegtem Unterdruck erreichen die Hauptsanierungsbrunnen KP 2 und P 2 zusammen mehr als 1/3 der Summe der Einzelströme, gefolgt von S 2/3, S 2/1, S 2/9, und S 2/6.

3.3.3 Vergleich zwischen volumenstrom- und unterdruckgesteuerter Absaugung

Bei der Absaugung aus einem mit Bodenluftsanierungspegeln flächig erfassten Feld stellt sich die Frage nach der effektivsten Absaugung:

- Die Absaugung aus allen Pegeln, wobei jeder Pegel mit annähernd gleichem Volumen abgesaugt wird (isochor).
- Eine Brunnenkonfiguration, bei der jeder Pegel mit dem gleichen Unterdruck angefahren wird (isobar).

Die zweite Möglichkeit ist eher die Regel, da hierfür kein weiterer technischer Aufwand erforderlich ist, die Absaugbrunnen werden einfach parallel an den Verdichter angeschlossen. Ganz exakt allerdings ist die isobare Absaugung damit nicht realisiert, da sich entsprechend der Bernoulli'schen Gleichung der Gesamtdruck aus dem statischen, dynamischen und dem hydrostatischen Anteilen zusammensetzt. Die Verluste durch den Transport der Bodenluft durch die Rohrleitung, welche sich als dynamischen Druckverlust zeigen, bewirken, dass an den Brunnenköpfen der einzelnen Pegel entsprechend der verlegten Leitungslänge verschiedene Drücke anliegen.

Für die Volumenstromsteuerung hingegen ist der Einbau von Ventilen und Volumenstrommeßvorrichtungen notwendig. Damit soll gewährleistet werden, dass jede Stelle des Feldes mit der gleichen Geschwindigkeit durchströmt wird. Im Versuch war es nur möglich, die bereits in den drei Rohrsammlern zusammengefassten Ströme isochor einzustellen. Entsprechend den Absaugwiderständen der Einzelpegel stellen sich dann unterschiedliche Teilströme ein. Da die Brunnen jedoch ringförmig zusammengefasst sind, wird zumindest aus jedem Ring das gleiche Volumen gefördert.

Die isobare Absaugung wurde realisiert, indem die Volumenströme so eingestellt wurden, dass die Unterdrücke in den drei parallel geschalteten Rohrsammlern gleich waren. Auch dies kann eine Drucksteuerung nicht perfekt nachbilden, weil sich an den Einzelpegeln aufgrund der oben besprochenen Sachverhalte unterschiedliche Drücke einstellen. Doch sind die Druckunterschiede nicht gravierend, weil die Wege von den Brunnenköpfen zu den entsprechenden Rohrsammlern relativ kurz und mit demselben HD-PE(el)-Rohr ohne Zwischenstücke ausgeführt waren. Direkt nach dem Sammelrohr des Rohrsammlers befand sich die Massenstromsteuerung.

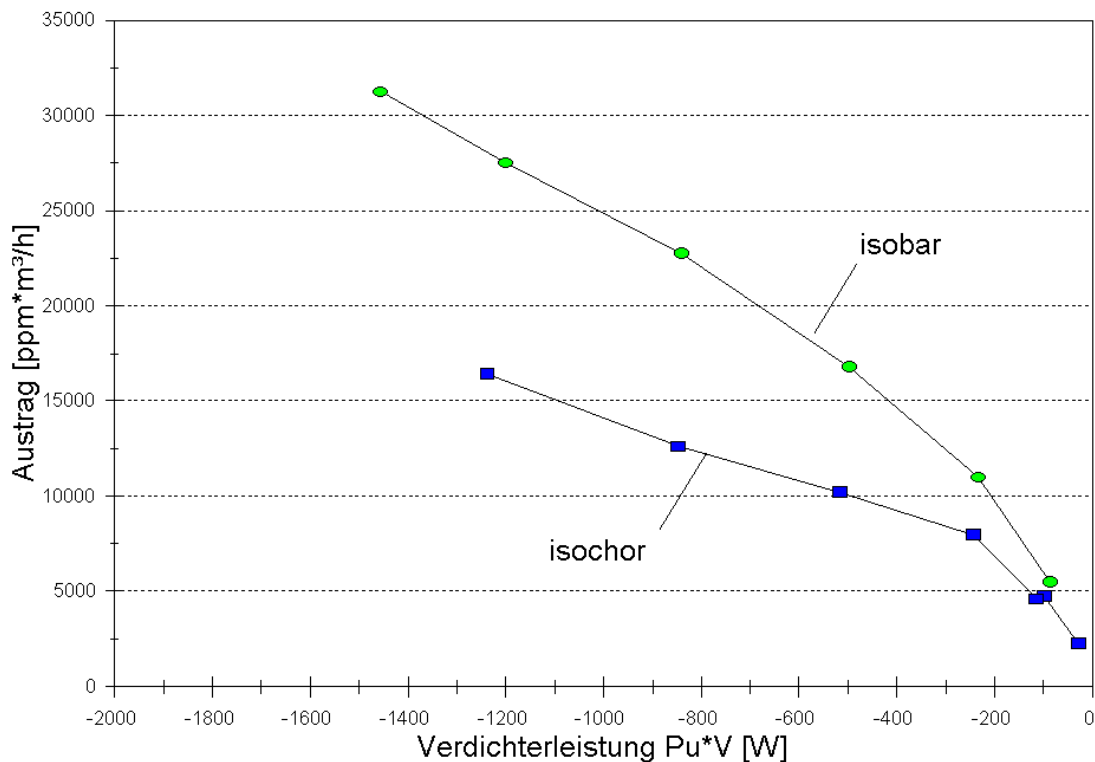


Abb. 3: Isobare und isochore Absaugung aller Pegel im Austragsdiagramm

Bei gleicher Verdichterleistung ist der Austrag bei isobarer Absaugung gegenüber isochorer Absaugung um etwa 70 % gesteigert. Offensichtlich bewirkt die "Zwangsdurchströmung" geringer durchlässiger Bereiche nur eine Erhöhung des Durchsatzes bereits erfasster Weigigkeiten.

Die nachfolgenden Versuche wurden alle bei isobarer Schaltung der 3 Hauptleitungen durchgeführt.

3.3.4 Vergleich verschiedener Absaugvarianten zwischen der Absaugung aus KP 2 und P 2 und aus allen Pegeln

Für die Absaugvarianten konventionelle Absaugung, passive und aktive Belüftung sind die Ergebnisse sowohl bei alleiniger Absaugung von KP 2 und P 2 als auch bei Absaugung aller Pegel dargestellt.

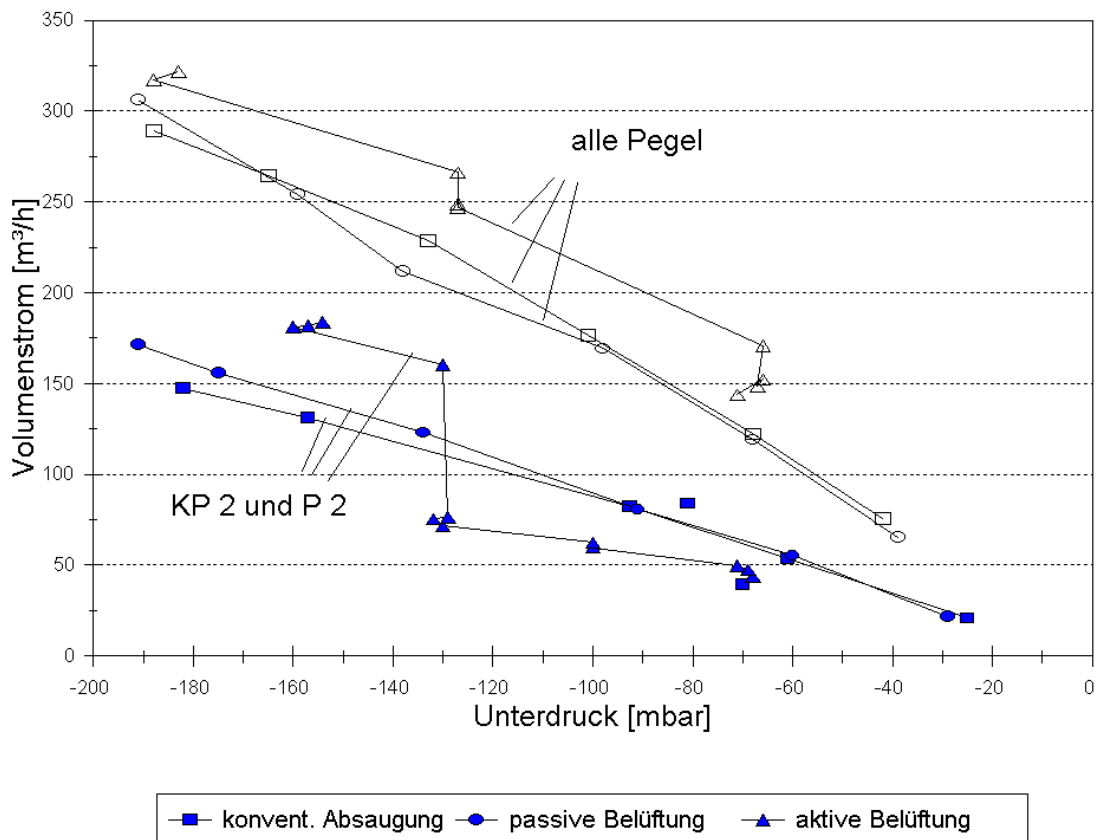


Abb. 4: Vergleich der Ergiebigkeit

Die Ergiebigkeit bei konventioneller Absaugung und passiver Belüftung hat sich durch die Erhöhung der Anzahl der Absaugpegel bei gleichem Unterdruck fast verdoppelt. Die passive Belüftung zeigt gegenüber der konventionellen Absaugung keine signifikante Erhöhung der Ergiebigkeit, bzw. die so erzielte Senkung des Absaugwiderstandes kompensiert die Zunahme des Filterwiderstandes der Einzelpegel (im betrachteten Zeitraum auf 140 % des Anfangswertes)

Die aktive Belüftung erzielte bei der alleinigen Absaugung aus KP 2 und P 2 bei der Druckstufe -130 mbar eine nachhaltige Erweiterung bestehender Absaugpfade, welche bei den nachfolgenden Versuchen erhalten blieb. Bei der Absaugung aus allen Pegeln wurde ein durch die aktive Belüftung gesteigerter Absaugvolumenstrom festgestellt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Auswirkungen der verschiedenen Absaugvarianten auf das Austragsverhalten.

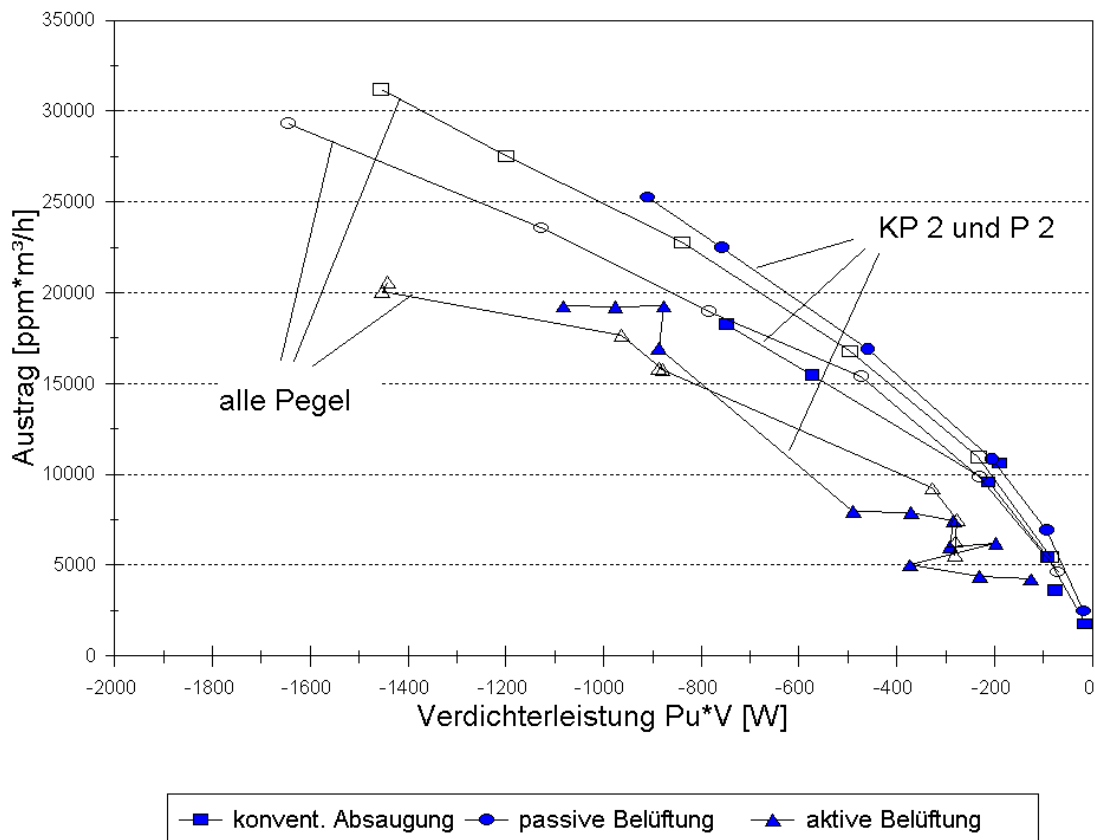


Abb. 5: Vergleich der Austräge

Bei der konventionellen Absaugung aus den 2 Hauptsanierungsbrunnen konnte am Punkt (-750 W/18.000 ppm*m³/h) trotz Erhöhung des Unterdrucks kein höherer Volumenstrom mehr erzielt werden. Durch nahezu doppelten Leistungseintrag konnte hingegen bei der konventionellen Absaugung aus allen Pegeln nahezu der 1,8-fache Austrag erzielt werden.

Bei gleicher Verdichterleistung ist die passive Absaugung von KP 2 und P 2 mindestens genauso günstig wie die konventionelle Absaugung aller Pegel. Unter Berücksichtigung, dass die FID-Werte im Vergleichszeitraum um rd. 17 % abnahmen, ist der Vorteil der passiven Belüftung von KP 2 und P 2 noch gravierender. Die zusätzliche Austragssteigerung zwischen dem Maximalwert der passiven Belüftung von KP 2 und P 2 und dem Maximum der konventionellen Absaugung aller Saugpegel beträgt bei 1,6-fachem Leistungseintrag 25 %.

Es wird deutlich, daß die aktive Belüftung bezüglich der Austragssteigerung deutlich hinter konventioneller Absaugung und passiver Belüftung zurückbleibt. Diese Variante ist energetisch zu aufwendig.

3.3.5 Auswirkungen der aktiven Belüftung

Nachdem die aktive Belüftung nicht die erwartete Austragssteigerung am Modellvorhaben erbracht hat, so hat sie dennoch eine Veränderung des Deponiekörpers bewirkt.

Dies wird am deutlichsten an der Variante "passive Belüftung" sichtbar, weil bei der passiven und der aktiven Belüftung die von der Bodenluft genutzten Wegigkeiten identisch sind. Deshalb wurde nach der aktiven Belüftung je eine Einstellung der Reihe "passive Belüftung aller Pegel" nachgefahren, indem die zuvor erzielten Volumenströme erneut eingestellt wurden.

Zuerst wurde der Druckabfall im Vergleich zu den älteren Messungen bemerkt. Um nachzuprüfen, ob die nach der aktiven Belüftung erhöhte Durchlässigkeit von Dauer war, wurden die folgenden Einstellungen im täglichen Abstand nachgefahren.

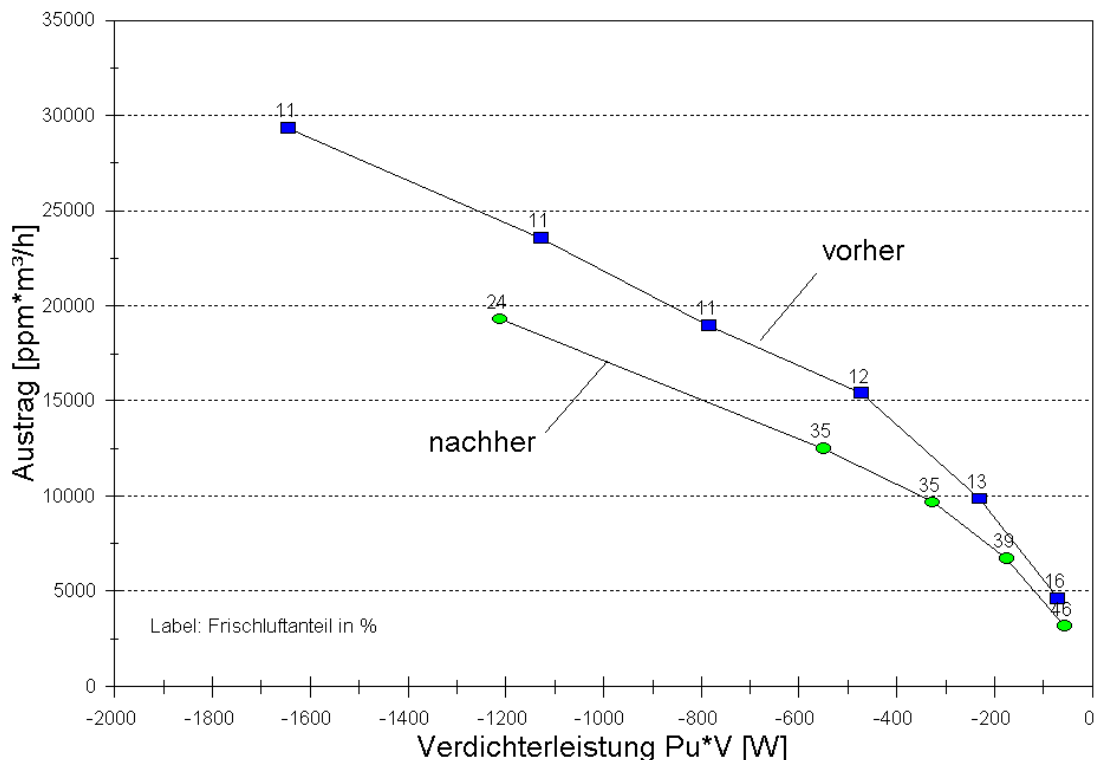


Abb. 6: Frischluftanteile der passiven Belüftung vor und nach der aktiven Belüftung

Der Frischluftanteil an der abgesaugten Bodenluft wurde berechnet, indem der sich frei einstellende, am Hauptsammler der Belüftungspegel gemessene Belüftungsvolumenstrom auf den insgesamt abgesaugten Volumenstrom bezogen wurde. Lag vor der aktiven Belüftung der Frischluftanteil bei mittleren und höheren Austrägen bei 10 - 16 %, stieg er nach der aktiven Belüftung auf bis 24 - 46 % an. Durch die vorangegangene aktive Belüftung wurden bestehende Wegigkeiten vergrößert, was sich hier bei vergleichbarem Leistungseintrag in geringeren Austrägen bemerkbar macht (Verdünnungseffekt).

Die einzelnen Punkte der Versuchsreihe „nachher“ wurden entsprechend den „vorher“ erreichten Volumenströme nachgefahren. Der sich dann einstellende Unterdruck pro Strang war niedriger als „vorher“, die korrespondierenden Einstellungen liegen nicht nur vom Austrag, sondern auch vom Leistungseintrag her niedriger.

3.4 Kostenbetrachtung

Es werden 3 Sanierungsvarianten miteinander verglichen:

- Konventionelle Absaugung aus KP 2 und P 2
- Bohrung von 4 Belüftungsbrunnen zusätzlich zu den vorhandenen 2 Sanierungspegeln
- Erhöhung der Zahl der Absaugbrunnen, betrieben als konventionelle, weitgehend isobare Absaugung

Nach der zusätzlichen Bohrung von Belüftungsbrunnen wird gemäß den Versuchsergebnissen von einer Austragssteigerung um 25 % bei gleichem Leistungseintrag ausgegangen, der Erhöhung der Zahl der Absaugbrunnen wird eine 1,8-fache Austragssteigerung bei doppeltem Leistungseintrag zugrundegelegt. Die Austragssteigerung macht sich als Verkürzung der Sanierungszeit bemerkbar, wie die folgende Abbildung zeigt.

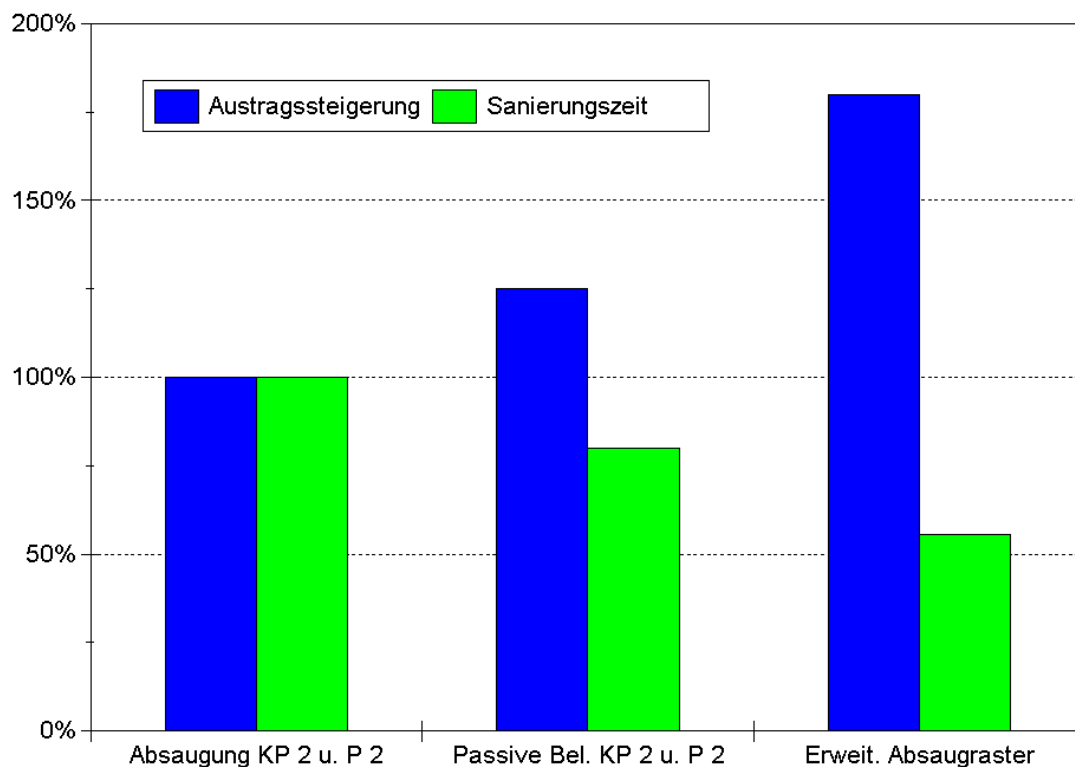


Abb. 7: Erhöhung des Schadstoffaustrages bzw. Verkürzung der Sanierungsdauer im Vergleich der Absaugvarianten

Die Kostenermittlung erfolgte unter folgenden Voraussetzungen

- Es sollen 50 kg CKW abgereinigt werden. Hierzu benötigt die konventionelle Absaugung aus KP 2 und P 2 ca. 15 Monate, die anderen Varianten entsprechend (s.o.) weniger.
- Das Becken beinhaltet ca. 3500 m³ Boden und Abfallmaterial
- Alle Bodenluftpegel sind als 4"-Pegel ausgebaut
- Die Abreinigung der Bodenluft erfolgt über Aktivkohle

Da die Versuche im Endstadium der Sanierung durchgeführt wurden, welches durch niedrige Konzentrationen gekennzeichnet ist, wird von einer Abreinigung über Aktivkohle ausgegangen. Ein Abreinigungsverfahren mit steigendem Betriebskostenanteil bei sinkender Fracht wie katalytische oder thermische Oxidation sind in dieser Phase nicht empfehlenswert.

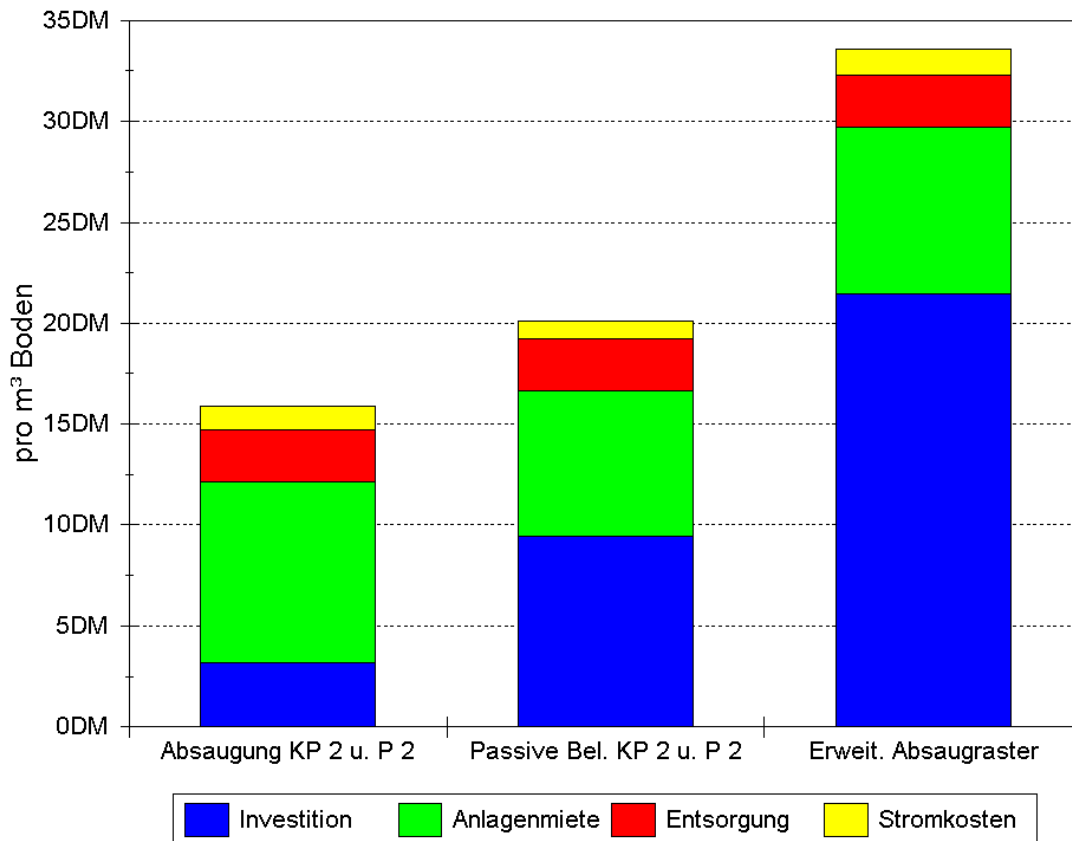


Abb. 8: Zusammensetzung der Kosten beim Vergleich dreier Absaugvarianten

Tendenziell ist die schnellere Sanierungsvariante auch die kostenintensivere. Die passive Belüftung ist in diesem Beispiel nur wenig teurer als die konventionelle Sanierung.

Je nach Größe des Standortes, gewähltem Absaugverfahren und Auslegung der evtl. vorhandenen Abreinigungsanlage kann sich die Kostensituation anders darstellen, insbesondere bei betriebskostenintensiven Verfahren kann der Zeitvorteil sich stärker in der Kostensparnis bemerkbar machen.

4. Geodesorb-Verfahren

4.1 Versuchsaufbau

Die Versuchsfelder von Geodesorb- und HF-Verfahren wurden im ursprünglich am stärksten mit CKW und flüchtigen Kohlenwasserstoffverbindungen verunreinigten Becken 1 angelegt. Um den zentral im Becken gelegenen Bodenluftabsaugpegel P 1 wurde das HF-Verfahren installiert, der in der inneren Ecke des Beckens befindliche Absaugpegel KP 1 bildete den Mittelpunkt des Geodesorb-Feldes. Das jeweils nicht am Versuch beteiligte Feld wurde zu Referenzmessungen herangezogen.

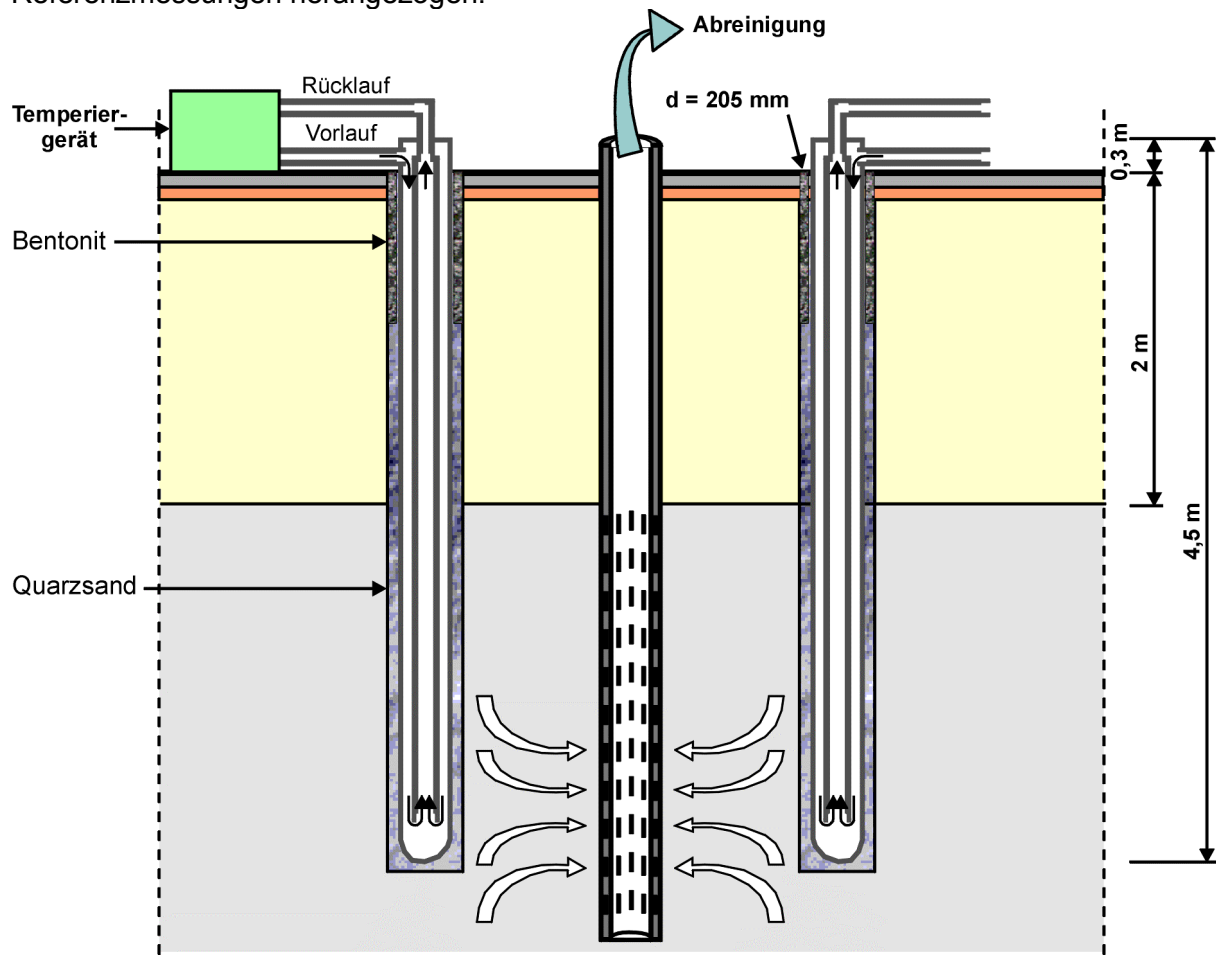


Abb. 9: Schnitt durch eine Heizlanze

Die Wärmeübertragung in den Boden erfolgt durch Wärmeleitung. Ein flüssiges Medium gibt über die Oberfläche eines Doppelmantelrohres, welches als Lanze in den Untergrund eingebaut wird, seine thermische Energie an den Boden ab.

Um zu verhindern, dass durch die mögliche Austrocknung des Ringraumes, d.h. Trocknungsschwund des Bodens/Abfallmaterials, der für die Wärmeleitung wichtige Kontakt zum erwärmten Medium verlorengeht, wurden die Lanzen in ein trockenes Sandbett eingebaut. Das Bohrloch wurde mit einem Schneckenbohrgerät etwas größer im Durchmesser als die Lanze ausgebohrt, danach die Lanze hineingestellt und der Ringraum mit Sand aufgefüllt. Zur Verhinderung von Kurzschlußabsaugungen wurde gegen die Lehmaddeckung mit Bentonit abgedichtet.

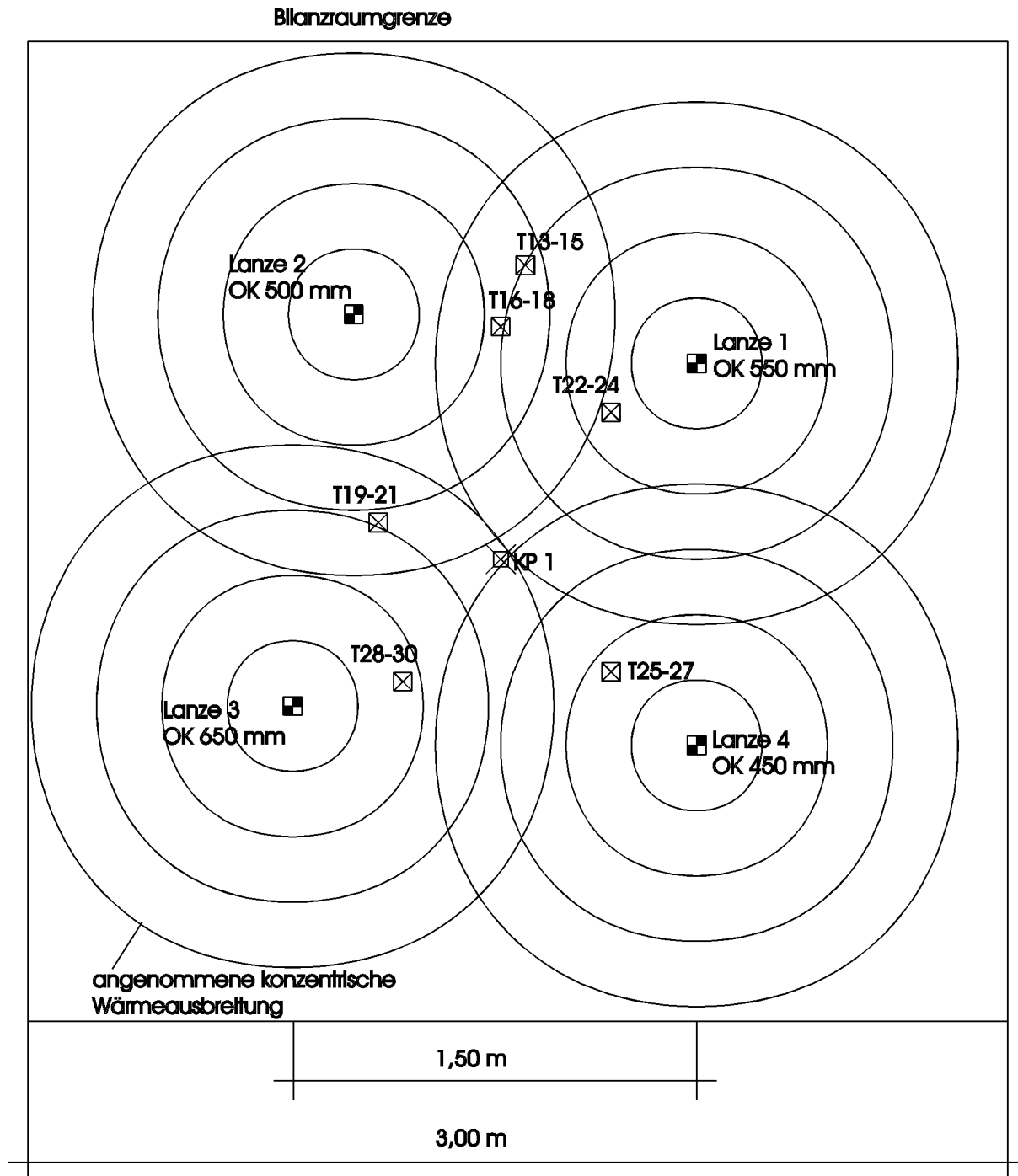


Abb. 10: Anordnung der Lanzen und Temperatursonden, angenommene Temperaturprofile und Bilanzraum

Es wurden 4 Lanzen zu je 4,5 m Länge im Abstand von 1,5 m um den Bodenluftabsaugpegel KP 1 niedergebracht. Weiterhin wurden in verschiedenen Abständen zum Absaugpegel, welcher den Mittelpunkt des Versuchsfeldes darstellt, sechs Temperatursonden eingebracht. In je drei verschiedenen Tiefen, nämlich in 2 m, in 2,8 m und in 4 m erfassen Pt-100-Meßfühler die Bodentemperatur.

Für das in den Lanzen zirkulierende Heizmedium wurde überhitztes Wasser bei 3 bar Überdruck verwendet. Ein unmittelbar neben dem Versuchsfeld in einem Container stehendes Temperiergerät der Fa. GWK erwärmt das Wasser elektrisch und wälzt es um (Mittelwert 2,9 m³/h). Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf betrug im Schnitt etwa 1,9 K ($T_{\text{Vor}} = 125,8 \text{ °C}$; $T_{\text{Rück}} = 123,9 \text{ °C}$).

4.2 Versuchsdurchführung

Das Geodesorb-Verfahren wurde vom 16.04. - 22.05.97 betrieben.

Eine Gefahr bei punktueller Erwärmung des Bodens stellt die mögliche Bildung sogenannter Kondensationsfronten dar. In der Draufsicht ist eine Heizlanze als punktförmige Wärmequelle anzusehen. In ihrer unmittelbaren Umgebung verdampfen Wasser und Kontaminanten, gelangen durch Diffusion in kältere, weiter von der Lanze entferntere Zonen und kondensieren dort wieder aus. Die Ausbildung regelrechter Fronten könnte zu einem Absickern von Schadstoffen in den tieferen Untergrund oder zum Verblocken des Absaugpegels durch Kapillarverschluß führen.

Deshalb beschloss man, trotz erhöhter konvektiver Wärmeverluste die Absaugung kontinuierlich weiterzubetreiben. Damit wurden die erwärmten Zonen in Richtung auf den Absaugpegel durchströmt und evtl. auskondensierende Schadstoffe durch die nachgeförderte, die Erwärmungszone passierende Bodenluft wieder aufgenommen. Die Volumenströme wurden an den Absaugpegeln KP 1 und P 1 (Referenz) jeweils zeitgleich auf denselben Wert eingeregelt.

Die zur Überwachung der Bodentemperatur installierten Widerstandsthermometer um die beiden Pegel (Versuchsfelder) wurden zweimal täglich, in der darauffolgenden Abkühlphase einmal täglich gemessen und protokolliert. Der elektrische Energieverbrauch der Verfahren wurde durch Ablesung des Zwischenzählers zweimal am Tag festgehalten.

4.3 Versuchsergebnisse

4.3.1 Temperaturverlauf von Boden und Bodenluft

Die Temperaturverläufe zeigten in verschiedenen Tiefen eine weitestgehende Ähnlichkeit, so dass die Erwärmung vermutlich nicht nur innerhalb des durch die Temperatursonden erfassten Gebietes stattfand, sondern das Temperaturprofil sich noch weiter fortsetzte. So wurde für die Bestimmung der erwärmten Kubatur bzw. für die Festlegung des Bilanzraumes von einer konzentrischen Ausbildung des Temperaturprofils über die gesamte Länge der Lanzen ausgegangen. Die außerhalb des von den Heizlanzen gebildeten Quadrates liegenden Meßstellen T 13 - 15 zeigten erwartungsgemäß die niedrigsten Werte an.

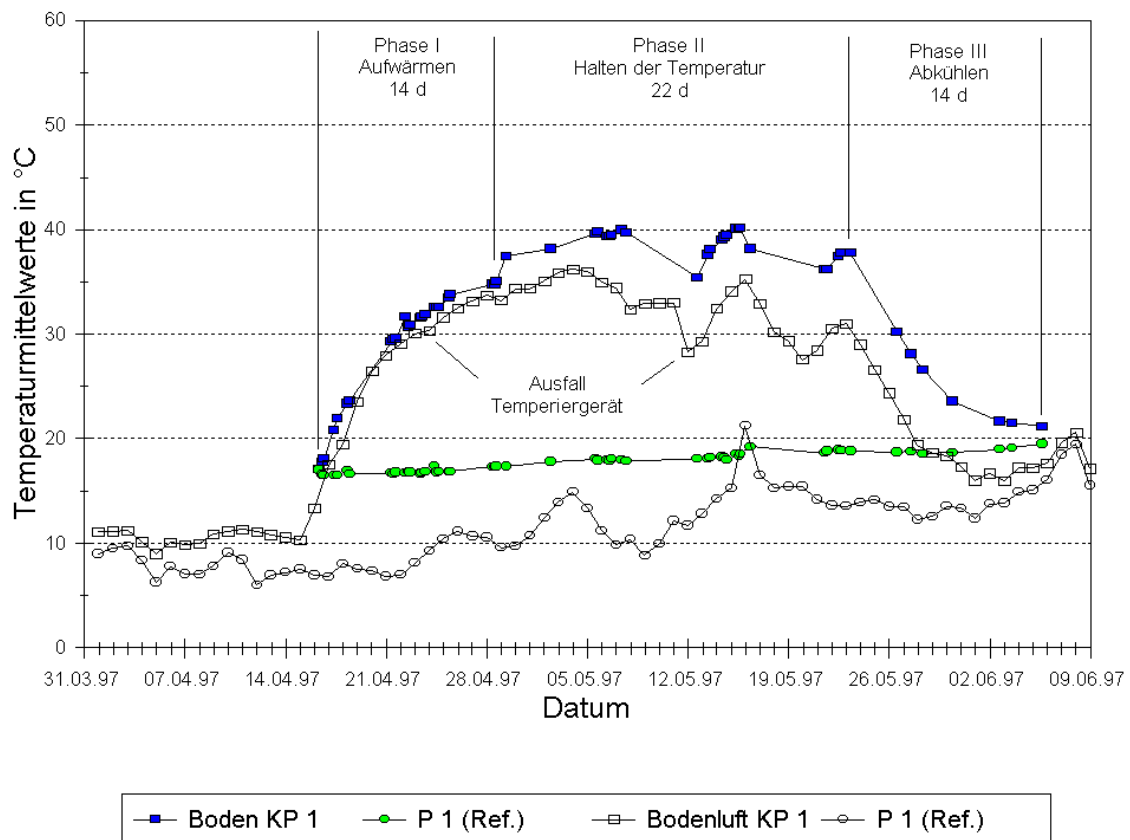


Abb. 11: Gemittelte Bodentemperaturen und Tagesmittelwerte der abgesaugten Bodenluft

Anhand der gemittelten Bodentemperaturen können 3 Phasen unterschieden werden:

- 16.04. - 30. 04.97 Phase I: Erwärmung des Bodenkörpers
- 01.05. - 22.05.97 Phase II: Halten der erreichten Temperatur
- 23.05. - 06.06.97 Phase III: Abkühlphase bei ausgeschaltetem Temperiergerät und fortgesetzter Absaugung

Es wurde eine maximale mittlere Bodentemperatur von 40 °C nach drei Wochen gegen eine Temperaturdifferenz von 20 K (Referenzfeld P 1) erreicht. Die Bodenlufttemperatur unterschied sich in der Aufwärmphase nur um 1 - 3 K von der gemittelten Bodentemperatur. In der Aufheizphase stieg sie steil an, um dann etwas flacher der Maximaltemperatur von 37 °C (gegen eine Temperaturdifferenz von etwa 23 K) zuzustreben, und nahm dann unregelmäßig (bedingt durch den von Störungen unterbrochenen Versuchsbetrieb) schwach ab. Die Referenzmeßstellen weisen einen schwachen Anstieg um etwa 3 K bei der gemittelten Bodentemperatur und um ca. 7 K bei der Bodenlufttemperatur auf.

Am 23.05.97 wurde das Temperiergerät abgeschaltet. Das Versuchsfeld kühlte relativ rasch, innerhalb von 14 Tagen, aus.

4.3.2 Verlauf von Volumenstrom, Unterdruck und C_{Org} -Gehalten der abgesaugten Bodenluft

Bis zum 30.04.1997 wurde der eingestellte Volumenstrom von 70 Nm³/h an beiden Sanierungspegeln ohne Unterbrechung gehalten. In dieser Zeit ist eine Abnahme des Unterdruckes von 30 auf etwa 20 mbar festzustellen, die von einer zunehmenden Durchlässigkeit des Deponiekörpers herrühren könnte. Durch den Wasserdampfaustrag der abgesaugten Bodenluft werden Porenräume frei. Die Feuchtemessung in der abgesaugten Bodenluft ergaben eine nahezu vollständige (94 - 96 %) Sättigung mit Wasserdampf.

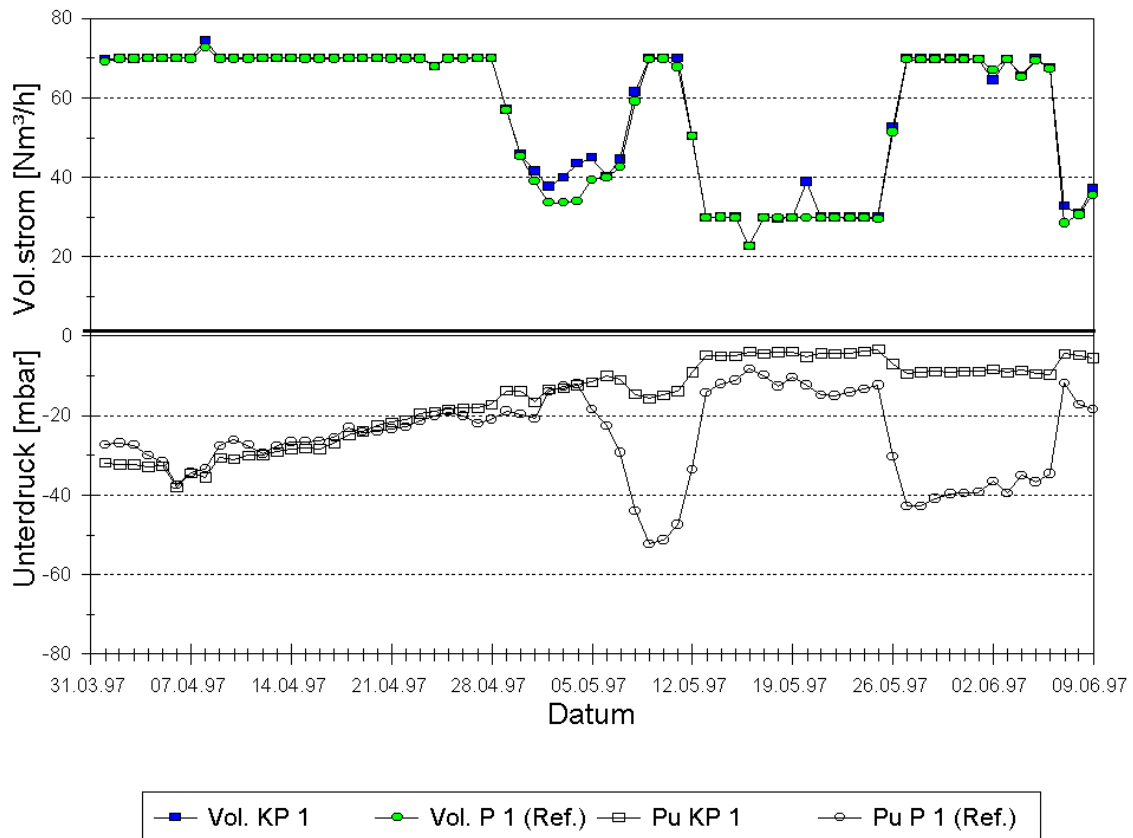


Abb. 12: Abgesaugter Volumenstrom in KP 1 und P 1 (Referenz)

Der Absaugbrunnen P 1 hat auf die Wiederanhebung des Volumenstroms nach den Anlagenausfällen bzw. in der Abkühlphase mit einem deutlichen Anstieg des Unterdrucks reagiert, der nicht mehr auf die ursprünglichen Werte zurückging.

Die C_{Org} -Gehalte der Bodenluft stiegen mit der Boden- bzw. Bodenlufttemperatur an.

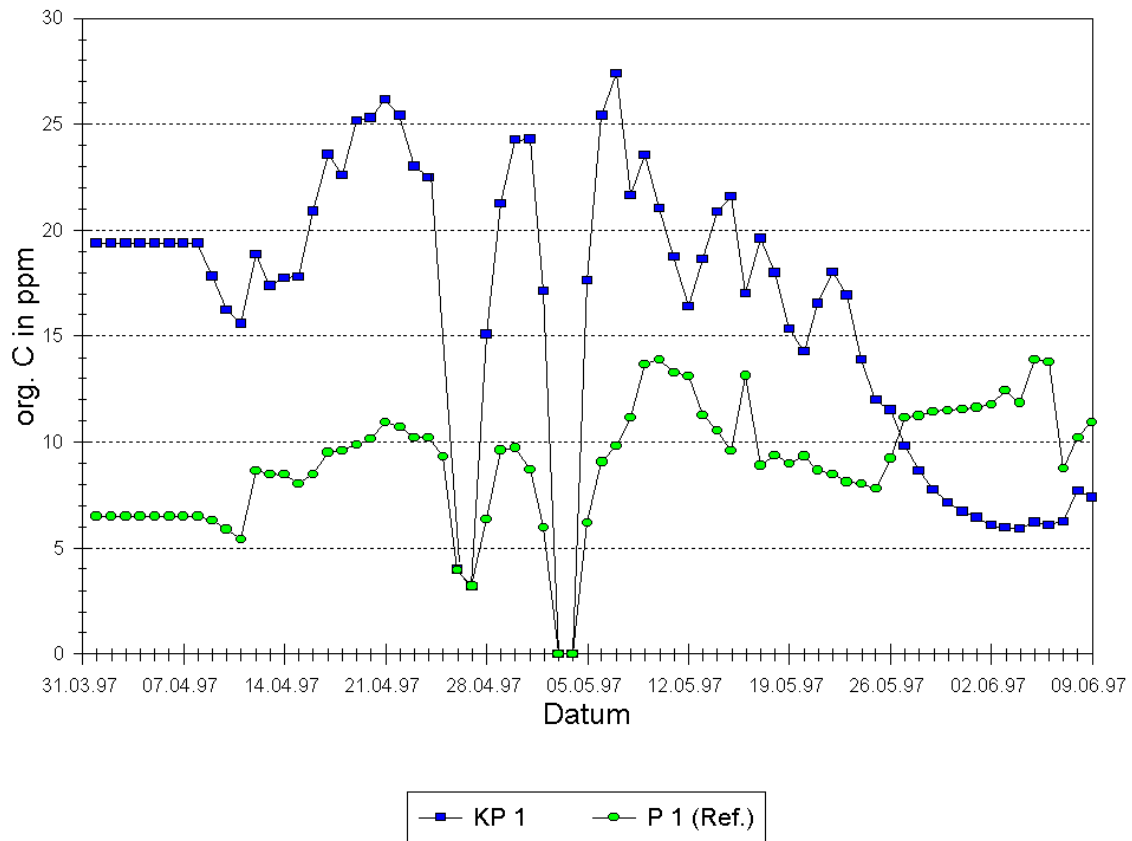


Abb. 13: C_{org} -Werte der Bodenluft aus den Absaugpegeln KP 1 und P 1 (Referenz)

Im Versuchsverlauf stiegen die FID-Werte in der Bodenluft aus dem Absaugpegel KP 1 von 19 auf bis zu 28 ppm. Die noch mobilisierten Schadstoffe stammten aus weitestgehend ausgetrockneten Bereichen, in denen die Adsorption an die Bodenpartikel die überwiegende Bindungsart darstellt. Durch die Temperaturerhöhung des Bodens fand eine beschleunigte Desorption statt. In der Abkühlphase fiel der FID-Wert auf nur noch 5 ppm ab. Die Belastung im Boden wurde nachhaltig reduziert. Während des Versuchszeitraumes lag der FID-Referenzwert der Bodenluft aus dem Absaugpegel P 1 im Mittel bei 10 ppm und zeigte eher einen zunehmenden Trend.

5. Hochfrequenztechnologie

5.1 Versuchsaufbau

Die Anlagentechnik des Hochfrequenzversuches besteht aus folgenden Anlagenkomponenten:

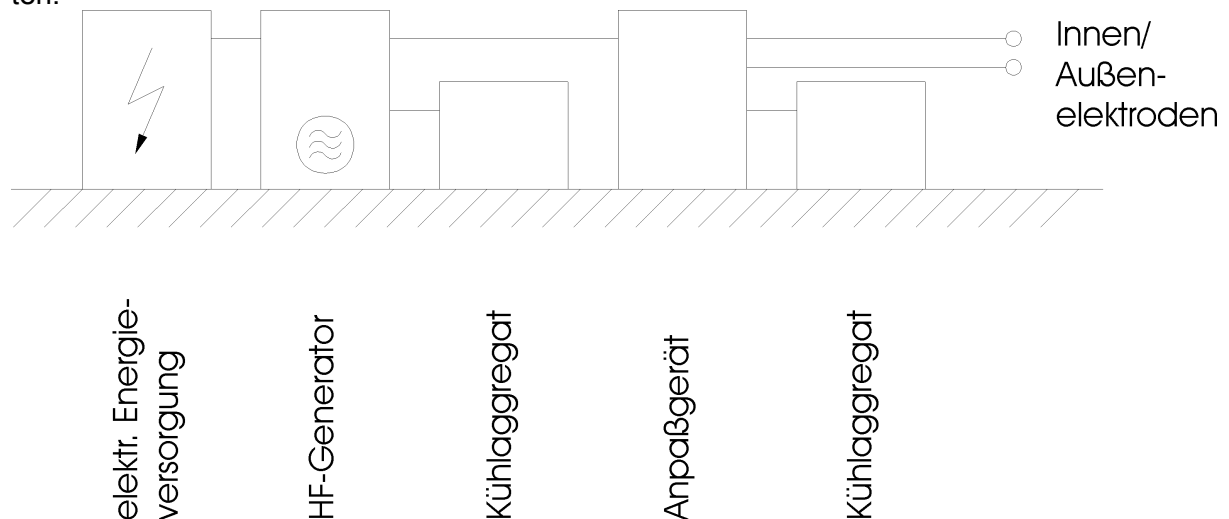


Abb. 14: Anlagenaufbau

Die aus öffentlichen 50-Hz-Elektroenergienetzen oder anderen Energieerzeugern entnommene niederfrequente Elektroenergie wird in den *Hochfrequenzgeneratoren* gleichgerichtet und Oszillatoren zugeführt. Diese schwingen auf der Frequenz von 13,56 Hz. Über Verstärkergeneratoren erfolgt die notwendige Leistungsverstärkung. Aufgrund dieses Wandlungsprinzips wird ein Großteil der eingesetzten Energie in Wärme umgewandelt. Bei den eingesetzten modernen Generatoren mit je 15 kW HF-Leistung ist deshalb eine Leistungsbereitstellung von je 28 kW erforderlich. Es entstehen somit ca. 13 kW Wärmeleistung, die von zwei *Kühlaggregaten* (Kühlwasserkreislauf, je 4 kW) abgeführt werden muss.

Über Koaxialkabel gelangt die HF-Energie zur Leistungsanpassung. Die *Matchboxen* passen die komplexe Impedanz des Elektroden-/ Bodensystems durch Kombination entsprechend dimensionierter induktiver und kapazitiver Bauelemente an den realen 50- Ω -Ausgang des HF-Generators an. Hohe Last- und Blindströme von bis zu 100 A erzeugen in den Matchboxen Wärme. Um eine thermische Zerstörung der Bauelemente zu verhindern, müssen kontinuierlich ca. 2 kW Wärmeenergie abgeführt werden. Bei einem Leistungsumsatz von ca. 15 kW HF-Energie ergibt sich ein Wirkungsgrad von 87 %. Die externe Steuerung der Matchboxen erfolgt über Lichtwellenleiter-Kabel.

Der Eintrag der Energie in das zu erwärmende Bodenvolumen wird durch ein speziell gestaltetes Elektrodenystem verwirklicht. Dazu werden verzinkte Stahlrohre mit einer Länge von 5 m verwendet. Die Elektroden haben folgenden Aufbau:

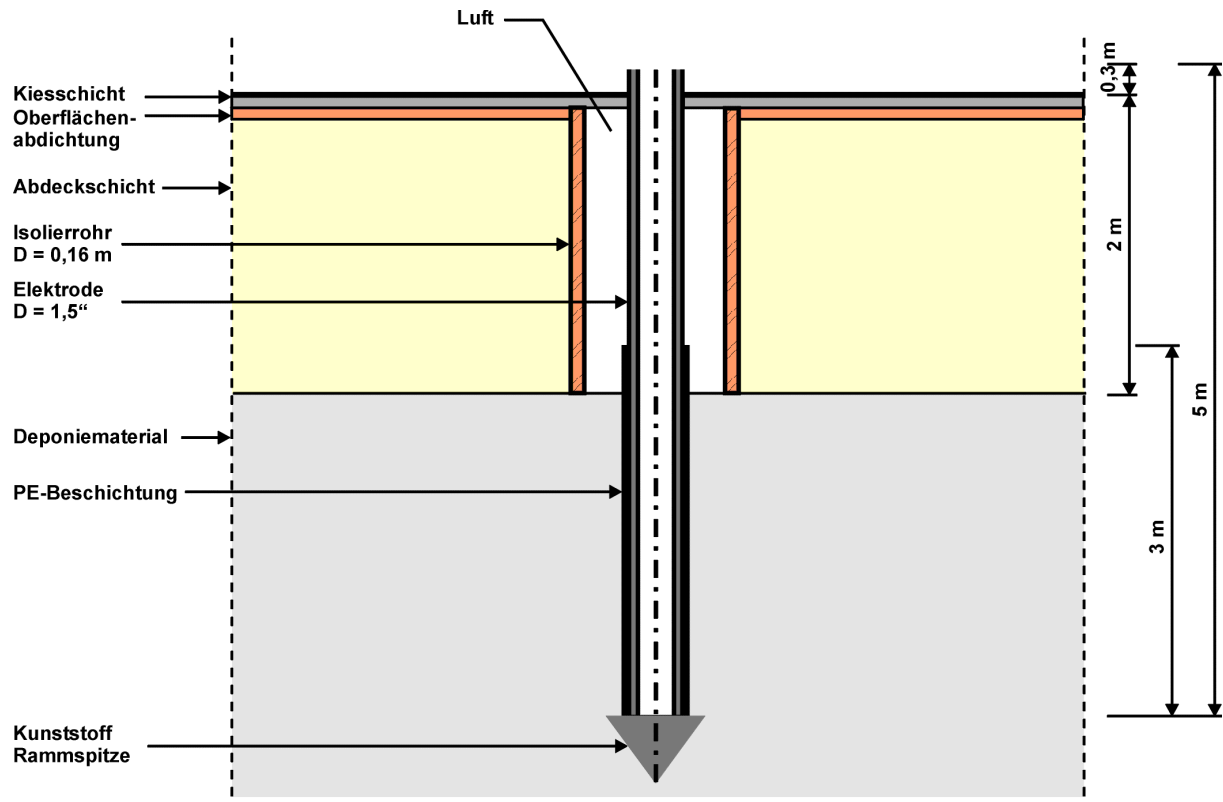
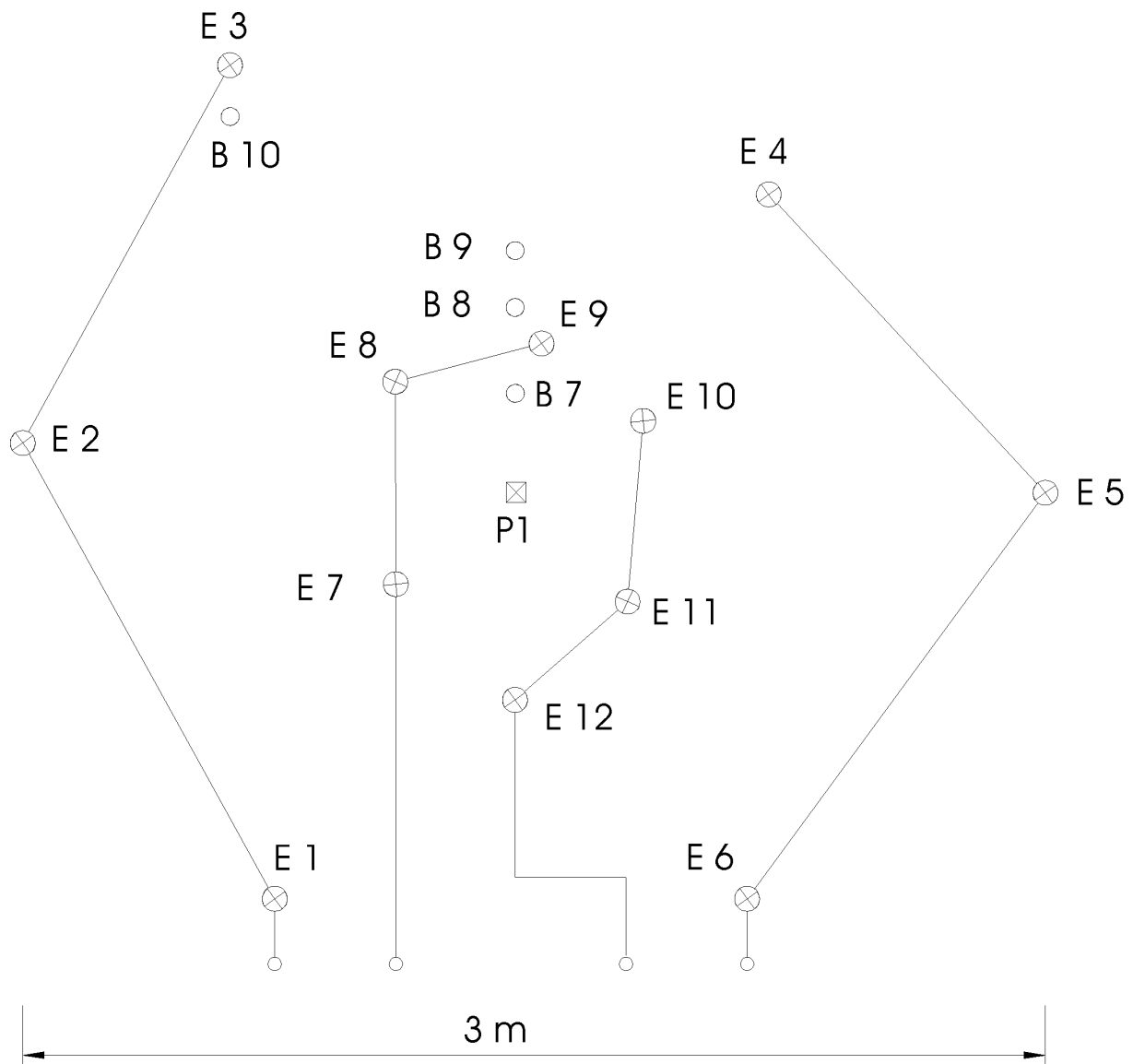


Abb. 15: Gestaltung der Elektroden

Die Kunststoff-Rammspitze dient zum Schutz der 3 mm starken PE-Rohrbeschichtung beim Rammvorgang. Die isolierende PE-Rohrbeschichtung soll einen gleichmäßigen Energieeintrag über die gesamte Rohrlänge in 2 bis 5 m Tiefe sicherstellen. In der Deponielehmabdeckung bis 2 m Tiefe wird ein Isolierrohr mit $D = 0,16\text{ m}$ eingebracht, um durch Luftisolation zu gewährleisten, dass in diesem Bereich keine Energie eingetragen wird.

Das HF-Versuchsfeld besteht aus 12 um den Absaugpegel P 1 ringförmig angeordneten Elektroden.



LEGENDE

- ⊗ E 1-12: HF-Elektroden
- B 7-10: Temperaturmeßstellen
- ⊠ P 1: Absaugpegel P 1

Abb. 16: Lage der Elektroden und Meßstellen im HF-Vesuchsfeld (Abstandsangaben in m)

Jeweils 3 Elektroden des Außen- bzw. Innenkreises sind mit Kupferbändern miteinander verbunden, so dass sie einen Kondensator bilden. Am Rand des HF-Feldabschnitts 1 liegen die Temperaturmessstellen B 7 und B 10 mit Widerstandsthermometern in 4 m und 6 m Tiefe sowie die Messstellen B 8 und B 9 mit Sensoren in 2, 4, 5 und 5,2 m Tiefe.

5.2 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde zur besseren Vergleichbarkeit mit den Volumenstromereinstellungen des Geodesorb-Versuchs durchgeführt. Auch die Protokollierung erfolgte nach demselben Schema.

Während der Versuchsphase zwischen dem 23.06.1997 und dem 10.08.1997 wurden verschiedene Versuchseinstellungen bezüglich des Elektrodenanschlusses gewählt:

Tabelle 1: Versuchseinstellungen

Zeitraum	HF-Feldabschnitt 1		HF-Feldabschnitt 2		Bemerkung
	Außen- elektroden	Innen- elektroden	Außen- elektroden	Innen- elektroden	
23.06. - 15.07.1997	E1 - E2 - E3	E7 - E8 - E9	E4 - E5 - E6	E10 - E11 - E12	Ausgangs- zustand
15.07. - 21.07.1997	E7 - E8 - E9	E1 - E2 - E3	E10 - E11 - E12	E4 - E5 - E6	Umpolung
21.07. - 10.08.1997	E8 - E9 - E10	E2 - E3 - E4	E11 - E12 - E7	E5 - E6 - E1	Versetzen um eine E- lektrode

Nach dem 26.06.1997 kam es immer wieder zu zeitweiligen Ausfällen der Generatoren 1 bzw. 2. Vom 05.07. - 07.07.1997 fiel die HF-Anlage aufgrund eines Stromausfalles an der Gesamtanlage aus. Auch nach dem 16.07.1997 gab es immer wieder Ausfälle der Generatoren aufgrund von Übertemperatur bzw. Defekten im Anpassgerät 1. Die Generatoren wurden fast täglich zur Nachmittagszeit ausgeschaltet, weil das Kühlsystem aufgrund der hohen Umgebungstemperaturen nicht mehr ausreichte. Ab dem 04.08.1997 wurden beide Generatoren wieder betrieben.

5.3 Versuchsergebnisse

5.3.1 Temperaturverlauf von Boden und Bodenluft

Stellvertretend für die anderen Messstellen werden die Temperaturverläufe der Messstelle B 9 diskutiert. Diese Messstelle liegt in deutlicher Entfernung von Innen- und Außenelektroden und zeigt deshalb keine ausgeprägte Abhängigkeit von den zahlreichen Unterbrechungen des Energieeintrages durch Anlagenausfälle.

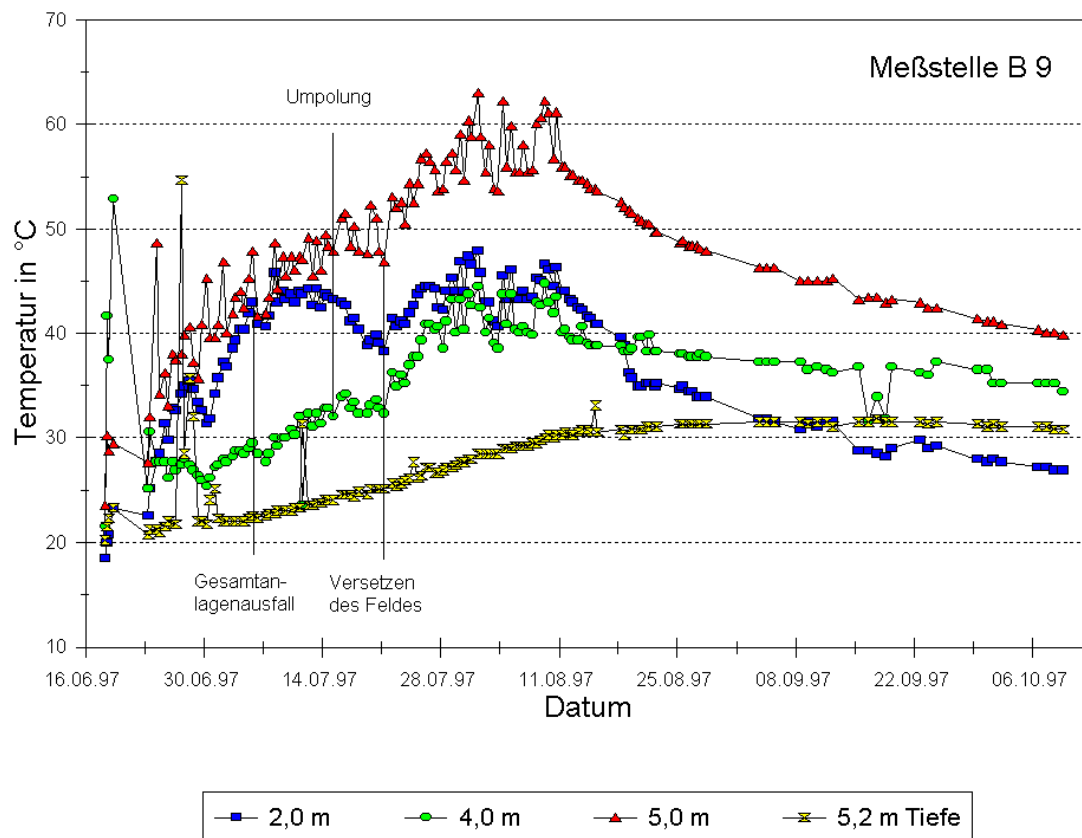


Abb. 17: Bodentemperatur Messstelle B 9 (Lage in der Nähe einer Innenelektrode)

Die höchsten Temperaturen wurden an allen Messstellen in der Tiefe von 5 m erreicht (~ 60 °C). Die niedrigsten Temperaturen wurden in 5,2 m gemessen.

Am empfindlichsten auf Veränderungen der Versuchskonfiguration oder auf Anlagenausfälle reagierten die Messstellen in 2 m Tiefe, direkt unter der Lehmabdeckung der Deponie. Die Elektrodenumpolung zeigt sich in diesem Tiefenhorizont als deutlicher Temperaturabfall an den Messstellen B 7, 8 und 9, die sich alle in der Nähe einer Innenelektrode befinden, an der Messstelle B 10 (nicht abgebildet) neben einer Außenelektrode hingegen erhöhten sich die Werte (tiefengemittelt) von 30 °C auf 55 °C innerhalb von 2 Tagen. Das Weiterversetzen des Feldes um eine Elektrode, damit die Temperaturmessstellen nicht zwischen beiden HF-Kreisen, sondern innerhalb eines Feldabschnitts lagen, brachte an den innenliegenden Messstellen einen erneuten Temperaturanstieg mit sich. Etwas abgeschwächt ist dieser Verlauf auch an den Messstellen in 4 m Tiefe zu beobachten.

Die Abbildung 18 stellt die Mittelwerte der Boden- und Bodenlufttemperaturmessungen im HF-Feld als auch der Referenzmessung um KP 1 dar.

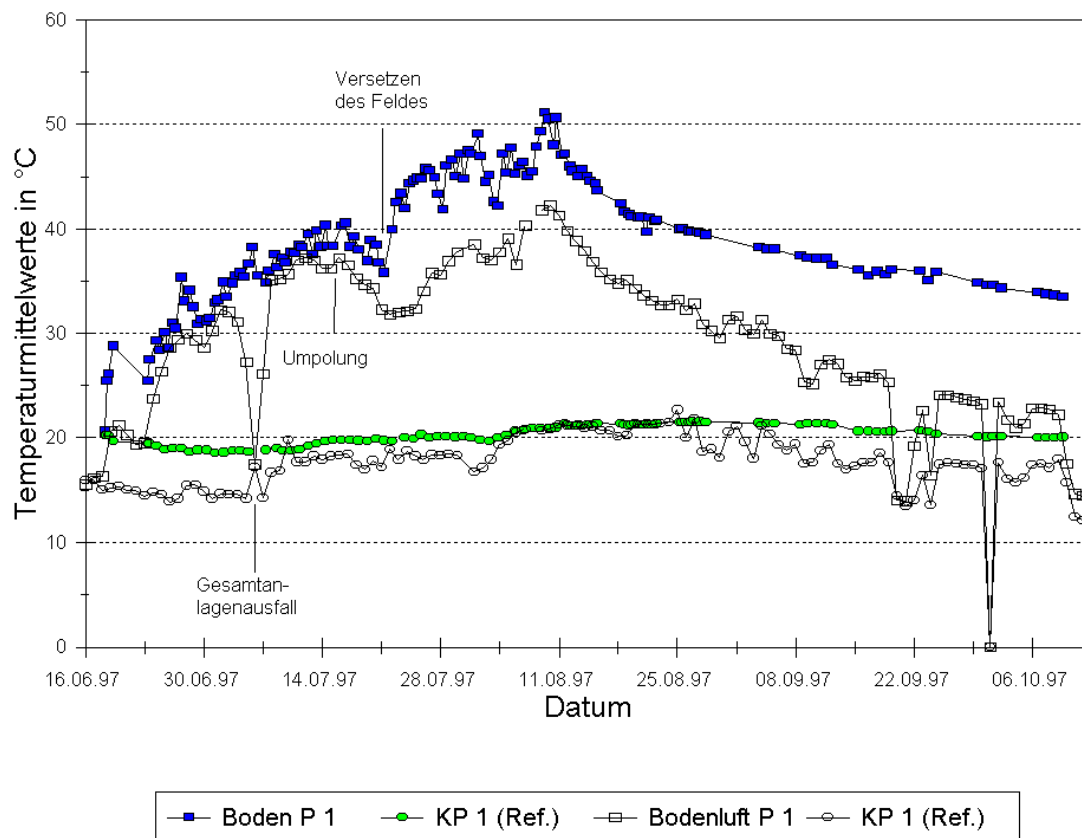


Abb. 18: Gemittelte Bodentemperaturen und Tagesmittelwerte der abgesaugten Bodenluft

Ab dem Versuchsbeginn am 24.06.1997 bis zum Versetzen des Versuchsfeldes um eine Elektrode am 21.07.1997 zeigen die mittlere Bodentemperatur und die Temperatur der Bodenluft an P 1 denselben Verlauf. Nach dieser Anlagenveränderung steigt die Bodentemperatur wesentlich schneller an als die Bodenlufttemperatur. Die maximale mittlere Bodentemperatur beträgt 51 °C und wird am Ende des Versuches erreicht. Die Abkühlkurve der Bodentemperatur verläuft sehr flach und hat zwei Monate nach Versuchsende (Mitte Oktober) noch nicht die Anfangstemperatur von ca. 20 °C erreicht. Die Maximaltemperatur des Bodenluftvolumenstromes P 1 war am 09.08.1997 mit 43 °C erreicht, die maximale Differenz zur Bodenlufttemperatur KP 1 betrug 24 K. Über die Versuchsdauer stieg die Bodenlufttemperatur am Referenzpegel KP 1 um etwa 5 K an.

5.3.2 Verlauf von Volumenstrom, Unterdruck und C_{Org} -Gehalten der abgesaugten Bodenluft

Die Abbildung 19 stellt den Verlauf von Durchfluß und Unterdruck am Absaugpegel P 1 sowie dem Referenzpegel KP 1 dar

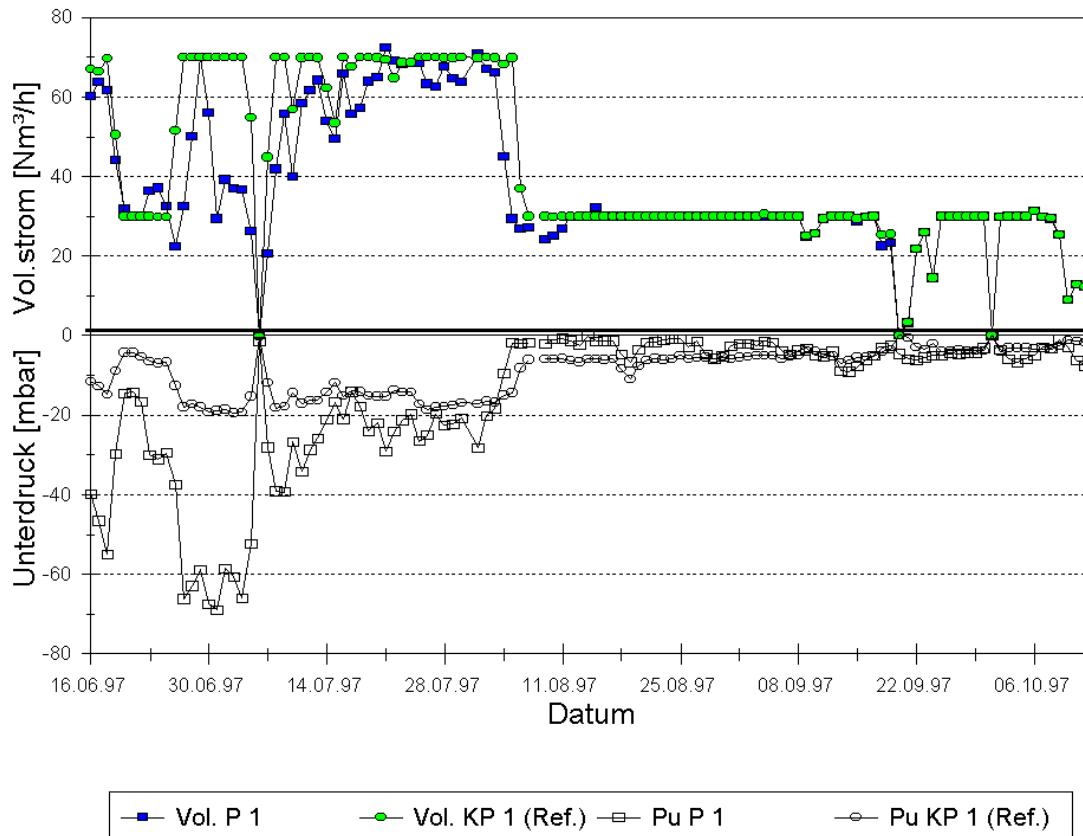


Abb. 19: Volumenstrom und Unterdruck an den Absaugpegeln P 1 und KP 1 (Referenz)

Während der gesamten Versuchsdauer wurden aus dem Pegel P 1 konstant $70 \text{ m}^3/\text{h}$ Depo-nieluft abgesaugt. Derselbe Volumenstrom wurde am Pegel KP 1 eingestellt. Während der Abkühlphase ab dem 11.08.1997 wurden die Volumenströme auf $30 \text{ m}^3/\text{h}$ reduziert. Diese Einstellung der Durchflüsse entspricht zur besseren Vergleichbarkeit weitestgehend den Einstellungen während des Geodesorb-Versuches.

Nach dem Heraufsetzen des Volumenstroms zu Versuchsbeginn steigt der Unterdruck am Absaugpegel P 1 bis auf 70 mbar an, weshalb der eingestellte Volumenstrom bei rückläufigem Unterdruck erst nach etwa 4 Wochen erreicht wurde. Der deutliche Anstieg des Unterdrucks (allerdings nur auf max. 50 mbar) nach Volumenstromanhebungen am P 1 entspricht den Erfahrungen im Geodesorb-Versuch. Durch die starke Bodenerwärmung ist es beim HF-Versuch allmählich zur Austrocknung und somit zur Erhöhung der Luftdurchlässigkeit im Untergrund gekommen. Dies erklärt den allmählichen Rückgang des Unterdrucks auf Werte, die dem Referenzpegel KP 1 entsprechen (ca. 20 mbar bei $70 \text{ m}^3/\text{h}$).

Die Messergebnisse des Kohlenwasserstoffanalysators sind in der Abbildung 20 dargestellt.

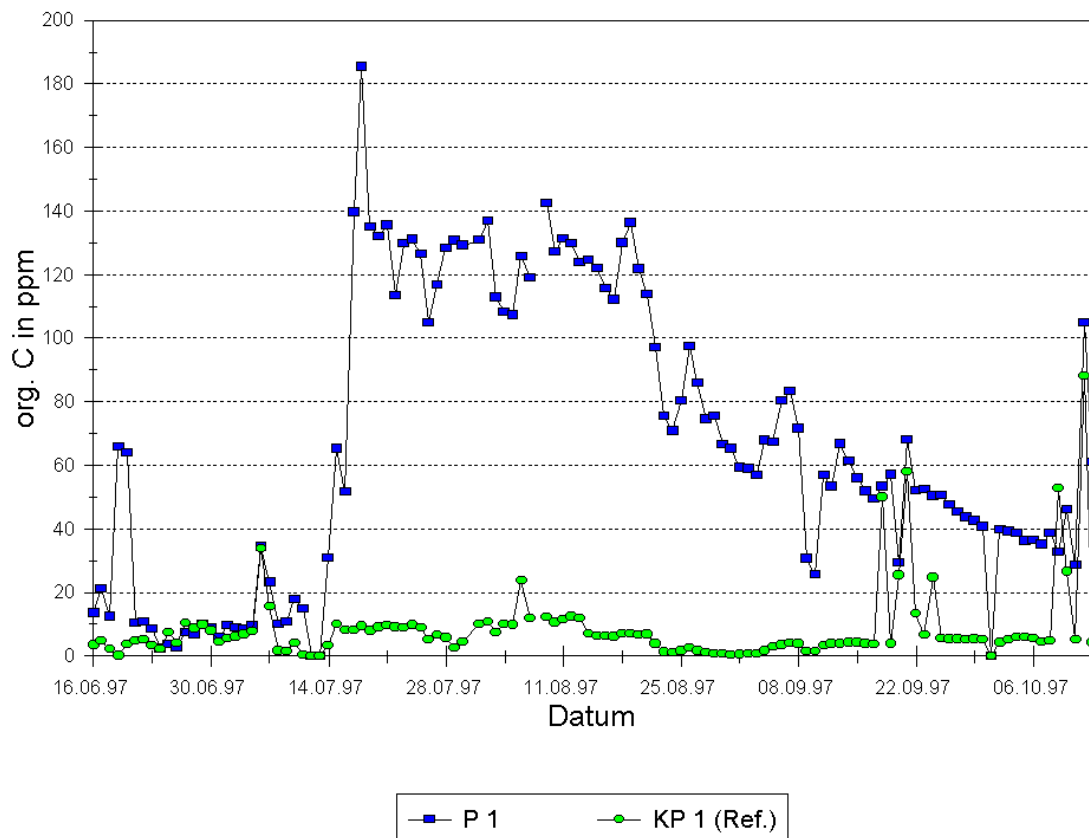


Abb. 20: C_{org} -Werte der Bodenluft aus den Absaugpegeln P 1 und KP 1 (Referenz)

Zu Beginn des Versuchs bis zum 15.07.1997 liefert der FID Meßwerte von durchschnittlich 10 ppm. Nach der Umpolung der Elektroden am 15.07.1997 steigen die Messwerte innerhalb von drei Tagen auf bis zu 185 ppm an. Die Bodenlufttemperatur liegt zu diesem Zeitpunkt bei ca. 38 °C. Die mittlere Bodentemperatur beträgt 40 °C (vgl. Abbildung 18). Kurz darauf fallen die Messwerte ab und pendeln sich für die verbleibende Versuchsphase auf ca. 125 ppm ein.

Die Messwerte an der Referenzmessstelle KP 1 liegen indessen weitestgehend konstant bei 8 ppm (Mittelwert). Die vereinzelt Peaks sind auf Kalibrierungen des Messgerätes mit Prüfgasen zurückzuführen.

Durch die starke Bodenerwärmung der äußeren Bereiche des Versuchsfeldes nach der Umpolung wurden offensichtlich Schadstoffe mobilisiert, die durch die bisherige Absaugung nicht erfasst wurden. Die Analysenergebnisse der Vorortprobenahme auf Aktivkohleröhrchen bestätigen dies. Nachdem die Bodenlufttemperatur auf über 40 °C angestiegen war, konnten bis zu 28,6 mg/m³ an C₉ und C₁₀-Aromaten sowie Spuren von Chlorbenzolen nachgewiesen werden. Als Hauptschadstoffkomponenten sind dabei n-Propylbenzol, 3- und 4-Ethyltoluol und 1,2,4-Trimethylbenzol zu nennen. In diesem Siedebereich fand die gaschromatografische Übersichtsanalyse vorher keine Substanzen. Der Gehalt an CKW lag während der Versuchsphase unverändert zwischen 0 und 40 mg/m³.

Während der Abkühlphase nach dem 10.08.1997 nimmt das FID-Signal kontinuierlich ab. Das bestätigt die Aussage, daß durch die Bodenerwärmung Schadstoffe mobilisiert wurden, die bei der bisherigen Sanierung nicht erfasst wurden.

5.4 Arbeitsschutz

5.4.1 Geltende Vorschriften und Grenzwerte

Die 26. BImSch-Verordnung über elektromagnetische Felder zum Schutz der Allgemeinheit und zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch elektromagnetische Felder gilt im Hochfrequenzbereich nur für ortsfeste Sendefunkanlagen.

Das EMV-Gesetz regelt die Bedingungen für das Inverkehrbringen, Aufstellen und Betreiben von Geräten, die elektromagnetische Störungen verursachen können oder deren Betrieb durch diese Störungen beeinträchtigt werden kann. Es hat nicht die Wirkung elektromagnetischer Felder (0 bis 300 GHz) auf den Menschen, seinen Schutz oder die Vorsorge zum Inhalt.

Für den diesbezüglichen Arbeitsschutz kommen folgende technische Regeln zur Anwendung:

- BGFE (Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik)
"Regeln für Sicherheit und Gesundheitsschutz an Arbeitsplätzen mit Exposition durch elektrische, magnetische oder elektromagnetische Felder"
- DIN VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker) 0848 Teil 1 u. 2
"Sicherheit in elektromagnetischen Feldern", Entwurf vom Okt. 1991

Die DIN VDE 0848 enthält Festlegungen für die anzuwendenden Messverfahren. Der Entwurf übernimmt die von der internationalen Strahlenschutz-Organisation IRPA vorgeschlagenen Basisgrenzwerte im Frequenzbereich von 30 kHz bis 300 GHz.

Auszugehen ist dabei von Grenzwerten für beruflich exponierte Personen und für die allgemeine Bevölkerung unter direkter Feldeinwirkung. Die aus den Basisgrenzwerten abgeleiteten zulässigen Grenzwerte sind für zwei Expositionsbereiche erfasst (siehe Tab. 2) und so festgelegt, dass selbst unter den ungünstigsten Bedingungen eine Überschreitung von Basisgrenzwerten nicht auftreten kann.

5.4.2 Messungen der Feldstärke

Die relevanten Arbeitsbereiche auf der Sonderabfalldeponie sowie der um die Deponie führende öffentliche Weg wurden in drei Bereiche eingeteilt mit je drei Messpositionen bzw. Messstrecken zur Bestimmung der elektrischen und der magnetischen Feldstärke. Die folgende Abbildung 21 zeigt den Lageplan des Geländes mit der Kennzeichnung der Messpositionen sowie der Schutzbereiche S, K und Ü.

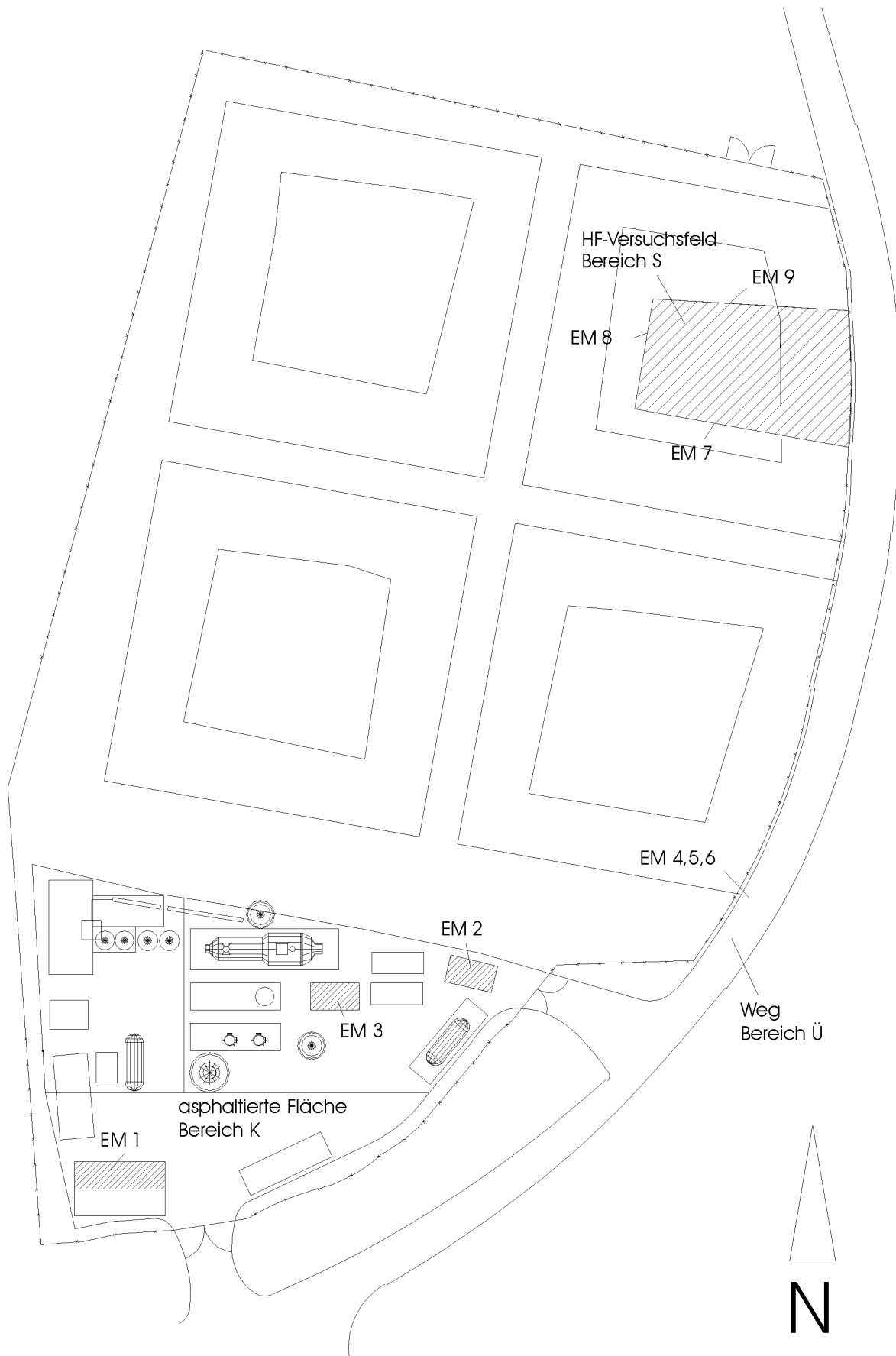


Abb. 21: Lageplan Arbeitsschutzzonen

Während des Versuchszeitraumes, in dem die HF-Generatoren in Betrieb waren und sich elektromagnetische Felder bildeten, erfolgte eine Feldstärkebestimmung pro Tag. Zur Messung des elektrischen Feldes wurde der Strahlungsmonitor Typ EMR-11 und zur Bestimmung des Magnetfeldes das Gerät EMR-10 der Fa. Wandel & Goltermann GmbH & Co. eingesetzt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Feldstärkenmessungen (Zusammenfassung)

Bereich	Meß- stelle	Elektrische Feldstärke V/m			magnetische Feldstärke A/m		
		Durch- schnitts- wert ²⁾	Maximal- wert	Grenz- wert ¹⁾	Durch- schnitts- wert ²⁾	Maximal- wert	Grenz- wert ¹⁾
K (Expo-1)	EM 1	1,03	3,86	61,4	0,0058	0,0207	0,36
K	EM 2	17,05	40,91	61,4	0,0212	0,0428	0,36
K	EM 3	1,48	3,02	61,4	0,0047	0,0272	0,36
Ü (Expo-2)	EM 4	6,00	10,61	27,5	0,0053	0,0088	0,16
Ü	EM 5	4,95	7,55	27,5	0,0092	0,0130	0,16
Ü	EM 6	14,56	20,16	27,5	0,0334	0,0871	0,16
S (Sperrber.)	EM 7	96,88	140,6	-	0,1795	0,2781	-
S	EM 8	36,79	50,77	-	0,0720	0,1185	-
S	EM 9	34,02	62,00	-	0,0487	0,0938	-

¹⁾ abgeleiteter Basisgrenzwert für $f = 13,56$ MHz und > 6 min Einwirkzeit. Der abgeleitete Spitzengrenzwert für < 6 min wurde selbst im Sperrbereich nicht erreicht.

²⁾ Die Durchschnittswerte wurden aus ca. 30 Einzelmessungen gebildet.

Die Schutzbereiche Ü und K (dem Personal oder der Bevölkerung zugänglicher Bereich) durften von Trägern elektronischer Implantate nicht betreten werden. Hierzu war das Verbotsschild "Herzschrittmacher" mehrfach angebracht. Der abgeleitete Grenzwert für den Expositionsbereich 1 wurde nur an der Messstelle EM 2 überschritten. Die elektromagnetische Strahlung ging von den im Büro- und Messcontainer aufgestellten Computerbildschirmen aus.

Am Aufstellort der HF-Generatoren (Messposition EM 2) lagen die Messwerte zwischen den Grenzwerten für den Expositionsbereich 1 und 2. Ein Aufenthalt im Bereich der Generatoren war nur zum Ein- und Abschalten, zur Leistungsregelung und -anpassung sowie zur Überwachung und Regelung der Temperaturen der Kühlkreisläufe notwendig und konnte auf deutlich weniger als 6 Stunden/Tag beschränkt werden.

Der Sperrbereich S durfte nur bei abgeschalteter HF-Anlage, z.B. für Reparaturen oder Messungen betreten werden. Die hohen Feldstärken an den Messpositionen EM 7 bis EM 9 sind auf magnetische Induktion bzw. hohe Spannungen in den Anpass- und Kühlgeräten zurückzuführen. Die erreichten Werte sind als gering einzustufen im Vergleich zur normalen Belastung durch Kurzwellen-Sendeanlagen, die Feldstärken von 27,5 V/m bis 121 V/m in Entfernungen von ca. 500 bis 50 m erzeugen.

6. Vergleichende Bewertung des Geodesorb- und Hochfrequenzversuchs

6.1 Energieverbrauch und Erwärmung

Im folgenden sollen beide zuvor beschriebenen Techniken anhand der Versuchsergebnisse hinsichtlich der zu erreichenden Temperaturerhöhung und des Energieverbrauches miteinander verglichen werden.

Tabelle 3: Kenndaten des Versuchs

Kriterien	Geodesorb-Verfahren	Hochfrequenz-Technologie
Größe Versuchsfeld	9 m ²	44 m ²
Kubatur Versuchsfeld	45 m ³	220 m ³
Maximal erreichte Bodenlufttemperatur	37 °C ($\Delta T = 23$ K)	44 °C ($\Delta T = 24$ K)
Maximal erreichte Bodentemperatur	40 °C ($\Delta T = 20$ K) nach 14 d	51 °C ($\Delta T = 31$ K) nach 49 d
Energieverbrauch gesamt	5.330 kWh in 40 d	48.247 kWh in 49 d
Anlagenverfügbarkeit	97,7 %	61 %

Beide Verfahren führen zu einer Temperaturerhöhung in der Bodenluft von 23 K bzw. 24 K. Die Absoluttemperaturen waren aufgrund der unterschiedlichen Jahreszeit verschieden. Die Maximaltemperatur von 40 °C beim Geodesorb-Verfahren wurde innerhalb der ersten 14 Tage erreicht.

Die maximal erreichte mittlere Bodentemperatur lag beim HF-Verfahren um ca. 10 °C über der des Geodesorb-Verfahrens. Allerdings haben die Messungen der Bodentemperatur in unterschiedlichen Tiefen und an verschiedenen Stellen im Versuchsfeld gezeigt, dass eine gleichmäßige Erwärmung des Deponiekörpers nicht stattgefunden hat. Die Messungen haben ergeben, dass die Bodenerwärmung sehr unterschiedlich verlaufen ist, wobei in 2,0 m und 5,0 m Tiefe die höchsten Temperaturen erreicht wurden. Dies kann einerseits dadurch bedingt sein, dass es sich bei dem Deponiematerial um kein homogenes Material handelt und sich aufgrund des Materialeinbaus Zonen unterschiedlicher Dichte und unterschiedlichen Wassergehaltes gebildet haben. Andererseits kann die schichtweise unterschiedlich starke Bodenerwärmung auch an der Ausbildung stehender Wellen entlang der HF-Elektroden liegen. An Wellenbäuchen findet dann der maximale Energieeintrag statt. Wellentäler führen zu einem geringen Energieeintrag.

Die Kubatur des HF-Versuchsfeldes war fünfmal größer als die des Geodesorb-Versuchsfeldes. Die Bedeutung des Verlustes durch Wärmeleitung nimmt bei der Vergrößerung des Feldes ab, weil die für die Wärmeübertragung relevante Begrenzungsfläche des Versuchsfeldes pro eingeschlossenem Bodenvolumen im Verhältnis kleiner wird.

Der im Vergleich zu den Verlusten durch Wärmeleitung kleinere Teil des Wärmeverlustes entstand durch die simultane Bodenluftabsaugung im Versuchsfeld. Der konvektive Wärmeverlust wurde unter der Annahme berechnet, dass die abgesaugte Bodenluft letztlich aus Umgebungsluft besteht, die durch den Deponiekörper gezogen wird, sich dabei mit Schadstoffen und Wasser belädt und aufgewärmt wird. Er summierte sich auf 20 % der insgesamt

benötigten Energie. Eine Volumenstromerhöhung um $50 \text{ m}^3/\text{h}$ bewirkte einen Leistungsverlust von max. 1 kW .

Beim Geodesorb-Verfahren erfasste ein Zwischenzähler die Energie, die das zur Erhitzung des Wärmeüberträgermediums verwendete Temperiergerät aufnahm. Die tatsächlich an den Boden abgegebene Energie war, bedingt durch den Wirkungsgrad des Temperiergerätes, etwas kleiner. Es wird angenommen, dass die Temperaturdifferenz des Heizmediums zwischen Vor- und Rücklauf, durchschnittlich $1,9 \text{ K}$, unmittelbar im Boden abgegeben wurde, Wärmeverluste in den gut isolierten Zu- und Ableitungen werden vernachlässigt.

Auch während des HF-Versuches wurden der Energieverbrauch der einzelnen Aggregate dokumentiert.

In der einfachen Handhabung und der guten Überwachbarkeit der Anlage ist das Geodesorb-Verfahren derzeit vorteilhafter (Anlagenverfügbarkeit $97,7 \%$), zu berücksichtigen ist hierbei jedoch der unterschiedliche Entwicklungsstand der beiden Verfahren.

Der HF-Versuch konnte nicht deutlich in Aufheizphase, Haltephase und Abkühlphase eingeteilt werden, wie dies beim Geodesorb-Versuch möglich war. Aus der Abbildung 22 ist vielmehr ersichtlich, dass der gesamte HF-Versuch als Aufheizphase betrachtet werden kann.

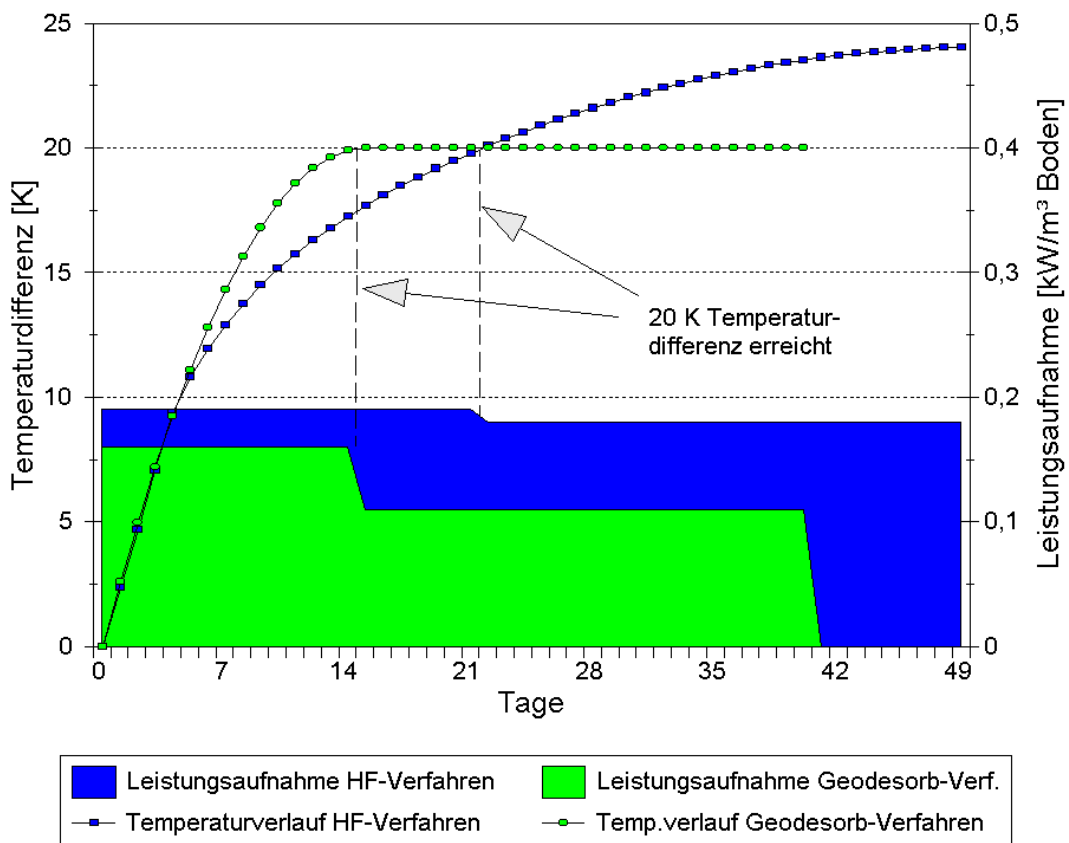


Abb. 22: Vergleich des Energieverbrauchs von Geodesorb- und HF-Verfahren

In dieser Abbildung sind die erreichten Bodentemperaturdifferenzen sowie der Energieverbrauch (als Fläche unter der Leistungskurve) dargestellt. Um eine Steigerung der Bodentemperatur von 20 K zu erreichen, benötigte das HF-Verfahren (aufgrund der zahlreichen Anlagenausfälle) 3 Wochen, das Geodesorb-Verfahren nur 14 Tage. Es wurde vor und nach den ersten drei Wochen bis zum Erreichen der Temperaturdifferenz von 20 K trotz der Unterbrechungen nahezu dieselbe HF-Leistung aufrechterhalten. Die Ausgleichskurve für die mittlere

Bodentemperatur des HF-Verfahrens zeigt, dass mit dieser Höhe des Leistungseintrages maximal etwa 25 K Temperaturdifferenz zu erreichen sind.

6.2 Entwicklungsmöglichkeiten

Das Geodesorb-Verfahren hat sich im Feldeinsatz als ein robustes und zuverlässiges Verfahren gezeigt. Um den Einsatzbereich zu verbreitern, können verschiedene Anlagenkomponenten weiter optimiert werden:

- Steigerung der erreichbaren Maximaltemperatur durch ein anderes Wärmeübertragemedium, z.B. Öl
- Kostenersparnis durch direkt heizendes Temperiergerät, z.B. mit Propangas anstelle von Strom
- Kosten- und Aufwandseinsparung durch konstruktive Veränderung der Heizlanzen, so dass diese gerammt werden können, anstelle des hier praktizierten Einbaus
- Kombination einer Heizlanze mit einem Absaugpegel, um den Bohraufwand durch gleichzeitige Verdichtung des Absaugrasters zu optimieren

Das Hauptproblem des HF-Verfahrens während des Versuches war die Kühlung der Generatoren. Hierdurch war die Anlagenverfügbarkeit nicht zufriedenstellend. Es bieten sich folgende, über das Abwärmeproblem hinausgehende Verbesserungsmöglichkeiten an:

- Höhere Anlagenverfügbarkeit durch großzügigere Dimensionierung der Kühlaggregate
- Verbesserung des Anlagenwirkungsgrades durch Abwärmenutzung der erforderlichen Generatorkühlung. Es ist zu prüfen, ob der Kühlwasserkreislauf wie beim Geodesorb-Verfahren direkt zur Wärmeerzeugung im Boden genutzt werden könnte.
- Verbesserung des Energieeintrages durch Nutzung einer auf den Untergrund abgestimmten Frequenz. Die öffentliche Frequenzverteilung und gesetzliche Vorgaben lassen bei weitem nicht die vollen Möglichkeiten des HF-Verfahrens zu. Die Feldstärkemessungen haben gezeigt, dass der Einflußbereich des Verfahrens lokal stark eingegrenzt ist und damit eine Ausnahmeregelung vertretbar wäre.
- Betriebskostensenkung durch direkte Kopplung der HF-Erzeugung mit der Energiegewinnung aus z.B. Diesel

Bei beiden Verfahren ist eine Kombination mit biologischen in-situ-Sanierungsverfahren denkbar. Durch ein gleichbleibendes z.B. mesophiles Klima könnten die Abbauraten gesteigert werden.

6.3 Kostenbetrachtung

Die Kostenermittlung basiert auf Angeboten der jeweiligen Firma. Die Sanierungsvorgaben sind möglichst nah an den Versuchsbedingungen gehalten, damit eine Übertragbarkeit des jetzigen technischen Standes überhaupt möglich ist. Dabei sind folgende Daten zugrunde gelegt:

- Größe des Bodenkörpers: 44 m²
- Volumen des Bodenkörpers: 220 m³
- zu erreichende Temperaturerhöhung: 20 K
- Betriebszeit 2 Monate

Alle Kosten wurden auf einen Kubikmeter Boden-/Abfallmaterial normiert. Aufgrund des Entwicklungsstandes beider Verfahren liegt der Schwerpunkt im Vergleich und nicht in der absoluten Höhe der Kosten.

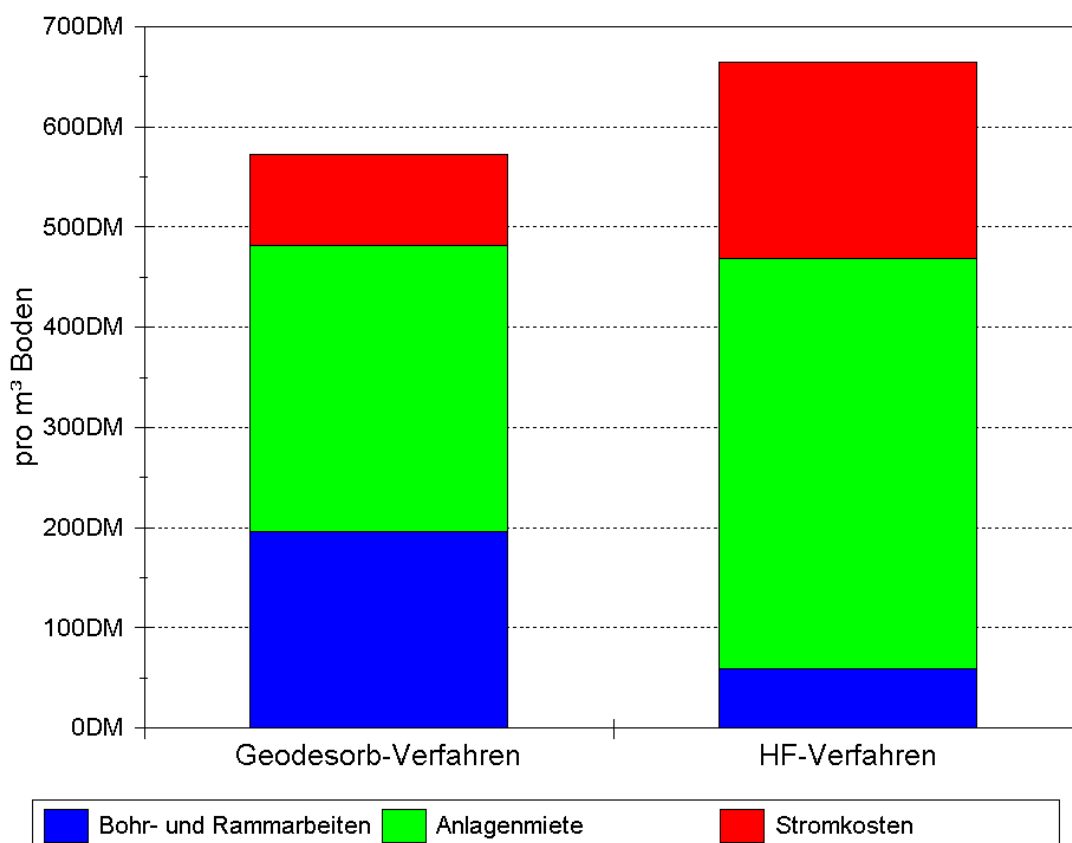


Abb. 23: Kostenvergleich Geodesorb-Verfahren und HF-Verfahren

Die Kosten setzen sich aus Bohr- bzw. Rammkosten (incl. Baustelleneinrichtung und Arbeitsschutz) sowie Anlage- und Betriebskosten für einen zweimonatigen Betrieb zusammen. Nach Erreichen der Temperaturdifferenz von 20 K kann der notwendige Energieeintrag für die Haltephase reduziert werden. Die Gesamtkosten beider Verfahren unterscheiden sich für diesen Musterfall nicht wesentlich. Die Kostendifferenz resultiert in erster Linie aus den höheren Kosten für Anlagentechnik und Energie beim HF-Verfahren.

7. Einsatzmöglichkeiten der vorgestellten Verfahren

7.1 Verdichtung des Absaugrasters

Es handelt sich um technisch einfache und kostengünstige Maßnahmen, um mit konventioneller Technik die Bodenluftabsaugung weiter zu optimieren.

Es empfiehlt sich bei

- eiligen Sanierungsvorhaben, wobei bereits in der Vorplanung der erhöhte Aufwand für zusätzliche Bohrungen berücksichtigt werden sollte;
- zurückgehenden Schadstofffrachten, die gegen Ende einer Sanierung den Betrieb einer Bodenluftabreinigungsanlage pro kg entfernten Schadstoffs verteuern;
- undurchlässigen Böden, um den Schadensherd gezielt zu durchlüften und den Absaugwiderstand zu senken. Hier eignet sich die passive Belüftung besonders gut;
- Absaugung in der Grundwasserwechselzone, hier können durch die aktive Belüftung z.B. verschlammte Filterstrecken wieder durchgängig gemacht werden.

7.2 Geodesorb-Verfahren

Das Geodesorb-Verfahren in seiner untersuchten technischen Ausführung hat sich als ein zuverlässiges und einfach zu bedienendes Verfahren zur Erwärmung des Untergrundes herausgestellt. Es kann eingesetzt werden

- Um bei CKW/BTEX-Schadensfällen den Austrag zu vervielfachen und damit die Sanierungszeit zu verkürzen;
- Um Restkontaminationen zu mobilisieren und damit die Endphase der Sanierung zu beschleunigen;
- Um KW-Schadensfälle mit Vergaserkraftstoffen (Siedepunkt $< 180\text{ °C}$) durch Bodenluftabsaugung sanierbar zu machen. Erfahrungen mit der erreichbaren Restkontamination liegen nicht vor.

7.3 HF-Verfahren

Das Verfahren zur Bodenerwärmung mit HF-Energie bietet weitere Möglichkeiten, durch Temperaturerhöhung des Untergrundes Schadstoffe zu mobilisieren. Seine Einsatzbereiche liegen

- sowohl in oberflächennahem Einsatz, wobei die verdampfenden Schadstoffkomponenten direkt über dem Boden aufgefangen und kondensiert werden;
- als auch in größeren Tiefen. Die Grenzen sind weniger durch das Einbringen der Elektroden als durch die Erfassung und Absaugung der mobilisierten Kontaminanten gesetzt;
- bei der Sanierung auch schwerer flüchtiger Kohlenwasserstoffanteile wie z.B. der Dieselfraktion durch Bodenluftabsaugung. Ein ausreichender Leistungseintrag muß bei der Planung der Elektrodenrasters und der Anlagendimensionierung gewährleistet sein.