

**D Energiebilanz zur Verwendung mineralischer
und polymerer Werkstoffe bei der Herstellung
von Deponieabdichtungen**

Dr. Dipl.-Geologe Thomas Egloffstein, Karlsruhe

Energiebilanz zur Verwendung mineralischer und polymerer Werkstoffe bei der Herstellung von Deponieabdichtungen

Thomas Egloffstein & Gerd Burkhardt

Inhalt

| | |
|---|----|
| 1. Allgemeines..... | 1 |
| 2. Zielsetzung, Rahmenbedingungen und Vorgehensweise für die vergleichende Energiebilanz..... | 5 |
| 3. Berechnungen der einzelnen Bilanzfaktoren..... | 11 |
| 4. Darstellung des Gesamtenergieverbrauchs der Dichtungs- und Dränelemente sowie der Rekultivierungsschicht | 25 |
| 5. Vergleichsbetrachtung Synthetische Dichtung / mineralische Dichtung sowie Kiesdränage / Dränmatte | 27 |
| 6. Zusammenfassende Bewertung - Ökobilanz | 28 |
| 7. Literatur: | 33 |

1. Allgemeines

Der Umweltschutz leidet darunter, dass es bislang kaum ein überzeugendes Konzept gibt, Produkte und Systeme unter dem Gesichtspunkt der von Ihnen verursachten Umweltbelastungen zu bewerten. Besonders deutlich wird dies beim Vergleich von alternativen technischen Lösungen bzw. Produkten, sei es die Mehrweg-Pfandflasche im Vergleich zur Einweg-Karton-Verbund-Verpackung oder der ICE im Vergleich zur Magnetschwebbahn. Solch einfach erscheinende Fragestellungen muss der seriöse Umweltwissenschaftler heute leider oftmals noch unbeantwortet lassen. Ökobilanzen sind ein vielversprechendes Instrument zur integrierten ökologischen Bewertung von Produkten und Systemen. Sie können zu einer vollständigen Erfassung der Umweltbeeinflussung durch ein System führen (REHBINDER 1995).

Diese Umweltbeeinflussungen werden in einem zweiten Schritt nach Art und Umfang der Auswirkungen auf die uns umgebende Umwelt bewertet. Auch wenn diese Bewertung derzeit noch erhebliche Probleme bereitet, so besteht zumindest mittelfristig Aussicht auf eine Lösung dieser Probleme. Während die Bilanzierung von Produkten heute vergleichsweise weit fortgeschritten ist, gibt es bislang kaum Stoffstromanalysen auf Branchenebene unter Einbezug vorgelagerter Prozesse (Beispiel Baubereich unter Einbezug der Baumaterialien wie Stahl, Beton, Kunststoffe und Herstellung dieser Materialien). Hier gibt es einerseits erhebliche praktische Schwierigkeiten (fehlende Daten über Stoffströme, fehlende Bilanzierungen), andererseits einige methodische Probleme (z. B. Abgrenzungsschwierigkeiten zwischen Branchen, Abgrenzung von Importen/Exporten).

Definitionen:

Ökobilanz

Ökobilanzen (engl. "lifecycle analysis") beschreiben den gesamten Lebensweg ("Produktionslinie") eines Produktes (Entnahme und Aufbereitung von Rohstoffen, Herstellung, Distribution und Transport, Gebrauch, Verbrauch und Entsorgung), analysieren die ökologischen Wirkungen und bewerten die längs des Lebensweges auftretenden Stoff- und Energieumsätze und die daraus resultierenden Umweltbelastungen (GRIEBHAMMER 1996).

Verfahrensablauf

1. Scoping
 - Festlegung der Rahmenbedingungen
 - Bestimmung des Untersuchungsziels (Planungsziel)
 - Begründung der Schwerpunktsetzung, Festlegung von Bilanzraum und Bilanzkriterien
2. Sachbilanz - Bilanzierung der Stoff- und Energieströme
3. Wirkungsanalyse und Bewertung inklusive Ermittlung der Beiträge zu übergeordneten Umweltzielen
4. Optimierung

Im einzelnen werden betrachtet (CORINO 1995):

Input von Stoffen

- a) Rohstoffe: Metalle, Steine, Salze, Kohlenstoff etc.
- b) Input von Energie
- c) Input von Raum (Raumverbrauch)

Output von Stoffen Emissionen)

- a) in die Luft
- b) in das Wasser
- c) in den Boden

Output von Energie

- a) Abwärme
- b) Lärm
- c) Erschütterungen
- d) Strahlung

Output von Raum (Raumgewinnung)

Produktbilanz

Anwendung nur auf ein konkretes Produkt bzw. verschiedene ähnliche Produktdaten bei vergleichenden Produktbilanzen. Dabei müssen folgende Kriterien mindestens sinngemäß erfüllt sein:

- gleicher Funktionsumfang
- gleicher Nutzungsumfang
- gleicher Stand der Technik

Folgende Punkte müssen dabei berücksichtigt werden (KENSY 1993, KAIMER & SCHADE 1994):

- Rohstoffgewinnung und -verarbeitung
- Transporte
- Vorproduktion
- Produktion
- Verpackung
- Handel und Vertrieb
- Ge- und Verbrauch
- Entsorgung/Endlagerung
- Toxikologie und Ökotoxikologie
- Energieverbrauch
- Luft-, Boden- und Wasserbelastung
- Störfallverhalten
- Landschafts- und Naturschutz

Die Bestandteile einer Produkt-Ökobilanz werden auch in der DIN 1996 wiedergegeben (siehe Abb. 1).

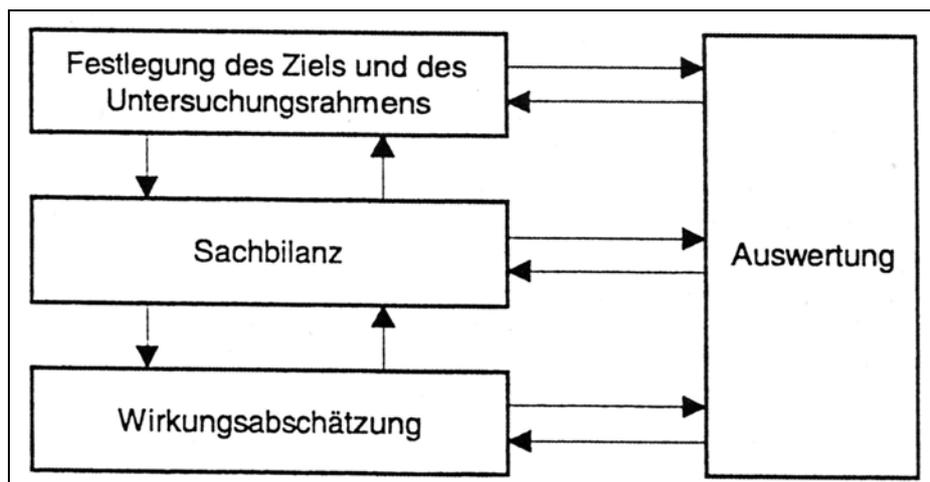


Abb. 1: Bestandteile einer Produkt-Ökobilanz (DIN 1996)

2. Zielsetzung, Rahmenbedingungen und Vorgehensweise für die vergleichende Energiebilanz

Ziel einer ganzheitlichen ökologischen Betrachtung von verschiedenen Oberflächenabdichtungssystemen ist ein bilanzierender Vergleich hinsichtlich der ökologischen Relevanz derselben unter Beachtung des Ressourcenverbrauchs, Energieverbrauchs zur Gewinnung der Rohstoffe und Herstellung der Abdichtungssysteme selbst. Im folgenden soll dies anhand eines Beispiels anschaulich durchgeführt werden. Als Beispiel wurde eine vergleichende Ökobilanz zwischen der Herstellung einer mineralischen Dichtung und einer Kunststoffdichtungsbahn sowie einer Flächendrainage aus Kies bzw. einer Dränmatte für Oberflächenabdichtungen von Deponien gewählt.

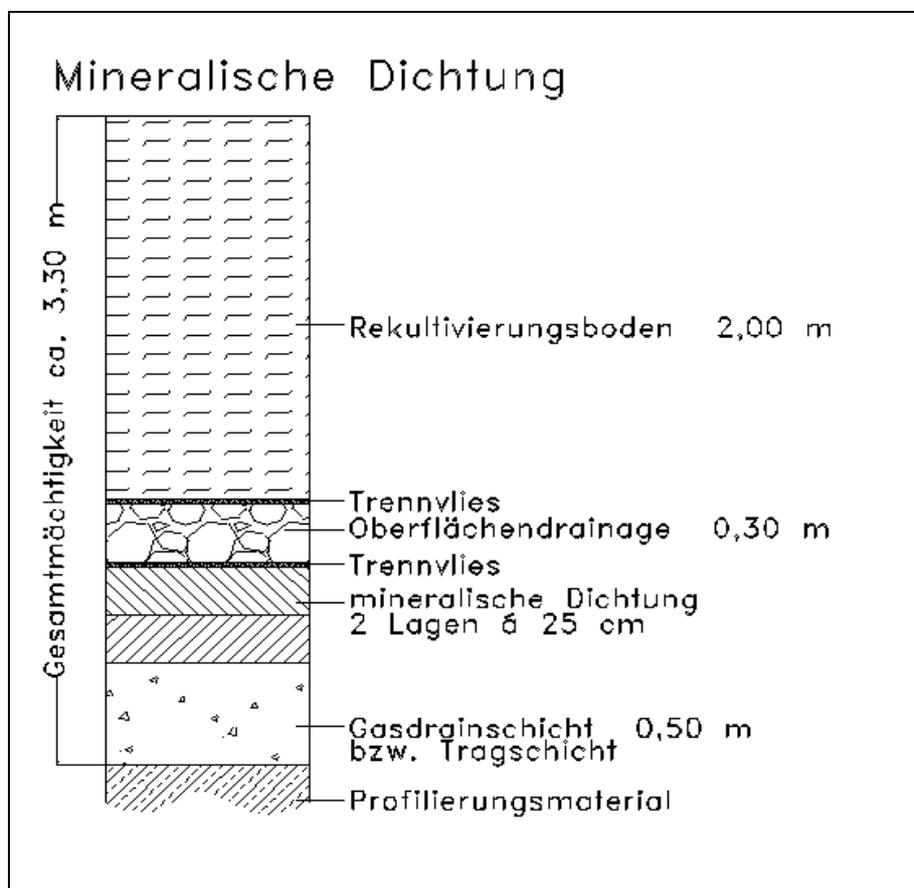


Abb. 2: Oberflächenabdichtung Variante A

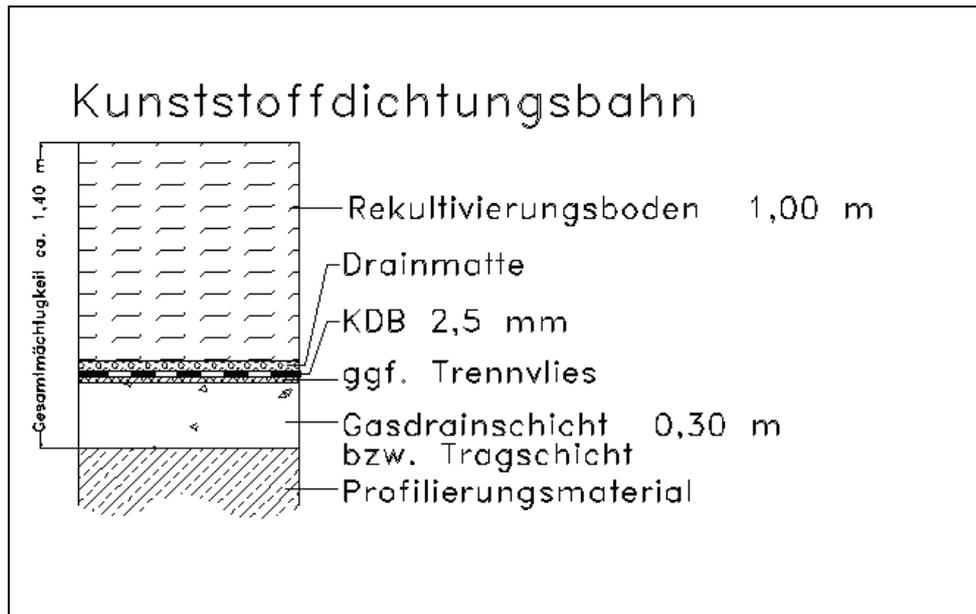


Abb. 3: Oberflächenabdichtung Variante B

Es werden die jeweiligen Arbeits- und Produktionsabläufe unter dem Gesichtspunkt des Energieverbrauchs pro m² aufgeschlüsselt und in einer Gesamtenergiebilanz gegenübergestellt. Gewählt werden dabei die Varianten A und B, die den Abb. 2 und 3 zu entnehmen sind.

Inhaltliche Bilanzgrenzen

Es wird versucht alle wesentlichen energiebeanspruchenden Vorgänge zu betrachten. Dabei werden nur unmittelbare Prozesse behandelt, mittelbare bzw. sekundäre und tertiäre Prozesse konnten aufgrund ihrer Vielfalt und Diversität nicht berücksichtigt werden. Es wird vereinfachend von einem im Bilanzraum vergleichbaren Energieaufwand für die Bereitstellung von Grundprodukten, Treibstoffen, Energie, Arbeitsgeräten, Maschinen und Transportmitteln ausgegangen. Als Beispiele hierfür seien genannt: Gewinnung und Transport des Vorproduktes Erdöl für den Dieselkraftstoff von Transportmitteln, Baumaschinen und für die Herstellung der Geokunststoffe; Energieverbrauch für die Raffination von Erdöl zu den veredelten Folgeprodukten Dieselkraftstoff und Polyolefine (PE-HD, PP); Transport des Diesels bis zum Verbraucher (LKW, Baumaschinen, Bahn, Schiff). Transport der Vorprodukte PE-HD und PP zum Produzenten. Herstellung, Transport, Aufbau der Gebäude und Produktionsmaschinen für die Herstellung der Geokunststoff-Ton-Dichtung und der Dränmatte.

Herstellung und Transport der Baumaschinen und Transportmittel zum Abbau, Transport und Einbau der mineralischen Abdichtungs- und der Entwässerungsschicht. Abwärme, Abwasser, Lärm und Erschütterung beim Abbau, Herstellung, Transport, Einbau der Dichtungs- und Dränelemente.

Der i. a. sehr gewichtige Endfaktor einer Produkt/Material-Ökobilanz "Entsorgung" muss aufgrund des spezifischen Verwendungszwecks nicht betrachtet werden. Alle betrachteten Produkte sind jeweils Systembestandteil des Oberflächenabdichtungssystems einer Deponie für die theoretisch zeitlich unbegrenzte Endlagerung von Abfällen. Der Entsorgungsaspekt hat allenfalls eine geringe mittelbare Wirkung bei der Herstellung und beim Transport (Abfälle, die bei der Produktion der Geokunststoffe anfallen bzw. deren Transport und Einbau; Abfälle durch die Nutzung von Transportmitteln und Baumaschinen u. ä.). Der Entsorgungsaspekt soll im Rahmen dieser Ausführungen nicht betrachtet werden, da eine Quantifizierung für die vorliegende Aufgabenstellung kaum möglich und auch nicht sinnvoll erscheint.

Aus Vereinfachungsgründen beschränkt sich die vorliegende vergleichende Ökobilanz selbst nahezu ausschließlich auf die mittelbar umweltrelevante Bilanzgröße "Energieverbrauch". Ein umfassender und direkter Vergleich aller Umweltauswirkungen (v. a. hinsichtlich Schadstoffemissionen, Lärmmissionen, Flächenverbrauch u. a.) vom Vorprodukt bis zum Einbau ist, aufgrund der unterschiedlichen Materialien, zum einen Lehm/Ton bzw. Kies als ausschließlich natürliche Rohstoffe und zum anderen industriell gefertigte Geokunststoffe auf der Basis eines natürlichen Rohstoffes, unseres Ermessens nicht möglich. Dem im Rahmen eines Vergleichs wichtigen Bilanzgrundsatz der Gleichartigkeit der Produkte bei ordnungs- und bestimmungsgemäßen Gebrauch (funktionelle Äquivalenz) kann deshalb nur eingeschränkt entsprochen werden.

Bilanzfaktoren

Der Vergleich erfolgt mittels folgender Bilanzfaktoren:

1. Abbau von Lehm/Tonschichten, Splitt, Sand, Nassbaggerkies,
(mineralische Dichtung, Entwässerungsschicht)
2. Energieinhalt der Geokunststoffe (Polyolfine)
3. Herstellung der Dränmatte
4. Herstellung der Kunststoffdichtungsbahn
5. Herstellung der Trennvliese

6. Transport der Materialien auf die Baustelle
7. Einbau der Materialien

Bilanzdimension

Als Bilanzdimension wird die Einheit kWh/m² gewählt. Zur Umrechnung der (üblichen) Volumenangabe für die mineralische Dichtung in m² wird folgende Festlegung getroffen: Dicke der mineralischen Dichtung ist 2 x 0,25 m = 0,5 m, Dicke der Entwässerungsschicht = 0,3 m entsprechend Nr. 10.4.1.4 der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TA Siedlungsabfall bzw. den Vorgaben der Deponieverordnung).

Produktkenndaten der Dränmatte

Es wurde als Beispiel eine dreischichtige Dränmatte Secudrän R201 DS 601/R201 der Fa. NAUE GmbH & Co.KG in Espelkamp-Fiestel mit Deck- und Trägergeotextil und Wirrgelegesickerschicht mit folgenden Produktkenndaten für die Ökobilanz herangezogen. Die Grunddaten für diese Dränmatte sind wie folgt:

| | |
|--|----------------------------|
| Deckvliesstoff aus PES (mechanisch verfestigtes Malivlies): | 300 g/m ² |
| Sickerschicht aus PP extrusionsverfestigt: | 600 g/m ² |
| <u>Trägervliesstoff aus PES (mechanisch verfestigtes Malivlies):</u> | <u>300 g/m²</u> |
| Flächengewicht: | 1.200 g/m ² |

Produktkenndaten der Kunststoffdichtungsbahn

Es wurde eine 2,5 mm dicke, beidseitig strukturierte Kunststoffdichtungsbahn aus PE-HD gemäß BAM-Zulassung (BAM 1992) mit folgenden Produktkenndaten für die Ökobilanz herangezogen.

| | |
|-----------------|------------------------|
| Flächengewicht: | 2.680 g/m ² |
|-----------------|------------------------|

Produktkenndaten der Trennvliese

Es wurden ca. 4 mm dicke Geotextile mit folgenden Produktkenndaten als Trennlagen für die Ökobilanz herangezogen.

Flächengewicht: 300 g/m²

Bodenphysikalische Kenndaten der Gasdrän-/Ausgleichsschicht

Es wurde ein typisches Gasdrän-/Ausgleichsschichtmaterial laufenden Baumaßnahme beim Bau einer Oberflächenabdichtung nach DepV / TA Siedlungsabfall (BMU 2002/1993) herangezogen.

Korngröße: 2/32 mm

Karbonatgehalt: ≤ 10 MA.%

Durchlässigkeitsbeiwert k: ≥ 5 · 10⁻⁴ m/s

Reibungswinkel: ≥ 34°

Verdichtungsgrad: ≥ 95 % der einfachen Proctordichte

Kennzeichnung gem. DIN 4022: Kies (gebrochenes Material, Splitt), weitgestuft

Trocken-/Feuchtdichte: 19 kN/m³ = 1,9 Mg/m³

Flächengewicht bei d = 0,3 m: 570 kg/m²

Flächengewicht bei d = 0,5 m: 950 kg/m²

Bodenphysikalische Kenndaten der mineralischen Abdichtung (MD)

Es wurde ein typischer Dichtungsboden aus einer laufenden Qualitätssicherungsmaßnahme beim Bau einer Oberflächenabdichtung nach DepV / TA Siedlungsabfall (BMU 2002/1993) herangezogen.

Feinstkorngehalt: ≥ 20 MA.%

Tonmineralgehalt: ≥ 10 MA.%

Karbonatgehalt: ≤ 15 MA.%

Organische Bestandteile: ≤ 5 MA.%

Durchlässigkeitsbeiwert k: ≤ 5 · 10⁻⁹ m/s

Verdichtungsgrad: ≥ 95 % der einfachen Proctordichte

Kennzeichnung gem. DIN 4022: Schluff, tonig, leicht sandig, leicht bis mittelplastisch (UL bis UM), steif

Trockendichte: $1,7 \text{ kN/m}^3 = 1,7 \text{ Mg/m}^3$

Feuchtdichte: $20 \text{ kN/m}^3 = 2 \text{ Mg/m}^3 = 1 \text{ Mg/m}^2$

(davon Wasser ca. 17 - 18 MA.% = ca. 150 kg/m^2)

Flächengewicht bei $d = 0,5 \text{ m}$: 1.000 kg/m^2

Bodenphysikalische/-mechanische Kenndaten der mineralischen Entwässerungsschicht (ES)

Gemäß TA Siedlungsabfall (1993) wurde ein nachfolgender Aufbau mit 16/32er bzw. 8/16er Kies mit folgenden Kenndaten für die Ökobilanz herangezogen. Die gleichen Daten werden auch für die Gasdrän- und Tragschicht unter der mineralischen Dichtung herangezogen.

| | |
|--|---------------------------------------|
| Korngröße: | 16/32 ggf. 8/16 |
| Durchlässigkeitsbeiwert: | $k: \geq 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ |
| Korndichte: | $2,7 \text{ Mg/m}^3$ |
| Porenvolumen (Porosität): | 40 % |
| Schüttdichte: | $1,62 \text{ Mg/m}^3$ |
| <hr/> | |
| Flächengewicht bei $d = 0,3 \text{ m}$: | 486 kg/m^2 |

Bodenphysikalische Kenndaten der Rekultivierungsschicht (RS)

Es wurde ein typischer Boden aus einer laufenden Qualitätssicherungsmaßnahme beim Bau einer Oberflächenabdichtung nach DepV / TA Siedlungsabfall herangezogen. Für beide Varianten wird der gleiche Bodentyp betrachtet, allerdings beträgt die Einbaustärke bei Variante A 2 m und bei Variante B 1 m.

| | |
|---|---|
| Bodenart: | schluffiger Boden, ca. 40 – 50 MA.% Schluff |
| Organische Bestandteile: | Unterboden kein Humus, Oberboden (30 cm) Humusgehalt ca. 4 MA. % |
| Verdichtungsgrad (unverdichteter Einbau): | ca. 90 % der einfachen Proctordichte |

Kennzeichnung gem. DIN 4022: Schluff, stark sandig, leicht tonig, leicht plastisch (UL), steif

Trockendichte: ca. $1,65 \text{ kN/m}^3 = 1,65 \text{ Mg/m}^3$

Feuchtdichte: ca. $18 \text{ kN/m}^3 = 1,8 \text{ Mg/m}^3 = 1 \text{ Mg/m}^2$

| | |
|--|-----------------------|
| Flächengewicht bei $d = 1,0 \text{ m}$: | 1.800 kg/m^2 |
| Flächengewicht bei $d = 2,0 \text{ m}$: | 3.600 kg/m^2 |

3. Berechnungen der einzelnen Bilanzfaktoren

3.1 Bilanzfaktoren Gewinnung mineralische Materialien

Energieverbrauch für die Gewinnung von mineralischem Dichtungsmaterial

Bei der Gewinnung des mineralischen Dichtungsmaterials wird von einer Entnahme des Bodenmaterials aus einer Baugrube, einer Lehmgrube oder z. B. von Abraummaterial eines Steinbruches oder einer Grube ausgegangen, welches eine häufige Art der Bodenherkunft für mineralische Dichtungen darstellt.

Beim Abbau des Bodenmaterials wird ein Hydraulikbagger mittlerer Größe mit einer Motorleistung von 100 kW, mit einem effektiven Löffelinhalt $1,35 \text{ Im}^3$ ($\text{Im} = \text{lose Masse}$), mit einer Arbeitstaktzeit von 0,45 min und einem Nutzungsfaktor für die Energiebilanz von $1 = 60$ Minuten pro Stunde reine Ladezeit angesetzt. Die theoretische Ladeleistung beträgt somit $1,35 \text{ m}^3 \cdot 0,45 \text{ min} = 180 \text{ fm}^3/\text{h}$ ($\text{fm} = \text{feste Masse}$). Hierbei wird ein Auflockerungsgrad 25 % zugrundegelegt. Die Festmasse des Dichtungsmaterials vor der Entnahme (natürliche Lagerungsdichte) entspricht in etwa der Dichte der verdichtet eingebauten mineralischen Dichtung. Die Masse entnommenen Dichtungsmaterials bzw. Dichtungsmaterial im eingebauten Zustand entspricht demnach $135 \text{ fm}^3/\text{h}$.

Grundsätzlich umfasst der Energieverbrauch bei allen im folgenden aufgeführten Lkws und Baumaschinen den Dieseltreibstoff und die Schmierstoffe, die mit ca. 6 % des Treibstoffverbrauchs angesetzt werden.

Bei einem spezifischen Energiebedarf des Baggers von 1.024 MJ/h errechnen sich:

| | |
|--|---------------------------------|
| 1.024 MJ/h : 135 m ³ /h | = 7,59 MJ/m ³ |
| dies entspricht: | = 2,11 kWh/m ³ |
| Mineralische Dichtung d = 0,5 m (1.000 kg/m ²) | <u>= 1,05 kWh/m²</u> |

Energieverbrauch für die Gewinnung von Material für die Rekultivierungsschicht

Bei der Gewinnung des Bodenmaterials wird ebenfalls von einer Entnahme des Bodenmaterials aus einer Baugrube, einer Lehmgrube oder z. B. von Abraummaterial eines Steinbruches oder einer Grube ausgegangen. Der Energiebedarf ist daher derselbe wie für die Gewinnung der mineralischen Abdichtung, allerdings wird die Rekultivierungsschicht später nicht verdichtet eingebaut, so dass von einer mittleren Dichte von 1.800 kg/m³ ausgegangen wird.

| | |
|---|---------------------------------|
| Rekultivierungsschicht d = 1,0 m (1.800 kg/m ²) | <u>= 3,80 kWh/m²</u> |
| Rekultivierungsschicht d = 2,0 m (3.600 kg/m ²) | <u>= 7,60 kWh/m²</u> |

Energieverbrauch für die Gewinnung und Aufbereitung von Kies und Sand für Kies als Dränmaterial für die Entwässerungsschicht (8/16 bzw. 16/32) bzw. für die Gasdrän-/Ausgleichsschicht (2/32)

Der Energieverbrauch für die Gewinnung von Kies setzt sich aus der eigentlichen Gewinnung (i. d. R. Nassbaggerung aus durchschnittlich 10 – 25 m Tiefe), den Transport von der Gewinnungsstätte (i. d. R. über Förderbänder) zum Kieswerk und die Aufbereitung (Waschen, Klassierung) zusammen. Als Beispiel wurde ein Schürfkübelbagger mit Raupenfahrwerk, Drehkranz, Ausleger, Schürfkübel mit Vorzugseil, Rückzugseil, Kippseil, herangezogen. Dieses diskontinuierlich arbeitende Gerät kann sowohl in der Nass- als auch bei der Trockengewinnung von Kies und Sand eingesetzt werden. Im Regelfall erfolgt der Abbau des Materials im Tiefschnitt, wobei Abbautiefen bis etwa 15 m möglich sind. In den Gewinnungsbetrieben werden diese Bagger mit Dienstgewichten von 50-100 Mg und installierten Motorleistungen von 130 bis 300 kW eingesetzt. Die Fördermengen erreichen bis zu 300 Mg/h (Die Industrie der Steine + Erden 1998). Das Nutzvolumen der Schürfkübel beträgt 2,5-4,2 m³.

Geht man von den angegebenen 300 Mg/h aus und von einer Motorleistung von 300 kW bei gleichem Wirkungsgrad wie der o. g. Hydraulikbagger (Leistung 100 kW, Energiebedarf 1.024 MJ/h = 284 kWh/h = 0,35), so errechnet sich für die Gewinnung von einem Mg Kies ein Energiebedarf von 2,84 kWh. Hinzu kommen noch der Energieverbrauch für den Transport von der Gewinnungsstelle zum Kieswerk (i. d. R. Förderbänder) und die Aufbereitung (Waschen, Klassieren) sowie die Zwischenlagerung und das Laden auf den LkW.

Für die hier durchgeführte Bilanzierung wurde deshalb ein statistischer Mittelwert herangezogen der sich aus Angaben des Statistischen Bundesamtes (1998) und des Bundesverbandes der Kies- und Sandindustrie zusammensetzt, wonach bei der Gewinnung von einem Mg Kies und Sand 7,7 % der Herstellungskosten von im Mittel 5,51 €/Mg, Energiekosten sind. Nach Angaben von Herrn Pal vom Bundesverband der Kies- und Sandindustrie kann für 1998 mit Energiekosten von ca. 0,08 € pro kWh gerechnet werden. Hieraus errechnet sich ein mittlerer Energiebedarf zur Förderung und Klassierung von Kies und Sand von etwa 5,35 kWh/Mg. Aus Vereinfachungsgründen wurde für das Material der Entwässerungsschicht und der Gasdrän-/Ausgleichsschicht der gleiche Rechenansatz verwendet, obwohl es sich beim Material der Gasdrän-/Ausgleichsschicht um ein gebrochenes Material handelt.

| | |
|---|---------------------------------|
| Gasdrän-/Ausgleichsschicht d = 0,3 m (570 kg/m ²) | <u>= 3,05Wh/m²</u> |
| Gasdrän-/Ausgleichsschicht d = 0,5 m (ca. 950 kg/m ²) | <u>= 5,08 kWh/m²</u> |
| Entwässerungsschicht d = 0,3 m (486 kg/m ²) | <u>= 2,60 kWh/m²</u> |

3.2 Bilanzfaktoren Transport der Vorprodukte zum Hersteller

Für den Transport der Vorprodukte zum Hersteller können folgende Angaben zum Energieverbrauch gemacht werden.

Tab. 1: Spezifischer Primärenergieverbrauch, Luftschadstoffemissionen (IFEU/TÜV 1989)

| | Energieverbrauch [kWs/tkm] | CO [g/tkm] | HC [g/tkm] | NO _x [g/tkm] | CO ₂ [g/tkm] |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------|----------------------------|----------------------------|
| Eisenbahn | 677 | 0,05 | 0,06 | 0,20 | 41 |
| Schiff ¹ | 423 | 0,12 | 0,10 | 0,40 | 30 |
| Straßengüterverkehr ² | 2.890 | 2,40 | 1,10 | 3,60 | 207 |

Da der Transportweg nicht definierbar ist und er für die Geokunststoffe kaum in das Gewicht fällt, wird darauf verzichtet einen exakten Ansatz zu machen. Es wird vereinfacht je kg Produktgewicht ein Wert von maximal 70 kWh/Mg angesetzt. Daraus ergeben sich bei den unterschiedlichen Flächengewichten:

| | |
|---|-------------------------------|
| Dränmatte (1.200 g PP/m ²) | <u>0,08 kWh/m²</u> |
| Kunststoffdichtungsbahn (2.680 g PE-HD/m ²) | <u>0,19 kWh/m²</u> |
| Trennvliese (300 PPg/m ²) | <u>0,02 kWh/m²</u> |

¹ Binnenschiff und Seeschiff

² Straßengüternah- und Fernverkehr

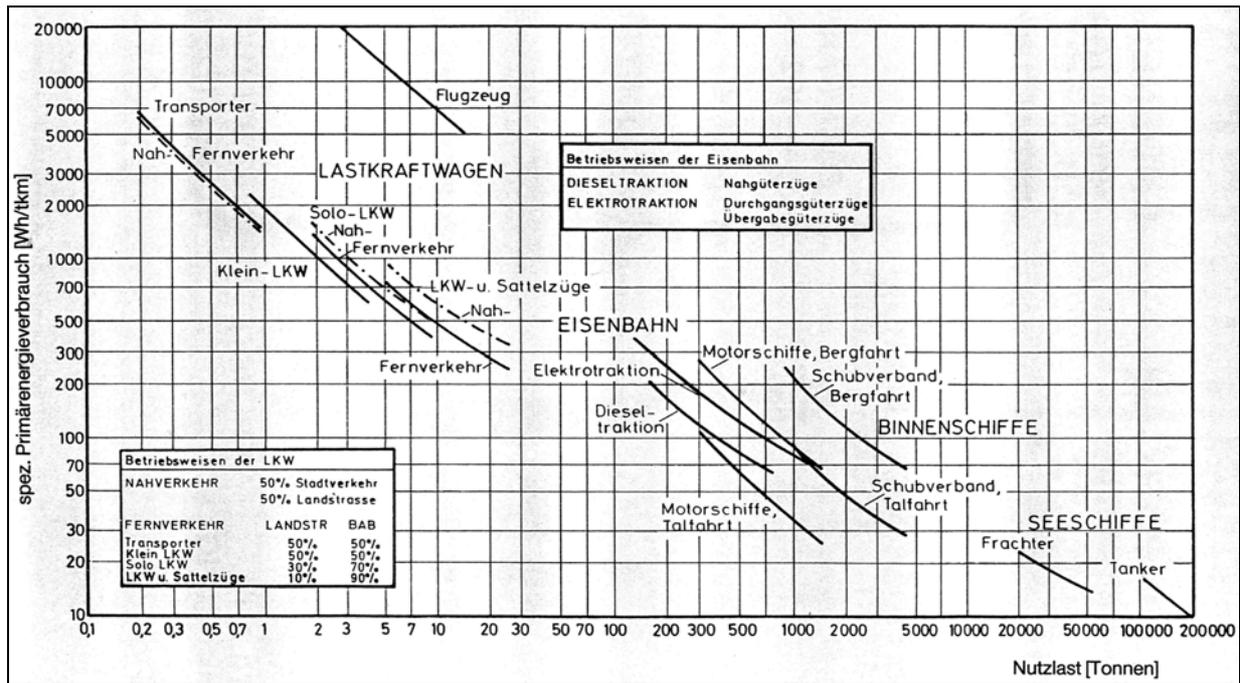


Abb. 4: Spezifischer Primärenergieverbrauch von Güterverkehrsmitteln für normierte Beförderungsabschnitte von Fahrzeugtypen (FGSV 1984).

3.3 Herstellung der Vorprodukte für Geokunststoffe (wie Polyolfine, PP oder PE-HD)

Energieinhalt von Polyethylen hoher Dichte und Polypropylen

Da es sich bei Polyethylen- und Polypropylen um ein Folgeprodukt aus Erdöl handelt, soll im Rahmen dieser Betrachtung auch der Energieinhalt (Feedstock = Energie im Produkt) von PE-HD und PP (Polyolfine) miteinbezogen werden. 1 kg des Kunststoffes Polyolfine haben einen Energieinhalt (Brennwert) von 46000 - 47000 kJ/kg. 1 kg Polypropylen hat einen Energieinhalt von 46,58 MJ/kg (Harding 1998) bzw. PE-HD von 47,74 MJ/kg (REUSSER 1998). Es ergeben sich somit folgende Energieinhalte:

| | | |
|---|--------------|--------------------------------|
| Dränmatte (1.200 g PP/m ²) | 55,90 MJ/kg | <u>15,53 kWh/m²</u> |
| Kunststoffdichtungsbahn (2.680 g PE-HD/m ²) | 127,94 MJ/kg | <u>35,54 kWh/m²</u> |
| Trennvliese (300 PPg/m ²) | 13,98 MJ/kg | <u>3,88 kWh/m²</u> |

Energieaufwand zur Herstellung von Roh-Polyethylen und Roh-Polypropylen

Polyethylen- und Polypropylenfasern werden für die Deckvliesstoffe sowie für die Trägergeotextilien der Dränmatte verwendet. Die Sickerschicht der Dränmatte besteht aus einem Wirrgelege aus Polypropylen. Zur Herstellung von PE-HD und PP werden nach Herstellerangaben (Hutten 1997) max. 1,0 kWh/kg benötigt (im Fall von Abwärmenutzung kann sich der reine Strombedarf bis auf ca. 0,6 kWh/kg verringern). In den Deck- und Trägervliesstoffen und dem Wirrgelege der Sickerschicht der Dränmatte sind 1,2 kg/m² PP enthalten. Für die Kunststoffdichtungsbahn werden bei gleichem Ansatz wie für die Dränmatte für die Herstellung des Vorproduktes HD-PE Granulat 1 kWh/kg Energie benötigt. Für 1 m² Kunststoffdichtungsbahn mit 2,5 mm Dicke bei einer Dichte von PE-HD von 0,95 g/cm³ ergibt sich ein Flächengewicht von 2.680 g HD-PE, so dass sich folgende Werte errechnen:

| | |
|---|-------------------------------|
| Dränmatte (300 g + 600 g + 300 g PP/m ²) | <u>1,20 kWh/m²</u> |
| Kunststoffdichtungsbahn (2.680 g PE-HD/m ²) | <u>2,68 kWh/m²</u> |
| Trennvlies (300 g PP/m ²) | <u>0,60 kWh/m²</u> |

Abweichend von der vergleichenden Energiebilanz zwischen den mineralischen und synthetischen Dichtungs- und Entwässerungsschichten können für die Kunststoffdichtungsbahn weitergehende Angaben für den Energieverbrauch mit dem ressourcenbezogenen Energiebedarf ab dem Rohöl am Bohrloch angegeben werden (REUSSER 1998). Demnach ist der Gesamt-Energiebedarf für die Herstellung und den Transport sowie die Raffination etc. für ein kg PE-HD Granulat 33,26 kJ/kg d. h. 9,24 kWh/kg. Die für die Herstellung von PE-HD Granulat oben genannte spez. Energiemenge von 1 kWh/kg bezieht sich, wie unter Punkt 2 „Inhaltliche Bilanzgrenzen“ erläutert, lediglich auf die Herstellung von PE-HD Granulat aus bereits raffiniertem Erdöl (PE-HD Granulatherstellung aus dem Vorprodukt). Im Rahmen der vergleichenden Energiebilanz ist dies u. e. akzeptabel, da im Gegenzug auch der Energieverbrauch für die Herstellung von Dieselkraftstoff beim Abbau und Transport der mineralischen Materialien nicht berücksichtigt wird. Im Rahmen der Betrachtung der Kunststoffdichtungsbahn kann die Betrachtung auf die Vorprodukte ausgeweitet werden, d. h. umfassender durchgeführt werden.

| | |
|---|--------------------------------|
| Kunststoffdichtungsbahn d = 2,5 mm (2.680 g/m ²) (mit Energieverbrauch ab Gewinnung Rohöl) | <u>24,76 kWh/m²</u> |
|---|--------------------------------|

3.4 Herstellung der Geokunststoffe

Herstellung der Dränmatte

Für die Herstellung der Dränmatte ergibt sich nach Herstellerangaben (Ehrenberg 2001) ein Energieverbrauch von:

| | |
|---|-------------------------------|
| Herstellung der Fasern: | 0,53 kWh/kg |
| Herstellung des Vliesstoffe: | 2 · 0,09 kWh/m ² |
| Faserextrusion (= 0,53 kWh/kg · 2 · 0,3 kg/m ²) | |
| + Herstellung Vliesstoff (= 2 · 0,09 kWh/m ²) = | <u>0,50 kWh/m²</u> |
| Sickerschicht (Wirrgelege): | |
| Extrusion Wirrgelege 0,38 kWh/m ² = | 0,38 kWh/m ² |
| Energieaufwand Herstellung Dränmatte: | <u>0,88 kWh/m²</u> |

Herstellung der Kunststoffdichtungsbahn

Extrusion der Kunststoffdichtungsbahn aus PE-HD Granulat 2,16 MJ/kg = 0,60 kWh/kg

| | |
|--|-------------------------------|
| Extrusion KDB 0,60 kWh/kg · 2,68 kg/m ² = | 1,61 kWh/m ² |
| Energieaufwand Herstellung Kunststoffdichtungsbahn: | <u>1,61 kWh/m²</u> |

Herstellung der Trennvliese

Für die Herstellung eines Trennvlieses (300 g/m²) zwischen zwei Schichten (z. B. Dränageschicht und Rekultivierungsschicht) ergibt sich nach Herstellerangaben (Ehrenberg 2001) ein Energieverbrauch von:

| | |
|--|-------------------------------|
| Herstellung der Fasern | |
| (Faserextrusion = 0,53 kWh/kg · 0,3 kg/m ²) | 0,16 kWh/m ² |
| Herstellung der Vliesstoffe (2 · 0,09 kWh/m ²) | = 0,09 kWh/m ² |
| Energieaufwand Herstellung eines Trennvlieses: | <u>0,25 kWh/m²</u> |

3.5 Bilanzfaktor Transport zur Baustelle

Transport des mineralischen Dichtungsmaterials

Es wird ein 6-Achs-LKW (Sattelzug) mit 24 Mg Nutzlast bzw. ca. 15 m³ (spez. Feuchtgewicht ca. 1.600 kg/m³ als lose Masse, Auflockerung von ca. 20 %) mit einem Verbrauch von 40 l/100 km zugrundegelegt. Bei der Berechnung wird eine einfache Fahrstrecke von 35 km angesetzt. Der Entfernungsansatz basiert auf der Inanspruchnahme regionaler Abbaustellen. Die Berechnung berücksichtigt die Hin- und Rückfahrt.

Aus dem spezifischen Energiebedarf eines LKWs von 2.145 MJ/100 km und einer Ladekapazität von 15 m³ ergibt sich ein Energiebedarf von:

$$21,45 \text{ MJ/km} \cdot 70 \text{ km} : 15 \text{ m}^3 = 100,1 \text{ MJ/m}^3 = 27,81 \text{ kWh/m}^3 = \underline{\underline{13,90 \text{ kWh/m}^2}}$$

Transport des Materials für die Rekultivierungsschicht

Es wird ein 6-Achs-LKW (Sattelzug) mit 24 Mg Nutzlast bzw. ca. 15 m³ (spez. Feuchtgewicht ca. 1.600 kg/m³ als lose Masse, Auflockerung von ca. 20 %) mit einem Verbrauch von 40 l/100 km zugrundegelegt. Bei der Berechnung wird eine einfache Fahrstrecke von 35 km angesetzt. Der Entfernungsansatz basiert auf der Inanspruchnahme regionaler Abbaustellen. Die Berechnung berücksichtigt die Hin- und Rückfahrt.

Aus dem spezifischen Energiebedarf eines LKWs von 2.145 MJ/100 km und einer Ladekapazität von 15 m³ ergibt sich ein Energiebedarf von:

$$(21,45 \text{ MJ/km} \cdot 70 \text{ km}) : 15 \text{ m}^3 = 100,10 \text{ MJ/m}^3 = 27,81 \text{ kWh/m}^3$$

| | | |
|----------------------------|---|--------------------------------|
| Rekultivierungsschicht 1 m | = | <u>27,80 kWh/m²</u> |
| Rekultivierungsschicht 2 m | = | <u>55,60 kWh/m²</u> |

Transport von Kies für die mineralische Entwässerungsschicht und die Gasdrän-/Ausgleichsschicht

Es wird ein 6-Achs-LKW (Sattelzug) mit 24 Mg Nutzlast bzw. ca. 15 m³ (spez. Feuchtgewicht ca. 1.600 kg/m³ als lose Masse, Auflockerung von ca. 20 %) ebenfalls mit einem Verbrauch von 40 l/100 km zugrundegelegt. Bei der Berechnung wird eine einfache Fahrstrecke von 50 km angesetzt. Der Entfernungsansatz berücksichtigt die Knappheit der Ressource Kies und die daraus resultierenden größeren Transportentfernungen. Die Berechnung berücksichtigt die Hin- und Rückfahrt (Leerfahrt).

Aus dem spezifischen Energiebedarf eines LKWs von 2.145 MJ/100 km und einer Ladekapazität von 15 m³ ergibt sich ein Energiebedarf von:

| | | |
|--|----------------------------|----------------------------------|
| 21,45 MJ/km · 100 km : 15 m ³ | = 143,00 MJ/m ³ | = 39,72 kWh/m ³ |
| Gasdrän-/Ausgleichsschicht 30 cm | | = <u>11,91 kWh/m²</u> |
| Gasdrän-/Ausgleichsschicht 50 cm | | = <u>18,85 kWh/m²</u> |
| Kiesdränschicht 30 cm | | = <u>11,91 kWh/m²</u> |

Transport der Kunststoffdichtungsbahn

Nach Herstellerangaben können pro LKW 7.140 m² Kunststoffdichtungsbahnen transportiert werden (Ansatz Ladegrad 80-90 %) werden. Der Dieserverbrauch beträgt 40 l/100 km.

Für den Ansatz der Transportentfernung soll in hinreichendem Maß berücksichtigt werden, dass es bundesweit nur wenige Herstellerfirmen gibt und sich dem zufolge im Durchschnitt größere Transportstrecken ergeben.

Es wird von einer durchschnittlichen Transportentfernungen (einfach) von 300 km ausgegangen. Die angesetzten 500 km berücksichtigen ca. 2/3 an Rückfahrten als Leerfahrten. Für etwa 1/3 der Rückfahrten zum Hersteller wird von einer Rückfracht ausgegangen (freie Spediteure).

Unter Zugrundelegung einer durchschnittlichen Transportentfernung von 500 km und eines spezifischen Energiebedarfs von 2.145 MJ/100 km pro LKW ergibt sich ein Energieverbrauch von:

$$21,45 \text{ MJ/km} \cdot 500 \text{ km} : 7.140 \text{ m}^2 = 1.50 \text{ MJ/m}^2 = \underline{\underline{0,42 \text{ kWh/m}^2}}$$

Transport der Dränmatte

Nach Herstellerangaben können pro LKW ca. 3.500 m² Dränmatte (Ansatz Ladegrad 80-90 %) transportiert werden. Die Begrenzung der Ladekapazität ist dabei nicht das Gewicht der Ladung sondern das Volumen. Die Ladung wiegt aufgrund des geringen Gewichts der Dränmatten lediglich ca. 5 Tonnen. Der Dieserverbrauch wird daher lediglich mit 36 l/100 km angenommen.

Für den Ansatz der Transportentfernung soll in hinreichendem Maß berücksichtigt werden, dass es bundesweit nur wenige Herstellerfirmen gibt und sich dem zufolge im Durchschnitt größere Transportstrecken ergeben.

Es wird von einer durchschnittlichen Transportentfernung (einfach) von 300 km ausgegangen. Die angesetzten 500 km berücksichtigen ca. 2/3 an Rückfahrten als Leerfahrten. Für etwa 1/3 der Rückfahrten zum Hersteller wird von einer Rückfracht ausgegangen (freie Spediteure).

Unter Zugrundelegung einer durchschnittlichen Transportentfernung von 500 km und eines spezifischen Energiebedarfs von 1.823 MJ/100 km (aufgrund des geringen Gewichts der Ladung von ca. 4,5 Mg werden nur 85 % des normalen Verbrauchs angesetzt) pro LKW ergibt sich ein Energieverbrauch von:

$$18,23 \text{ MJ/km} \cdot 500 \text{ km} : 3.500 \text{ m}^2 = 2.60 \text{ MJ/m}^2 = \underline{\underline{0,72 \text{ kWh/m}^2}}$$

Transport der Trennvliese (300g/m²)

Transport der Geotextilien (2 Trennvliese á 300 g/m²) zur Baustelle:

Aufgrund des gegenüber Sand und Kies vernachlässigbaren Energieverbrauchs für den Transport der Geotextilien wurden dieser aus den vergleichbaren Ansätzen für den Transport der Dränmatte bzw. der Kunststoffdichtungsbahn abgeschätzt:

Transport einer Lage Trennvlies: = 0,30 kWh/m²

3.6 Bilanzfaktor Einbau der Materialien**Mineralische Abdichtung (MD)**

a) Profilgerechtes Verteilen des Materials

Als Baugerät wird eine Schubraupe mit einer Leistung von 136 kW mit einem spezifischen Energiebedarf von 1.392 MJ/h verwendet.

Die Einbauleistung wird mit 155 m³/h festgelegt. Somit errechnet sich ein Energieverbrauch von:

$$1.392 \text{ MJ/h} : 155 \text{ m}^3/\text{h} \quad = 8,98 \text{ MJ/m}^3 \quad = 2,50 \text{ kWh/m}^3 \quad = \underline{\underline{1,25 \text{ kWh/m}^2}}$$

b) Bodenbearbeitung mit einer Fräse

Es wird davon ausgegangen, dass eine Fräse mittlerer Kapazität zwei Arbeitsübergänge benötigt, um die gewünschte Korngröße des Materials zu erreichen. Jede der beiden 0,25 m starken mineralischen Schichten ist 2 mal zu fräsen.

Die Arbeitsgeschwindigkeit beträgt 6 - 8 m/min. Gewählt werden 7 m/min. Die effektive Arbeitsbreite ist 1,8 m. Somit werden 12,6 m²/min gefräst.

Bei einem spezifischen Energiebedarf der Fräse von 2.990 MJ/h errechnen sich:

$$2.990 \text{ MJ/h} / 60 \text{ min} / 12,6 \text{ m}^2 \quad = 3,96 \text{ MJ/m}^2 \quad = 1,10 \text{ kWh/m}^2$$

$$4 \text{ Fräsvorgänge} \quad = \underline{\underline{4,39 \text{ kWh/m}^2}}$$

c) Bodenbearbeitung durch Verdichten und Abwalzen

Es werden zwei verschiedene Walzentypen eingesetzt:

Zur Erbringung der Hauptverdichtungsleistung wird ein Stampffußwalzenzug (18 Mg) mit insgesamt 6 Übergängen angesetzt. Die Leistung beträgt bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von 1.750 m/h und einer effektiven Arbeitsbreite von 1,9 m insgesamt 3.325 m²/h. Der spezifische Energieverbrauch liegt bei 1.208 MJ/h. Somit errechnen sich:

$$\begin{aligned}
 1.208 \text{ MJ/h} : 3.325 \text{ m}^2/\text{h} &= 0,36 \text{ MJ/m}^2 &= 0,10 \text{ kWh/m}^2 \\
 \text{Insgesamt 10 Übergänge (1. Lage 6, 2. Lage 4, s.u.)} &&= \underline{1,01 \text{ kWh/m}^2}
 \end{aligned}$$

Zur abschließenden Verdichtung sowie zum Oberflächenschluss der Stampffußindrücke wird ein Glattmantelwalzenzug (10 Mg) mit 3 Übergängen eingesetzt. Die Flächenleistung entspricht dem o. g. Typ. Der spezifische Energieverbrauch beträgt 850 MJ/h. Somit errechnen sich:

$$\begin{aligned}
 850 \text{ MJ/h} : 3.325 \text{ m}^2/\text{h} &= 0,26 \text{ MJ/m}^2 &= 0,07 \text{ kWh/m}^2 \\
 3 \text{ Übergänge} &&= 0,21 \text{ kWh/m}^2
 \end{aligned}$$

Zusammenfassend stellt sich der Energieverbrauch für den Einbau von 1 m² mineralischer Dichtung wie folgt dar:

| | |
|------------------------------|-------------------------------|
| Schubraupe: | 1,25 kWh/m ² |
| Fräse: | 4,39 kWh/m ² |
| Stampffußwalzenzug: | 1,01 kWh/m ² |
| <u>Glattmantelwalzenzug:</u> | <u>0,21 kWh/m²</u> |
| Summe: | <u>6,86 kWh/m²</u> |

Einbau der Rekultivierungsschicht

Das Material der Rekultivierungsschicht soll nur profilgerecht verteilt und nicht verdichtet werden. Als Baugerät wird eine Schubraupe mit einer Leistung von 136 kW mit einem spezifischen Energiebedarf von 1.392 MJ/h verwendet.

Die Einbauleistung wird mit 155 m³/h festgelegt. Somit errechnet sich ein Energieverbrauch von:

| | | |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| 1.392 MJ/h : 155 m ³ /h | = 8,98 MJ/m ³ | = 2,50 kWh/m ³ |
| <hr/> | | |
| Einbau Rekultivierungsschicht 1 m | | = <u>2,50 kWh/m²</u> |
| Einbau Rekultivierungsschicht 2 m | | = <u>5,00 kWh/m²</u> |

Einbau der Gasdrän-/Ausgleichsschicht

Profilgerechtes Verteilen des Materials:

Als Baugerät wird eine Schubraupe mit einer Leistung von 136 kW mit einem spezifischen Energiebedarf von 1.392 MJ/h verwendet.

Die Einbauleistung wird mit 155 m³/h festgelegt. Somit errechnet sich ein Energieverbrauch von:

| | | | |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 1.392 MJ/h : 155 m ³ /h | = 8,98 MJ/m ³ | = 2,50 kWh/m ³ | = <u>1,25 kWh/m²</u> |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------|

Zur Verdichtung wird ein Glattmantelwalzenzug (10 Mg) mit 3 Übergängen eingesetzt. Die Flächenleistung entspricht dem gleichen Typ wie bei der MD. Der spezifische Energieverbrauch beträgt 850 MJ/h. Somit errechnen sich:

| | | |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| 850 MJ/h : 3.325 m ² /h | = 0,26 MJ/m ² | = 0,07 kWh/m ² |
| 2 Übergänge | | = 0,14 kWh/m ² |
| <hr/> | | |
| Einbau einer Schicht von 30 cm | | = <u>0,89 kWh/m²</u> |
| Einbau einer Schicht von 50 cm | | = <u>1,39 kWh/m²</u> |

Einbau der mineralischen Entwässerungsschicht

Verteilung des Kiesel der Entwässerungsschicht:

Als Baugerät für die Bekiesung wird ein Hydraulikbagger mit 100 kW und einem spezifischen Energiebedarf von 1.024 MJ/h verwendet. Der Hydraulikbagger verteilt den Kies gleichmäßig auf der Dichtung. Er baut sich selbst seine Fahrstraßen (Bekiesung einer Kunststoffdichtungsbahn) auf der Dichtungsschicht. Die Einbauleistung beträgt ca. 1.000 m² pro Tag.

Somit errechnet sich ein Energieverbrauch von:

$$\begin{array}{r} 1.024 \text{ MJ/h} \cdot 8 \text{ h} : 1000 \text{ m}^2 \\ \hline \text{Einbau einer Schicht von 30 cm} \end{array} \quad \begin{array}{l} = 8,19 \text{ MJ/m}^2 \\ = \underline{\underline{2,28 \text{ kWh/m}^2}} \end{array}$$

Einbau der Trennvliese

Für die Verlegung eines Trennvlieses wird von einer Verlegeleistung von 5.000 m² pro Tag ausgegangen. Der Berechnungsansatz legt die gleichen Gerätschaften und Einsatzdauern wie für die Verlegung der Dränmatte zugrunde (s. u.). Lediglich die Verlegeleistung wird aufgrund der einfacheren Verlegung für die Trennvliese auf 5000 m² pro Tag erhöht. Der Energieverbrauch beträgt somit:

$$(461 \text{ MJ/h} \cdot 8 \text{ h} + 500 \text{ MJ/h} \cdot 3 \text{ h}) : 5.000 \text{ m}^2 = 1,04 \text{ MJ/m}^2 = \underline{\underline{0,29 \text{ kWh/m}^2}}$$

Einbau der Dränmatte

Es wird von einer Verlegeleistung von 3.000 m² pro Tag ausgegangen. Die Verlegeleistung hängt abgesehen von der Witterung im wesentlichen von Flächenzuschnitt, von der Zugänglichkeit, von den Transportentfernungen im Baufeld sowie von Böschungsneigungen und -längen ab. An Geräten wird folgende Kombination zugrundegelegt:

Bagger mit Traverse 8 h (100 kW, Teillastbetrieb 45 %, spezifischer Energiebedarf 461 MJ/h). Radlader 3 h (spezifischer Energiebedarf 500 MJ/h)

Der Energieverbrauch beträgt somit:

$$(461 \text{ MJ/h} \cdot 8 \text{ h} + 500 \text{ MJ/h} \cdot 3 \text{ h}) : 3.000 \text{ m}^2 = 1,73 \text{ MJ/m}^2 = \underline{\underline{0,48 \text{ kWh/m}^2}}$$

Bei der Verlegung der Dränmatten kann davon ausgegangen werden, dass der spezifische Energiebedarf für die Verlegearbeit der Dränmatte durch das gemeinsame Verlegen in Kombination mit einer KDB und/oder einer Bentonitmatte weiter absinkt. Es arbeiten die gleiche Verlegemannschaft und die gleichen Geräte an der Verlegung der Bentonitmatte und der Dränmatte. Die Dränmatte wird dem Dichtungselement sukzessiv nachgezogen.

Einbau der Kunststoffdichtungsbahn

Im Rahmen dieser Öko-/Energiebilanz wird die Kunststoffdichtungsbahn als separates Dichtungselement betrachtet. Kommt die KDB in Kombination mit einer mineralischen Flächen- drainage zum Einsatz, so ist zusätzlich die Herstellung, der Heizwert und die Verlegung einer geotextilen Schutzlage als weitere Systemkomponente des Abdichtungssystems zu berücksichtigen. Bei Oberflächenabdichtungen wird heute die KDB häufig mit einer Dränmatte überdeckt, welche gleichzeitig als Schutzlage fungiert. Dies hat einen Einfluss auf die Verlegeleistung beider Systeme, da die Dränmatte sukzessive nachgezogen wird. Es wird von einer Verlegeleistung incl. Verschweißen für die Kunststoffdichtungsbahn von im Mittel 1.500 m² pro Tag ausgegangen. Die Verlegeleistung hängt abgesehen von der Witterung im wesentlichen von Flächenzuschnitt, von der Zugänglichkeit, von den Transportentfernungen im Bau- feld sowie von Böschungsneigungen und -längen ab. An Geräten wird folgende Kombination zugrundegelegt:

Bagger mit Traverse 8 h (100 kW, Teillastbetrieb 33 %, spezifischer Energiebedarf 338 MJ/h). Radlader 2 h (spezifischer Energiebedarf 500 MJ/h). Schweißen (spezifischer Energiebedarf 0,0132 MJ/kg HD-PE) = 0,0098 kWh/m²

Der Energieverbrauch beträgt somit:

$$\begin{aligned} (338 \text{ MJ/h} \cdot 8 \text{ h} + 500 \text{ MJ/h} \cdot 2 \text{ h}) : 1.500 \text{ m}^2 &= 2,47 \text{ MJ/m}^2 \\ \text{gesamt:} &0,69 \text{ kWh/m}^2 + 0,0098 \text{ kWh/m}^2 \\ &= \underline{\underline{0,70 \text{ kWh/m}^2}} \end{aligned}$$

4. Darstellung des Gesamtenergieverbrauchs der Dichtungs- und Dränelemente sowie der Rekultivierungsschicht

Die vergleichende Bilanz mittels der festgelegten Bilanzgrößen ist nachfolgender Tabelle 2 zu entnehmen.

Wie unter Punkt 2 „Inhaltliche Bilanzgrenzen“ aufgeführt, wurde der Energieverbrauch für die Herstellung der Vorprodukte von Dieselkraftstoff und PE-HD Granulat für die vergleichende Betrachtung nicht berücksichtigt. Wird dies am Beispiel der KDB für das PE-HD Granulat berücksichtigt, so würde der Energiebedarf noch einmal deutlich auf 64,45 kWh/m² ansteigen.

Dies betrifft auch die PP Komponenten der Dränmatte sowie alle Gewinnungs-, Transport und Einbauvorgänge der mineralischen Materialien für die Dieselkraftstoffe bzw. elektrische Energie eingesetzt werden. Alle Summenwerte der Energiebilanz, insbesondere die der mineralischen Komponenten, würden sich bei Berücksichtigung des Energiebedarfs für die Herstellung der Vorprodukte von Diesel und PE-HD/PP Granulat ab Rohöl Bohrloch noch einmal merklich erhöhen.

Tab. 2: Energiebilanzvergleich mineralische und synthetische Dichtungs- und Entwässerungsschichten mit Energieinhalt (feedstock) der Geokunststoffe (Angaben in kWh/m²).

| kWh/m ² | Dränmatte | Mineralische Dichtung | Flächendränage | Kunststoffdichtungsbahn |
|-------------------------|--------------|-----------------------|----------------|-------------------------|
| Gewinnung | - | 1,05 | 2,60 | - |
| Transport ¹⁾ | - | - | - | - |
| Feedstock | 15,53 | - | - | 35,54 |
| Herstellung | 2,08 | - | - | 4,29 |
| Transport ²⁾ | 0,77 | 13,90 | 11,91 | 0,42 |
| Einbau | 0,48 | 6,86 | 2,28 | 0,70 |
| Summe | 18,86 | 21,81 | 16,79 | 40,95 |

¹⁾ *Aufbereitung und Transport der Vorprodukte zum Hersteller*

²⁾ *Transport von der Gewinnungsstätte bzw. vom Hersteller zur Einbaustelle*

Tab. 3: Energiebilanzvergleich mineralische und synthetische Dichtungs- und Entwässerungsschichten ohne Energieinhalt (feedstock) der Geokunststoffe (Angaben in kWh/m²).

| kWh/m ² | Dränmatte | Mineralische Dichtung | Flächendränage | Kunststoffdichtungsbahn |
|-------------------------|-------------|-----------------------|----------------|-------------------------|
| Gewinnung | - | 1,05 | 2,60 | - |
| Transport ¹⁾ | - | - | - | - |
| Feedstock | - | - | - | - |
| Herstellung | 2,08 | - | - | 4,29 |
| Transport ²⁾ | 0,77 | 13,90 | 11,91 | 0,42 |
| Einbau | 0,48 | 6,86 | 2,28 | 0,70 |
| Summe | 3,33 | 21,81 | 16,79 | 5,49 |

¹⁾ *Aufbereitung und Transport der Vorprodukte zum Hersteller*

²⁾ *Transport von der Gewinnungsstätte bzw. vom Hersteller zur Einbaustelle*

5. Vergleichsbetrachtung Synthetische Dichtung / mineralische Dichtung sowie Kiesdränage / Dränmatte

Stellt man die Werte für die einzelnen Materialien zusammen so ergibt sich folgende Energiebilanz für die beiden Varianten der Oberflächenabdichtung (siehe Tabellen 4 und 5):

Tab. 4: Energiebilanzvergleich der Varianten A und B mit Energieinhalt (feedstock) der Geokunststoffe (Angaben in kWh/m²).

| Bauteil (inklusive feedstock) | Variante A | Variante B | Variante A | Variante B |
|------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|
| | Dicke in m | Dicke in m | kWh/m ² | kWh/m ² |
| Gasdränschicht / Ausgleichsschicht | 0,5000 | 0,3000 | 25,32 | 15,85 |
| Trennvlies | 0,0040 | 0,0040 | 0,00 | 5,34 |
| Mineralische Dichtung | 0,5000 | - | 21,81 | 0,00 |
| Trennvlies | 0,0040 | - | 5,34 | 0,00 |
| Kunststoffdichtungsbahn | - | 0,0025 | 0,00 | 41,13 |
| Dränmatte | - | 0,0100 | 0,00 | 18,89 |
| Dränschicht | 0,3000 | - | 16,79 | 0,00 |
| Trennvlies | 0,0040 | - | 5,34 | 0,00 |
| Rekultivierungsschicht | 2,0000 | 1,0000 | 68,20 | 34,10 |
| Gesamt | 3,3120 | 1,3165 | 142,80 | 115,31 |

Tab. 5: Energiebilanzvergleich der Varianten A und B ohne Energieinhalt (feedstock) der Geokunststoffe (Angaben in kWh/m²).

| Bauteil (ohne feedstock) | Variante A | Variante B | Variante A | Variante B |
|------------------------------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|
| | Dicke in m | Dicke in m | kWh/m ² | kWh/m ² |
| Gasdränschicht / Ausgleichsschicht | 0,5000 | 0,3000 | 25,32 | 15,85 |
| Trennvlies | 0,0040 | 0,0040 | 0,00 | 1,46 |
| Mineralische Dichtung | 0,5000 | - | 21,81 | 0,00 |
| Trennvlies | 0,0040 | - | 1,46 | 0,00 |
| Kunststoffdichtungsbahn | - | 0,0025 | 0,00 | 5,60 |
| Dränmatte | - | 0,0100 | 0,00 | 3,36 |
| Dränschicht | 0,3000 | - | 16,79 | 0,00 |
| Trennvlies | 0,0040 | - | 1,46 | 0,00 |
| Rekultivierungsschicht | 2,0000 | 1,0000 | 68,20 | 34,10 |
| Gesamt | 3,3120 | 1,3165 | 135,04 | 60,37 |

6. Zusammenfassende Bewertung - Ökobilanz

Die vergleichende Energiebilanz der beiden Abdichtungs- und Entwässerungssysteme (Varianten A und B) zeigt, dass die mineralischen Abdichtungssysteme aufgrund ihrer großen Massen hohe Energieaufwendungen für die Gewinnung, den Transport und den Einbau benötigen. Demgegenüber haben die Geokunststoffe in der Regel vergleichsweise geringe Energieaufwendungen für Herstellung, Transport und Einbau.

Die vergleichende Energiebilanz zwischen der Erstellung einer Abdichtung mit mineralischem Dichtungsmaterial und Geokunststoffen zeigt, dass die Verfügbarkeit an geeignetem mineralischen Dichtungsmaterial in der Nähe der Baustelle zum entscheidenden Faktor für die Entscheidung aus Sicht einer vergleichenden Energiebilanz darstellt. Da sehr große Massen an mineralischen Materialien benötigt werden, kann eine ortsnahe Gewinnung der mineralischen Komponenten jedoch i. d. R. ausgeschlossen werden.

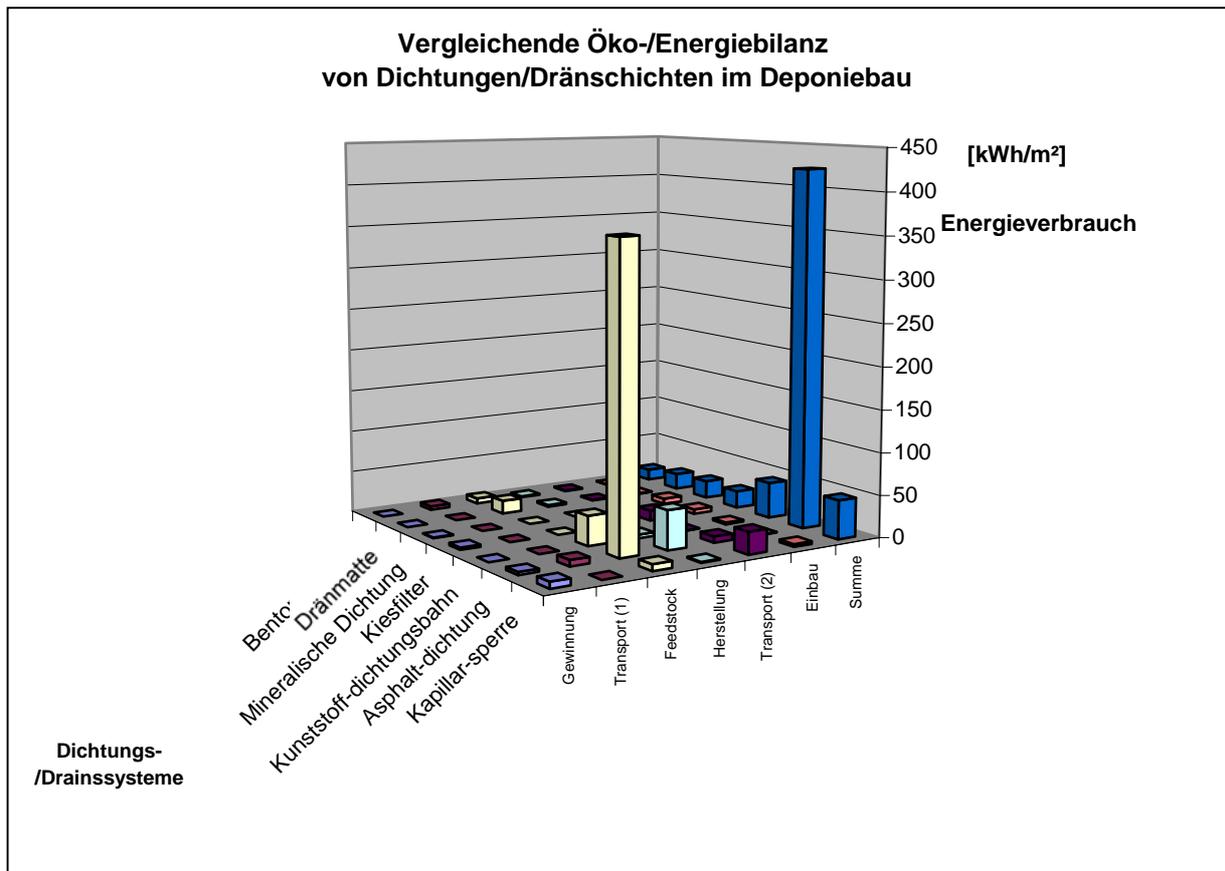


Abb. 5: Vergleichende Öko-Energiebilanz von Dichtungen und Dränschichten im Deponiebau.

Die verursachenden Faktoren des hohen Energieverbrauchs der mineralischen Dichtung resultieren eindeutig aus dem notwendigen Einsatz der LKWs für den Transport des mineralischen Dichtungsmaterials und nachgeordnet der Einbaufahrzeuge, wobei der Energieverbrauch der Einbaufahrzeuge als annähernd fix zu betrachten ist. Der transportbedingte Energieverbrauch verringert sich mit kürzerer Entfernung zwischen Abbaustelle und Einbauort in etwa linear.

Bei der Dränmatte und der Kunststoffdichtungsbahn hat die Transportentfernung vom Hersteller zur Baustelle aufgrund der geringen spezifischen Masse der Geokunststoffe nur vergleichsweise geringen Einfluss auf die Energiebilanz. Auch der einbaubedingte Energieverbrauch fällt kaum ins Gewicht.

Die wesentlichen Bilanzfaktoren bei den Geokunststoffen sind der hohe Energieinhalt (Feedstock) der hochwertigen Kunststoffe Polyethylen und Polypropylen und der Herstellungsprozess. Dies wird bei der Betrachtung der Kunststoffdichtungsbahn besonders deutlich. Für den Vergleich wurde bei den Dichtungs-/Dränsystemen aus Geokunststoffen ab der Herstellung des PE-HD bzw. PP Granulats bilanziert. Bezieht man hierfür die Energieaufwendungen ab Rohöl Bohrloch mit ein, erhöht sich dieser Wert erheblich. Dies wäre jedoch auch bei der Betrachtung des Energieverbrauchs von Dieselkraftstoff ab Rohöl Bohrloch für das Laden, Transportieren und den Einbau der Dichtungsmaterialien der Fall. Hier bieten sich nur wenige Ansätze zur Reduzierung, wenn nicht Produkte mit geringerem Flächengewicht, d. h. weniger PE-HD, PP pro m² eingesetzt werden sollen. Evtl. können produktionsbedingte Energieeinsparungen den Gesamtenergieverbrauch noch geringfügig senken.

Aus umwelttechnischer Sicht kann jedoch der Energieinhalt der Geokunststoffprodukte nicht angesetzt werden, da er (zumindest kurzfristig) keinerlei nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt hat. Eine schleichende Freisetzung des Energiegehalts durch die Zersetzung der Materialien über viele Jahrhunderte kann in dieser Betrachtung nicht mit angesetzt werden, da die Stoffe über eine sehr lange Zeit stabil sind (mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte).

Da die Emissionen, welche bei der Herstellung der beiden Abdichtungsvarianten A und B frei werden nicht exakt gefasst werden können, wird auf eine Wichtung dieser Emissionen und somit auf eine echte Ökobilanzierung verzichtet, zumal sich unterschiedliche Emissionen (CO, CO₂, SO₂ etc.) ohnehin nur schwer gegeneinander abwägen lassen. Es scheint jedoch klar, dass aus ökologischer Sicht die Variante Nachteile aufweist, welche die höheren Emissionen aus Lkw-Transport verursacht, da die Emissionen bei Lkws noch relativ wenig gereinigt werden (z. B. keine Rußfilter), während hier bei Produktionsstätten klare Vorgaben und Grenzwerte für Emissionen durch das Immissionsschutzrecht gegeben sind.

Tab. 6: Generelle Vor- und Nachteile von mineralischen Abdichtungen und Geokunststoff-Ton-Dichtungen unter dem Aspekt der vergleichenden Öko-/Energiebilanz

| Mineralische Abdichtung | Geokunststoff-Ton-Dichtung |
|--|---|
| großer Volumenbedarf | geringer Volumenbedarf |
| großes Gewicht | geringes Gewicht |
| Materialgewinnung aufgrund großer spez. Massen energieaufwendig | Materialgewinnung und Aufbereitung aufgrund geringer spez. Massen vgl. wenig energieaufwendig |
| kein „Feedstock“ | Transport Vorprodukt trotz langer Transportwege zum Hersteller aufgrund geringer spez.. Massen vgl. wenig energieaufwendig |
| keine Produktion | hoher Energieinhalt (Brennwert) der Geokunststoffe (Polyolifine), trotz sehr geringer spez. Massen Produktionsprozess vgl. wenig energieaufwendig |
| Transport von der Gewinnungsstätte zur Baustelle aufgrund großer Massen energieaufwendig, jedoch in günstigen Fällen geringer Energieaufwand durch geringe Transportentfernungen | Transport zur Baustelle auch bei langen Transportwegen aufgrund geringer Massen sehr geringer Energieaufwand |
| Einbau und Verdichtung aufgrund schwerem Einbaugeräts (Raupe, Fräse, Walze) sehr energieaufwendig | leichtes Einbaugerät geringer Energiebedarf |

Tab. 7: Vor- und Nachteile von mineralischen Entwässerungsschichten und Dränmatten unter dem Aspekt der vergleichenden Öko-/Energiebilanz

| Mineralische Entwässerungsschicht | Dränmatte |
|---|---|
| großer Volumenbedarf 0,3 m ³ /m ² | geringer Volumenbedarf 0,02 m ³ /m ² |
| großes Gewicht 486 kg/m ² | geringes Gewicht 1,2 kg/m ² |
| Materialgewinnung Kies aufgrund großer spez. Massen energieaufwendig. Kies wird i. d. R. im Nassbaggerbetrieb aus größeren Tiefen (10 – 25 m) gewonnen und muss noch gewaschen und klassiert werden | hoher Energieinhalt (Brennwert) Geokunststoffe (Polyolifine), trotz sehr geringer spez. Massen |
| kein Produktionsprozess | Produktionsprozess vergleichsweise energieaufwendig |
| Transport von der Gewinnungsstätte zur Baustelle aufgrund großer Massen energieaufwendig, jedoch in günstigen Fällen geringer Energieaufwand durch geringe Transportentfernungen | Transport Dränmatte zur Baustelle auch bei langen Transportwegen aufgrund sehr geringer Massen sehr geringer Energieaufwand |
| Bekiesung (vorsichtiges Belegen, Bau von Fahrstraßen) sehr zeit- und energieaufwendig | leichtes Einbaugerät geringer Energiebedarf |
| Kies ist ein wertvoller und knapper Rohstoff für die Bauindustrie, der vor allem für die-Betonherstellung genutzt werden sollte. | Erdöl als Grundstoff für alle Geokunststoffe ist ebenfalls ein wertvoller und knapper Rohstoff. |

7. Literatur:

- BAM BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND PRÜFUNG (1992): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsabdichtung für Siedlungsabfalldeponien sowie für Abdichtungen für Altlasten. Berlin.
- BLÜMEL, W., BRUMMERMANN, K. (1998): Kontrollen zur Stand- und Funktionssicherheit der temporären Oberflächenabdichtung einer Abfalldeponie. Geotechnik 21 (1998) Nr. 4.
- BMU BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (1993): Dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall). Bundesanzeiger, 45. Jg, Nr. 99a vom 15.05.1993.
- BMU BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2002): Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV) vom 24. Juli 2002, BGBl. I. S. 2807.
- CORINO, C. (1995): Ökobilanzen - Entwurf und Beurteilung einer allgemeinen Regelung. In: BATTIS et al. (Hrsg.) Umweltrechtliche Studien, Band 19, Werner Verlag, Düsseldorf.
- DIE INDUSTRIE DER STEINE + ERDEN (1998): Nassgewinnung von Kies und Sand. Die Industrie der Steine + Erden, Das Fachmagazin für Arbeit Sicherheit und Gesundheit, Ausgabe 3/98.
- DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1996): DIN EN ISO 14040 (Entwurf): Umweltmanagement - Produkt-Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderung. Beuth Verlag, Berlin.
- DORN (1974): Physik, 18. Auflage. Hermann Schroedel Verlag, Hannover.
- EHRENBERG H. (2001) Freundliche mündl. Mitt. Hr. Ehrenberg, Leiter Qualitätssicherung Fa. Naue Fasertechnik.
- EYMEYER, W. (1992): Grundlagen der Erdbewegung. Kirschbaum Verlag, Bonn.
- FGSV FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESEN (1984): Energie und Verkehr, Bericht 1984, Köln.
- GRIEBHAMMER, R. (1996): Entwicklungsziele für nachhaltige Produkte. In: EBERLE, U., GRIEBHAMMER, R. (Hrsg.) Ökobilanzen und Produktlinienanalysen. Ökoinstitut Verlag, Freiburg.
- HARDING, DSM Polyolifine GmbH, Gelsenkirchen (1998): Frdl. mündl. Mitt.
- HENNINGSEN, D., KATZUNG, G. (1998): Einführung in die Geologie Deutschlands. 5. neubearbeitete Auflage. Ferdinand Enke, Stuttgart.
- HUTTEN, DSM Polyolifine GmbH, Gelsenkirchen (1997): Frdl. mündl. Mitt.

- IFEU/TÜV RHEINLAND (1989): Emissionsminderung durch rationelle Energienutzung und emissionsmindernden Maßnahmen im Verkehrssektor (Studienschwerpunkt A.1.4) für die Bundestags-Enquêt-Kommission "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" Bonn. In: Ökobilanzen für Produkte. Bedeutung - Sachstand - Perspektiven. Texte 38/92 Umweltbundesamt.
- KAIMER, M., SCHADE, D. (1994): Ökobilanzen - Umweltorientierte Informations- und Bewertungsinstrumente - Stand der Diskussion. Arbeitsbericht. Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart.
- KENSY, P. (1993): Ökobilanzen - Eine kritische Bestandsaufnahme - CUTEC-Schriftenreihe Nr. 9, Monographie, Umwelttechnik-Institut, Clausthal-Zellerfeld.
- LÜHMANN (Bauleiter Deponie Hillern), Klatt Bauunternehmen, Lühneburg (1998): Frdl. mündl. Mitt.
- MÜLLER, Produktionsleiter Bentonitmattenproduktion NAUE Fasertechnik, Espelkamp-Fiestel (1997): Frdl. mündl. Mitt.
- PAL (2001): Freundliche mündl. Mitt. Herr Pal Bundesverband der Deutschen Kies- und Sandindustrie e.V.
- REHBINDER 1995: Vorwort. In: CORINO, C. (1995): Ökobilanzen - Entwurf und Beurteilung einer allgemeinen Regelung. BATTIS, U., REHBINDER, E., WINTER, G., (Hrsg.) Umweltrechtliche Studien, Band 19, Werner Verlag, Düsseldorf.
- REUTER, E. (1997): Prüfergebnisse und Bewertung der Aufgrabung auf der Zentraldeponie Hillern am 14.05.1997. Unveröff. Bericht der NAUE Fasertechnik GmbH & Co. KG, Wartturmstraße 1, 32312 Lübbecke.
- REUSSER, L. (1998): Ökobilanz von Rohrleitungssystemen. Eine Fallstudie am Beispiel der Erstellung der Trinkwasserversorgung und Schmutzwasserentsorgung für eine Einfamilien-siedlung. EMPA Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, St. Gallen.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (1998): Produzierendes Gewerbe. Reihe 4.3 Kostenstruktur der Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden. Metzler-Poeschel, Stuttgart.