

GASONTWIKKELING IN VUILSTORTEN

dr. J. Hoeks

BILBO
STARINGSEBUW



Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatiemid-
den, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen de
conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek nog
niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. ANAEROBE GISTINGSPROCESSEN IN EEN AFVALSTORT	1
3. OMVANG EN SNELHEID VAN DE GASPRODUCTIE	6
4. PROBLEMEN ALS GEVOLG VAN DE GASONTWIKKELING	11
5. CONTROLE MAATREGELEN	14
6. MOGELIJKHEDEN VOOR WINNING VAN HET GAS	16
7. CONCLUSIES	19
8. AANBEVELINGEN	20
9. LITERATUUR	22

1. INLEIDING

In de praktijk is gebleken dat gasontwikkeling in vuilstorten problemen kan veroorzaken reeds tijdens de stortfase, maar vooral later na afsluiting van de stortplaats. In de literatuur (vnl. uit de U.S.A.) worden meerdere voorbeelden gegeven van vuilstortplaatsen waar problemen zijn opgetreden. Ook in Nederland kent men soortgelijke gevallen, maar deze zijn slecht gedocumenteerd.

Bij de inrichting van afgesloten stortterreinen dient men zich de mogelijke problemen veroorzaakt door gasontwikkeling goed te realiseren, dat wil dus zeggen dat bepaalde voorzorgsmaatregelen moeten worden genomen of dat bepaalde inrichtingsplannen moeten worden gewijzigd.

Op verzoek van de Stichting Verwijdering Afvalstoffen (SVA) in Amersfoort is een literatuuronderzoek uitgevoerd, om na te gaan welke gegevens reeds beschikbaar zijn betreffende de gasvorming in vuilstorten. Met name de omvang en de snelheid van de gasvorming bepaalt in welke mate en gedurende welke termijn problemen kunnen voorkomen. De gedachte om het gevormde (brandbare) gas te gebruiken als brandstof is niet vreemd met de energiecrisis nog vers in het geheugen. De mogelijkheden betreffende de winning van het gas zullen in deze nota daarom ook worden besproken.

2. ANAEROBE GISTINGSPROCESSEN IN EEN AFVALSTORT

De microbiologische afbraakprocessen in gestort afval doorlopen achtereenvolgens een viertal stadia (FARQUHAR and ROVERS, 1973):

1. A e r o b e f a s e

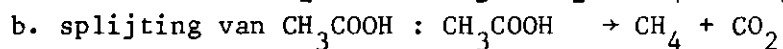
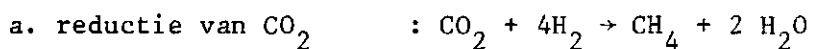
In het pas gestort afval is aanvankelijk nog zuurstof aanwezig. Door de aerobe afbraakprocessen wordt deze zuurstof echter vrij snel verbruikt (binnen enkele dagen tot enkele weken, afhankelijk van de verdichting van het afval (FUNGAROLI, 1970; ROVERS and FARQUHAR, 1973). Daarna treedt dan de anaerobe fase in, die in twee stadia uiteenvalt.

2. A n a e r o b e , n i e t - m e t h a n o g e n e f a s e (o o k w e l : z u u r v o r m i n g s f a s e)

Na het intreden van de anaerobe fase zijn veelal facultatief anaerobe micro-organismen werkzaam, die complexe organische stoffen hydrolyseren tot kleinere, oplosbare componenten, zoals lagere vetzuren, eenvoudige suikers, aminozuren en andere laag-moleculaire organische verbindingen. Dit hydrolyse proces voltrekt zich meestal vrij snel. Naast de vorming van organische zuren is er in deze fase sprake van vorming van NH_3 , H_2O en gasen zoals H_2 en CO_2 . De micro-organismen die deze processen bewerkstelligen zijn tamelijk tolerant en weinig kieskeurig, dit in tegenstelling tot de methaan vormende bacteriën.

3. A n a e r o b e m e t h a n o g e n e f a s e

In deze fase begint de productie van CH_4 . De hiervoor verantwoordelijke bacterie *Methanobacterium*, die obligaat anaeroob is, verkrijgt energie voor de opbouw van celmateriaal uit een tweetal reacties, namelijk



Over het algemeen vindt er in deze fase weinig synthese van celmateriaal plaats. Andere geproduceerde gasen tijdens de anaerobe fase zijn: N_2 als gevolg van denitrificatie (begint reeds in een vroeg stadium van anaerobie (fase 2)) en H_2S als gevolg van sulfaat-reductie (in een later stadium van anaerobie bij $\text{pH} > 7$).

Voor de productie van CH_4 zijn vrij specifieke milieu omstandigheden

vereist. De methanogene fase kan daarom gemakkelijk verstoord worden.

De verschillende stadia en het verloop van de gassenstelling tijdens deze fasen is weergegeven in fig. 1, waarbij fase 3 nog is onderverdeeld in een niet-stationaire en een stationaire fase. Het microbiologische proces van CH_4 -vorming is vrij goed bekend en wordt in de praktijk veelvuldig toegepast bij de anaerobe vergisting van rioolslib.

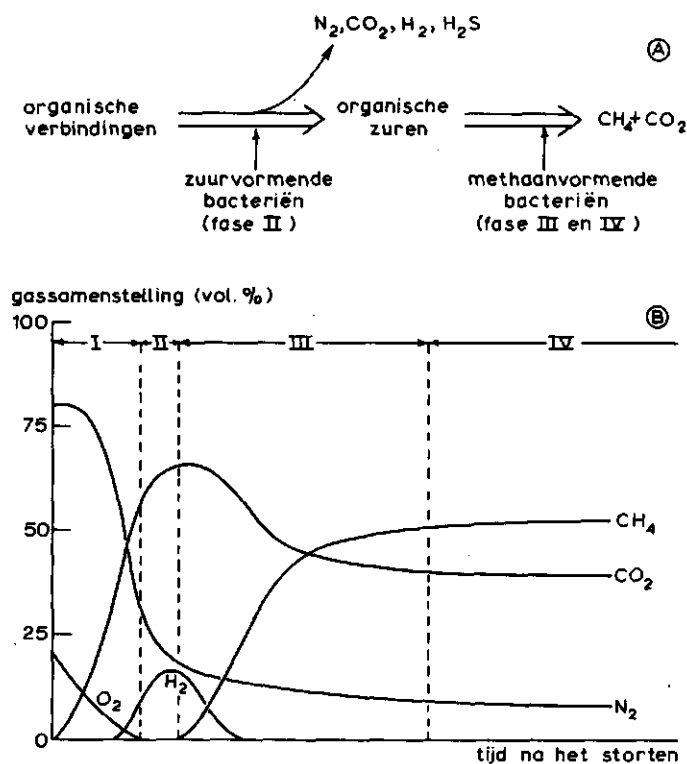


Fig. 1. Schematische voorstelling van het anaerobe afbraakproces (A) en het verloop van de gassenstelling in de verschillende stadia (B): I = aerobe fase, II = anaerobe, niet-methanogene fase, III = anaerobe, methanogene niet-stationaire fase, IV = anaerobe, methanogene stationaire fase

Aan de hand van literatuurgegevens komen FARQUHAR and ROVERS (1973) tot de volgende voorwaarden voor een optimaal verlopen van het proces:

- vocht: de bacterieactiviteit neemt toe met het vochtgehalte; de gasproduktie blijkt sterk toe te nemen na het toedienen van water aan het afval (MERZ and STONE, 1964). Volgens RAMASWAMY (1970) en SONGONUGA (1970) (geciteerd door FARQUHAR en ROVERS (1973)) zou de CH_4 -produktie maximaal zijn bij een vochtgehalte in het afval van 60-80 gew. %.
- zuurgraad: de optimale pH voor de anaerobe gisting van rioolslib blijkt 6,4 - 7,2 te zijn; de range waarbinnen CH_4 -vorming nog kan optreden wordt echter ruimer opgegeven, namelijk pH 5,5 - 9,0.
- temperatuur: CH_4 produktie treedt op in het traject 2 - 55 °C, met als gemiddeld optimum 30 - 35 °C. De ligging van het optimum hangt echter af van de temperatuurgevoeligheid van de bacterie: voor thermofiele soorten ligt het optimum boven 44 °C, voor mesofiele tussen 20 en 44 °C en voor psychrofiele beneden 20 °C.
De methaanvormende bacteriën zijn zeer gevoelig voor abrupte temperatuursveranderingen, zelfs al is het maar 1 à 2 °C.
- voedingsomstandigheden: voor een maximale CH_4 -produktie zou nodig zijn, dat de bicarbonaat alkaliniteit hoger is dan 2000 mg CaCO_3 /l, de ammonium concentratie hoger dan 100 mg NH_3 /l, de Fe^{2+} -concentratie hoger dan 20 mg/l en de C/N-verhouding ongeveer 16. De concentratie aan organische zuren moet bij voorkeur niet te hoog zijn, voor de azijnzuurconcentratie stelt men dat deze maximaal 3000 mg CH_3COOH /l mag zijn.
- redoxpotentiaal: deze moet lager dan -200 mV zijn.

In een vuilstort kan het vochtgehalte te laag zijn, waardoor de CH_4 -vorming niet op gang komt. Vooral bij de methodiek van gecontroleerd storten probeert men de infiltratie van water in het afval zo veel mogelijk te voorkomen door de oppervlakkige afstroming

te bevorderen. Het is echter niet waarschijnlijk dat een 'droge stort' ook op de lange duur te handhaven is. Verhoging van de grondwaterstand of infiltratie van regenwater kan ook na afsluiting van de stortplaats alsnog de CH_4 -vorming in gang zetten. Ervaringen wijzen er op dat de CH_4 -vorming eerst plaatselijk begint en zich daarna uitbreidt door het gehele stort. Bij de biologische afbraak van organisch materiaal komt water vrij (vgl. ROVERS and FARQUHAR (1973) zou dit kunnen oplopen tot 42 mm per meter afval), zodat ook bij een geringe infiltratiecapaciteit het proces op de lange duur op gang zal komen. Het is mogelijk dat in het afval giftige stoffen voorkomen die de CH_4 -vorming belemmeren. Desalniettemin blijkt in de praktijk praktisch altijd CH_4 aangetoond te kunnen worden in een afvalstort.

De samenstelling van het gevormde gasmengsel is afhankelijk van de aard van de af te breken organische stoffen (ANDERSON and CALLINAN, 1970). Papier, planten- en houtresten bestaan uit lange ketens van hexoses (hoofdzakelijk α - en β -glucose), die bij anaerobe afbraak een gasmengsel van 50% CH_4 en 50% CO_2 geven. Eiwitten worden afgebroken tot aminozuren en uiteindelijk tot CH_4 , CO_2 en NH_3 . Het hierbij gevormde gasmengsel bevat circa 60% CH_4 en 40% CO_2 . Vetten worden afgebroken tot vetzuren en uiteindelijk tot een gasmengsel bestaande uit circa 70% CH_4 en 30% CO_2 . Bij de anaerobe gisting van rioolslib ontstaat een gasmengsel dat circa 2 delen CH_4 bevat tegen 1 deel CO_2 (inclusief vergisting van vetten).

Uitgaande van een gemiddelde samenstelling van huisvuil: (BELL, 1964; geciteerd door ANDERSON and CALLINAN, 1970):

vocht	20,73%
cellulose, zetmeel, koolhydraten	46,63%
vetten	4,50%
eiwitten (6,25 N)	2,06%
andere organische stoffen	1,15%
inerte delen	24,93%
	100,00%

zou in theorie 410 liter gas per kg huisvuil worden geproduceerd met een samenstelling van 59% CH₄ en 41% CO₂.

Metingen op stortplaatsen en lysimeterproeven laten grote verschillen zien wat betreft de gemeten gassamenstelling. RHYNE vermeldt de volgende range in concentraties: 20-90% CO₂, 0-80% CH₄, 0-70% N₂ en minder dan 1% O₂, H₂S, NH₃ en H₂. Hiervoor kunnen als oorzaken genoemd worden: a) het afbraakproces heeft nog niet in alle gevallen de stationaire, methanogene fase bereikt, b) het vochtgehalte is te laag voor een optimale CH₄-productie. De gevoeligheid van het proces voor omstandigheden als vochtgehalte, temperatuur en pH is ook aanleiding tot grote verschillen in tijdsduur van de in fig. 1 onderscheiden fasen. De 'lag-fase' voor CH₄-productie na het intreden van de anaerobe toestand wordt mogelijk veroorzaakt door de behoefte aan voldoende hoge CO₂-concentraties (CO₂ fungeert dan als H₂-acceptor). FARQUHAR and ROVERS (1973) vermelden in hun literatuuroverzicht dat de stationaire, methanogene fase bereikt wordt na 180 dagen (RAMASWAMY, 1970), na 250 dagen (ROVERS and FARQUHAR, 1972) of 500 dagen (BELUCHE, 1968). In de daarna optredende stationaire, methanogene fase blijft de gassamenstelling ongeveer constant, namelijk 50-70% CH₄ en 30-50% CO₂.

3. OMVANG EN SNELHEID VAN DE GASPRODUCTIE

Behalve enkele metingen van de samenstelling van het gasmengsel in vuilstorten (gehalten aan CH₄, CO₂, N₂, O₂, H₂ en enkele sporen) zijn er nauwelijks gegevens bekend over de omvang en de snelheid van de gasproductie. Uit de literatuur (ANON., 1969; MERZ en STONE, 1964) blijkt dat in het stort als gevolg van de gasproductie een duidelijk verhoogde gasdruk optreedt in de orde van 5 à 7,5 cm H₂O-druk met een maximum gemeten waarde van zelfs 32 cm H₂O-druk. Er zijn enkele waarnemingen, die er op wijzen dat de gasproductie zeer lang kan doorgaan. MacFARLANE (1970) geeft een voorbeeld van een stortplaats waar 25 jaar na afsluiting bij opgraving bleek dat verschillende afvalstoffen (vooral cellulosehoudende materialen) nog onaangetast waren. Onlangs uitgevoerde metingen op een 12 jaar

geleden afgesloten stortplaats in West-Nederland toonden aan, dat er nog steeds volop CH_4 -vorming plaatsvond. Bij opgraving bleek hier dat het afval nog lang niet verteerd was.

Een berekening van het State Water Pollution Control Board of California (MacFARLANE, 1970) werd gebaseerd op de aanvankelijk aanwezige totaal-C in het afval en op de huidige en vroegere afbraaksnelheden van de koolstof (gemeten op een proefstort). Volgens deze berekening zou na 57 jaar 50% van de oorspronkelijke hoeveelheid totaal-C zijn verdwenen en pas na 950 jaar zou 90% verdwenen zijn. Dit duidt op een wel zeer traag verlopend afbraakproces.

Op basis van in lysimeterproeven gemeten gasproductiesnelheden is de volgende berekening te maken. Aannemend dat de afbreekbare organische stof in een afvalstort wordt afgebroken volgens een eerste orde reactie, dan is

$$P_t = P_o e^{-kt} \quad (1)$$

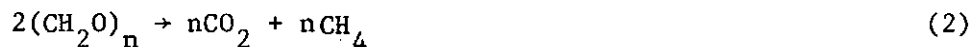
waarin: P_t = hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal op tijdstip t (kg/ton afval)

P_o = hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal op tijdstip 0 (kg/ton afval)

k = afbraaksnelheidscoëfficiënt (dag^{-1})

t = tijd (dagen)

Vervolgens aannemend dat de gasproductie uit afbreekbaar organisch materiaal mag worden voorgesteld door de reactie



dan betekent dit dat per kg afbreekbaar organisch materiaal gevormd wordt 800 liter gas (bestaande uit 50% CO_2 en 50% CH_4).

De gasproductie α per tijdseenheid wordt dan (met vgl.(1)):

$$\alpha = -800 \frac{\partial P}{\partial t} = 800 k P_o e^{-kt} \quad (3)$$

Als verondersteld wordt dat 50% van het afval bestaat uit organisch materiaal en dat 50% hiervan afbreekbaar is dan is $P_o = 250$ kg afbreekbaar organisch materiaal per ton afval.

Volgens ROVERS and FARQUHAR (1973) bedroeg de gasproductie van vers afval circa 20 liter/dag per ton afval, dit wil zeggen voor $t = 0$ is $\alpha = 20$. Voor $t = 0$ volgt uit vgl. 3:

$$k = \frac{\alpha}{800 P_0} \quad (4)$$

Met $\alpha=20$ en $P_0=250$ wordt dan $k = 1 \times 10^{-4} \text{ dag}^{-1}$.

Nu is de afname van de hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal (P) in de tijd uit te rekenen (tabel 1). Het verloop van de gasproductie in de tijd (m^3/jaar per ton afval) is weergegeven in fig. 2.

Tabel 1. Afbraak van organisch materiaal in een vuilstort (vlg. berekening)

Tijd na storten (in jaren)	Relatieve hoeveelheid organisch materiaal ($P/P_0 \times 100\%$)	Gasproductie α (l/dag.ton afval)
0	100%	20
17,5	50%	10
35	25%	5
52,5	12,5%	2,5
70	6,3%	1,25
87,5	3,1%	0,63
105	1,6%	0,31

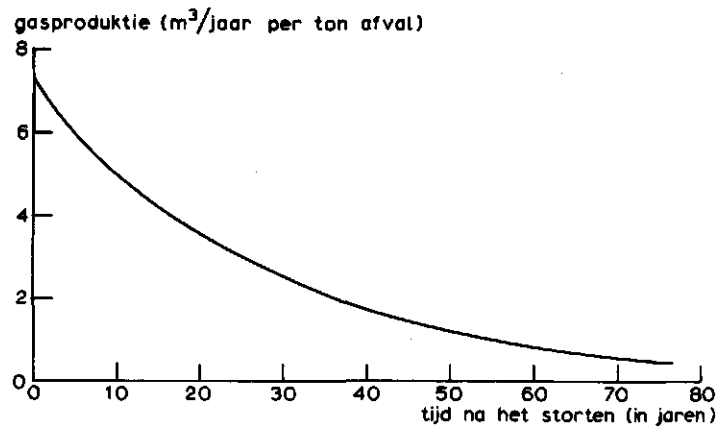


Fig. 2. Het verloop van de gasproductie in een vuilstort met de tijd, berekend volgens vgl. (3) met $k = 1 \times 10^{-4} \text{ dag}^{-1}$ en $P_0 = 250 \text{ kg/ton afval}$

Uit vergelijking 3 is ook de cumulatieve gasproductie over een gegeven tijdsperiode uit te rekenen als:

$$\int_0^t \alpha \, dt = \int_0^t 800 k P_0 e^{-kt} \, dt \quad (5)$$

dit geeft:

$$A_t = 800 P_0 (1 - e^{-kt}) \quad (6)$$

waarin A_t de totale gasproductie in de periode t is. Met de hierboven aangenomen en berekende waarden voor P_0 en k kan dan de cumulatieve gasproductie A_t in de tijd worden berekend (fig. 3).

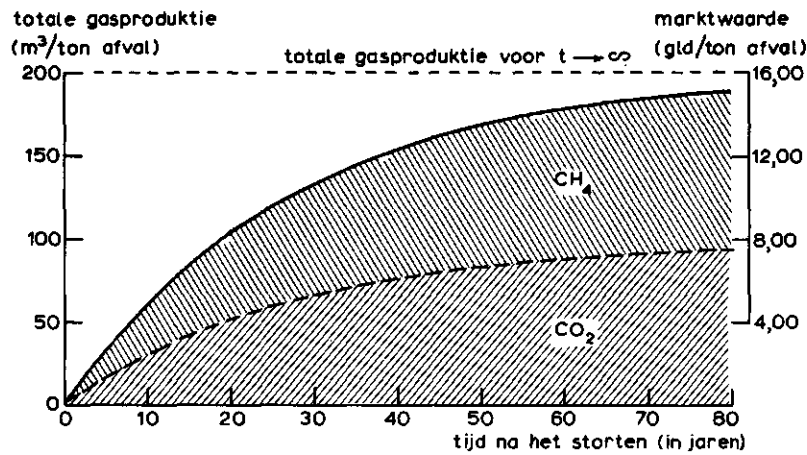


Fig. 3. Het verloop van de totale (cumulatieve) gasproductie met de tijd, berekend volgens vgl. (6). Bij deze berekening is aangenomen dat het geproduceerde gas 50% CH₄ en 50% CO₂ bevat

Uit de bovenstaande berekening blijkt dat de gasproductie zeer lang kan doorgaan. De gemeten gasproductie van 20 l/dag per ton vers afval van ROVERS and FARQUHAR levert aannemelijke cijfers voor de afbraak op. In hun literatuuroverzicht vermelden zij ook twee onderzoeksresultaten van andere onderzoekers, namelijk 9,2 respectievelijk 1410 liter gas/dag per ton vers afval. Het eerste getal ligt in een vergelijkbare orde van grootte. Het tweede getal is echter zeer onwaarschijnlijk, aangezien dit zou betekenen (in bovenstaande berekening) dat alle afbreekbare organisch materiaal wordt afgebroken in een tijdsbestek van minder dan een half jaar.

Volgens de hier uitgevoerde berekeningen zal de afbraak van het organisch materiaal in een vuilstort vele tientallen jaren duren. Er zijn meerdere praktijkgevallen bekend (afgraven van oude vuilstorten) die dit bevestigen, en waar tientallen jaren na de afsluiting nog steeds gas wordt geproduceerd.

4. PROBLEMEN ALS GEVOLG VAN DE GASONTWIKKELING

Zoals hiervoor bleek gaat het bij gasontwikkeling in vuilstorten in hoofdzaak om twee gassen, namelijk koolzuurgas (CO_2) en het brandbare methaangas (CH_4).

Het gevormde koolzuurgas (vooral in fase II en III kan de concentratie zeer hoog zijn; zie fig. 1) is zeer goed oplosbaar in water (tot 1688 mg CO_2 /liter). Hierbij wordt H_2CO_3 gevormd, waardoor de pH daalt en moeilijk oplosbare Ca-verbindingen in oplossing gaan. De hardheid van het water neemt toe en het water heeft door de lagere pH ook een grotere agressiviteit ten aanzien van verschillende andere verbindingen die hierdoor beter oplossen (bijv. Fe, zware metalen). De sterke verontreiniging van het perkolatiewater uit een vuilstort wordt dan ook mede in de hand gewerkt door de productie van CO_2 . Het perkolatiewater blijkt inderdaad een zeer hoog bicarbonaatgehalte te hebben (perkolatiewater van de stortplaats Ambt-Delden: ca. 14 000 mg HCO_3^- /l).

De vorming van het brandbare methaangas kan, meer als het koolzuurgas, direct waarneembare problemen veroorzaken. Reeds tijdens de stortfase kan dit aanleiding zijn tot het afsterven van de vegetatie op afgewerkte gedeelten van de stortplaats (HUDGES et al. 1971). Ook na afsluiting van de stortplaats kan schade aan de beplanting op het afgewerkte stort ontstaan. Het gevormde methaangas (niet-giftig) zal vanuit het afval via de aangebrachte afdeklaag in de atmosfeer ontwijken. In de afdeklaag zal echter met binnendringende zuurstof methaanoxydatie door methaan oxyderende bacteriën optreden, waardoor in de bodem anaërobie kan optreden (HOEKS, 1972). Ook bij dikke afdekkingen van 1 meter grond of meer kunnen dan problemen voor de vegetatie ontstaan, vooral voor de dieper wortelende beplantingen (FUKUSHI et al., 1975)

Verder kan het methaangas zich ophopen in afgesloten ruimten, bijvoorbeeld in kelderruimten van gebouwen, waarbij explosies kunnen optreden. Bij zijdelings transport van het gas door de bodem (vooral mogelijk bij met afval gevulde zandafgravingen) kunnen ook problemen ontstaan in gebouwen in de onmiddellijke omgeving van de stortplaats.

Over het algemeen zullen er tijdens de stortfase geen gebouwen geplaatst worden op het stort, mogelijk wel eens een schuur of een loods voor het opbergen van gereedschappen en het stallen van machinerieën. Na afsluiting van de stortplaats zal echter het terrein veelal opnieuw ingericht worden teneinde het weer een positieve functie te geven in het landschap. Mogelijke bestemmingen van het terrein zijn: park- of groengebied, ski-hellingen, sportvelden, tennisbanen, speelplaatsen, weide- of bouwland en, wat ook wel gebeurd is, bouw- of industrieterrein. Geconstateerde problemen hebben vooral betrekking op gasophoping onder gebouwen en verzakingsverschijnselen als gevolg van de steeds voortgaande afbraak van het afval. Enkele 'case-histories' zullen hier worden besproken (ontleend aan MacFARLANE, 1970).

Geval 1. Tijdens de bouw van een openbare school op een afgewerkte vuilstortplaats ontdekten de werklieden gasopborreling in plassen bij de fundering. Het gas bleek gemiddeld 51,3% CH_4 te bevatten en in één geval ook een kleine hoeveelheid H_2 . Rondom de fundering werden in de bodem ontluchtungs-pijpen aangebracht. Ook de afgesloten kelderruimten en kruipruimten onder de school werden geventileerd. Periodiek werden gasmetingen gedaan, waarbij bleek dat het ventilatiesysteem zeer effectief werkte. Drie jaar na het onderzoek bleek nog steeds gas gevormd te worden.

Geval 2. Rondom een groot winkelcomplex, aangelegd op een oude vuilstort (paalfunderingen door het afval heen in de onderliggende bodem) werd gasontwikkeling geconstateerd. Dit ging gepaard met grote verzakkingen (hier en daar tot 15 cm) op de parkeerplaatsen rondom het winkelcomplex. De dienstleidingen (gas, water en electriciteit) naar de gebouwen verzakten ook, waardoor veelvuldig breuken in de leidingen optraden. Dit leidde tot de aanbeveling om zulke dienstleidingen ook te funderen op palen (geldt vooral voor aardgasleidingen).

- Geval 3. In een woonwijk kwam in een aantal naast elkaar staande huizen gas binnen langs de waterleidingen. Het gas bleek veel CO_2 en CH_4 te bevatten, stonk bovendien en was afkomstig van een aangrenzende vuilstortplaats. Om de gasophoping onder de huizen te voorkomen werden scheuren in de funderingen en gaten in de muren (vooral langs binnenkomende leidingen) gasdicht gemaakt. Indien nodig werd natuurlijke of geforceerde ventilatie toegepast. Het eindadvies luidde, dat gezien de langdurige gasontwikkeling in het afval, beter geen gebouwen op een afgesloten vuilstortplaats gezet kunnen worden.
- Geval 4. In een recreatiecentrum op een afgesloten stortplaats deed zich een explosie voor. De kelderruimte onder het gebouw was uit voorzorg al gasdicht gemaakt. Echter, tijdens de aanleg van een gasleiding in het gebouw is er gas uit de bodem onder het gebouw terecht gekomen, via de omhulling van de gasleiding. Door het aansteken van een sigaret bij het uiteinde van deze omhulling ontstond een explosie. Gevolgen: 2 werklieden gedood, 6 gewonden, gebouw volledig verwoest. Hoewel er aanvankelijk twijfel was over de oorsprong van het gas, werd de explosie later met stelligheid toegeschreven aan gas uit de vuilstort. Uit latere metingen bleek in een gebied van 60 meter rondom het gebouw brandbaar gas voor te komen in de bodem.
- Geval 5. Ontleend aan RHYNE (1974). In een gebouw van de National Guard Armory in North Carolina kwamen in 1969 3 mensen om het leven door een steekvlam. Het vuur was ontstaan toen een bewaker een sigaret opstak in een ruimte waar methaan van de aangrenzende stortplaats terechtgekomen was. De bodem bestond uit goed doorlatend zand, waardoor ook zijdelings transport mogelijk was. Het afval op de stortplaats werd kunstmatig bevochtigd om een betere verdichting te krijgen. Deze bevochtiging bevordert echter ook de gasproductie.

Geval 6. Ontleend aan RHYNE (1974): in 1971 kwamen 2 mensen door verstikking om het leven in een mangat. De oorzaak was de aanwezigheid van gas ($\text{CO}_2 + \text{CH}_4$) afkomstig van een vlakbij gelegen houtafvalstort.

Zoals reeds eerder opgemerkt zal als gevolg van de gasontwikkeling ook verzakking optreden. Vele publikaties wijzen op hierdoor veroorzaakte problemen, zoals verzakking van parkeerplaatsen, wegen en ondergrondse leidingnetten. Bij breuk van waterleidingen kan versneld verzakking en een hernieuwde biologische activiteit (gasvorming) optreden. In één geval ging door verzakking zelfs een heel zwembad met een clubhuis verloren. Gebouwen zullen in dergelijke situaties altijd op palen (door het afval heen) moeten worden gefundeerd.

5. CONTROLE MAATREGELEN

Indien op een (afgesloten) vuilstortplaats problemen ontstaan tengevolge van de gasontwikkeling in het afval, zullen controlemaatregelen moeten worden getroffen. Het zal duidelijk zijn uit het bovenstaande dat het wegnemen van de oorzaak in de praktijk ondoenlijk is. Dit zou betekenen dat het vuilstort geheel zou moeten worden afgegraven. Maatregelen kunnen daarom alleen tot doel hebben om de gevolgen van de gasontwikkeling te bestrijden. In het algemeen zal dit betekenen dat het ontsnappen van gas naar de atmosfeer zoveel mogelijk moet worden bevorderd. Afgesloten ruimten onder gebouwen moeten worden geventileerd, ofwel door natuurlijke ventilatie (bijvoorbeeld roosters in de gevel), of, als dit niet voldoende is door middel van geforceerde ventilatie.

Langs de gevels van gebouwen kan men de bodem ventileren door sleuven of kokers gevuld met grind aan te brengen. Om echter een zo effectief mogelijke werking te verkrijgen, zou de vulling met grind beter achterwege kunnen blijven. Men zou dan ventilatiekokers moeten installeren zoals dat gebruikelijk is bij straatbomen in geval van aardgaslekkage (HOEKS, 1971 en 1972). Indien het beslist noodzakelijk is gebouwen te plaatsen op een afgesloten stortplaats, dan is een gascontrolesysteem waarbij de bodem en de kruip- en

kelderruimten worden geventileerd een eerste vereiste om problemen te voorkomen. De vloer van kruip- en kelderruimten moet zoveel mogelijk gasdicht gemaakt worden. Vooral op plaatsen waar gas-, water- en electriciteitsleidingen het gebouw binnenkomen moeten de gaten in de muren/funderingen zoveel mogelijk gasdicht gemaakt worden. Buiten langs de gevel zou vooral bij deze leidingen een goede bodemventilatie bevorderd moeten worden (zie schematische voorstelling in fig. 4.).

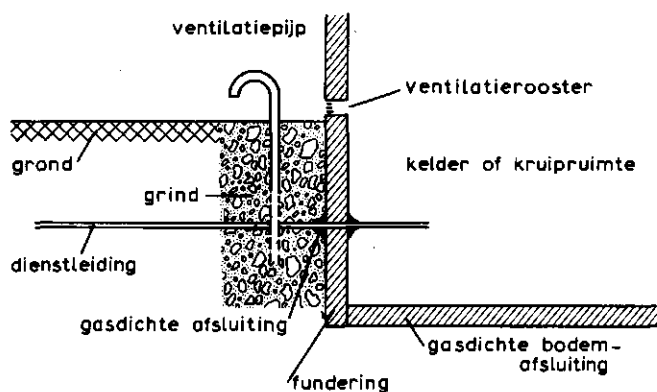


Fig. 4. Schematische weergave van enkele gascontrolemaatregelen bij gebouwen op vuilstortplaatsen

In verband met het zijdelingse transport van gas door de bodem naar gebouwen in de nabijheid van de stortplaats wordt in de U.S.A. vaak het aanbrengen van 'gas-barrières' aanbevolen, dit wil zeggen langs de randen en op de bodem van de stortplaats wordt, vóórdat het afval hier gestort wordt een moeilijk doorlatende laag aangebracht zodat het zijdelingse en benedenwaartse transport van gas wordt belemmerd (HAGERTY et al., 1973). Hierbij dient men te bedenken dat in de U.S.A. veel stortplaatsen echte 'land fills' zijn, dit wil zeggen afgravingen opgevuld met afval. In de literatuur wordt een voorbeeld genoemd waarbij op 200 meter afstand van een stortplaats nog 10% CH_4 werd gevonden (ANON, 1969). Dit betrof een stort in een grindafgraving terwijl de bodem in de omgeving bestond uit grof zand met grind. In Nederland daarentegen wordt het meeste

afval op het maaiveld gestort, zodat het gas hier door zijdelings transport ook in de atmosfeer kan ontsnappen.

Om het ontsnappen van het gas naar de atmosfeer te bevorderen kunnen ventilatiepijpen tot diep in het afval worden geplaatst. Deze pijpen zijn over een grote lengte geperforeerd en kunnen omstort worden met grind. Het meest eenvoudige is om reeds bij het storten van het afval een dergelijk ventilatiesysteem aan te brengen. Bij sterke gasontwikkeling kan men eventueel via deze ventilatiepijpen het gas uit het stort pompen. Ook kunnen in het afval verticale grindbanen worden aangebracht waarlangs het gas kan ontsnappen (HAGERTY et al., 1973; LEWICKE, 1972).

Door het aanbrengen van een ventilatiesysteem in het afval hoeft minder gas te ontwijken via de afdeklaag, waardoor de levenskansen van de vegetatie op de stortplaats toenemen.

6. MOGELIJKHEDEN VOOR WINNING VAN HET GAS

In enkele Amerikaanse publikaties (DAIR and SCHWEGLER, 1974; RHYNE, 1974; RICCI, 1974) wordt melding gemaakt van ideeën en experimenten met betrekking tot de winning van het gevormde gas. In par. 3 zijn reeds een aantal gegevens en berekeningen weergegeven waaruit de omvang van de gasproduktie blijkt.

Uit vergelijking (6) in par. 3 volgt dat de potentiële gasproduktie ($t \rightarrow \infty$) per ton afval 200 m^3 gas (50% CH_4 + 50% CO_2) bedraagt. De productiesnelheid neemt echter af in de tijd, zodat de winning van het laatste gas zeker niet meer rendabel zal zijn.

Aan de hand van fig. 2 kan nu een berekening worden opgezet van de jaarlijks winbare hoeveelheden gas, waarbij wordt aangenomen dat slechts 50% van het geproduceerde gas kan worden gewonnen (de rest ontwijkt in de atmosfeer). Voor een pas afgesloten stortplaats met 500 000 ton afval (10 jaar lang circa 50 000 ton per jaar gestort) levert dit de volgende berekening op. Bij de afsluiting is het gestorte afval gemiddeld 5 jaar oud, dit wil zeggen dat het gas dat in de eerste 5 jaar wordt geproduceerd niet meetelt (dit is tijdens het storten gevormd en ontweken in de atmosfeer).

In de periode 0-5 jaar na afsluiting bedraagt de gasproductie minimaal 5 m^3 gas per jaar per ton afval (in fig. 2: periode 5-10 jaar). Hiervan zou 50% winbaar zijn, zodat voor de hele stortplaats een winbare hoeveelheid gas van $1\,250\,000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ kan worden berekend. Op dezelfde wijze berekend zal gedurende de daaropvolgende 5 jaar (5-10 jaar na afsluiting) minimaal $1\,050\,000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ gewonnen kunnen worden. In de daaropvolgende perioden bedraagt de winbare hoeveelheid: 10-15 jaar na afsluiting minimaal $875\,000 \text{ m}^3/\text{jaar}$ en 15-20 jaar na afsluiting minimaal $750\,000 \text{ m}^3/\text{jaar}$. In tabel 2 is een overzicht gegeven van de hier berekende winbare hoeveelheden gas (marktwaarde voor het ongezuiverde gas (50% CH_4 , 50% CO_2) is hier op $8 \text{ ct}/\text{m}^3$ gesteld).

Tabel 2. Berekening van de winbare hoeveelheden gas in een afgesloten vuilstortplaats met 500 000 ton afval

Periode na afsluiting	Minimaal winbare gas hoeveelheid per ton afval	Minimaal winbare hoeveelheid gas	Marktwaarde ($\approx 8 \text{ ct}/\text{m}^3$)
0 - 5 jaar	$2,50 \text{ m}^3/\text{j}$	$1\,250\,000 \text{ m}^3/\text{j}$	f 100 000,-/j
5 - 10 jaar	$2,10 \text{ m}^3/\text{j}$	$1\,050\,000 \text{ m}^3/\text{j}$	f 84 000,-/j
10 - 15 jaar	$1,75 \text{ m}^3/\text{j}$	$875\,000 \text{ m}^3/\text{j}$	f 70 000,-/j
15 - 20 jaar	$1,50 \text{ m}^3/\text{j}$	$750\,000 \text{ m}^3/\text{j}$	f 60 000,-/j
20 - 25 jaar	$1,25 \text{ m}^3/\text{j}$	$625\,000 \text{ m}^3/\text{j}$	f 50 000,-/j

Een berekening van investerings- en exploitatiekosten verbonden aan de winning zal moeten uitwijzen in hoeverre deze gaswinning een rendabele zaak zal kunnen zijn. De exploitatiekosten zullen dan ook vooral bepalen hoelang men op een vuilstortplaats zal doorgaan met de gaswinning. Stel dat de gaswinning alleen in de eerste 10 jaar rendabel is, dan kan (vgl. fig. 3 periode 5-15 jaar) totaal 50% van 2,5 miljoen m^3 , dit is 12,5 miljoen m^3 gas worden gewonnen met een totale marktwaarde van f 1,00 miljoen (dit is f 2,00 per ton afval).

- Voor de duidelijkheid moet hier nog even gesteld worden dat bij bovenstaande berekeningen de volgende aannamen gedaan zijn:
- de gasproductie in vers afval bedraagt 20 liter gas/dag per ton afval (gemeten waarde van ROVERS and FARQUHAR, 1973)
 - de gasproductie per kg afbreekbaar organisch materiaal (CH_2O)_n is 800 liter gas
 - de hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal in het afval is 250 kg per ton afval (d.i. 25%)
 - de hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal neemt exponentieel af in de tijd (volgens vgl.(1))
 - slechts 50% van het geproduceerde gas is winbaar

Wat betreft de investerings- en exploitatiekosten zijn praktisch geen cijfers beschikbaar. In Los Angeles (Palos Verdes Landfill) is sinds begin 1975 een groot experiment opgezet om voorlopig gedurende een jaar het gas te winnen, en vervolgens na zuivering (verwijdering van CO_2) te verkopen aan het plaatselijk gasdistributiebedrijf. Op meerdere stortplaatsen in de U.S.A. lopen proeven of worden proeven opgezet.

De meest aantrekkelijke methode lijkt om het gas op te pompen via in het afval aangebrachte ventilatiepijpen. Op de Sheldon-Arleta Landfill in California (zeer grote stortplaats waar circa 3,5 miljoen ton afval ligt) is geëxperimenteerd met dergelijke ventilatiepijpen waarbij het gas werd verbrand (RHYNE, 1974). De kosten van dit systeem, inclusief de verbrandingskosten, bedroegen \$ 0,04 per ton afval (ca. 10 ct per ton). Voor een kleinere stortplaats (550 000 ton afval) was dit bedrag iets hoger, namelijk \$ 0,14 per ton (ca. 35 ct per ton). De invloedssfeer van één ventilatiepijp is uiteraard afhankelijk van de aanzuigsnelheid. Bij onderzoek op de Palos Verdes Landfill bleek bij een snelheid van $8,5 \text{ à } 10 \text{ m}^3$ per minuut de invloedssfeer zich uit te strekken tot $60 \text{ à } 75$ meter rond een 35 meter diepe aanzuigpijp (DAIR and SCHWEGLER, 1974). Dit komt neer op ongeveer 12 m^3 gas/jaar per ton afval. Het gas bevatte dan gemiddeld 50,2% CH_4 , bij hogere aanzuigsnelheden zakte dit gehalte en nam de verbrandingswaarde van het gas dienovereenkomstig af. De kosten voor het reinigen van het gas, dit wil zeggen het verwijderen van CO_2 en

eventueel H_2S teneinde de verbrandingswaarde te verhogen, zijn vrij hoog. Hetzelfde geldt voor de compressie van het gas. Vooral deze kosten (reiniging en compressie) zullen tot gevolg hebben dat de gaswinning alleen rendabel te maken is op grotere, regionale stortplaatsen.

Het gas kan na zuivering en compressie aan het plaatselijk gasdistributienet worden toegevoerd. Ook kan het gas, en hiervoor is zuivering niet noodzakelijk, ter plaatse gebruikt worden om een methaanmotor met daaraan gekoppeld een elektrische generator aan te drijven. Bij de huidige electriciteitsprijzen zou deze electriciteitsopwekking winstgevender zijn dan de eerste oplossing (RHYNE, 1974).

7. CONCLUSIES

Uit een aantal 'case-histories' blijkt, dat gasontwikkeling in vuilstorten en de hiermee gepaard gaande verzakkingen problemen kunnen veroorzaken. Bij het vaststellen van een bestemmingsplan voor een afgesloten vuilstortplaats dient hiermee rekening te worden gehouden. Aangezien de uiteindelijke bestemming van invloed zal zijn op het ontwerp van en de gevolgde werkwijze op de stortplaats moet reeds tijdens deze planningsfase de uiteindelijke bestemming worden vastgesteld (LEWICKE, 1972).

De berekeningen tonen aan dat de ontwikkeling van gas in een vuilstort een lang voortdurend proces is en tientallen jaren lang aanleiding kan blijven geven tot problemen.

De hoeveelheid vocht in het afval heeft een grote invloed op de biologische activiteit in het stort. Bij de methode van gecontroleerd storten wordt gestreefd naar vermindering van infiltratie van regenwater. Enerzijds zal daardoor minder perkolatiewater ontstaan, anderzijds zou de gasontwikkeling afgeremd worden. De vraag is echter of en op welke wijze de infiltratie van regenwater blijvend kan worden voorkomen of gereduceerd.

Concluderend kan men stellen dat het gevaar voor gasontwikkeling reëel is, zelfs bij de methode van gecontroleerd storten. Het moet daarom beslist ontraden worden om een afgesloten vuilstortplaats te

bestemmen tot bouw- of industrieterrein. Ook in geval het terrein bestemd wordt voor recreatiegebied moet de bouw van bijvoorbeeld een recreatiecentrum, een kiosk, toiletgebouwen, clubgebouwen en dergelijke ontraden worden, tenzij afdoende voorzorgsmaatregelen getroffen worden (zie onder Aanbevelingen). Bestemmingsmogelijkheden zonder al te veel risico's zijn: park- of groengebied, weide- of bouwland (met dikke afdeklaag), voetbalvelden, golfterreinen, speelplaatsen, tennisbanen, op de hellingen mogelijkheden voor skieën en bobsleeën, etc. Bij de aanleg van sportterreinen is meestal de bouw van een clubgebouw (met kleedkamer en toiletten) onontbeerlijk. Tijdens de stortfase zou men hiermee al rekening kunnen houden door ter plaatse alleen inert afval (puin, asfalt, beton) te deponeren. Bovendien zal voor een afdoende ventilatie van de bodem en van kelder- en kruipruimten moeten worden gezorgd. In verband met mogelijke verzakkingen kan het wenselijk zijn het gebouw (en eventueel ook de dienstleidingen voor gas, water en electriciteit) op palen te funderen.

Op de grotere, regionale stortplaatsen lijkt de totaal gevormde hoeveelheid gas voldoende groot om onderzoek naar de economische aspecten van gaswinning interessant te maken. Dit moet echter niet gezien worden als een bijdrage aan de oplossing van het energieprobleem (hoogstens 2% van de energiebehoefte zou gedekt kunnen worden), maar wel als een mogelijkheid tot (rendabel) hergebruik, waardoor de kosten van de afvalverwerking kunnen afnemen. Zeker bij nog verder stijgende energieprijzen verdient dit aspect de aandacht. Zou men inderdaad, voor de grotere, regionale stortplaatsen, aan gaswinning gaan denken, dan kan dit consequenties hebben voor de te volgen storttechniek, omdat het afval dan voldoende vochtig moet zijn.

8. AANBEVELINGEN

Aan de hand van literatuurgegevens en ervaringen uit eigen onderzoek kunnen enkele aanbevelingen worden gedaan in verband met de problemen van gasontwikkeling in vuilstorten. Het uiteinde-

lijke bestemmingsplan moet reeds bij de planning van een vuilstortplaats aan de orde komen. Het terrein zou na afsluiting ingericht kunnen worden als groene ruimte, als recreatiegebied of voor landbouwkundige doeleinden (HAGERTY et al., 1973; LEWICKE, 1972). In een dergelijk bestemmingsplan zullen alleen gebouwen mogen voorkomen, als dat onvermijdelijk en dringend noodzakelijk is. In dat geval dient men een gasregelings- en controlesysteem te ontwerpen, dit wil zeggen:

- kruip- en kelderruimten van gebouwen gasdicht maken, vooral ook bij binnenkomende leidingen, zodat vanuit de bodem geen gas kan binnendringen (de bodem van kruipruimten kan bijvoorbeeld dicht gemaakt worden met een polyethyleen membraan, aangebracht in twee lagen op een schoon zand vulling); deze afgesloten ruimten moeten voldoende geventileerd worden (meestal geven extra ventilatieroosters in de gevel voldoende effect).
- het gebouw moet worden gefundeerd op palen (door het afval heen) in verband met verzakkingen
- dienstleidingen voor gas, water en electriciteit moeten eveneens bij voorkeur op palen worden gefundeerd, om leidingbreuk bij verzakkingen te voorkomen
- de bodem, vooral langs de gevels van gebouwen, extra ventileren (aanbrengen van grind langs buitenkant van de fundering en ventilatiepijpen of -kokers, zie ook HOEKS (1972): pag. 84)
- ventilatiepijpen aanbrengen tot diep in het afval (kan reeds tijdens de stortfase gebeuren); met behulp van een pomp kan eventueel het gas uit het stort worden gezogen
- met het oog op het ontsnappen van het gas naar de atmosfeer zou de afdeklaag poreus en doorlatend moeten zijn (dit is in tegenspraak met de huidige idee van beperking van de infiltratiecapaciteit bij gecontroleerd storten).

Behalve bij gebouwen zal het ontwerpen van een bodemventilatiesysteem (met ventilatiepijpen tot in het afval) in het algemeen ook gunstig zijn voor de op het stort aangebrachte beplantingen.

9. LITERATUUR

- ANDERSON, D.R. and J.P. CALLINAN, 1970. Gas generation and movement in landfills. Loyola Univ., Coll. of Eng., Los Angeles, 15 pp.
- ANON., 1969. Development of construction and use criteria for sanitary landfills. Los Angeles County and Engineering Sci., Inc., U.S. Public Health Service, Arcadia, California 266 pp.
- DAIR, F.R. and R.E. SCHWEGLER, 1974. Energy recovery from landfills Waste Age 5 (2) : 6-10
- FARQUHAR, G.J. and F.A. ROVERS, 1973. Gas production during refuse decomposition. Water, Air and Soil Poll. 2 : 483-495
- FUKUSHI, S., K. SHIRAI und K. MINAMI, 1975. Einfluss vom in der Mülldeponie gebildeten Gas auf den Boden. Soil.Sci. Plant Nutr. 21: 293-300
- FUNGAROLI, A.A., 1970. Instrumentation of two experimental sanitary landfills. I.E.E.E. Transact. Geose. Electron. GE-8(3): 118-125
- HAGERTY, D.J., J.L. PAVONI and J.E. HEER, 1973. Solid Waste Management. Van Nostrand Reinhold Company, New York. p. 203-207 and 216-221
- HOEKS, J., 1971. Verbetering van de bodemventilatie bij straatbomen. SIAB-rapport 5, Den Haag. 19 pp.
- _____ 1972. Effect of leaking natural gas on soil and vegetation in urban areas. Agric. Res. Rep. 778. Pudoc, Wageningen, 120 pp.
- HUDGES, G.M., R.A. LANDON and F.N. FARVOLDEN, 1971. Hydrogeology of solid waste disposal sites in Northeastern Illinois. EPA SW-12d, U.S. Government Printing Office, Washington. 154 pp.
- LEWICKE, C.K., 1972. Sanitary landfill: alternative to the open dump. Env. Sci. Technol. 6 (5): 408-410
- MacFARLANE, I.C., 1970. Gas explosion hazards in sanitary landfills. Public Works 101 (5): 76-78

- MERZ, R.C. and R. STONE, 1964. Gas production in a sanitary landfill.
Public Works 95:84-87
- RHYNE, C.W., 1974. Landfill gas. Office of Solid Waste Management
Programs, U.S. Environmental Protection Agency. 21 pp.
- RICCI, I.J., 1974. Garbage routes to methane. Chem. Eng. 81 (11):
58-60
- ROVERS, F.A. and G.J. FARQUHAR, 1973. Infiltration and landfill
behaviour. Amer. Soc.Civil Eng., Envir.Eng.Div. J. 99:
671-690