

Verontreiniging van de bodem en het grondwater door minerale oliën¹⁾

Bibliotheek Hooftkantoor TNO
's-Gravenhage 19-66

Ir. J. A. SOMERS

INSTITUUT VOOR GEZONDHEIDSTECHNIEK TNO

Samenvatting

De verontreiniging van grondwater met aardolieprodukten als gevolg van lekkages, breuk en andere ongelukken bij de produktie, opslag en transport is een probleem van steeds groeiende betekenis. Wanneer deze stoffen in grondwatervoorraden doordringen is dit zeer nadelig voor de kwaliteit van eventueel daaruit te winnen drinkwater, aangezien kleine hoeveelheden van deze verontreinigingen reeds een zeer onaangename geur en smaak teweegbrengen.

Het onderzoek op dit gebied werd aangevangen met de ontwikkeling van apparatuur waarmee de migratie van aardolieprodukten in verschillende grondsoorten kan worden nagegaan.

Summary

The pollution of groundwater with mineral oils as a result of leakages, ruptures and other accidents during production, storage and transportation, becomes a problem of increasing importance.

The nuisance of such a pollution by minute amounts of those oils consists mainly of a very unpleasant odour and taste of the groundwater, which is disadvantageous for the aesthetic quality of the drinking water, prepared from this polluted groundwater.

A research program has been started to investigate on laboratory scale the behaviour of an oil pollution in the subsoil and the solubility of the oil in the groundwater.

1. Probleemstelling

Grondwater ontstaat uit regenwater dat op zijn weg omlaag zeer langzaam door de bodem filtreert en daarbij praktisch vrij van bacteriën wordt, evenwel ook verschillende bestanddelen uit de bodem op kan nemen.

Het ijzer- en mangaangehalte van grondwater bijvoorbeeld is vaak hoger dan wordt toegestaan voor drinkwater in verband met vlekvorming op sanitair en troebeling, doch met de hedendaagse zuiveringstechnieken kan een produkt worden verkregen dat geheel aan de te stellen eisen voldoet.

Voor de winning van grondwater is een korrelige, poreuze bodem gewenst; het water kan zonder te veel weerstand naar de winningsmiddelen stromen. In de bodem eventueel aanwezige klei-afzettingen kunnen vanwege hun slechte doorlatendheid worden gebruikt om het eronder aanwezige grondwater te vrijwaren van een rechtstreekse besmetting van boven af, met schadelijke afvalstoffen.

In Nederland en in vele andere landen is het grondwater een zeer waardevolle grondstof voor de bereiding van drinkwater, welke zoveel als mogelijk is beschermd moet worden tegen verontreinigingen, welke de kwaliteit nadelig zouden kunnen beïnvloeden.

Dank zij alle hygiënische voorzorgen, waarmee het grondwater werd omringd, was tot op heden ook op de esthetische kwaliteit hiervan weinig aan te merken. Sedert het einde van de tweede wereld-

oorlog staat het grondwater echter steeds meer bloot aan verontreinigingen door benzine en andere minerale oliën. Het gevaar ligt hier geheel en al in het esthetische vlak: verontreiniging met een minerale olie maakt het water ongenietbaar tengevolge van een intense reuk en smaak.

In tabel 1 zijn reukdrempels van diverse koolwaterstoffen weergegeven en in tabel 2 de resultaten van een aantal smaak- en reukproeven.

Een bijprodukt als fenol gaat grote smaakbezwaren geven als het water gehoord wordt en verder kunnen er nog andere bijprodukten met een sterke geur of smaak, zoals mercaptanen en andere organische zwavel- en stikstofverbindingen in de olie aanwezig zijn.

Voor het maximaal toelaatbare gehalte aan minerale olie in drinkwater wordt vaak een waarde van 1 mg/l (= 1 : 1.000.000) genoemd. Alhoewel dit gehalte door sommige proefpersonen nog wordt opgemerkt, is het voor vele anderen aanvaardbaar. De genoemde waarde heeft slechts betekenis als een gemiddelde voor vele koolwaterstoffen; sommige stoffen geven bij een hoger gehalte nog geen aanleiding tot klachten, bij weer andere stoffen moeten wij ver beneden deze norm blijven. In Rusland bestaan voor zwavelhoudende oliesoorten bijvoorbeeld maxima van 0,1—0,3 mg/l [3].

Als gevolg van de eenvoud van de waarde 1 mg/l bestaat het gevaar dat men dit als absoluut criterium gaat beschouwen, terwijl de juiste grenzen in een groot gebied om deze waarde heen liggen, afhankelijk van de oliesoort, de bijmengselen en andere smaakjes van het water. Bovendien zijn kwantitatieve bepalingen van dergelijke lage gehalten

¹⁾ Publikatie nr 255 van het Instituut voor Gezondheidstechniek TNO.

TABEL 1

Reukdrempels van diverse koolwaterstoffen [1]

Produkt	mg/m ³
Benzine (met olie)	0,05
Dieselolie	0,5
Thiofenol	1
Testbenzine	100
Verwarmingsolie	220
Smeerolie	500
Machineolie	1.000
Fenol	1.000
Benzeen	2.000

moeilijk. Het lijkt verstandiger voor de praktijk een limiet te verbinden aan een gestandaardiseerde organoleptische beoordeling van de reuk (reuk treedt eerder op dan smaak), zonodig gevolgd door een gevoelige kwalitatieve chemisch/fysische analyse om de ongewenste stof te identificeren.

Uit hygiënisch oogpunt bezien schijnt er bij een oliegehalte van 1 mg/l in het algemeen geen *direct* gevaar voor mens en dier te zijn. Hetzelfde kan worden gezegd van toevoegingen zoals loodverbindingen. De „veilige” concentratie hiervan zou overeenkomen met een concentratie van enkele honderden milligrammen benzine per liter water, dus ver boven de smaakgrens [4]. Wel zijn er mogelijkheden tot accumulatie van dergelijke verbindingen in het menselijk lichaam, hetgeen ook geldt voor kankerverwekkende koolwaterstoffen [5,6], maar veel is hierover niet bekend.

De moeilijkheden die de landbouw kan ondervinden van minerale olie in het water, vallen buiten de strekking van dit artikel. Ook hier kan grondwater de betekenis hebben van gebruikswater.

2. Besmettingsmogelijkheden van het grondwater door minerale oliën

Reeds in 1932 werd erop gewezen dat lekkende olietanks en -leidingen verontreiniging van de bodem en van het grondwater ten gevolge hadden [7]. Sinds die tijd is het verbruik van minerale oliën verveelvoudigd. Enkele situaties die mogelijk tot verontreiniging kunnen leiden zijn:

a) Oliewinning in waterwingebieden. In Den Haag werd deze pas toegestaan nadat uitgebreide maatregelen waren getroffen om te voorkomen dat olie zich zou gaan verspreiden in de watervoerende bodemlagen.

Een vrij recente eruptie tijdens een boring bij Sleen heeft bij velen echter de vraag doen rijzen of dergelijke ongelukken altijd voorkomen kunnen worden.

b) Olieraffinaderijen, tankparken en pijpleidingen. Deze zijn uiteraard potentiële bronnen van grote

TABEL 2

Resultaten van smaak- en reukproeven [2]

Verduunning 1 : 1.000.000; temp. 18 °C

Produkt	reuk	smaak
Shell 800 I.P. 919/60	+	0
Shell petroleum I.P. 916/60	+	±
Shell verwarmingsolie I.P.P. 917/60	+	+
Super Shell I.P. 915/60	+	+
1, 2, 3, 4 - tetrahydronaftaleen	++	++
n-oktaan	0	0
n-hexaan	0	±
benzeen	0	0

++ = sterk; + = duidelijk waarneembaar; ± = zwak waarneembaar; 0 = afwezig.

verontreiniging. Als zodanig bekend staand zijn zij echter in wezen niet gevaarlijk; men kan hun de vestiging ontzeggen als dat nodig is, men kan extra veiligheidsmaatregelen met controlemogelijkheden en men kan regelmatig controleren. Direct na een ongeluk kunnen de geëigende maatregelen worden genomen.

c) Ongelukken met tankwagens en vliegtuigen. Deze kunnen overal gebeuren, maar worden direct als gevaarlijk onderkend, zodat ook hier maatregelen mogelijk zijn.

d) Kleine voorraadtanks voor partikuliere verwarmingsinstallaties. Deze ontelbare kleine tanks vormen een zeer groot en misschien wel het grootste gevaar. Zij kunnen van twijfelachtige kwaliteit zijn, worden vaak zonder zorg getransporteerd en ingegraven (zand erover!), worden door de eigenaar nooit gecontroleerd (dit kan meestal ook niet), terwijl door het grote, onbekende aantal ook geen overheidscontrole mogelijk is. Een technisch onfeilbare bescherming van de tank, met controlemogelijkheden, wordt als te kostbaar ervaren. Lekkages worden meestal pas geconstateerd als het kwaad reeds lang is voortgewoekerd en de schade onherstelbaar is.

Bij het vullen van deze tanks kunnen zij overlopen; ook het boordevol vullen van (warme) bodemtanks met (koude) olie in de winter kan overlopen van de tank tot gevolg hebben. veroorzaakt door uitzetting van de olie.

Overigens moeten ook deze gevaren niet worden overschat; bodemverontreiniging in een stadswijk veroorzaakt ongerief of direct herstelbare schade; ook voor de land- en tuinbouw zal de schade beperkt blijven tot een aantal hektaren met soms de mogelijkheid tot wettelijke aansprakelijkheid. Slechts bij de drinkwatervoorziening kan een lekkage voor een grote groep mensen jarenlang ongerief betekenen.

e) Rekreatiegebieden. Ook hier ligt nog een mogelijk aktueel wordend probleem. De waterwingebieden liggen nl. meestal in voor rekreatie aantrekkelijke gebieden. De toename van de motorisering van het rekreatiezoekend publiek vraagt om

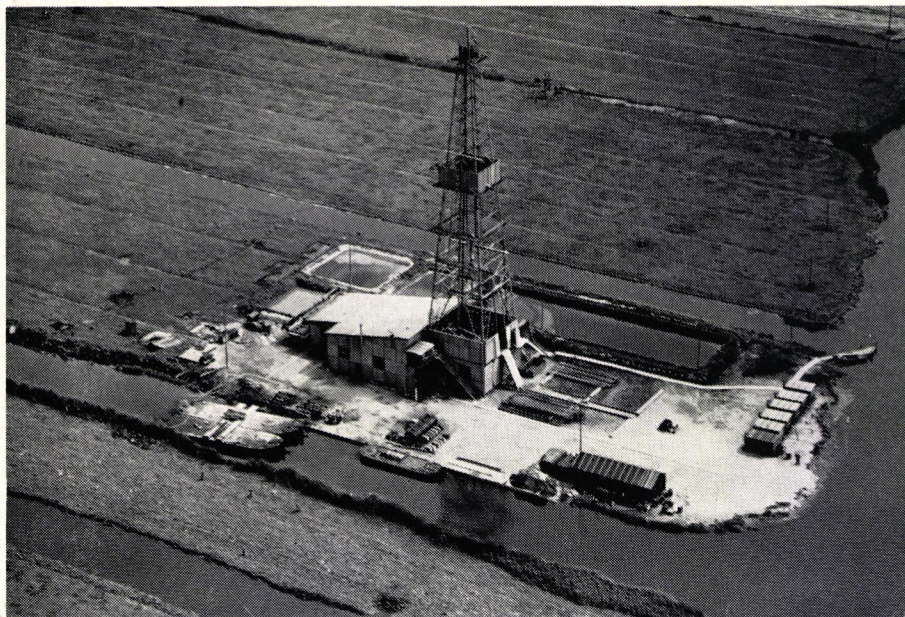


Fig. 1. Een boorlokatie in Nederland. Duidelijk zichtbaar zijn de vergaarbakken van spoeling en water. Links een spoelput die speciaal beveiligd is tegen migratie in de bodem, rechts een watervergaarbak.

(Foto: KLM Aerocarto N.V.)

autowegen, pompstations, parkeerplaatsen e.d., allemaal verontreinigingsbronnen.

Ook potentiële waterwingebieden moeten worden beschermd. Als het in de toekomst economisch verantwoord wordt om bijvoorbeeld op de Veluwe infiltratieterrainen voor rivierwater in te richten en het gewonnen kunstmatig grondwater naar de Randstad Holland te transporteren, dan moet deze oplossing niet worden doorkruist door een met olie verontreinigde bodem!

In Nederland verkeren wij in de gelukkige positie dat onze grondwaterwingebieden in hygiënisch opzicht al zeer goed zijn beschermd. Waarschijnlijk is het hierdoor dat het probleem in Nederland weinig voorkomt.

Wel moeten wij voortdurend op onze hoede blijven: het oliegebruik neemt toe, het waterverbruik ook; de mogelijkheden tot contact tussen beide worden steeds groter.

In onze angst voor olieverontreinigingen mogen wij echter niet vergeten dat de olievoorziening van enorm belang is voor de werkgelegenheid en voor de welvaart.

De oliemaatschappijen mogen niet onnodig worden geremd in hun activiteiten. Planologisch en technisch gezien blijven altijd nog mogelijkheden open, lang niet al het grondwater heeft een bestemming tot gebruikswater.

Om tot optimale resultaten te komen is naast goede wil echter ook een diepgaande kennis van het probleem noodzakelijk en het is hier dat de schoen wringt. Een goede normstelling is pas mogelijk als het gevaar tot in details onderkend kan worden.

Dank zij het aardgas zal in de eerstkomende decennia het aantal tanks voor huisbrandolie in Nederland niet sterk meer toenemen. Wat echter te

zeggen van het groeiende aantal tanks dat tengevolge van overschakeling op aardgas buiten gebruik wordt gesteld en die men rustig in de grond laat zitten? Tanks met olieresten, tanks die vergeten worden!

3. Levensduur van een olieverontreiniging in de bodem

De invloed van een olieverontreiniging blijkt jarenlang aantoonbaar te zijn. Tot nog toe zijn er gevallen bekend met een levensduur van 2 tot meer dan 70 jaar [8]. In de meeste van deze gevallen is er echter alleen sprake van kwalitatieve aspecten. Bakteriologische afbraak onder aërobe omstandigheden is goed mogelijk [9], hetgeen ook blijkt in biologische zuiveringsinstallaties.

Over de snelheid en de omvang van het proces in de bodem is echter praktisch niets bekend. Dat chemisch gebonden zuurstof (nitraten, sulfaten) kan worden gebruikt bij de oxydatie van minerale oliën lijkt onwaarschijnlijk [9].

Het is te verwachten dat een olieverontreiniging, eenmaal in de anaërobe bodemzones aangeland, een blijvend gevaar is voor het grondwater.

Wel is het mogelijk dat door biologische invloeden de fysische eigenschappen van de olie aan veranderingen onderhevig zijn. Zo is vaak melding gemaakt van slijmvorming, bestaande uit een olie-wateremulsie met een rijk bacteriële leven op de grensvlakken water-olie. Een dergelijke slijmvorming is ook gekonstateerd in voorraad tanks [8,10], en bij eigen proefnemingen.

4. De migratie van minerale oliën in de bodem

In de grondwatertechniek wordt in het algemeen gewerkt met het begrip doorlatendheid of permea-



Fig. 2. Gaseruption bij Sleen (Drenthe). Als dit een olie-eruptie was geweest zou dit zeer ernstige gevolgen voor de kwaliteit van het grondwater hebben gehad.

(Foto: Anp-foto)

biliteit, de bekende k -waarde uit de wet van Darcy: $v = -kI$, waarin v de filtersnelheid voorstelt, I het verhang van het drukniveau en k de doorlatendheidsfactor.

Bij de oliemaatschappijen is het gewoonte uit deze k -waarde de viscositeit en de dichtheid af te zonderen, waardoor men komt tot een specifieke K -waarde.

Goede stappen vooruit maakten Rose [11], die de invloed van het poriëngehalte en de onrondheid van de korrels signaleerde, en Kozeny [12], die de invloed van het poriëngehalte in formule bracht.

Met deze formuleringen en nog vele andere praktijkformules is jarenlang goed gewerkt; zij zullen ook wel in gebruik blijven door hun goede hanterbaarheid, afwijkingen neemt men op de koop toe.

De meeste grondwaterformules kennen een splitting in termen die specifiek de vloeistof beschrijven en termen die specifiek de bodem beschrijven, zonder te letten op wederzijdse beïnvloeding.

De meting van de absolute permeabiliteit is echter alleen mogelijk met een gas of met een niet-polaire vloeistof (hexaan, benzeen e.d.), terwijl water tengevolge van zijn polariteit door bijvoorbeeld kleihoudende bodemlagen langzamer zal stromen dan in overeenstemming is met de absolute permeabiliteit. Een gedeelte van de poriën wordt nu ingenomen door gebonden water, dat zich ongeveer als een vaste stof gedraagt en zo het effectieve poriënvolume doet afnemen. Dit proces is afhankelijk van het gehalte aan elektrolyten in het water.

Bij grofkorrelige zanden zijn de permeabiliteitsverschillen tussen het polaire water en niet-polaire koolwaterstoffen nauwelijks meetbaar en voor de praktijk dus niet interessant.

Voor klei ligt de zaak geheel anders. Van nature aanwezige kleilagen worden vaak gebruikt ter be-

scherming van het hieronder aanwezige water: de klei is „ondoorlatend” voor water en mogelijk in dit water aanwezige schadelijke stoffen. De kleilaag is echter wel doorlatend voor de niet-polaire minerale oliën. Of het de olie zal lukken het in de kleilaag aanwezige water te verdringen is een andere vraag.

Is een tweefasenstroming (d.w.z. olie en water) mathematisch nog wel te vatten zolang er een makroskopisch grensvlak tussen beide vloeistoffen bestaat, beslist moeilijk wordt het indien elk van beide stoffen, gezamenlijk stromend, voorkeur toont voor bepaalde poriën. De uit de grensvlakspanningen af te leiden krachten, die dit grensvlak in beweging willen brengen, zijn namelijk afhankelijk van het bodemmateriaal en van de afmetingen der poriën.

Nu vertonen deze poriën langs het grensvlak een enorme variatie, zodat na enige tijd niet meer kan worden gesproken van een vlak oliefront. Dit zal een van de oorzaken zijn dat het hydraulisch niet goed mogelijk is de olie restloos uit de poriën te verdringen.

Het is in principe mogelijk aan het drijvende water stoffen toe te voegen waardoor de fysische eigenschappen ten aanzien van de stroming voor water en olie gelijk worden. De toegevoegde stoffen mogen echter niet schadelijk zijn en moeten restloos kunnen worden uitgespoeld. Bovendien is de keuze ervan afhankelijk van de bodemgesteldheid en van de oliesoort.

Gelden de voorgaande beschouwingen voor een met water verzadigde bodem, meer gekompliceerd wordt het indien de olieverontreiniging zich bevindt in een niet verzadigde bodem. Van het begin af aan spelen nu capillaire krachten mee, die afhankelijk zijn van het poriënsysteem, waarin plaatselijk zeer grote variaties voorkomen. Uit het mis-

TABEL 3

Oplosbaarheid van koolwaterstoffen in water [4, 13]

aantal koolstofatomen	produkt	oplosbaarheid in mg/l
5-12	autobenzine	93-505
10-	dieselolie	17-22
5	n-pentaan	350
6	cyclohexaan	94
6	benzeen	800
7	n-heptaan	45
7	tolueen	470
8	n-octaan	14
8	ethylbenzeen	140
10	n-decaan	6
10	tetrahydronaftaleen	40
18	dodecylbenzeen	1

schien aanvankelijk „gesloten” oliefront kunnen zich olie-uitlopers vormen langs bepaalde poriën of korreloppervlakken.

Om het gehele migratieprobleem te completeren moet nog gewezen worden op de mogelijkheid dat het fysische karakter van de olie tijdens zijn verblijf in de bodem aan veranderingen onderhevig is.

Op slijmvorming en emulsiëring (biologisch) is reeds gewezen.

Vluchtige componenten kunnen door verdamping verdwijnen en tijdens de stroming kan fraktioneering van het oliemengsel optreden.

Wat men op een bepaald moment op een bepaalde plaats onderzoekt is een ander mengsel dan dat wat men een jaar later 100 m verder wil onderzoeken. Zowel bij de analysemethoden als bij de fysische formulering van de stroming moet hier rekening mee worden gehouden.

Ook indien een olieverontreiniging in zijn totaliteit ergens in de bodem tot rust zou zijn gekomen is het gevaar voor het grondwater nog niet geweken.

Minerale oliën zijn oplosbaar in water en het blijkt dat de oplosbaarheden ver boven de reeds eerder genoemde smaakgrens van 1 mg/l liggen (zie tabel 3).

De oplosbaarheid neemt sterk af met toenemend aantal koolstofatomen, waarbij aromaten beter oplosbaar zijn dan paraffinen met hetzelfde aantal koolstofatomen.

De in tabel 3 vermelde oplosbaarheden zijn maxima die onder laboratoriumomstandigheden konden worden bereikt. In welke mate langs de tot stilstand gekomen oliemassa stromend grondwater of percolerend regenwater oplossend kan werken is nog niet bekend; het is wel waarschijnlijk dat de sterkte van de in tabel 3 genoemde oplossingen bij lange na niet zal worden gehaald.

Voor de praktische beoordeling van een dergelijk geval is nog van belang de verhouding tussen de totaal gewonnen hoeveelheid grondwater en de hoeveelheid door opgeloste olie verontreinigd water. De verdunning kan hierbij zo groot zijn dat het water juist vrij is van geur en smaak.

5. Het voorkómen en bestrijden van olieverontreinigingen in grondwater

Het beste bestrijdingsmiddel is nog altijd het voorkómen van mogelijke olieverontreinigingen. Dit houdt in dat er rond de onttrekkingsputten van het grondwater zones moeten zijn waar alle olieopslag en/of -transport is verboden, met daaromheen zones waar dit aan vergunningen met technische voorwaarden en controlebevoegdheden is onderworpen.

De afmetingen van deze zones zijn afhankelijk van de geohydrologische bodemgesteldheid ter plaatse, de belangrijkheid van de winning en van de in het geding zijnde oliesoorten. Beide laatste factoren zijn geen konstante grootheden! Verder moet rekening worden gehouden met oorlogsomstandigheden, waarbij opruiming van weggevoelde olie vaak niet mogelijk is.

Bij tijdig ontdekte ongevallen is het vaak mogelijk de verontreinigde grond uit te graven en af te voeren. Deze methode is uiterst kostbaar, maar tot op heden de enig bekende succesrijke methode. Bij een diepliggende grondwaterstand kan het verder voordeel bieden de plaats van het ongeval zoveel mogelijk af te dekken, zodat percolerend regenwater geen invloed kan uitoefenen op de oliemassa en er enige tijd gewonnen kan worden.

Het boren en afpompen van putten, in de hoop de verontreiniging naar deze putten te drijven, is ook kostbaar en het succes is twijfelachtig. Er blijven olieresten in de bodem en door het rijzen en dalen van de waterspiegel ten gevolge van het pompbedrijf kunnen grote massa's bodem worden verontreinigd. Waar laat men bovendien het afgepompte water?

De olie uit het gewonnen water verwijderen is mogelijk: na afscheiders voor de niet opgeloste olie kan actieve kool worden toegepast of een uitvlokkingsmethode. Een biologisch/oxydatieve methode, zoals bij het afvalwater van olieraffinaderijen wel wordt toegepast, is waarschijnlijk niet mogelijk bij het relatief schone grondwater.

Lijken de genoemde methoden in principe goed mogelijk, in de praktijk zal dit anders zijn.

Bij grondwatervoorkomens die in hygiënisch opzicht betrouwbaar zijn, is de nazuivering van het gewonnen water meestal summier en beperkt zich tot het verwijderen van ijzer en mangaan of een ontzuring.

Het gekozen zuiveringssysteem voor de olieverontreiniging betekent dan een kostbare wijziging van het produktieschema; bovendien moet deze wijziging gereed zijn als de olie in de pompputten is aangetoond.

6. Het verdere onderzoek naar het gedrag van minerale oliën in de bodem

In het buitenland, vooral in Duitsland, wordt zeer veel praktijkonderzoek verricht en in Nederland begint dit bij vóórkomende gevallen ook te gebeuren.

Het onderzoek dat het Instituut voor Gezondheidstechniek TNO verricht naar de migratie van minerale oliën in de bodem, is meer theoretisch van aard dan praktisch, daar de middelen niet voldoende zijn voor praktijkonderzoek op grote schaal. Er zal worden getracht enige problemen theoretisch en op laboratoriumschaal te benaderen, met de hoop aan te kunnen sluiten aan praktijkervaringen van anderen. In dit programma, dat zich over enige jaren zal uitstrekken, wordt aandacht geschonken aan:

- a. De invloed van de polariteit op de permeabiliteit.
- b. De invloed van grensvlakspanningen op de gedragingen van het grensvlak water-olie.
- c. Het in een waterige oplossing gaan van minerale oliën in de bodem.

Een en ander zal voorlopig worden toegespitst op een bodem in verzadigde toestand.

Literatuur

- [1] J. Holluta: Zur Frage der Belastung natürlicher Gewässer mit Mineralölprodukten. Gas/Wasser/Wärme, 15 (1961), p. 151, 186.
- [2] International Water Supply Association, 6th Congress 1964. (Rapport Boorsma en van Soest).
- [3] International Water Supply Association, 6th Congress 1964. (Russisch nationaal rapport).
- [4] H. Eilers: Minerale olie en drinkwater. Water, Bodem, Lucht, 50 (1960), p. 58.
- [5] M. Knorr: Über Mineralöl und seine Produkte im Boden und im Grundwasser. Water, 41 (1957) p. 247, 276.
- [6] J. Borneff: Mäusefütterungsversuche mit 3,4-Benzpyren, Mineralöl und Tensiden. Archiv für Hygiene, 147 (1963), p. 28.
- [7] P. Thomas: Verunreinigung von Wassergewinnungsanlagen durch Benzin oder dergleichen und Behebung derselben. Gesundheitsingenieur 55 (1932) p. 8.
- [8] International Water Supply Association, 6th Congress 1964. (samenvatting van nationale rapporteurs).
- [9] G. W. Fuhs: Der mikrobielle Abbau von Kohlenwasserstoffen. Arch. für Mikrobiologie 39 (1961), p. 374-422.
- [10] R. J. de Gray und L. N. Killian: Bakterielle Schleime und Korrosion in petrochemischen Lagerbehältern. Ind. Engng. Chem. 52 (1962), p. 58.
- [11] a. H. E. Rose: An Investigation into the Laws of Flow of Fluids through Beds of Granular Materials. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1945 vol. 153, p. 141.
b. H. E. Rose: The Isothermal Flow of Gases Through Beds of Granular Materials. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1945, vol. 153, p. 148.
c. H. E. Rose: On the Resistance Coefficient-Reynolds Number Relationship for Fluid Flow Through a Bed of Granular Material. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1945, vol 153, p. 154.
d. Rose and Rick: Further researches in fluid flow through beds of granular material. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1949, vol. 160, nr. 4.
- [12] J. Kozeny: Hydraulik. Wien 1953.
- [13] P. Ladendorf: Untersuchungen zur Methodik der quantitativen Bestimmung von Heizölen und flüssigen Treibstoffen in Wasser. Dissertatie Aken 1961.