



## IN SITU STABILISIERUNG ALS MAßNAHME ZUR KALKULIERBAREN BEENDIGUNG DER DEPONIENACHSORGE

*Prof. Dr.-Ing. R. Stegmann  
Dr.-Ing. K.-U. Heyer, Dr.-Ing. K. Hupe*

IFAS - Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft  
*Prof. R. Stegmann und Partner*  
Schellerdamm 19-21  
21079 Hamburg



[www.ifas-hamburg.de](http://www.ifas-hamburg.de)



## IN SITU STABILISIERUNG ALS MAßNAHME ZUR KALKULIERBAREN BEENDIGUNG DER DEPONIENACHSORGE

### Grundlagen und Hintergrund:

- Stand des Wissens und der Technik zur aeroben in situ Stabilisierung
- UFOPLAN-Vorhaben: „Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge“ (Stegmann et al., 2006)
- Regelungsansätze zur Deponienachsorge im Arbeitsentwurf der „Verordnung über Deponien und Langzeitlager und zur Umsetzung der Bergbauabfallrichtlinie“ vom 17.10.2007 (BMU)



## „Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge“

UFOPLAN-Vorhaben



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit



Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft  
Prof. R. Stegmann und Partner



## Betrachtete Deponietypen:

- **stillgelegte und in der Stilllegung befindliche Deponien für unvorbehandelte Siedlungsabfälle**  
„herkömmliche Siedlungsabfalldeponien“ (Verfüllung bis längstens 31.05.2005)
- MBA-Deponien (bzw. Deponieabschnitte)
- HMV-Asche-Deponien
- Boden-/Bauschuttdeponien



In situ Stabilisierung zur kalkulierbaren Beendigung der Deponienachsorge



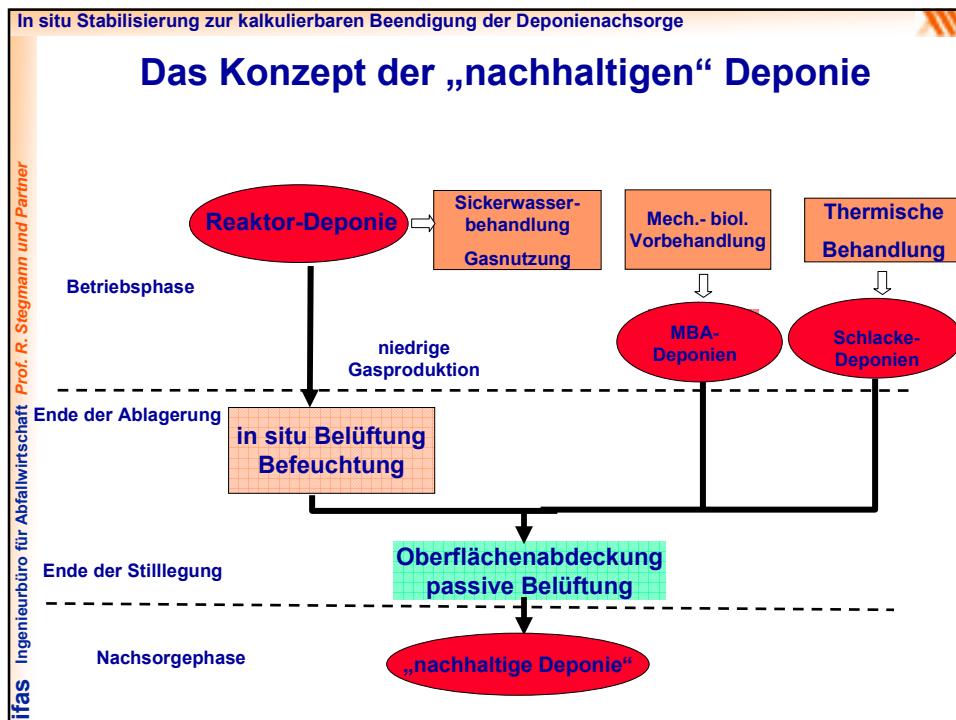
## Schlussfolgerungen Langzeitverhalten:

Herkömmliche Siedlungsabfalldeponien und Altablagerungen sind langfristige Reaktordeponien

- ➔ Deponiegas (und Setzungen) über viele Jahre / mehrere Jahrzehnte
- ➔ Sickerwasser über viele Jahrzehnte / mehrere Jahrhunderte
- ➔ Langfristiges Emissionsverhalten und Gefahrenpotenzial nicht umweltakzeptabel
- ➔ Nachsorge deutlich länger als 30 Jahre

Daher:

- Emissionspotenzial nicht konservieren, sondern beschleunigte und kontrollierte Reduzierung des Emissionspotenzials
- Stilllegungs- und Nachsorgemaßnahmen auf standortbezogene Rahmenbedingungen anpassen (gem. § 36 c, Abs. 2 KrW/AbfG)



In situ Stabilisierung zur kalkulierbaren Beendigung der Deponienachsorge

Begründungstext zu § 14 Stilllegungsphase im Arbeitsentwurf der „Verordnung über Deponien und Langzeitlager und zur Umsetzung der Bergbau-abfallrichtlinie“ vom 17.10.2007:

„Bei ehemaligen Hausmülldeponien ist zu berücksichtigen, dass es sich um einen Bioreaktor handelt, der nach dem Stand der Technik kaum dauerhaft stabil gehalten (mumifiziert) werden kann. Um den Nachsorgezeitraum überschaubar zu halten, wären in situ Behandlungsmaßnahmen erforderlich.“



# Stilllegungs- und Nachsorgemaßnahmen

## Wie?



### Maßnahmen zur Deponiestilllegung:

- Erfassung und Behandlung des Sickerwassers (ggf. des Grundwassers)
- Erfassung und Behandlung des Deponiegases
- Ablagerungsende: temporäre Oberflächenabdeckung (§ 14)
- Option: kontrollierte Befeuchtung / Infiltration (§ 12)
- Option: aerobe in situ Stabilisierung (§ 12)
- Endgültige Oberflächenabdichtung (ggf. Nachrüstung)  
→ Reduzierter Nachsorgeaufwand, reduziertes Gefährdungspotenzial



## Maßnahmen zur Reduzierung des Emissionspotenzials:

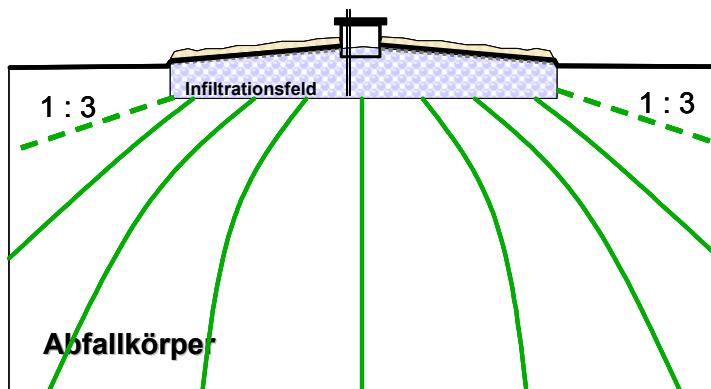
### Infiltrationsmaßnahmen zur kontrollierten Wasserzugabe



#### Infiltrationsmaßnahmen

Schematische Darstellung des Infiltrationsfeldes und der Wirkfläche

Planung Deponie in NRW, IFAS 2004







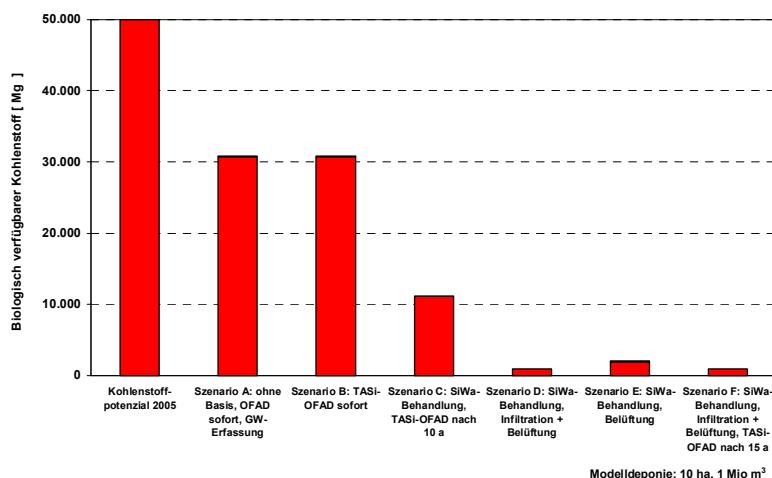
## Maßnahmen zur Reduzierung des Emissionspotenzials:

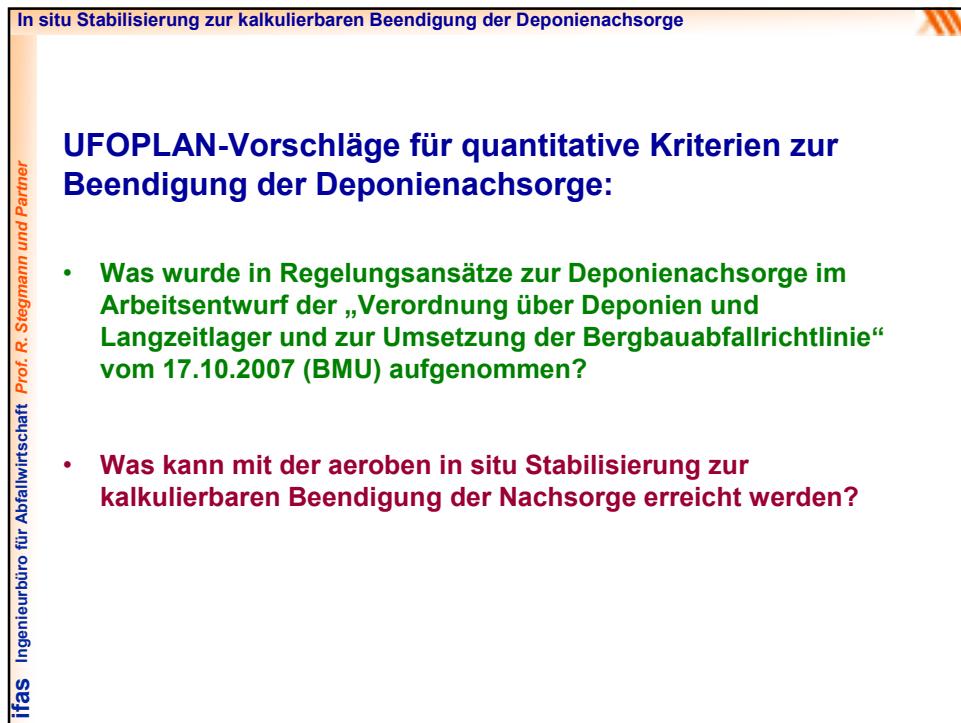
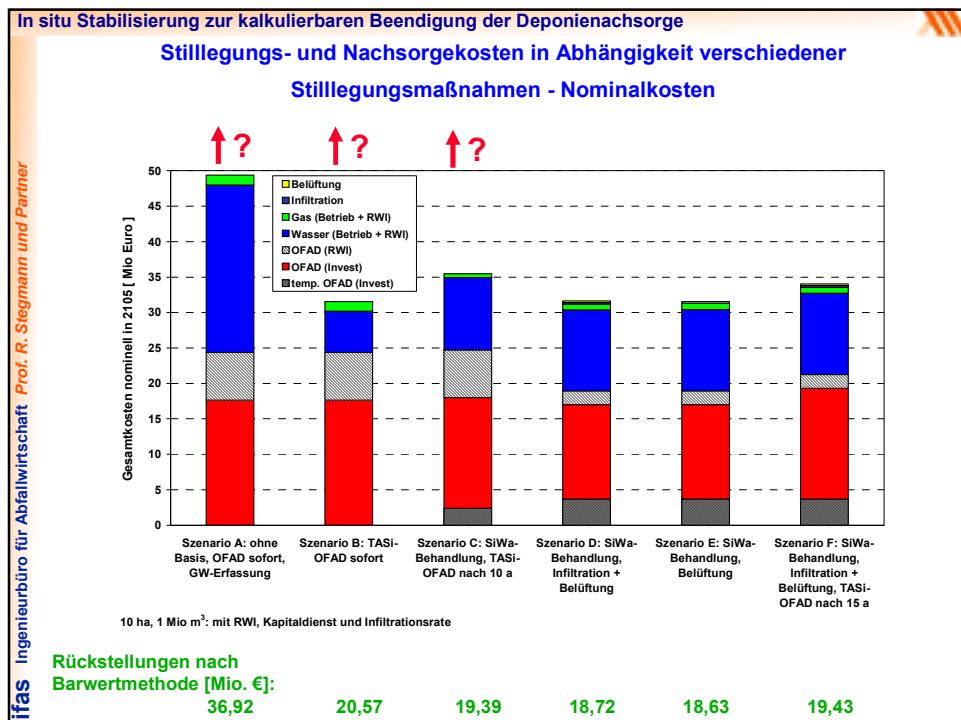
### Beschleunigte aerobe in situ Stabilisierung

(ggf. in Kombination mit  
oder nach Infiltrationsmaßnahmen)



#### Kohlenstoffpotenzial im Jahr 2005 und Kohlenstoffreduzierung bis 2020 in Abhängigkeit unterschiedlicher Stilllegungsmaßnahmen, Szenarienvergleich anhand einer Modelldeponie





## „Deponienachsorge – Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge“

UFOPLAN-Vorhaben



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit



Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft  
Prof. R. Stegmann und Partner

[http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql\\_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3128](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3128)  
sowie unter: [www.ifas-hamburg.de](http://www.ifas-hamburg.de)

[Gothaer, Gottlieb, Seeliger & Cie.]  
Reichsmarke

## Maßgebliche Thesen zum Nachsorgeende

aufgrund qualitativer Kriterien gemäß § 13 Abs. 5 DepV (2002)

- Neben den aktuellen Emissionen und Prozessen muss auch das **Emissions- und Reaktionspotenzial** der abgelagerten Abfälle reduziert worden sein (**emissionsarmer Deponiekörper**):
  - weitgehende Umsetzung der bioverfügbaren Abfallorganik: **geringes Gasbildungspotenzial, reduzierte Sickerwasserbelastungen, setzungssarmer Abfallkörper**
  - zusätzlich Unterbrechung der Transmissionspfade zum Stoffaustausch durch dauerhaft funktionstüchtige Oberflächenabdichtung



## Deponiegas



## Vorschlag UFOPLAN-Vorhaben

### Deponiegasproduktion mit einem Methanvolumenstrom

$\leq 25 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$  für den gesamten Standort

$\leq 5 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/(\text{h} * \text{ha})$

- Prüfung, ob die Gaserfassung und Verwertung technisch und wirtschaftlich noch möglich und zumutbar ist.
- Umstellung auf passive Restgasbehandlung z.B. über Methanoxidation in der Rekultivierungsschicht
  - Methanvolumenstrom  $\leq 0,5 \text{ l CH}_4 / (\text{m}^2 * \text{h})$  in Rekultivierungsschicht
  - flächenhafte Ausgasung über die Rekultivierungsschicht  $\leq 25 \text{ ppm}$  (FID)

Werte abgeleitet aus unterschiedlichen F&E-Projekten und Praxiserfahrungen

**In situ Stabilisierung zur kalkulierbaren Beendigung der Deponienachsorge**



**Literaturangaben zur Methanoxidation in Böden und Deponieabdeckungen**

Quelle	Randbedingungen	Oxidationsrate [l CH <sub>4</sub> /(m <sup>2</sup> ·h)]
Czepiel et al. (1996)	Deponieabdeckung, 5°C Laborversuch, 21°C	1,34 5,38
Whalen et al. (1990)	Deponieabdeckung, 5°C Laborversuch, 30°C	0,35 1,23
Stegmann et al. (1991)	Deponieabdeckung Rekultivierungsschicht, Laborversuch	0,64
Börjesson et al. (1997)	Deponieabdeckung Laborversuch Deponieabdeckung Laborversuch Maximum bei WG 20%	1,61 3,56 6,72
Bender (1992)	Deponieabdeckung, Laborversuch, Raumtemperatur	16,8
Kighfley & Nedwell (1994)	Tondichtungsschicht Laborversuch nährstoffreicher, grobkörniger Sand Laborversuch	6,35 9,7
Dach et al. (1996)	Deponieabdeckung	0,1 - 4,2
Croft & Emberton (1989)	sandig-toniger Deponieabdeckboden Laboruntersuchung	7,2 20
Hoeks (1983)	Rekultivierungsschicht	0,57 - 2,85
Figueroa (1998)	Mutterboden Rekultivierungsschicht, 20°C, Laboruntersuchung; Geschiebemergel Rekultivierungsschicht, 20°C, Laboruntersuchung	0,06 – 5,24 0,06 – 3,59
Lechner et al. (2000)	mineralischer Mutterboden, 18°C Labor Gartenerde, 18°C, Labor bindiger Deponieabdeckboden, 18°C, Labor	ca. 3 ca. 8 ca. 6
IFAS (2004) IFAS (2006)	Versuchsfelder Kuhstedt Schwachgas Versuchsfelder Kuhstedt techn. Gas	0,4 - 1,0 0,8 - 4,0

**In situ Stabilisierung zur kalkulierbaren Beendigung der Deponienachsorge**



**Arbeitsentwurf der „Verordnung über Deponien und Langzeitlager und zur Umsetzung der Bergbauabfallrichtlinie“ vom 17.10.2007 in § 15 Nachsorgephase, Absatz (4):**

- **Nachweis einer ausreichenden Methanoxidation des Restgases**
- **Konkrete o.g. quantitative Kriterien „nur“ mit einer Kommentierung im Begründungstext**

**Diese beiden quantitativen Kriterien (0,5 l CH<sub>4</sub> / (m<sup>2</sup> \* h), 25 ppm) zumindest als orientierende „Zielwerte“, wenn schon nicht als „Grenzwerte“ in Verordnung aufnehmen.**



## Welchen Beitrag leistet die Belüftung hinsichtlich der Entlassung aus der Nachsorge?

Deponiegas	Vorschläge UFOPLAN-Vorhaben*	Ergebnisse Deponiebelüftung**
Methanvolumenstrom [m³ CH₄/(ha*h)]	5	< 3 °

Aerobe in situ Stabilisierung: nach Abschluss des mehrjährigen Belüftungsbetriebs kann eine Qualität der Restgasemissionen erreicht werden, die die qualitativen wie quantitativen Kriterien zur Entlassung aus der Nachsorge erfüllt.



## Sickerwasser



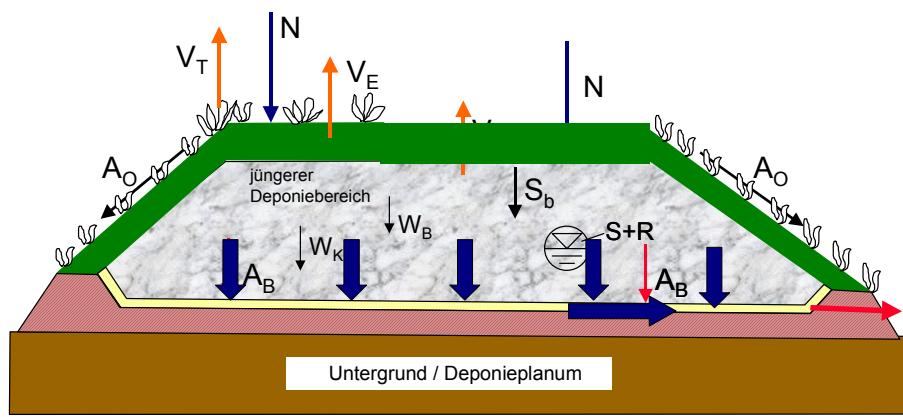
## Vorschlag UFOPLAN-Vorhaben

Als Kriterium der Sickerwasserbelastungen kann Massenstrom (Fracht) als Produkt von Konzentration und Sickerwasseranfall pro Hektar Ablagerungsfläche und Jahr gewählt werden.

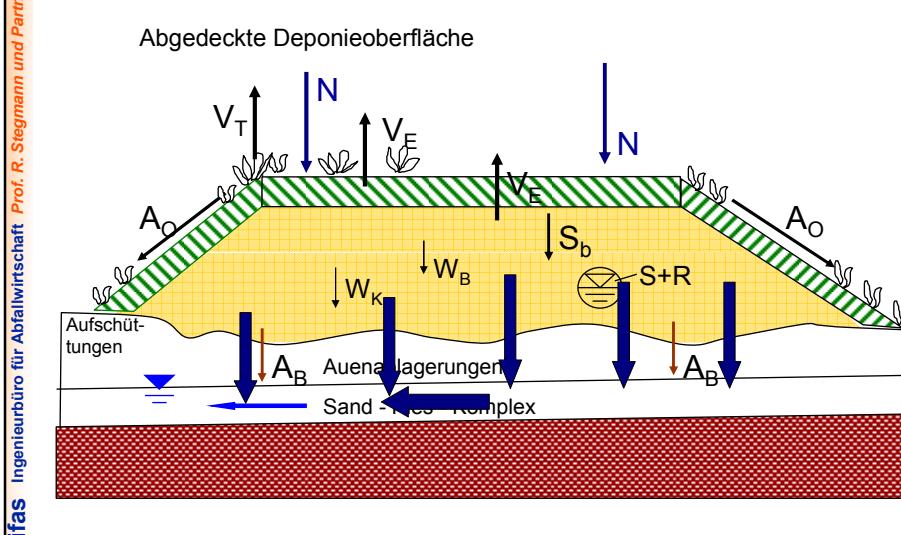
Werte abgeleitet aus Anhang 51 und Wasserhaushaltsbetrachtungen



## Geordnete Deponien: Wasserhaushalt und Emissionen



## Altablagerungen und Altdeponien: Wasserhaushalt und Emissionen



Arbeitsentwurf der „Verordnung über Deponien und Langzeitlager und zur Umsetzung der Bergbauabfallrichtlinie“ vom 17.10.2007, § 15 Nachsorgephase, Absatz (4), Kriterien zur Entlassung aus der Nachsorge:

- „7. Die mit dem Sickerwasser in ein oberirdisches Gewässer eingeleitete jährliche Fracht eines relevanten Schadstoffes überschreitet nicht das Produkt des zulässigen Konzentrationswertes ... des Anhangs 51 der Abwasserverordnung...multipliziert mit 20% der langjährigen durchschnittlichen Niederschlagsmenge am Standort der Deponie.“

In situ Stabilisierung zur kalkulierbaren Beendigung der Deponienachsorge

Vorschlag zu quantitativen Kriterien zur Entlassung aus der Nachsorge für Sickerwasser- und Grundwasserbelastungen sowie bei Direkt- und Indirekt-einleitung

Parameter	Direkteinleitung		Indirekteinleitung		Versickerung	
	Konzentration [mg/l]	max. Fracht [kg/ha*a]	Konzentration [mg/l]	max. Fracht [kg/ha*a]	Konzentration Immission (Differenzwert) [mg/l]	max. Fracht [kg/ha*a]
CSB UFOPLAN <i>Entw. DepV<sub>neu</sub></i> <sup>1</sup>	200 200	50 – 200 280	400	50 – (>) 200 -	11 <sup>2</sup> 11 <sup>2</sup>	50 – 200 -
Nges. UFOPLAN <i>Entw. DepV<sub>neu</sub></i> <sup>1</sup>	70 70	25 – 100 98	(>) 70	25 – (>) 100	NH <sub>4</sub> 0,3 – 5 0,3	25 – 100 -
CI UFOPLAN <i>Entw. DepV<sub>neu</sub></i> <sup>1</sup>	100 -	100 – 200 -	(>) 100	100 – (>) 200	30 30	100 – 200 -
AOX UFOPLAN <i>Entw. DepV<sub>neu</sub></i> <sup>1</sup>	0,5 0,5	0,1 – 0,5 0,7	0,5	0,1 – (>) 0,5 -	0,02 0,02	0,1 – 0,5 -

1 Arbeitsentwurf der „Verordnung über Deponen und Langzeitlager und zur Umsetzung der Bergbauabfallrichtlinie“ vom 17.10.2007 in § 15 Nachsorgephase, Absatz (4) zu den Kriterien zur Entlassung, Beispiel für durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von 700 mm

2 CSB-Differenzwert abgeleitet aus Vorgabewert für TOC

In situ Stabilisierung zur kalkulierbaren Beendigung der Deponienachsorge

Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitung zur aeroben in situ Stabilisierung der Altdeponie Kuhstedt

- begleitende Untersuchungen in Deponiesimulationsreaktoren
- Monitoring Grundwasserleiter
- wesentliche Verbesserung der Sickerwasserqualität infolge der Belüftung
- insbesondere organische wie die Stickstoffverbindungen
- Anforderungen an die Sickerwasserqualität und den akzeptablen Frachtaustrag nach einer Belüftung wahrscheinlich innerhalb von 30 Jahren zu erreichen



## Ergebnisse Sickerwasserbeschaffenheit Altdeponie Kuhstedt (über DSR)

Parameter	Sickerwasser (aus DSR) vor Belüftung (Durchschnitt)	Sickerwasser (aus DSR) nach Belüftung (Durchschn.)	Veränderung
NH <sub>4</sub> -N [mg/l]	322	52	-84 %
BSB <sub>5</sub> [mg/l]	299	39	-87 %
TOC [mg/l]	456	114	-75 %



### Kriterien zum Setzungsverhalten

#### UFOPLAN:

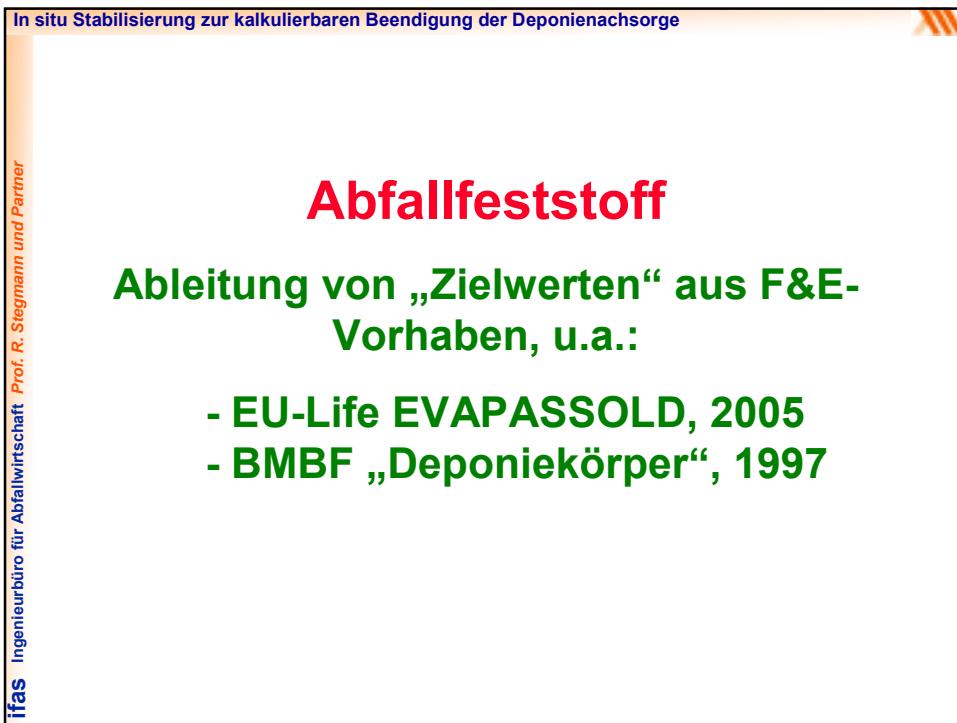
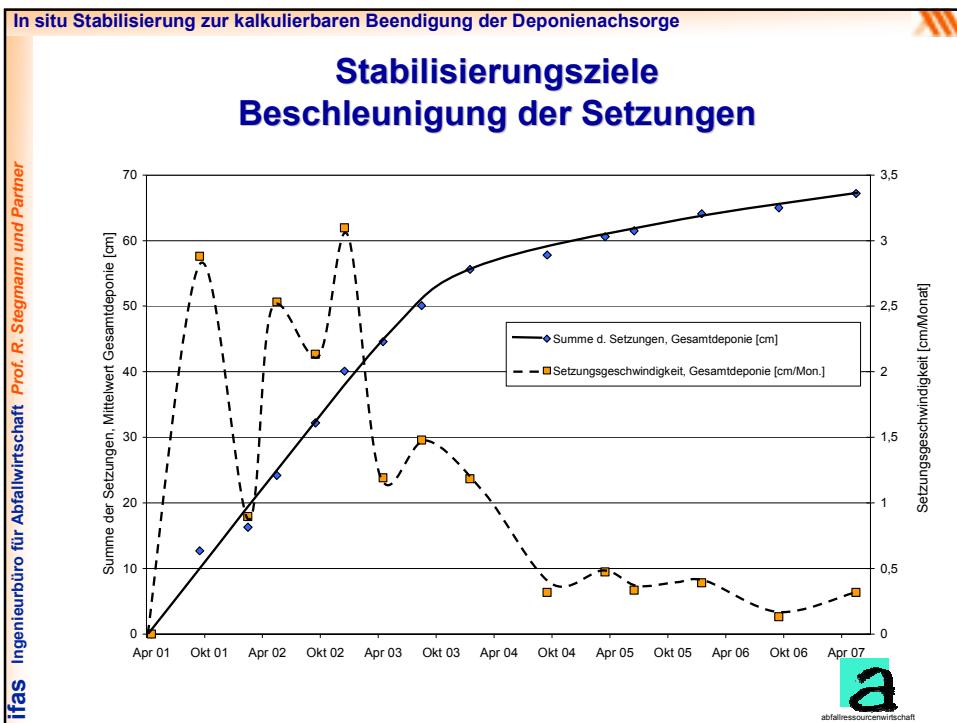
Setzungsmaß von mindestens 90% der Gesamtsetzungen bei Entlassung aus der Nachsorge

Arbeitsentwurf der „Verordnung über Deponien und Langzeitlager und zur Umsetzung der Bergbauabfallrichtlinie“ vom 17.10.2007 in § 15 Nachsorgephase, Absatz (4) zu den Kriterien zur Entlassung:

Zehnjährige Überwachungsphase, um zu bewerten bzw. nachzuweisen, dass die Setzungen soweit abgeklungen sind, dass setzungsbedingte Beschädigungen des Oberflächenabdichtungssystems für die Zukunft ausgeschlossen werden können.

#### Auswirkungen aerobe in situ Stabilisierung:

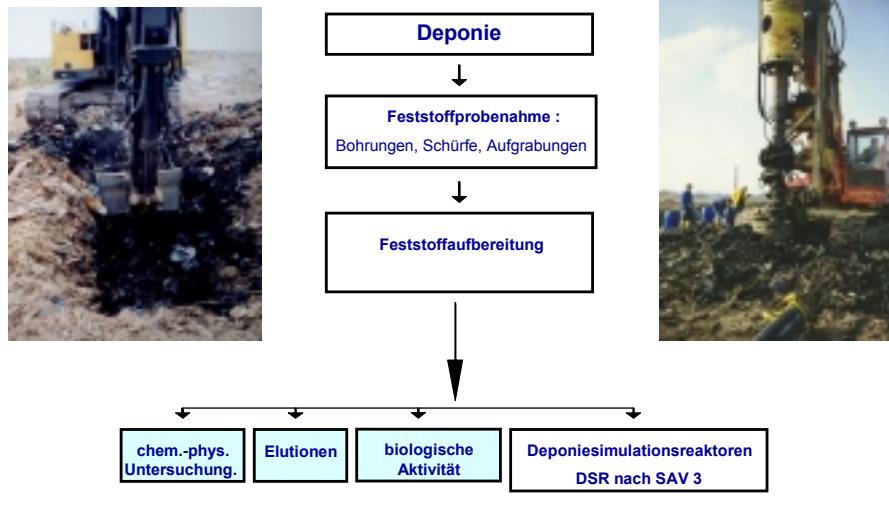
Setzungen laufen beschleunigt innerhalb des Behandlungszeitraums ab, daher zum Ende des Belüftungsprozesses soweit abgeschlossen, dass gemäß Anforderung § 15 setzungsbedingte Beschädigungen des anschließend aufgebrachten Oberflächenabdichtungssystems für die Zukunft ausgeschlossen werden können.





## Ergebnisse der Deponieüberwachung sowie

### Untersuchungen auf Deponien und im Labormaßstab



Nr.	Parameter	Zuordnungs-werte Anhang 2 AbfAbIV	Zielwerte zum Nachsorge-ende <sup>1)</sup>
<b>4</b>	<b>Eluatkriterien</b>		
4.01	pH-Wert	5,5 – 13,0	6,0 – 9,0
4.02	Leitfähigkeit	≤ 50.000 µS/cm	≤ 2.500 µS/cm
4.03	TOC/DOC	≤ 300 mg/l	≤ 150 mg/l
4.04	Phenole	≤ 50 mg/l	≤ 0,5 mg/l
4.05	Arsen	≤ 0,5 mg/l	≤ 0,1 mg/l
4.06	Blei	≤ 1 mg/l	≤ 0,4 mg/l
4.07	Cadmium	≤ 0,1 mg/l	≤ 0,05 mg/l
4.08	Chrom-VI	≤ 0,1 mg/l	? (≤ 0,1 mg/l)
4.09	Kupfer	≤ 5 mg/l	≤ 1 mg/l
4.10	Nickel	≤ 1 mg/l	≤ 0,2 mg/l
4.11	Quecksilber	≤ 0,02 mg/l	≤ 0,005 mg/l
4.12	Zink	≤ 5 mg/l	≤ 2 mg/l
4.13	Fluorid	≤ 25 mg/l	? (≤ 25 mg/l)
4.14	Ammoniumstickstoff	≤ 200 mg/l	≤ 50 mg/l
4.15	Cyanide, leicht freisetzbar	≤ 0,5 mg/l	≤ 0,1 mg/l
4.16	AOX	≤ 1,5 mg/l	≤ 0,5 mg/l
<b>5</b>	<b>Biologische Abbaubarkeit des Trockenrückstands der „Original- substanz“</b>		
	bestimmt als Atmungsaktivität (AT <sub>4</sub> )	≤ 5 mgO <sub>2</sub> /gTS	≤ 2,5 mgO <sub>2</sub> /gTS
	oder bestimmt als Gasbildungsrate im Gärtest (GB <sub>21</sub> )	≤ 20 l/kgTS	(≤ 10 l/kgTS)



### Aerobe in situ Stabilisierung

#### Abfallfeststoffproben aus der Altdeponie Kuhstedt:

- Nach Abschluss der Belüftung wird eine Qualität der Feststoffbeschaffenheit erreicht, die eine Entlassung aus der Nachsorge erlaubt, da sie den emissionsarmen Deponiekörper belegt.
- Nachweis insbesondere über die Bestimmung der biologischen Restaktivität, d.h. Atmungsaktivität und Gasbildungsrate

Abfallfeststoff	Vorschläge UFOPLAN-Vorhaben*		Ergebnisse Deponiebelüftung**
	[mg O <sub>2</sub> /g TS]	2,5	
Atmungsaktivität (AT <sub>4</sub> )	[mg O <sub>2</sub> /g TS]	2,5	1,1
Gasbildungspotenzial (GB <sub>21</sub> )	[l/kg TS]	10	3,1

\* Deponienachsorge - Handlungsoptionen, Dauer, Kosten und quantitative Kriterien für die Entlassung aus der Nachsorge

\*\* BMBF-Vorhaben zur beschleunigten aeroben in situ Stabilisierung der Altdeponie Kuhstedt



### Zusammenfassung und Fazit

- Emissionsverhalten ohne Infiltration und/oder Belüftung kann zu langfristiger Nachsorge führen, vermutlich >> 30 Jahre, ggf. > 100 Jahre
- Oberflächenabdichtungen bei Deponien mit hohen organischen Anteilen bieten keine nachhaltigen Lösungen
- verbessertes Emissionsverhalten durch in situ Stabilisierung (Belüftung/Infiltration)



## Zusammenfassung und Fazit

- **UFOPLAN-Vorschläge für quantitative Kriterien zur Entlassung aus der Nachsorge**
- **Mehrere UFOPLAN-Vorschläge wurden im Arbeitsentwurfs der „Verordnung über Deponien und Langzeitlager und zur Umsetzung der Bergbauabfallrichtlinie“ vom 17.10.2007 aufgenommen**
- **Ergebnisse BMBF-Vorhaben Kuhstedt und andere: Durch Belüftung sind die Kriterien zur Entlassung aus der Nachsorge innerhalb von ca. 30 Jahren zu erreichen.**
- **Vorgehensweise führt nicht zu Mehrkosten, sondern eher zu Kostensenkungen in der Stilllegung und Nachsorge**



# deponietechnik 2008

21.-22. Februar 2008  
Tagungsort: Technische Universität Hamburg-Harburg



**Wissenschaftliche Koordination:**  
TUHH, Institut für AbfallRessourcenWirtschaft  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Stegmann