

Verontreiniging en zuivering van grondwater bij vuilstortplaatsen

1. Inleiding

Bij het zoeken naar verantwoorde methoden van afvalverwijdering speelt naast economische, technische en maatschappelijke factoren de milieuhygiëne een belangrijke rol. De verontreiniging van het grondwater door stortplaatsen van stedelijk afval, of door residuen van compostering of verbranding, vormt daarbij één der voornaamste vraagstukken. Dit probleem is met name van belang in verband met de chemische beschermingszones voor waterwinplaatsen [Van Waegeningh, 1972].



DR. IR. A. BREEUWSMA
Stichting voor Bodemkartering,
Wageningen



IR. L. E. VAN ENGERS
Stichting Verwijdering Afvalstoffen,
Amersfoort

Het onderzoek van de grondwaterverontreiniging door vuilstortplaatsen is in het buitenland ongeveer een jaar of tien geleden pas goed begonnen. De meeste publikaties, vooral afkomstig uit de Verenigde Staten [Hughes et al., 1971, Apgar and Langmuir, 1971, Zaroni, 1972, Walker, 1973], en West-Duitsland [Golwer et al., 1969 en 1972, Nöring et al., 1968, Exler, 1972, Böke et al., 1973], dateren van de laatste vijf jaar. In Nederland hebben verschillende instanties op het terrein van het waterbeheer (Rijks Instituut voor Drinkwatervoorziening, Waterleidingmaatschappijen, Provinciale Waterstaten, e.d.) zich op de een of andere manier met het probleem beziggehouden.

Het betreft hier echter voornamelijk incidenteel onderzoek waarvan de resultaten zijn verwerkt in rapporten met een zeer beperkte verspreiding. Ook de Stichting Verwijdering Afvalstoffen (SVA) is sinds een jaar of vijf bezig met onderzoek. Over de resultaten van het onderzoek bij een vuilstortplaats in Ambt-Delden wordt jaarlijks verslag uitgebracht. Verder is op instigatie van deze instelling door de Stichting voor Bodemkartering, Wageningen (Stiboka) een fysisch-chemisch onderzoek verricht aan een bodemprofiel onder een vuilstortplaats en doet het Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding onderzoek naar de verbreiding van de grondwaterverontreiniging bij een viertal stortplaatsen met uiteenlopende geohydrologische omstandigheden.

In dit artikel worden enkele van de belangrijkste resultaten belicht van het water- en bodemonderzoek door SVA (1971, 1972, 1973, 1974) en Stiboka [Breeuwsma en Van Engers, 1974]. Eerst wordt in het kort een beeld gegeven van de verontreiniging (aard, hoeveelheid, verbreiding e.d.). Daarna wordt wat uitvoeriger ingegaan op de zuiveringsprocessen die er in de bodem optreden.

2. Gegevens van de onderzochte vuilstortplaatsen

Zoals gezegd, vond een wateronderzoek door de SVA plaats bij een vuilstortterrein in de gemeente Ambt-Delden. Dit terrein werd in 1969 in gebruik genomen. Het bodemonderzoek door Stiboka werd verricht bij een stortplaats van de gemeente Markelo, in de buurt van Rijssen. Hier kon tijdelijk, tijdens graafwerkzaamheden aan de rand van het stort, het bodemprofiel onder de vuilstortplaats worden onderzocht. Naar schatting heeft hier een vuilpakket van ca. 12 m hoogte gedurende 5 jaar op het onderzochte gedeelte van de stortplaats gelegen.

In beide gevallen betreft het een stort waar toezicht is op de aanvoer en verwerking van het vuil. Er mogen geen giftige stoffen worden gestort en het aangevoerde vuil wordt regelmatig afgedekt met een laag grond. Het vuil bestaat voor het grootste deel uit stedelijk afval (huis- en tuinvuil) en industriële afvalstoffen (waaronder bouwen- en sloopafval).

Beide stortplaatsen bevinden zich boven het grondwaterniveau. In Delden bestaat de ondergrond voornamelijk uit grof zand (fluviatiel materiaal), afgewisseld door lemige laagjes. De stortplaats in de gemeente Markelo ligt in de stuwwal van Rijssen, in een zandafgraving (fluvioglaciaal materiaal). Ook hier is in de ondergrond hoofdzakelijk grof zand met lemige laagjes aanwezig.

3. Kwantiteit en kwaliteit van het verontreinigde water

3.1 Hoeveelheid percolatiewater

De hoeveelheid water die door het gestorte vuil wordt beïnvloed, is sterk afhankelijk van de ligging van de stortplaats ten opzichte van het grondwater. Wanneer de basis van de stortplaats zich in het grondwater bevindt, is de hoeveelheid water die door het vuilpakket beweegt, al gauw een factor honderd groter dan wanneer er alleen regenwater door het stort sijpelt. Dit is een van de redenen waarom het aanbeveling verdient de stortbasis boven het niveau van de hoogste grondwaterstand te leggen. In het laatste geval wordt de hoeveelheid percolatiewater die uit het stort vrijkomt,

alleen beïnvloed door neerslagoverschot, vochtgehalte van het vuil, methode van storten e.d.

Voor een uitvoeriger overzicht van deze materie wordt verwezen naar een literatuuroverzicht van Hoeks (1973) en naar Mesu en Van Engers (1974). Hier zij slechts opgemerkt dat in Ambt-Delden, waar men heeft getracht de hoeveelheid percolatiewater zoveel mogelijk te reduceren, deze hoeveelheid ongeveer tien procent van de jaarlijkse neerslag bedraagt (± 70 mm). In het buitenland is deze hoeveelheid doorgaans groter. Hoeveel percolatiewater na het afwerken van het stortterrein jaarlijks vrij zal kunnen komen, is nog niet bekend. Er bestaan plannen om na te gaan of de percolatie dan zal kunnen worden gestopt door het aanbrengen van een ondoorlatende afdeklaag. Voorlopig zal men echter ook onder optimale stortcondities, zowel tijdens als na het storten, met beïnvloeding van het grondwater door stortplaatsen rekening moeten houden.

3.2 Verbreiding van de verontreiniging

Zoals in 3.3 zal blijken kan de verbreiding van 'de verontreiniging' worden nagegaan door middel van metingen van het chloridegehalte en/of het geleidingsvermogen, omdat de verontreiniging op enige afstand van het stort hoofdzakelijk uit chloriden bestaat. De verbreiding is sterk afhankelijk van de geohydrologische situatie in de bovengrond. De situatie in Nederland is doorgaans niet te vergelijken met die welke in het buitenland bij vuilstortonderzoek is beschreven. Bovendien is het aantal metingen in ons land tot dusver zeer gering.

Uit het onderzoek in Ambt-Delden blijkt dat twee jaar na het storten de invloed van het percolatiewater op een diepte van 12 tot 14 m merkbaar is. Geo-elektrisch onderzoek bij de stortplaats in deze gemeente, uitgevoerd tot een diepte van 15 m, wijst uit dat deze invloed zich tot dusver horizontaal over een afstand van 10 tot 30 m benedenstrooms uitstrekt. Het verloop van de horizontale en verticale verbreiding op de lange duur, en onder andere geohydrologische omstandigheden, vereist nog veel onderzoek.

3.3 Kwaliteit van percolatiewater en grondwater

De samenstelling van het percolatiewater kan door allerlei oorzaken sterk uiteenlopen [Hoeks, 1973]. De variatie betreft echter niet zo zeer de aard van de verontreiniging als wel de hoeveelheid. In tabel I zijn enkele analysegegevens vermeld van het percolatiewater, zoals dat in een der proefvakken bij de stortplaats in Ambt-Delden is opgevangen met behulp van een plastic folie

TABEL I - Analysegegevens uit 1972 van percolatiewater en grondwater bij een vuilstortplaats in de gemeente Ambt-Delden (SVA, 1973). Concentratie in mg/l, geleidingsvermogen in μ S.

	Percolatie-	Grondwater	
	proef- vak III	beneden- streams ¹⁾	boven- streams ²⁾
COD	48.600	55	22
Anorg. NH ₄ -N	1.072	2,7	0,60
Tot. NH ₄ -N	1.409	5,1	1,8
Cl ⁻	2.961	407	66
Tot. P.	0,9	0,06	0,13
SO ₄ ²⁻	785	75	40
Fe	2.202	14,6	62
Na ⁺	1.380	n.b.	n.b.
K ⁺	950	n.b.	n.b.
Ca ²⁺	2.200	n.b.	n.b.
Mg ²⁺	447	n.b.	n.b.
Geleidings- vermogen	31.560	1.708	610
pH	6,2	7,4	7,2

¹⁾ 14 m vanaf het stort, op 12-14 m diepte (boring IV)

²⁾ op 12-14 m diepte
n.b. = niet bepaald

onder het vuil. Deze gegevens werden twee jaar na het storten verzameld (in 1972). De gegevens van andere proefvakken en/of jaren vertonen vrijwel hetzelfde beeld. De belangrijkste chemische macro-verontreinigingen zijn organische stoffen, anorganisch en organisch ammonium, chloride, sulfaat, ijzer, natrium, kalium, calcium en magnesium. Uit eerdere metingen was gebleken dat nitriet en nitraat vrijwel niet in het percolatiewater aanwezig zijn. De concentratie van deze ionen werd daarom in het onderhavige geval niet bepaald. Verder dient te worden opgemerkt dat de concentratie van het bicarbonaat ion eveneens niet werd bepaald, hoewel dit ion naar alle waarschijnlijkheid ook tot de macro-verontreinigingen behoort.

Om na te gaan wat er met bovengenoemde verontreinigingen gebeurt, zijn benedenstreams van de stortplaats enkele filterbuizen geplaatst, met peilfilters op verschillende dieptes. De afstand tot het stort varieert van 5 tot 14 m, de diepte van 1,20 tot 14 m. Ter vergelijking werd bovenstreams eveneens een filterbuis geplaatst. Tabel I geeft een indruk van de invloed die het percolatiewater op het grondwater heeft doordat hierin, behalve de analysegegevens van het percolatiewater, ook die van het grondwater bovenstreams en 14 m benedenstreams zijn vermeld. In de beide laatste gevallen betreft het metingen in monsters die op een diepte van 12 - 14 m onder maaiveld zijn genomen.

Metingen aan monsters uit andere peilfilters vertonen dezelfde tendens als de gegevens van tabel I, namelijk dat van de meeste macro-verontreinigingen zoals organische verbindingen, ammonium, sulfaat en ijzer

op enige afstand van het stort weinig of niets wordt teruggevonden. Van micro-verontreinigingen, met name de zware metalen, is het aantal metingen tot dusver veel beperkter. Ook hier is echter tot nu toe geen verhoging (eerder een verlaging) van het oorspronkelijke gehalte gevonden, hoewel met name Zn en Ni in het percolatiewater aanwezig zijn (resp. ca. 30 en 1 mg per liter). De invloed van het percolatiewater is volgens tabel I het duidelijkst af te lezen uit de verhoging van het chloridegehalte en daarmee samenhangend het geleidingsvermogen. Uit latere metingen komt dit nog sterker naar voren. Zo is eind 1973 op dezelfde plaats een sterk toegenomen chloridegehalte en geleidingsvermogen gemeten (resp. 1440 mg per liter en 4760 μ S), terwijl de cijfers voor de overige verontreinigingen niet noemenswaard verschillen van die in tabel I. Verder blijkt de invloed van het percolatiewater ook uit de rottende geur van het grondwater.

4. Zuiveringsprocessen in de bodem

Uit het wateronderzoek komt duidelijk naar voren dat er, behalve voor het chloride-ion, een zuivering van het percolatiewater plaatsvindt tijdens het transport door de bodem. In het buitenland heeft men soortgelijke ervaringen opgedaan. Met name Golwer et al. (1969) hebben de verschillende zuiveringsprocessen bestudeerd. Men kan daarbij onderscheid maken tussen:

1. microbiologische omzettingen,
2. adsorptie,
3. precipitatie,
4. filtratie.

Verder kan de concentratie in het grondwater ook afnemen door verdunning, diffusie en dispersie.

Om de betekenis van de verschillende zuiveringsprocessen voor de grondwaterverontreiniging op kortere en langere termijn aan te kunnen geven, dient men aard en intensiteit van deze processen vast te stellen. Daartoe moet behalve het water ook de bodem, i.c. de daarin aanwezige vaste fase en gasfase, worden onderzocht. De rol welke de eerste drie genoemde processen bij de zuivering kunnen spelen, zal nu worden toegelicht aan de hand van de resultaten van het bodemonderzoek bij Rijssen.

4.1 Microbiologische omzettingen

Een van de opmerkelijke resultaten van het in 3.3 besproken wateronderzoek is dat van de belangrijkste macro-verontreiniging, de organische stof, in het grondwater naast de stortplaats weinig of niets wordt teruggevonden. In theorie zou deze zuivering door alle vier genoemde processen kunnen worden veroorzaakt. In de praktijk blijkt

TABEL II - O₂- en CO₂-gehalten van de bodemlucht en redoxpotentiaal in de grond onder een vuilstortplaats in de gemeente Markelo (metingen Dr. J. Hoeks, ICW).

Diepte onder het vuil (cm)	O ₂	CO ₂	E _H (mV)
	(vol.%)		
± 20	< 1	38	n.b.
± 60	< 1	32	n.b.
10	n.b.	n.b.	-166
70	n.b.	n.b.	-126
120	n.b.	n.b.	-166

n.b. = niet bepaald

ze (vrijwel) alleen een gevolg te zijn van de microbiologische afbraak van de organische stof.

Indirect blijkt dit uit het feit dat vrijwel geen accumulatie van organisch materiaal in de bodem werd gevonden in het onderzoek bij Rijssen. Meer direct volgt dit uit metingen, in de grond onder het stort, van het O₂- en CO₂-gehalte van de bodemlucht en van de redoxpotentiaal. De resultaten daarvan zijn vermeld in tabel II. Het milieu onder het stort is, gezien de redoxpotentiaal van -126 tot -166 mV, sterk gereduceerd. Het meest opvallend is het hoge CO₂-gehalte van de bodemlucht (32 - 38 vol.%). In een normale, goed geaëreerde grond is dit gehalte vaak meer dan een factor tien lager. De enige verklaring voor een dergelijk hoog gehalte ligt in een sterke CO₂-productie door micro-organismen. De activiteit van de micro-organismen kan ook worden afgeleid uit de reductie van nitraat tot ammonium, en van sulfaat tot sulfide. Volgens de eerder besproken wateranalyses heeft eerstgenoemde omzetting reeds volledig in het stort zelf plaatsgevonden. Uit onderzoekingen van Golwer et al. (1969) blijkt echter dat deze omzetting ook in het grondwater zelf nog plaats kan vinden. De omzetting van sulfaat in sulfide werd eveneens door deze auteurs beschreven en volgt ook uit eigen onderzoek (zie 4.3).

4.2 Adsorptie

Bij aanwezigheid van fijnkorrelige bestanddelen (klei, humus, ijzeroxyden, e.d.) bezit de bodem adsorptiecapaciteit. Doordat de klei- en humusdeeltjes bij de in de bodem aanwezige pH-waarden een netto negatieve lading dragen, worden vooral positieve ionen (via een omwisselingsreactie) geadsorbeerd. IJzeroxyden die onder dezelfde omstandigheden een positieve lading kunnen hebben, adsorberen mede daardoor vooral anionen.

In ons land is de anionenadsorptie in de meeste gronden gering, in vergelijking met de kationenadsorptie. Verder worden er niet-ionogene verbindingen door voornoemde bestanddelen meer of minder sterk geadsorbeerd.

TABEL III - Chemische samenstelling van precipitaten in de grond onder een vuilstortplaats in de gemeente Markelo.

Monster	nr.	gew.% van de grond				
		FeS	FeCO ₃ *	CaCO ₃	MnCO ₃	MgCO ₃
Zwart	16	0,06	0,0	0,18	0,0	0,04
Zwart, verkit	11	0,33	0,63	1,20	0,08	0,06
Zwart, verkit	15	0,12	0,54	2,03	0,09	0,07
Zwart, verkit	17	0,21	0,59	2,23	0,16	0,07
Groen	12	0,0	0,05	0,07	0,01	0,04
Groen	14	0,0	0,08	0,22	0,0	0,04
Groen	18	0,0	0,04	0,11	0,0	0,04
Groen, verkit	19	0,0	0,08	0,45	0,0	0,05
Groen, verkit	20	0,0	0,03	0,27	0,0	0,05

* De FeCO₃-cijfers zijn in het veld waarschijnlijk hoger geweest in verband met oxydatie na de bemonstering.

Toegepast op de grondwaterverontreiniging door vuilstortplaatsen betekent dit dat anorganische anionen zoals Cl⁻, NO₃⁻ en SO₄²⁻ niet door adsorptie uit de bodemoplossing verdwijnen, terwijl kationen zoals NH₄⁺, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺, Zn²⁺, Ni²⁺, e.d., wél aan adsorptie onderhevig zijn. Bij een grofzandige ondergrond met hier en daar lemige laagjes, zoals die zowel in Delden als in Rijssen aanwezig is, is de adsorptiecapaciteit van de grond gering. In het laatste geval bleek de samenstelling van de geadsorbeerde kationen onder invloed van het percolatiewater volledig te zijn gewijzigd over de gehele diepte van het onderzochte bodemprofiel i.c. de (onverzadigde) zone van 1 à 2 m tussen de basis van het vuilpakket en de grondwaterspiegel. De belangrijkste verandering die daarbij werd gevonden, is de vervanging van Al³⁺ door K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺ en, in een enkel geval, Zn²⁺. Waarschijnlijk heeft ook vervanging door NH₄⁺ plaatsgevonden, maar dit is niet nagegaan. Tenslotte wordt opgemerkt dat de veranderingen van plaats tot plaats nogal verschillen, wat zou kunnen samenhangen met lokale variaties in de samenstelling van het percolatiewater.

4.3 Precipitatie

Het uiterlijk van een verse, onder de vuilstortplaats gelegen profielwand bleek zich met name van een normale, niet onder vuil gelegen wand te onderscheiden door het verspreid voorkomen van groene en zwarte plekken. Verder was ook de kleur van de lemige lagen groener dan normaal. Zowel de groene als de zwarte plekken waren soms sterk verkit. Na toetreding van lucht ontstond in beide gevallen een bruine kleur. Deze plekken werden speciaal bemonsterd en onderzocht op de aanwezigheid van precipitaten.

Een oriënterend onderzoek toonde aan dat deze monsters sulfide- en/of carbonaat-accumulaties bevatten. Ter bepaling van de globale samenstelling van de kationen in de

accumulaties werden de monsters geëxtraheerd met een geringe overmaat HCl. De som van de in de extracten bepaalde kationen Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ en Mn²⁺ bleek goed overeen te stemmen met de som van de anionen (CO₃²⁻ en S²⁻), die uit andere metingen werd berekend. Aan de hand van deze gegevens en van literatuurgegevens omtrent de stabiliteitsgebieden van Fe(II)- en Mn-verbindingen [Garrels and Christ, 1965], werd vervolgens een schatting gemaakt van de gehalten aan Ca-, Mg-, Fe(II)- en Mn-carbonaat en Fe(II)-sulfide. Hoewel in deze procedure nog wel enkele onzekere elementen schuilen, is het niet waarschijnlijk dat de berekende samenstelling daardoor essentieel wordt gewijzigd. De resultaten zijn in tabel III vermeld. Het blijkt dat de carbonaten voornamelijk uit Ca- resp. Fe(II)-carbonaten bestaan, zoals men ook op grond van de samenstelling van het percolatiewater (tabel I) zou verwachten. Deze verbindingen zijn evenals MgCO₃ in alle monsters aanwezig, het meest

Afb. 1 - Accumulatie van calcium- en ferrocarbonaat tussen zandkorrels, afkomstig uit de grond onder de vuilstortplaats bij Rijssen. Vergroting 600 X. Opname gemaakt met behulp van een raster-elektronenmicroscop door de Stichting Technische en Fysische Dienst voor de Landbouw, Wageningen.



in de zwarte monsters. In laatstgenoemde monsters komen, in tegenstelling tot de groene monsters, ook MnCO₃ en FeS voor; het ligt mede daarom voor de hand om aan te nemen dat het FeS oorzaak is van de zwarte kleur. De kleur van de groene monsters kan zowel van sideriet (FeCO₃) als van het van oorsprong aanwezig glauconiet (een ijzerrijke glimmer) afkomstig zijn. Laatstgenoemd mineraal geeft, wanneer het in fijn verdeelde vorm aanwezig is, zoals in lemige, fijnzandige lagen, ook onder 'natuurlijke' omstandigheden een groenige kleur aan de grond ('groen zand').

De bevindingen werden ten dele bevestigd door mineralogisch onderzoek. Met behulp van röntgendiffractie kon de aanwezigheid van calciet (CaCO₃) worden vastgesteld. Onderzoek met behulp van een raster-elektronenmicroscop en een energiedispersieve röntgenspectrometer toonde aan dat de zandkorrels aan elkaar gekit worden door calcium- en ijzerverbindingen (zie afb. 1). De precipitatie van sulfiden en vooral carbonaten is hiermee duidelijk geïllustreerd. Dat daarbij de carbonaatprecipitatie belangrijker is dan de sulfideprecipitatie laat zich begrijpen. De CO₂-productie door micro-organismen is veel algemener dan de S²⁻-productie die door sulfaatreducerende bacteriën wordt teweeggebracht. De betekenis van dit precipitatiemechanisme voor de grondwaterverontreiniging is in kwalitatieve zin duidelijk. Vele kationen, waaronder de zware metalen, vormen slecht oplosbare carbonaten en sulfiden en zijn daardoor eveneens onderhevig aan (co)precipitatie. Wat de kwantitatieve bijdrage van dit mechanisme tot de totale zuivering is, kon in dit onderzoek niet worden vastgesteld.

5. Zware metalen

De zuiveringsprocessen kunnen het gemakkelijkst worden bestudeerd door, zoals hierboven is gedaan, na te gaan wat er met de macro-verontreinigingen gebeurt. In de praktijk kunnen de micro-verontreinigingen echter evenzeer prolemen opleveren. Daarom is ook een beperkt onderzoek verricht naar het voorkomen van een belangrijke groep van micro-verontreinigingen, te weten de zware metalen. In alle onderzochte monsters werd een totaalanalyse verricht van Co, Zn, Cr, Ni en Cd.

Rekening houdend met het natuurlijke gehalte en de spreiding die daarin optreedt, kon in twee van de veertien monsters een accumulatie van een der zware metalen worden geconstateerd. In één geval (Co) betrof het een zwart, verkit, monster; in het andere geval (Zn) een monster dat zich juist onder de grondwaterspiegel bevond en waarin geen carbonaat- of sulfide-accumulatie aanwezig was. Waarschijnlijk spelen

respectievelijk precipitatie en adsorptie hier een rol bij de ophoping.

Dat er niet meer accumulaties van zware metalen werden gevonden, hangt vermoedelijk samen met de lage concentraties van deze elementen in het percolatiewater en de geringe ouderdom van het betreffende stort. Complexering van zware metalen, gevolgd door uitspoeling ('mobilisatie') als verklaring voor het ontbreken van accumulaties, lijkt niet erg waarschijnlijk. In de eerste plaats geven de wateranalyses daarvoor geen aanwijzingen (3.3). In de tweede plaats zijn de omstandigheden vooral voor het optreden van organische complexen niet erg gunstig. De afbraak van de organische stof is (vrijwel?) volledig en er is een grote overmaat van concurrerende kationen. Bovendien worden dergelijke complexen meestal sterker geadsorbeerd dan de metalen zelf.

6. Conclusies

1. Uit het wateronderzoek in Ambt-Delden is enkele jaren na het storten 10 tot 30 m benedenstrooms van het stortterrein vrijwel alleen een verhoging van het chloridegehalte van het grondwater waar te nemen. Andere bestanddelen, zoals organische verbindingen, ammonium, sulfaat, ijzer en zware metalen, zijn door van nature optredende zuiveringsprocessen uit het sterk verontreinigde percolatiewater verwijderd.
2. Uit het onderzoek van de bodem onder een stortplaats bij Rijssen volgt dat er onder het stort een sterk gereduceerd milieu aanwezig is. Daarin vindt een intensieve CO₂-productie door micro-organismen plaats. Door de microbiologische activiteit worden organische stoffen afgebroken en vinden er reductieprocessen plaats, waarbij nitraat wordt omgezet in ammoniak, sulfaat in sulfide, Fe³⁺ in Fe²⁺, enz.
3. De microbiologische processen geven aanleiding tot de vorming van carbonaten en sulfiden. De precipitatie van voornamelijk Ca- en Fe(II)-carbonaat is kwantitatief gezien belangrijker dan de sulfideprecipitatie. Dit komt doordat de microbiologische CO₂-productie algemener is dan de sulfideproductie.
4. Behalve door precipitatie worden kationen ook door adsorptie uit de bodemoplossing verwijderd. De samenstelling van de geadsorbeerde ionen wisselt van plaats tot plaats, wat op lokale variaties in de samenstelling van het percolatiewater wijst.
5. Zoals kan worden verwacht, is de ophoping in de bodem bij de onderzochte zware metalen veel minder algemeen aantoonbaar dan bij de macro-verontreinigingen. Het onderzoek zowel van water als bodem doet vermoeden dat de zware meta-

len eveneens door adsorptie en precipitatie uit de bodemoplossing worden verwijderd.

7. Slotopmerking

Een belangrijk deel van de zuivering, te weten die van de anorganische componenten van het percolatiewater, bestaat uit adsorptie en precipitatie. Deze processen verlopen in het algemeen reversibel, zodat elke verandering in de evenwichtstoestand tot verschuivingen in de geadsorbeerde en geprecipiteerde hoeveelheden leidt. Doordat de evenwichtstoestand na het afwerken van het stort op den duur zal veranderen, kunnen geadsorbeerde en geprecipiteerde verbindingen in principe weer vrijkomen. Welke veranderingen hierbij optreden, dient stellig te worden onderzocht.

Literatuur

- Appar, M. A., and Langmuir, D., 1971. *Groundwater pollution potential of a landfill above the water-table*. Groundwater 9, 6, 76-96.
- Böke, E., Sturm, G. und Zubiller, C. O., 1973. *Die Ablagerung von Schlacke und Asche aus kommunalen Müllverbrennungsanlagen im Hinblick auf den Gewässerschutz*. Deutsche Gewässerkd., Mitteilgn. 55-60.
- Breeuwsma, A., en Engers, L. E. van, 1974. *De invloed van vuilstortplaatsen op bodem- en grondwater. Een praktijkonderzoek in de gemeenten Ambt-Delden en Markelo*. Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, rapport nr. 1156 (idem SVA-rapport nr. 947), 19 blz.
- Exler, H. J., 1972. *Defining the spread of groundwater contamination below a waste tip*. Conf. on Groundwater pollution, Univ. of Reading, Vol. I, 145-169.
- Garrels, R. M., and Christ, C. L., 1965. *Solutions, minerals and Equilibria*. Harper and Row, New York, Evanston and London, 450 blz.
- Golwer, A., Matthess G., und Schneider W., 1969. *Selbstreinigungsvorgänge im aeroben und anaeroben Grundwasserbereich*. Wasser 36, 64-91.
- Golwer, A., Matthess G., und Schneider, W., 1972. *Contamination de l'eau souterraine par les dépôts de déchets et implications pour les méthodes d'évacuation des résidus*. Centre Belge d'Etude et de Documentation des Eaux no. 347, 428-433.
- Hoeks, J., 1973. *Verontreiniging van bodem- en grondwater bij vuilstortplaatsen. Een literatuurstudie*. Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen. Nota 737.
- Hughes, G. M., Landon, R. A., and Farvolden, R. N., 1971. *Hydrogeology of solid waste disposal sites in Northeastern Illinois U.S.* Environment Protection Agency, U.S. Governm. Printing Office, Washington, 154 blz.
- Mesu, E. J., en Engers, L. E. van, 1974. *Grondwaterverontreiniging ten gevolge van stortplaatsen*. Landbk. Tijdschrift 86, 8, 214-219.
- Nöring, F., Farkasdi, G., Golwer, A., Knoll, K. H., Matthess, G., und Schneider, W., 1968. *Ueber Abbauvorgänge von Grundwasserverunreinigungen im Unterstrom von Abfalldeponien*. Gas- und Wasserfach 109, Heft 6, 137-142.
- SVA, 1971. *Onderzoek Centrale Stortplaats van het Openbaar Lichaam Vuilyverwijdering Twente*, II, 47 blz.
- SVA, 1972. Idem III, 44 blz.
- SVA, 1973. Idem IV, 60 blz.
- SVA, 1974. Idem V, 55 blz.
- Waegeningh, H. G. van, 1972. *Grondwaterbeheer in Nederland*. H₂O, 6, 13, 334-336.
- Walker, W. H., 1973. *Where have all the toxic chemicals gone?* Groundwater 11, 2, 11-20.
- Zanoni, A. E., 1972. *Groundwater pollution and Sanitary Landfills. A critical review*. Groundwater 10, 1, 3-13.

