

RIVM Rapport 609021031/2005

Validatie van het model DIVOCOS

M.G. Mennen en M.H. Broekman

Contact: M.G. Mennen
Centrum voor Inspectieonderzoek, Milieucalamiteiten en Drinkwater
Marcel.Mennen@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van de VROM-Inspectie in het kader van project M/609021: “Raamproject algemene ad hoc ondersteuning Inspectie”

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Postbus 1, 3720 BA Bilthoven,
telefoon: 030 - 274 91 11, fax: 030 - 274 29 71

Rapport in het kort

Validatie van het model DIVOCOS

Het model DIVOCOS (DIspersion of VOlatile COntaminantS) is een bruikbaar model om een adequaat meetprogramma op te stellen waarmee tijdens een bodemsanering de luchtkwaliteit in de omgeving kan worden bewaakt. Dit concluderen we aan de hand van een validatiestudie van dit model.

Met het model DIVOCOS kunnen de concentraties aan vluchtige stoffen in de lucht worden berekend die vrijkomen tijdens een bodemsanering. Het belangrijkste doel van deze berekeningen is te bepalen of en in welke vorm er tijdens de sanering metingen moeten worden uitgevoerd om de luchtkwaliteit in de omgeving te bewaken en eventuele blootstellingsrisico's van omwonenden te beperken.

In deze studie hebben we gegevens verzameld van 10 bodemsaneringen om het model te valideren en de bruikbaarheid te beoordelen. We hebben het onderzoek gericht op acht stoffen, die verreweg het meest voorkomen in bodem- en grondwaterverontreinigingen in Nederland.

De resultaten geven aan dat het model voor de meeste van deze stoffen concentraties in de leefomgeving berekent die redelijk goed overeenkomen met de gemeten waarden.

Voor twee stoffen, beide met een relatief hoge dampdruk, vallen de berekende concentraties systematisch hoger uit dan de gemeten waarden.

Trefwoorden: model, modelberekeningen, DIVOCOS, validatie, bodemsanering, bodemverontreiniging, metingen, vluchtige stoffen, lucht, leefomgeving, benzeen, toluen, ethylbenzeen, xylenen, vinylchloride, 1,2-cis-dichlooretheen, trichlooretheen, tetrachlooretheen

Abstract

Validation of the DIVOCOS model

The computer model, DIVOCOS (DIspersion of VOLatile COntaminantS), calculates the concentrations of volatile compounds in air released during soil remediation. These calculations are primarily performed to determine whether air concentration measurements have to be carried out during the remediation in order to control the air quality and minimize possible health risks to residents. In this study we gathered data from 10 soil remediation processes to validate the computer model and assess its usefulness. Validation was performed on the compounds: benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes, vinyl chloride, 1,2-cis-dichloroethene, trichloroethene and tetrachloroethene, all of which dominantly occur in soil and groundwater pollution in the Netherlands. The results of the validation show that for most of the compounds studied, the air concentrations calculated with the model compare well, at least in order of magnitude, with the measured values. The calculated concentrations of vinyl chloride and 1,2-cis-dichloroethene, however, appear to be systematically higher than the measured values. This is probably due to the high vapour pressure of these two compounds. In conclusion, DIVOCOS can be said to serve its main purpose: determining the necessity of taking air concentration measurements and defining an adequate measuring program during soil remediation.

Keywords: computer model, model calculations, DIVOCOS, validation, soil remediation, soil pollution, measurements, volatile components, ambient air, living environment, benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes, vinyl chloride, 1,2-cis-dichloroethene, trichloroethene, tetrachloroethene

Inhoud

Samenvatting	7
1. Inleiding.....	9
2. Beschrijving van het model.....	11
2.1 Algemeen.....	11
2.2 Model concepten.....	11
2.3 Invoer van gegevens en uitvoer van resultaten	13
2.4 Beperkingen en onzekerheden van het model.....	16
3. Doel, opzet en uitvoering van de validatie	19
3.1 Doel	19
3.2 Opzet.....	19
3.3 Uitvoering	19
3.3.1 Selectie saneringen.....	20
3.3.2 Berekeningen met DIVOCOS.....	21
3.3.3 Sanering Enschede	24
3.3.4 Sanering Bergen op Zoom	26
3.3.5 Sanering Groningen	28
3.3.6 Sanering Gorinchem	31
3.3.7 Sanering Zaltbommel.....	32
3.3.8 Sanering Epe	34
3.3.9 Sanering Tiel.....	36
3.3.10 Sanering Zwijndrecht.....	38
3.3.11 Sanering Grave.....	41
3.3.12 Sanering Zwolle	44
4. Resultaten.....	47
4.1 Inleiding.....	47
4.2 Toelichting toetsingscriteria.....	47
4.2.1 De toetsingscriteria	47
4.2.2 Validatie op basis van de toetsingscriteria	49
4.3 Uitwerking van de vergelijkingen per sanering	50
4.3.1 Sanering Enschede	50
4.3.2 Sanering Bergen op Zoom	52
4.3.3 Sanering Groningen	55
4.3.4 Sanering Gorinchem	58

4.3.5 Sanering Zaltbommel.....	59
4.3.6 Sanering Epe.....	62
4.3.7 Sanering Tiel.....	64
4.3.8 Sanering Zwijndrecht.....	67
4.3.9 Sanering Grave.....	69
4.3.10 Sanering Zwolle.....	73
4.4 Bespreking overall resultaten.....	75
4.4.1 Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties.....	76
4.4.2 Validatie op basis van de toetsingscriteria.....	78
4.4.3 Overige bevindingen.....	81
5. Conclusies en aanbevelingen.....	83
Literatuur.....	85
Bijlage 1: Beschrijving van het model DIVOCOS.....	87
B1.1 Inleiding.....	87
B1.2 Algemene massabalans in een poreus medium.....	88
B1.3 Emissie tijdens grondverzet.....	89
B1.4 Emissie uit de in situ grond.....	93
B1.5 Verdelingscoëfficiënten.....	97
B1.6 Diffusiecoëfficiënten.....	98
B1.7 Parameterwaarden.....	102
Referenties Bijlage 1.....	103
Lijst van gebruikte symbolen Bijlage 1.....	105

Samenvatting

Het RIVM heeft in opdracht van de VROM-Inspectie het protocol “risico’s blootstelling bij bodemsaneringen” ontwikkeld. Dit protocol beschrijft hoe de blootstelling aan vrijkomende stoffen tijdens een bodemsanering en de daarmee gepaard gaande risico’s voor omwonenden en passanten door middel van een snelle en simpele aanpak geschat kunnen worden.

Ter ondersteuning van het protocol is een rekenmodel ontwikkeld, genaamd DIVOCOS (DIspersion of VOlatile COntaminantS). Met dit model kunnen voorafgaand aan een sanering de te verwachten concentraties aan vluchtige stoffen in de lucht worden berekend die tijdens de sanering vrijkomen. Het belangrijkste doel van deze berekeningen is te bepalen of en in welke vorm er tijdens de sanering een meetplan moet worden uitgevoerd om de luchtkwaliteit in de omgeving te bewaken en eventuele blootstellingsrisico’s voor omwonenden te beperken. Voor dit doel is naast het rekenmodel een set toetsingscriteria opgesteld, gebaseerd op toxicologische grenswaarden voor de in het model opgenomen stoffen.

Om het model te valideren en de bruikbaarheid te beoordelen is een studie uitgevoerd. In dit rapport worden de opzet en uitkomsten van deze studie gepresenteerd. De opdracht tot deze validatie is gegeven door de VROM-Inspectie.

Voor de validatie zijn 10 bodemsaneringen geselecteerd, waarbij tijdens de sanering concentraties stoffen in de lucht zijn gemeten. Voor elke sanering zijn ook concentraties berekend met het model DIVOCOS. Daarvoor zijn gegevens gebruikt uit de voorafgaand verrichte bodemonderzoeken en is informatie ingewonnen bij de instanties en bedrijven die bij de sanering betrokken waren. Vervolgens zijn de gemeten concentraties vergeleken met de met het model berekende waarden en is onderzocht of op grond van de berekeningen met het model een adequaat meetplan is gekozen om tijdens de sanering de luchtkwaliteit in de omgeving te bewaken.

De resultaten van de studie geven aan dat het model voor de meeste van de in deze studie onderzochte stoffen concentraties in de leefomgeving berekent die *qua orde van grootte* goed overeenkomen met de gemeten waarden. Gemiddelde concentraties worden over het algemeen beter voorspeld dan percentielen van uurgemiddelde concentraties. Voor vinylchloride en 1,2-cis-dichlooretheen, beide stoffen met een relatief hoge dampdruk, vallen de met DIVOCOS berekende concentraties systematisch hoger uit dan de gemeten waarden. Echter, op grond van de beperkte hoeveelheid data in deze studie kan niet worden vastgesteld of de afwijkingen zijn toe te schrijven aan de hoge dampdruk of dat ook andere factoren – bijvoorbeeld andere stoffeigenschappen of bepaalde aannames in het model – een rol spelen.

Ook is onderzocht of op basis van de berekeningen de juiste keuze is gemaakt ten aanzien van het meetplan tijdens de sanering. In 60 van de 68 gevallen (88%) bleek de met DIVOCOS voorspelde situatie overeen te komen met de gemeten situatie. In vijf gevallen

(7,4%) volgde uit de berekening een “vals-positief” meetadvies en in drie gevallen (4,4%) een “vals-negatief” meetadvies. Vanuit de visie dat men blootstelling aan te hoge concentraties zo veel mogelijk wil voorkomen, kan een percentage van 4,4% “vals-negatieve” meetadviezen acceptabel worden genoemd.

Geconcludeerd wordt dat het model DIVOCOS bruikbaar is voor het doel waarvoor het is ontworpen, namelijk het bepalen of en in welke vorm er tijdens de sanering metingen van de luchtkwaliteit moeten worden uitgevoerd. In dit onderzoek hebben we ons beperkt tot de stoffen: benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen, vinylchloride, 1,2-cis-dichlooretheen, trichlooretheen en tetrachlooretheen. Deze stoffen komen verreweg het meest voor in bodem- en grondwaterverontreinigingen in Nederland. Van andere stoffen waren te weinig gegevens beschikbaar om het model te kunnen valideren. Naar verwachting zal het model echter ook bruikbaar zijn voor stoffen, waarvan de fysisch-chemische eigenschappen in dezelfde range liggen als die van de onderzochte stoffen.

Om vast te stellen in hoeverre het noodzakelijk is om DIVOCOS ook voor andere stoffen te valideren wordt aanbevolen om, op basis van de inventarisatie van alle te saneren locaties in Nederland met een bodemverontreiniging, te schatten bij hoeveel van deze locaties de verontreiniging bestaat uit (enkele van de) de stoffen waarvoor DIVOCOS nu is gevalideerd. Dit aantal kan worden getoetst aan een criterium, bijvoorbeeld een minimaal gewenst percentage locaties waarbij DIVOCOS gevalideerd moet kunnen worden toegepast. Als het criterium niet wordt gehaald, kan worden onderzocht welke andere stoffen relatief vaak voorkomen in bodemverontreinigingen in Nederland. Voor deze stoffen zou eventueel een aanvullende validatiestudie kunnen worden uitgevoerd met gegevens uit saneringen waarin deze stoffen voorkomen. Daarbij is het gewenst om vooral stoffen te kiezen met andere eigenschappen (dampdruk, oplosbaarheid, halfwaardetijd in de bodem en partiticoëfficiënt tussen de organische fase en de waterfase) dan de in deze studie onderzochte componenten, en wordt het resultaat van de eerste stap vergeleken met dit criterium.

1. Inleiding

Bij saneringen van verontreinigde bodems kunnen vluchtige stoffen vrijkomen. Deze stoffen kunnen vervolgens worden verspreid in de lucht, waardoor omwonenden en passanten aan de stoffen worden blootgesteld. De mate en ernst van deze blootstelling hangen af van de eigenschappen van de vrijkomende stoffen, de bodemeigenschappen, de ernst van de verontreiniging, de diepte en het oppervlak van de verontreiniging, de duur van de sanering en de werkwijze van saneren. Daarnaast spelen weersomstandigheden en de lokale situatie een rol.

Door de blootstelling kunnen er gezondheidsrisico's ontstaan voor omwonenden en passanten. Het wordt van belang geacht om deze risico's zo goed mogelijk in kaart te brengen, zodat indien nodig maatregelen genomen kunnen worden om deze risico's te minimaliseren. Hierbij kan gedacht worden aan het beperken van de uitdamping en verspreiding van vrijkomende stoffen, maar ook aan tijdelijke evacuatie van omwonenden.

In 1999 is door RIVM in opdracht van de toenmalige Inspectie Milieuhygiëne – inmiddels overgegaan in de VROM-Inspectie – het protocol “risico's blootstelling bij bodemsaneringen” ontwikkeld (Mennen *et al.*, 2004). Dit protocol beschrijft hoe de blootstelling aan vrijkomende stoffen bij een bodemsanering en de daarmee gepaard gaande risico's door middel van een snelle en simpele aanpak geschat kunnen worden, zowel voorafgaand aan als tijdens de sanering.

Het protocol bevat onder meer een toxicologisch beoordelingskader, een rekenmodel met uitgebreide handleiding en toelichting, een aantal richtlijnen voor het uitvoeren van meetcampagnes en een overzicht van eventuele maatregelen om de blootstelling te beperken.

Het protocol is aanvankelijk verspreid onder medewerkers van de VROM-Inspectie en de bij GGD's werkzame Medisch Milieukundigen. Naar aanleiding van de ervaringen met het protocol en een evaluatie onder een aantal gebruikers is het protocol aangepast. Begin 2004 is een herziene versie uitgebracht en verspreid onder de gebruikers. Naast de al genoemde gebruikers wordt het protocol nu ook op verzoek verstrekt aan medewerkers van andere overheidsinstanties die zich met bodemsaneringen bezig houden. Het protocol is inmiddels ook opgenomen in de landelijke GGD-richtlijn “Gezondheidsrisico's voor omgeving bij bodemsanering” (Brederode, 2004).

Ter ondersteuning van het protocol is een rekenmodel ontwikkeld, genaamd DIVOCOS (DISpersion of VOLatile COntaminantS). Met dit model kunnen voorafgaand aan een sanering de te verwachten concentraties aan de tijdens de sanering vrijkomende vluchtige stoffen in de lucht worden berekend. Daarbij worden gegevens gebruikt van onder andere de duur en omvang van de sanering, het bodemtype, de mate van de verontreiniging en de eigenschappen van de verontreinigende stof. Het model voorspelt, vanwege alle onzekerheden die aan de berekeningen kleven, geen exacte concentraties maar alleen de

orde van grootte van de concentraties. DIVOCOS moet daarom worden gebruikt als een screeningsmodel. Het belangrijkste doel van de berekeningen is te bepalen of en in welke vorm er tijdens de sanering een meetplan moet worden uitgevoerd om de luchtkwaliteit in de omgeving te bewaken en eventuele blootstellingsrisico's voor omwonenden te beperken. Voor dit doel is een set toetsingscriteria opgesteld, waarbij berekende concentraties worden vergeleken met grenswaarden uit het toxicologisch beoordelingskader van het protocol.

Het model is een integraal onderdeel van het protocol en wordt dan ook met het protocol meegeleverd. De gebruiker kan het model op een PC installeren.

In de afgelopen jaren is het model toegepast bij, voor zover bij ons bekend, meer dan 25 saneringen. Bij een aantal van deze saneringen zijn metingen verricht van de concentraties in de lucht rondom het saneringsterrein. Van 10 bodemsaneringen hebben we de resultaten van deze metingen vergeleken met de met DIVOCOS berekende concentraties om een indruk te krijgen van de validiteit van de voorspelde waarden. In dit rapport worden de opzet, uitvoering en resultaten van deze validatiestudie beschreven. De opdracht tot deze validatiestudie is gegeven door de VROM-Inspectie. Ten aanzien van het begrip validatie merken we het volgende op. Om een computermodel te valideren wordt over het algemeen ook een gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse gedaan. Het ontbreekt echter aan gegevens om een dergelijke analyse voor het model DIVOCOS uit te voeren. Bovendien voorspelt DIVOCOS, zoals we al hebben gemeld, geen exacte concentraties maar alleen de orde van grootte van de concentraties. Voor de toepassing van het model is dat geen probleem, omdat de toetsingscriteria die worden gebruikt om te bepalen of tijdens de sanering al dan niet een meetprogramma moet worden uitgevoerd, ruim genomen zijn. Voor de validatie hebben we ons daarom beperkt tot het vergelijken van berekende en gemeten concentraties, zonder gevoeligheids- en onzekerheidsanalyse.

Dit rapport is verder als volgt ingedeeld. In Hoofdstuk 2 wordt een korte beschrijving gegeven van het model en het gebruik ervan. Ook de beperkingen en onzekerheden van het model komen daarbij aan bod. Hoofdstuk 3 bevat een algemeen overzicht van de saneringen, waarvan gegevens zijn gebruikt voor de validatie, en de criteria die zijn gebruikt om deze saneringen te selecteren. Verder wordt per sanering een korte beschrijving gegeven van de verontreiniging, de uitvoering van de sanering, de vooraf verrichte modelberekeningen en de metingen die tijdens de sanering zijn gedaan in de lucht in de omgeving van het saneringsterrein. In Hoofdstuk 4 worden de gemeten en berekende concentraties vergeleken. Niet alleen de concentraties zelf zullen worden vergeleken, maar ook zal worden nagegaan of de berekende en gemeten concentraties hetzelfde resultaat geven bij toepassing van de toetsingscriteria voor het meetplan. Dit is immers het belangrijkste doel van de berekeningen met DIVOCOS. De conclusies en aanbevelingen van het onderzoek zullen worden weergegeven in Hoofdstuk 5.

2. Beschrijving van het model

2.1 Algemeen

Het model berekent in eerste instantie de te verwachten emissies van een stof tijdens de sanering en vervolgens de concentraties van die stof in de buitenlucht in het omliggende gebied. Daartoe moet de gebruiker van het model een aantal gegevens invoeren zoals de gemeten concentraties van de stof in de bodem, het grondwater of de bodemlucht, het bodemtype, de omvang van de sanering en een aantal andere essentiële parameters. In het model zijn meer dan 100 stoffen opgenomen. De gebruiker kan echter maar voor één stof tegelijk een berekening doen. Indien er meer stoffen in de verontreiniging voorkomen, moeten meerdere berekeningen worden gedaan.

De berekende concentraties worden getoetst aan grenswaarden uit een toxicologisch beoordelingskader dat is beschreven in paragraaf 3.6 van het protocol. Op basis van de toetsing kan worden besloten om tijdens de sanering al dan niet metingen te verrichten van de concentraties van de vrijkomende stoffen in de lucht om de luchtkwaliteit rondom het saneringsterrein te bewaken. Indien die metingen aangeven dat een grenswaarde uit het beoordelingskader wordt overschreden, kan besloten worden emissiebeperkende maatregelen te treffen of omwonenden tijdelijk te evacueren. Zulke maatregelen kunnen eventueel ook van tevoren worden genomen, bijvoorbeeld als de modelberekeningen uitwijzen dat zeer hoge concentraties worden verwacht.

Ook als geen grenswaarden worden overschreden kan de informatie uit een meetprogramma worden gebruikt om de bevolking te informeren over de blootstelling en de gevolgen daarvan. Een en ander is uitvoerig beschreven in het protocol.

De feitelijke handleiding van het model is opgenomen in het protocol “risico’s blootstelling bij bodemsaneringen”. Het protocol bevat ook een volledige beschrijving van het model inclusief de fysisch-chemische processen en mathematische uitwerking. Deze beschrijving is opgenomen in Bijlage 1 van dit rapport. In de volgende paragrafen zullen we kort beschrijven hoe het modelconcept in elkaar zit (paragraaf 2.2), welke gegevens moeten worden ingevoerd en welke resultaten het model geeft (paragraaf 2.3). In paragraaf 2.4 wordt aandacht gegeven aan de beperkingen van het model en de gevolgen daarvan voor gebruik.

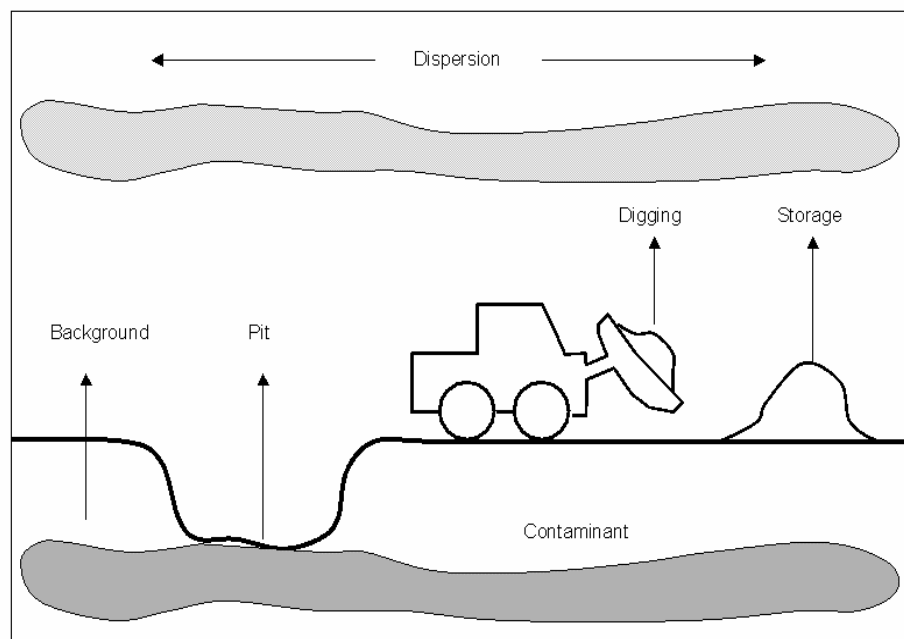
2.2 Model concepten

Het model veronderstelt een continue afgraving en afvoer van verontreinigde grond waarbij vluchtige stoffen uit de grond kunnen vrijkomen in de atmosfeer. Daarbij worden de volgende emissie routes uit de grond naar de atmosfeer onderscheiden (zie Figuur 1):

1. Emissie van de stof uit nog niet afgegraven grond (background)

2. Emissie uit de put, die ontstaat door afgraven van verontreinigde grond (pit)
3. Emissie tijdens de overslag van de grond uit de put naar de opslag op het terrein of naar de vrachtwagen, die de verontreinigde grond afvoert (digging)
4. Emissie tijdens de opslag van de grond op het terrein of in een vrachtwagen (storage)

Deze emissies worden in DIVOCOS uitgerekend met behulp van twee analytische oplossingen van de transportvergelijking voor stoffen in poreuze media.



Figuur 1. Emissieroutes in het DIVOCOS model

De vier emissies worden vervolgens gesommeerd, waarna uit de berekende totale emissie en een set immissiefactoren de concentraties in de lucht worden berekend.

De immissiefactoren zijn vaste omrekeningsfactoren, berekend met behulp van een aantal atmosferische verspreidingsmodellen op basis van langjarige meteorologische gegevens. In Bijlage 2 van het protocol wordt beschreven hoe de immissiefactoren zijn bepaald. De keuze voor het gebruik van immissiefactoren is ingegeven door het feit dat het inbouwen van een apart luchtverspreidingsmodel in DIVOCOS te ingewikkeld bleek. Bovendien is niet van tevoren bekend wat de meteorologische omstandigheden tijdens de sanering zullen zijn. Bij langdurige saneringen zullen de berekende waarden een redelijk goed

beeld geven van de werkelijke gemiddelde concentraties. Bij kortdurende saneringen kunnen echter flinke afwijkingen ontstaan, omdat de meteorologische omstandigheden tijdens de saneringsperiode kunnen verschillen van de langjarig gemiddelde omstandigheden. Bij de toetsing van de berekende concentraties aan de grenswaarden uit het toxicologisch beoordelingskader wordt hier rekening mee gehouden, doordat er ruime marges worden gehanteerd.

Het model onderscheidt drie “typen” immissieconcentraties, namelijk gemiddelde concentraties, 92-percentielen van uurgemiddelde concentraties en 99,7-percentielen van uurgemiddelde concentraties. Voor elk van deze “typen” wordt de concentratie van de stof als functie van de afstand tot de bron, het zogenaamde concentratieprofiel, berekend. Er is gekozen voor gemiddelden, 92-percentielen en 99,7-percentielen, omdat ze gerelateerd kunnen worden aan de blootstellingstermijnen waarop de grenswaarden uit het toxicologisch beoordelingskader betrekking hebben, namelijk korte, middellange en lange blootsteldingsduur. Bij de beschrijving van het toxicologisch beoordelingskader in paragraaf 3.6 van het protocol wordt deze keuze nader toegelicht.

Opmerking: Praktisch gesproken komen de 99,7-percentielen overeen met uurgemiddelde concentraties die voorkomen in perioden met lage windsnelheid, veelal vergezeld van een lage inversiehoogte. Onder dit soort omstandigheden is de verspreiding van stoffen in de lucht immers ongunstig. In principe zou bij het berekenen van de 99,7-percentielen ook rekening moeten worden gehouden met variaties in de emissies tijdens de sanering, maar die zijn niet te voorspellen. De 99,7-percentielen zijn dus uitsluitend gebaseerd op de variatie in de meteorologische omstandigheden. De emissie wordt constant verondersteld.

2.3 Invoer van gegevens en uitvoer van resultaten

De omvang van de emissies via de vier bovengenoemde routes van overdracht is afhankelijk van een groot aantal factoren die te maken hebben met de concentraties in de bodem, de eigenschappen van de stof, de bodemgesteldheid, en de wijze waarop de sanering wordt uitgevoerd. Het computermodel voorziet in twee invoerschermen, waarin de gebruiker een aantal gegevens moet invoeren.

Het eerste invoerscherm heeft betrekking op het bodemtype, de omvang van de sanering en de werkwijze. In dit scherm moeten de volgende gegevens worden ingevoerd.

- Het bodemtype. Er kan uit tien typen grond worden gekozen: zand, leem, klei of veen, waarbij voor de soorten zand, leem en klei ook nog gekozen kan worden uit normaal, humusachtig of veenachtig.
- Een aantal bodemspecifieke parameters: het organisch stof gehalte, het porievolume, de dichtheid, het vochtgehalte en de temperatuur. Enkele van deze parameters zijn direct gerelateerd aan het gekozen bodemtype (default waarden).
- De ruwheid van het omliggende terrein. Daarbij kan worden gekozen uit twee opties: lage ruwheid (open terrein met hooguit een enkel obstakel zoals een laag gebouw of kleine bossage) of hoge ruwheid (stedelijk en industrieel gebied).

- De werkwijze. Er kan worden gekozen uit twee opties: afgraven in kolommen – dan wordt steeds een deel van de grond afgegraven tot op de diepte waarop de bodem schoon is – of laag voor laag afgraven.
- Omvang van de sanering, dat wil zeggen het te saneren oppervlak, de diepte tot op waar grond wordt afgegraven en het verwachte gemiddelde grondverzet per dag.
- Het volume van de grond tijdens het afgraven en verplaatsen naar de opslag en de tijdsduur van dit proces (“digging” in Figuur 1). Voor deze parameters zijn in het model default waarden opgenomen, die zijn gebaseerd op ervaring en gegevens van een aantal saneringen. Ze kunnen door de gebruiker worden gewijzigd.
- Het volume van de grond tijdens de opslag en de duur van het opslaan (“storage” in Figuur 1). Ook hiervoor zijn default waarden opgenomen, die door de gebruiker kunnen worden gewijzigd. De default waarden hebben betrekking op opslag in een vrachtwagen met een laadvermogen van 20 m³, die in 2 uur tijd wordt geladen en daarna direct van de locatie vertrekt. Bij opslag van afgegraven grond op het terrein gelden andere waarden, meestal een groter volume en een langere opslagtijd.

In het tweede invoerscherm wordt de stof geselecteerd. Per berekening kan slechts één stof worden gekozen. Indien meerdere stoffen in het geding zijn, moeten dus meerdere berekeningen worden gedaan, waarbij uiteraard de gegevens uit het eerste scherm alleen bij de eerste berekening ingevoerd hoeven te worden.

Het model bevat een lijst met 117 stoffen of stofgroepen¹. Deze lijst is tot stand gekomen op basis van:

- 1) de lijsten van bestaande interventiewaarden voor bodemsanering en indicatieve waarden voor ernstige bodemverontreiniging (inclusief stoffen waarvoor een ad hoc waarde is afgeleid),
- 2) stoffen die voorkwamen bij saneringen waar een eerdere versie van DIVOCOS is gebruikt en
- 3) een lijst met bodemcontaminanten waarvoor de ATSDR² één of meer grenswaarden heeft afgeleid.

Vervolgens is uit deze lijsten een selectie gemaakt op grond van de eigenschappen van elke stof: alleen stoffen die vluchtig of matig vluchtig zijn, werden in de lijst van DIVOCOS opgenomen. In Bijlage 3 van het protocol is een overzicht gegeven van alle stoffen die in het model zijn opgenomen inclusief de bijbehorende grenswaarden uit het toxicologisch beoordelingskader.

Nadat een stof is gekozen verschijnen op het scherm het CAS nummer van de stof en de waarden van enkele stofspecifieke eigenschappen, die worden gebruikt bij de berekeningen van de emissies: de halfwaardetijd van de stof in de bodem, de

¹ Een aantal stoffen is als groep opgenomen, omdat ze in analyserapporten van bodemonderzoeken meestal ook als groep worden gepresenteerd. Voorbeelden zijn xylenen (in plaats van de afzonderlijke isomeren *o*-xyleen, *m*-xyleen en *p*-xyleen), aromatische oplosmiddelen (een veel voorkomend mengsel van een aantal koolwaterstoffen) en een aantal fracties van minerale olie.

² Voluit: Agency for Toxic Substances and Disease Registry, een Amerikaanse overheidsinstantie die onder meer normen en grenswaarden voor schadelijke stoffen afleidt.

oplosbaarheid, de dampdruk, de partiticoëfficiënt tussen de organische fase en de waterfase (K_{oc}), de molmassa, de Henri coëfficiënt (partiticoëfficiënt tussen de gasfase en de waterfase) en de diffusiecoëfficiënt in lucht. De gebruiker kan aan de waarden van deze eigenschappen niets veranderen. De waarden zijn afkomstig uit diverse databanken en handboeken met gegevens over stoffen. Ze worden ook in andere door het RIVM toegepaste modellen en berekeningen gebruikt, onder meer bij het afleiden van bodeminterventiewaarden. Voor stofgroepen zijn gemiddelde waarden of waarden van de meeste voorkomende stoffen uit die groep genomen.

Na het selecteren van een stof verschijnen in het invoerscherm ook de grenswaarden van de stof uit het toxicologisch beoordelingskader. Er wordt onderscheid gemaakt in grenswaarden voor korte (*acute*), middellange (*intermediate*) en lange termijn (*chronic*) blootstelling. Voor een aantal stoffen en stofgroepen ontbreken één of meer grenswaarden. De gebruiker kan dan zelf een grenswaarde invoeren of besluiten geen toetsing op die grenswaarde uit te voeren. Ook kan een gebruiker een default grenswaarde vervangen door een andere waarde, bijvoorbeeld omdat de gebruiker in de betreffende situatie een strengere of minder strenge norm wil hanteren. Meer informatie hierover is te vinden in het protocol.

Via het tweede invoerscherm worden, in een apart blok, ook de meetgegevens van de verontreiniging ingevoerd. In één blok kunnen meetwaarden in drie verschillende matrices – bodem, grondwater of bodemlucht – worden ingevoerd³. Het aantal metingen dat kan worden ingevoerd is vrij, met een minimum van één en een maximum van honderd. Voor het invoeren van een meetwaarde moet de gebruiker eerst de matrix selecteren. Daarna wordt de meetwaarde ingevuld, waarbij tevens de bijbehorende eenheid moet worden aangegeven. Tenslotte moet worden aangegeven op welke diepte onder het maaiveld de meetwaarde is vastgesteld. Vaak heeft een analyseresultaat betrekking op een monster dat is genomen op een diepte tussen bijvoorbeeld 2 tot 2,4 m. Dan wordt aanbevolen de gemiddelde diepte te nemen, in dit geval 2,2 m.

Na het invoeren en bewaren van de gegevens in de twee schermen kan een berekening worden gedaan. De resultaten kunnen zowel grafisch als in een tekstbestand (zogenaamde report file) worden weergegeven.

Bij de grafische weergave kan de gebruiker kiezen uit twee soorten figuren. De eerste figuur geeft in de vorm van een staafdiagram de emissies van de vluchtige stof naar de atmosfeer weer, via elk van de vier routes en in totaal. In de tweede figuur zijn de berekende jaargemiddelde concentratie, het 92-percentiel van de uurgemiddelde concentraties en het 99,7-percentiel van de uurgemiddelde concentraties uitgezet tegen de afstand tot de saneringslocatie. Uit de figuur kunnen de berekende concentraties bij een zekere afstand, bijvoorbeeld de afstand van de dichtstbijzijnde bebouwing tot de bron, worden afgelezen. In de figuur worden ook de grenswaarden uit het toxicologisch

³ Alle meetwaarden worden, uitgaande van evenwichtspartitie, door het programma omgerekend naar concentraties in de gasfase van de bodem (zogenaamde bodemlucht).

beoordelingskader weergegeven, zodat direct kan worden waargenomen of en op welke afstand tot de bron deze grenswaarden worden overschreden.

De concentraties zijn berekend op ademhoogte. Omdat de bronnen van de emissies zich ongeveer op het niveau van het maaiveld bevinden, zullen concentraties op grotere hoogtes, bijvoorbeeld bij de hogere verdiepingen van een flat, altijd lager zijn dan de in de figuren weergegeven waarden.

Om de resultaten als tekst te kunnen bekijken moet de gebruiker eerst een report file maken. Dit is een tekstbestand waarin zowel de ingevoerde informatie en de bijbehorende default waarden van enkele parameters als de berekende emissies en concentraties worden opgenomen. De report file kan uiteraard worden afgedrukt.

2.4 Beperkingen en onzekerheden van het model

Elke modelberekening is behept met beperkingen en onzekerheden, omdat de aannames waarvan in de berekeningen wordt uitgegaan slechts een benadering zijn van de werkelijkheid. Dit geldt uiteraard ook voor DIVOCOS, zowel voor de berekening van de emissies als die van de concentraties in de leefomgeving. Een bijkomend probleem bij berekeningen met DIVOCOS is dat wordt uitgegaan van langjarige meteorologische gegevens, terwijl de werkelijke weersomstandigheden tijdens een sanering hier van af kunnen wijken, zeker bij saneringen van beperkte duur.

Verder blijkt uit de ervaringen van gebruikers dat men in de praktijk vaak tegen het probleem aan loopt dat de situatie enigermate of zelfs sterk afwijkt van de “ideale sanering” waar het modelconcept van DIVOCOS op is gebaseerd. Voorbeelden van deze situaties zijn een zeer heterogeen verdeelde verontreiniging, een opslaglocatie van afgegraven grond die ver van het terrein ligt of een saneringsterrein dat aan de ene zijde wordt begrensd door open terrein en aan de andere zijde door bebouwing. Het protocol bevat een aantal tips en richtlijnen om voor dit soort gevallen toch een optimale berekening te kunnen uitvoeren. Echter, de nauwkeurigheid van de resultaten zal vanwege de simpele benadering van een complexe situatie beperkt zijn.

De berekende emissies en concentraties moeten daarom worden beschouwd als orde-van-grootte-waarden. Dit houdt in dat bij de toetsing van de berekende concentraties op grenswaarden, en ook bij de vergelijking met gemeten concentraties ten behoeve van de validatie, ruime marges in acht moeten worden genomen. In het protocol wordt bij de toetsingsprocedure met deze marges rekening gehouden.

In bepaalde complexe situaties kunnen de onzekerheden in de met DIVOCOS voorspelde concentraties zo groot zijn dat de berekende waarden mogelijk te veel afwijken van de werkelijk voorkomende concentraties. Men kan daarbij denken aan:

- Saneringen op of bij complexe terreinen zoals bijvoorbeeld een nauwe straat, waarin een soort corridor effect kan optreden.
- In het geval er woningen zeer dicht (minder dan 5 m) op het saneringsterrein staan.

- Saneringen gedurende extreme weersomstandigheden zoals een week met windstil, droog en zeer warm weer.
- Saneringen van complexe of zeer inhomogene verontreinigingen, bijvoorbeeld als de verontreiniging vaten met chemisch afval bevat. Ook als er drijflagen aanwezig zijn, zullen de onzekerheden in de met DIVOCOS voorspelde waarden groot zijn.

Als voor dit soort gevallen toch gebruik wordt gemaakt van DIVOCOS, moet de gebruiker bij de toetsing op grenswaarden een nog ruimere marge hanteren dan in het protocol wordt aangegeven. Een andere mogelijkheid is om in dit soort gevallen geen berekeningen met DIVOCOS uit te voeren en direct uit voorzorg een meetprogramma in te stellen.

Bij de selectie van saneringen voor de validatie is zoveel mogelijk rekening gehouden met bovengenoemde beperkingen. Er zijn echter enkele uitzonderingen gemaakt. Ten eerste worden er relatief veel saneringen verricht in bebouwde gebieden, waardoor woningen zich vaak dicht bij het saneringsterrein bevinden. Bovendien zijn juist dit soort gevallen relevant voor de toepassing van DIVOCOS, omdat er een relatief groot risico is op blootstelling aan hoge concentraties. Daarom zijn enkele saneringen, waarbij de afstand van de dichtstbijzijnde woningen tot het terrein zeer klein was, niet uitgesloten van deze validatie.

Ten tweede is bij één sanering, waarbij grond is afgegraven tussen verschillende huizen in een tijdelijk ontruimde woonwijk (paragraaf 3.3.10), sprake van een relatief complex terrein in de zin dat het gedrag van de wind dicht boven de grond sterk kan worden beïnvloed door de verspreid over het terrein liggende woningen. Deze sanering is toch meegenomen, omdat alle momentane metingen zijn uitgevoerd bij één beperkt gedeelte van het terrein, waarop de verstoring minder van invloed was. Bovendien werden bij deze sanering hoge concentraties verwacht, hetgeen voor de reikwijdte van de validatie ook van belang is.

Ten derde kan niet precies worden vastgesteld wanneer een verontreiniging zodanig inhomogeen is dat de onzekerheden in de met DIVOCOS berekende waarden te groot worden. Bij alle geselecteerde saneringen was de verontreiniging inhomogeen, maar in enkele gevallen was de inhomogeniteit aantoonbaar groter dan bij de andere saneringen. Niettemin zijn ook deze gevallen meegenomen in de validatie om inzicht te krijgen in de bruikbaarheid van DIVOCOS.

3. Doel, opzet en uitvoering van de validatie

3.1 Doel

Het doel van deze validatie is na te gaan of de concentraties die met het model DIVOCOS worden berekend een zodanig goede voorspelling geven van de werkelijke concentraties, dat de berekende waarden kunnen worden gebruikt om vast te stellen of er al dan niet een meetprogramma moet worden verricht tijdens de sanering.

Een bijkomend doel is vast te stellen welke oorzaken er zijn voor eventuele te grote afwijkingen tussen berekende en werkelijke concentraties en of hiervoor in het model verbeteringen zijn aan te brengen.

3.2 Opzet

Voor de validatie zijn tien bodemsaneringen geselecteerd, waarbij tijdens de sanering metingen van concentraties stoffen in de lucht zijn uitgevoerd. Voor elke sanering zijn eerst de te verwachten concentraties berekend met het model DIVOCOS. Daarvoor zijn gegevens gebruikt uit de voorafgaand verrichte bodemonderzoeken en is informatie ingewonnen bij de instanties en bedrijven die bij de sanering betrokken waren.

Vervolgens zijn van elke sanering de resultaten van het meetprogramma verzameld, zodat de van tevoren berekende concentraties kunnen worden vergeleken met de tijdens de sanering gemeten waarden. Die vergelijking wordt in Hoofdstuk 4 besproken.

3.3 Uitvoering

Eerst wordt in paragraaf 3.3.1 een overzicht gegeven van de voor deze validatie geselecteerde bodemsaneringen en de daarbij gebruikte criteria. In paragraaf 3.3.2 wordt een algemene toelichting gegeven op de uitvoering van de berekeningen met DIVOCOS. Vervolgens zullen in de daarop volgende paragrafen (3.3.3 tot en met 3.3.12) de geselecteerde saneringen elk apart worden besproken. Daarbij komen de volgende aspecten aan de orde:

- De verontreiniging (samenstelling, vorm) en uitvoering van de sanering;
- De berekeningen met DIVOCOS: de gebruikte waarden voor de invoerparameters, de herkomst daarvan, de stoffen waarvoor is gerekend en eventuele aannames en bijzonderheden;
- De metingen tijdens de sanering: de typen metingen (momentaan, tijdsgemiddeld), duur van de metingen en de stoffen waarop is gemeten.

3.3.1 Selectie saneringen

In Tabel 3.1 is een overzicht gegeven van de geselecteerde bodemsaneringen. In deze tabel zijn voor elke sanering aangegeven: de plaats waar de verontreiniging zich bevond, een korte omschrijving van de locatie, het type bodemverontreiniging, de componenten waarvoor concentratiemetingen in de lucht zijn uitgevoerd en de tijdsduur van de metingen.

Voor wat betreft de tijdsduur wordt globaal onderscheid gemaakt in tijdsgemiddelde metingen en momentane metingen. Bij tijdsgemiddelde metingen wordt een gemiddelde concentratie over een zekere bemonsteringstijd bepaald. De tijdsduur kan variëren van enkele uren tot weken of zelfs een maand. De gemeten tijdsgemiddelde concentraties worden meestal vergeleken met grenswaarden voor middellange of langdurige blootstelling.

Bij momentane metingen wordt de op dat moment aanwezige concentratie van de stof direct in de lucht bepaald. Door dit soort metingen gedurende langere tijd achter elkaar te doen kan het verloop van de concentratie in de tijd worden gevolgd en kunnen piekwaarden worden gedetecteerd. Deze continue metingen worden vaak op één locatie uitgevoerd, namelijk aan de rand van het saneringsterrein of bij de dichtstbijzijnde woning benedenwinds van de graafwerkzaamheden. Soms is het nodig om tijdens de metingen van meetlocatie te veranderen, bijvoorbeeld als de wind draait. De gemeten piekconcentraties worden getoetst aan grenswaarden voor kortdurende verhoogde blootstelling. Bij overschrijding kunnen zo nodig direct maatregelen worden getroffen om de emissies dan wel de blootstelling te beperken.

Bij saneringen worden momentane metingen vaak gedurende één tot enkele dagen gedaan en wel op de dagen dat de ernstigste verontreiniging wordt verwijderd. Tijdsgemiddelde metingen worden veelal over de hele of in ieder geval een groot deel van de hele saneringsperiode uitgevoerd.

Overigens kunnen door meetwaarden over zekere tijd, bijvoorbeeld een uur of een dag, te middelen uit momentane metingen ook tijdsgemiddelde concentraties worden berekend.

De bodemsaneringen in Tabel 3.1 zijn geselecteerd op basis van de volgende criteria:

- Er moeten voldoende gegevens beschikbaar zijn om berekeningen met DIVOCOS te kunnen uitvoeren. In paragraaf 2.3 is aangegeven welke gegevens een gebruiker minimaal nodig heeft.
- De bodemverontreiniging moet in ieder geval voor een deel bestaan uit vluchtige stoffen.
- Tijdens de sanering moeten er metingen zijn verricht van de concentraties vluchtige stoffen in de lucht in de omgeving van het terrein (dus geen zogenaamde werkplekmetingen, die worden gedaan in het kader van de bescherming van werknemers die de sanering uitvoeren). Bij voorkeur moeten er zowel tijdsgemiddelde als momentane metingen zijn gedaan, maar in ieder geval één van de twee.

- De situatie rond de sanering mag niet dusdanig complex zijn, dat de onzekerheden in de met DIVOCOS voorspelde concentraties te groot worden (zie echter de toelichting onder de voorbeelden in paragraaf 2.4).

3.3.2 Berekeningen met DIVOCOS

Voor elke sanering uit Tabel 1 zijn eerst de nodige gegevens verzameld om de berekeningen met DIVOCOS uit te kunnen voeren. Hiertoe zijn onder meer rapporten van bodemonderzoeken geraadpleegd. In het algemeen is in deze rapporten de benodigde informatie te vinden zoals het bodemtype, het organische stof gehalte, de omvang van het te saneren terrein en de gehalten aan verontreinigende stoffen in bodem, grondwater of bodemlucht. Daarnaast zijn gegevens opgevraagd bij instanties en bedrijven die bij de sanering betrokken waren. Het gaat dan vooral om gegevens als werkwijze bij de sanering en de grootte van de grijper waarmee de grond werd afgegraven. De gebruikte gegevens zijn in tabelvorm, al dan niet voorzien van een toelichting, weergegeven in de paragrafen 3.3.3 tot en met 3.3.12.

De berekeningen zijn zo goed als mogelijk uitgevoerd volgens de richtlijnen van het protocol “risico’s blootstelling bij bodemsaneringen”. Ook voor complexe situaties, zoals een inhomogeen verdeelde verontreiniging, een bodem die uit meerdere lagen bestaat of een sanering waarbij een deel van het terrein tot op bijvoorbeeld 5 meter diepte wordt afgegraven en een ander deel tot op 2 meter, is gebruik gemaakt van de aanwijzingen en rekenvoorbeelden uit het protocol.

Daarbij was het soms noodzakelijk aannames te doen of een keuze voor een parameter te maken, zoals een keuze voor een terreinruwheid bij een saneringsterrein dat aan één zijde open is en aan de andere zijde is afgeschermd door bebouwing. Deze keuzes zullen waar nodig bij de bespreking van de afzonderlijke saneringen worden toegelicht. In gevallen waarbij de keuze voor een parameter op zeer weinig gegevens is gebaseerd en deze parameter een groot effect heeft op de berekende concentraties, zijn er meerdere berekeningen gedaan waarbij steeds een andere waarde voor de betreffende parameter is genomen. Ook deze gevallen worden toegelicht bij de bespreking van de saneringen en bij de bespreking van de resultaten in Hoofdstuk 4.

In dit rapport wordt alleen de meest relevante informatie over de gedane berekeningen in detail gegeven. Voor gedetailleerde informatie wordt verwezen naar de rapportages in de literatuurlijst.

Tabel 3.1. Overzicht van de geselecteerde bodemsaneringen voor de validatie.

Plaats	Omschrijving locatie	Saneringsperiode	Type verontreiniging	Gemeten componenten	Tijdsduur metingen
Enschede	Perikweg (textielbedrijf)	Mei 1998	Huisbrandolie en motorbrandstoffen	BTEX ¹⁾	Tijdsgemiddeld: enkele metingen van 1,5 tot 6 uur, op twee werkdagen ²⁾ Monitoring: gedurende 2 werkdagen
Bergen op Zoom	Noordzijde Haven (woongebied)	Juni – juli 1999	Minerale olie, brandstoffen	BTEX ¹⁾	Tijdsgemiddeld: 8-uurs metingen op 13 werkdagen ²⁾ Monitoring: gedurende 14 werkdagen
Groningen	Ciboga terrein (voormalige gasfabriek)	April 2000 – Medio 2001 ³⁾	Minerale olie, benzeen, PAK's, fenolen, cyanide	BTEX ¹⁾ Andere VOC's ⁴⁾	Tijdsgemiddeld: 7 series van circa 1 maand
Gorinchem	Havendijk (pakhuis; voormalige eierveiling)	Februari 2001	Minerale olie, brandstoffen	BTEX ¹⁾ Andere VOC's ⁴⁾	Tijdsgemiddeld: 2 series van respectievelijk 1 en 2 weken
Zaltbommel	Oliestraat (voormalig benzinestation)	November – december 1999	Minerale olie, brandstoffen	BTEX ¹⁾ Andere VOC's ⁴⁾	Tijdsgemiddeld: 1 serie van 30 dagen Monitoring: gedurende 2 werkdagen
Epe	Achterste Molenweg (voormalige chemische wasserij)	Maart – mei 2001	Gechloreerde ethenen	Cis, tri, per ⁵⁾ Andere VOC's ⁴⁾	Tijdsgemiddeld: 3 series van respectievelijk 28, 36 en 30 dagen Monitoring: gedurende 2 werkdagen
Tiel	RIO terrein (voormalige tinfabriek)	September – november 1998	Gechloreerde ethenen	Cis, tri, per ⁵⁾ Andere VOC's ⁴⁾	Tijdsgemiddeld: 2 series van respectievelijk 2 weken en 1 maand Monitoring: gedurende 3 werkdagen
Zwijndrecht	Tomado terrein (voormalige metaal- en kunststoffabriek)	Mei – augustus 2001	Gechloreerde ethenen, koper, lood, zink, PAK's, Minerale olie, BTEX	Cis, tri, vc ⁵⁾ Andere VOC's ⁴⁾	Tijdsgemiddeld: 3 series van respectievelijk 35, 29 en 26 dagen Monitoring: gedurende 3 werkdagen
Grave	Hamstraat (voormalige chemische wasserij)	Maart – juni 2002	Gechloreerde ethenen	Cis, tri, per ⁵⁾	Tijdsgemiddeld: 6-uurs metingen op 8 werkdagen ²⁾ Tijdsgemiddeld (binnenlucht): 24 tot 72-uurs metingen op 8 werkdagen ²⁾ Monitoring: gedurende alle werkdagen
Zwolle	Dellen-Wuijts (voormalige chemische wasserij)	Juli – september 2003	Gechloreerde ethenen	Cis, tri, per ⁵⁾	Tijdsgemiddeld: 3 series van respectievelijk 18, 10 en 6 dagen Tijdsgemiddeld: enkele metingen van 4 tot 7 uur, op twee werkdagen ²⁾ Momentaan: gedurende de meeste werkdagen ⁶⁾

- 1) BTEX = Benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen
- 2) Hoewel het tijdsgemiddelde metingen betreft, is de bemonsteringsperiode zo kort (enkele uren tot een werkdag) dat ze niet op één lijn kunnen worden gesteld met tijdsgemiddelde metingen over de hele saneringsperiode. Dat wil zeggen dat ze, voor wat betreft de interpretatie, niet moeten worden vergeleken met de met DIVOCOS berekende gemiddelde concentraties, maar eerder met de berekende 92- of 99,7-percentielen van uurgemiddelde concentraties (zie paragraaf 4.3).
- 3) Geplande periode van de sanering. Het is ons niet bekend of de sanering daadwerkelijk in de zomer van 2001 was afgerond, omdat vanaf december 2000 door RIVM geen metingen meer zijn verricht (zie paragraaf 3.3.5)
- 4) Met andere VOC's wordt bedoeld een groep van circa 40 vluchtige organische componenten, waarvoor RIVM een standaard analyse heeft ontwikkeld. Deze VOC's komen in mindere of meerdere voor in de binnen- en buitenlucht en ze worden ook gemeten op een aantal stations van het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit. Tot de groep behoren onder meer alkanen, BTEX en grotere aromatische verbindingen zoals trimethylbenzenen, een aantal gechloreerde alifatische verbindingen (bijvoorbeeld tetrachloormethaan), een aantal gechloreerde aromatische verbindingen (bijvoorbeeld dichloorbenzenen) en enkele andere stoffen waaronder fenol, naftaleen en limoneen.
- 5) vc = vinylchloride; cis = cis-1,2-dichlooretheen; tri = trichlooretheen; per = tetrachlooretheen
- 6) Tweemaal daags zijn bij de dichtstbijzijnde woningen momentane metingen verricht met behulp van Dräger meetbuisjes.

3.3.3 Sanering Enschede

Uitvoering sanering

In mei 1998 vond een bodem- en grondwatersanering plaats van een terrein aan de Perikweg in Enschede. In de bodem bevonden zich twee ondergrondse tanks van het aan de Perikweg gelegen textielbedrijf Ropax. Uit de tanks waren huisbrandolie en benzine in de bodem gelekt.

De verontreiniging bestond voornamelijk uit olie- en benzinecomponenten, onder meer benzeen, toluen, ethylbenzeen, xylenen (BTEX), naftaleen en een aantal alkanen. De sanering bestond uit een vaksgewijze ontgraving tot een diepte van ongeveer 4,5 m, gevolgd door langdurige onttrekking van grondwater. Een deel van de afgegraven grond, die niet of weinig vervuild was, werd tijdelijk naast het terrein opgeslagen, afgedekt met plastic. De meest vervuilde grond werd na afgraven zo snel mogelijk afgevoerd met behulp van vrachtwagens. Ook de tanks die bij de ontgraving werden verwijderd werden zo snel mogelijk afgevoerd. Tussen het verwijderen van de tanks en het afgraven van de meest vervuilde grond zat een periode van bijna drie weken.

De saneringslocatie bevond zich in een woongebied. De dichtst bijzijnde woningen lagen op minder dan 10 meter van de plaats van de ontgraving.

Berekeningen

Voor de berekeningen met DIVOCOS zijn gegevens gebruikt uit het rapport van het bodemonderzoek, verricht door Tebodin (Elderman, 1996), en uit het omgevingsplan van de GGD Twente (Van de Weerd en Köhne, 1998). De gebruikte parameters staan in Tabel 3.2.

Er zijn berekeningen gedaan voor de componenten benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen. Voor de andere in de verontreiniging aangetroffen componenten zijn geen berekeningen gedaan, omdat uit metingen in de kruip- en woonruimte van aanliggende woningen was gebleken dat deze nauwelijks in verhoogde mate voorkwamen. Voor de berekeningen zijn gegevens gebruikt van ongeveer 10 bodem- en ongeveer 10 grondwatermonsters, genomen over het hele terrein. De verontreiniging was geconcentreerd rond twee kernen (daar waar zich de tanks bevonden), één aan de noord- en één aan de zuidzijde van het saneringsterrein.

Tabel 3.2. Invoergegevens voor de berekeningen met DIVOCOS

Parameter	Gekozen waarde
Omgeving (i.v.m. ruwheid)	Bebouwd gebied
Bodemtype	Humusrijk zand ¹⁾
Organisch stofgehalte	3,4%
Bodemtemperatuur	10°C
Watergehalte bodem	0,2 kg kg ⁻¹
Oppervlakte terrein	920 m ²
Diepte van de ontgraving	4,5 m
Volume ontgraven grond	4140 m ³
Werkschema	kolom voor kolom ontgraven
Dagelijks grondverzet	250 m ³ d ⁻¹
Grijpervolume	1 m ³
Ontgravingstijd per keer	0,05 h
Volume opslag	20 m ³
Tijd vullen opslag	24 h

Opmerking: in de tabel staan alleen de parameters die door de gebruiker van DIVOCOS zelf kunnen worden ingevoerd of aangepast. Andere parameters zoals de bodemdichtheid en de porositeit zijn gekoppeld aan het bodemtype; deze zijn niet in de tabel opgenomen.

¹⁾ De bodem bestond tot op 2,5 m uit zwartbruin matig fijn tot matig grof zand. Daaronder wordt leem aangetroffen.

Metingen

Het RIVM heeft tijdens de sanering op twee dagen met behulp van een mobiele GC momentane metingen verricht op BTEX. Daarnaast werden op deze dagen tijdsgemiddelde metingen gedaan met behulp van actief koolbuizen, eveneens op BTEX. Deze metingen namen slechts anderhalf tot enkele uren in beslag en kunnen niet op één lijn worden gesteld met tijdsgemiddelde metingen over de hele saneringsperiode. Dat wil zeggen dat ze, voor wat betreft de interpretatie, niet moeten worden vergeleken met de met DIVOCOS berekende gemiddelde concentraties, maar eerder met de berekende 92- of 99,7-percentielen van uurgemiddelde concentraties (hier wordt in paragraaf 4.3.1 op teruggekomen).

Tijdens de eerste meetdag, op 5 mei 1998, werden de tanks uitgegraven en verwijderd. Op die dag zijn op twee locaties gedurende anderhalf uur tijdsgemiddelde metingen gedaan met actief koolbuizen. De locaties lagen aan respectievelijk de zuid- en westrand van het saneringsterrein, benedenwinds van de saneringswerkzaamheden. De wind was die dag variabel, uit noordelijke tot oostelijke richting. Daarnaast werden op deze locaties en in het gebied tussen deze locaties momentane metingen verricht met behulp van Tedlar bags, die direct werden geanalyseerd met de GC. Als referentie werden ook enkele metingen bovenwinds van het terrein verricht.

Tijdens de tweede meetdag, op 25 mei 1998, werd de meest vervuilde grond afgegraven en met vrachtwagens afgevoerd. Op deze dag zijn op twee locaties gedurende bijna 6 uur

tijdsgemiddelde metingen gedaan met actief koolbuizen. Eén locatie lag aan de noordrand (benedenwinds) van het saneringsterrein en de andere locatie aan de zuidrand (bovenwinds). Daarnaast werden op de benedenwindse locatie en op twee locaties daar dichtbij momentane metingen verricht met behulp van Tedlar bags, die direct werden geanalyseerd met de GC.

De metingen zijn gerapporteerd in Knol-de Vos (1998).

3.3.4 Sanering Bergen op Zoom

Uitvoering sanering

Op de locatie Noordzijde Haven in Bergen op Zoom is begin jaren '90 een bodem- en grondwaterverontreiniging met brandstofcomponenten (minerale olie, in het bijzonder benzeen, toluen, ethylbenzeen, xylenen (BTEX), naftaleen en een aantal alkanen)en, in mindere mate, lood geconstateerd. De verontreiniging bevond zich gedeeltelijk onder een aantal woningen.

In de zomer van 1999 is deze locatie gesaneerd. De sanering bestond uit een vaksgewijze ontgraving. Het te saneren terrein is ingedeeld in 5 vakken met een totale oppervlakte van ruim 400 m². De diepte tot waarop werd gesaneerd verschilde per vak en varieerde van ongeveer 1 tot 4 m. De vervuilde grond diende na afgraven zo snel mogelijk afgevoerd met behulp van vrachtwagen. Daarnaast werd ongeveer 320 m³ schone taludgrond verwijderd en tijdelijk nabij het terrein opgeslagen om later te worden teruggeplaatst. Na de ontgraving vond onttrekking en reiniging van grondwater plaats tot het niveau van de streefwaarde voor de aangetroffen componenten. De ontgraving nam ongeveer een maand in beslag.

De saneringslocatie bevond zich in een woongebied. De dichtst bijzijnde woningen lagen aan de rand van het saneringsterrein; een klein deel van de af te graven grond is zelfs onder deze woningen vandaan verwijderd.

Berekeningen

Voor de berekeningen met DIVOCOS zijn gegevens gebruikt uit het saneringsplan (Remmits, 1997) en de rapporten van de vooraf verrichte nadere bodemonderzoeken (Tauw, 1991; 1992). De gebruikte parameters staan in Tabel 3.3.

Er zijn berekeningen gedaan voor de componenten benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen. Voor de andere in de verontreiniging aangetroffen componenten zijn geen berekeningen gedaan, omdat uit metingen in de kruip- en woonruimte van aanliggende woningen was gebleken dat deze nauwelijks in verhoogde mate voorkwamen. Voor de berekeningen zijn gegevens gebruikt van ongeveer 15 bodem- en grondwatermonsters, genomen over het hele terrein. De verontreiniging was geconcentreerd rond een kern, die dicht bij de bebouwing lag, en strekte zich uit richting de haven.

Tabel 3.3. Invoergegevens voor de berekeningen met DIVOCOS

Parameter	Gekozen waarde
Omgeving (i.v.m. ruwheid)	Bebouwd gebied
Bodemtype	Klei ¹⁾
Organisch stofgehalte	2% ¹⁾
Bodemtemperatuur	10°C
Watergehalte bodem	0,2 kg kg ⁻¹
Oppervlakte terrein	415 m ²
Diepte van de ontgraving	3 m ²⁾
Volume ontgraven grond	1240 m ³
Werkschema	kolom voor kolom ontgraven
Dagelijks grondverzet	80 m ³ d ⁻¹
Grijpervolume	0,7 m ³
Ontgravingstijd per keer	0,05 h
Volume opslag	20 m ³
Tijd vullen opslag	2 h

Opmerking: in de tabel staan alleen de parameters die door de gebruiker van DIVOCOS zelf kunnen worden ingevoerd of aangepast. Andere parameters zoals de bodemdichtheid en de porositeit zijn gekoppeld aan het bodemtype; deze zijn niet in de tabel opgenomen.

- 1) De bodem bestond tot op 5 m diepte uit zandige klei en fijn zand. Vanwege de hoge porositeit van de grond is bij de berekeningen gekozen voor klei.
- 2) De diepte tot waarop werd gesaneerd verschilde per vak en varieerde van ongeveer 1 tot 4 m. Er is gerekend met de gemiddelde diepte over de verschillende oppervlakken.

Metingen

De Grontmij heeft gedurende de meeste dagen dat de saneringswerkzaamheden plaatsvonden met behulp van een mobiele GC momentane metingen verricht op BTEX. Deze metingen vonden plaats aan de rand van de werkput, waarbij zo goed als mogelijk benedenwinds van de put werd gemeten. In totaal werd in de periode 18 juni tot en met 17 juli 1999 op 14 dagen gemeten (op de andere dagen werd niet gesaneerd of werd in ieder geval geen verontreinigde grond afgegraven).

Omdat op de eerste meetdag de vooraf gestelde signaalwaarde⁴ voor xyleen enkele malen werd overschreden en een aantal omwonenden klachten bleken te ondervinden, is besloten om naast de metingen met de GC aanvullende metingen te verrichten op twee vaste meetpunten. Dit betrof 8-uurs gemiddelde metingen met behulp van actief koolbuizen gedurende de werkdag. De meetpunten lagen aan weerszijden van het saneringsterrein, één bij de gevel van de woning waar zich de grootste verontreiniging

⁴ De signaalwaarde is een grenswaarde, gelijkgesteld aan drie maal de acute MRL (zie paragraaf 3.6.2 van het protocol "risico's blootstelling bij bodemsaneringen"), die wordt gebruikt tijdens de uitvoering van een sanering. Indien een gemeten uurgemiddelde concentratie boven de signaalwaarde komt, kunnen maatregelen worden getroffen zoals tijdelijk stilleggen van de werkzaamheden of het beperken van de emissies of de blootstelling.

bevond en één bij het hek aan de andere kant van het terrein. De meetresultaten waren steeds één dag na bemonstering beschikbaar, zodat tijds maatregelen getroffen konden worden. Door de dagelijks gemeten 8-uursgemiddelde concentraties over alle meetdagen te middelen wordt een benadering van de gemiddelde concentratie over de saneringsperiode verkregen (zie paragraaf 4.3.2). De metingen zijn gerapporteerd in Jans (1999).

3.3.5 Sanering Groningen

Uitvoering sanering

Op het Ciboga-terrein in Groningen heeft vroeger een gasfabriek gestaan. De fabriek is begin jaren '90 grotendeels afgebroken. De bodem van het terrein bleek op sommige plaatsen ernstig vervuild te zijn met onder meer PAK's, minerale olie, waaronder benzeen, toluen, ethylbenzeen, xylenen, en verder met fenolen en cyanide. De locatie is in de periode april 2000 tot de zomer van 2001 gesaneerd. De sanering bestond uit een laagsgewijze ontgraving van het hele terrein, waarbij afgegraven grond tijdelijk in een depot op het terrein werd opgeslagen. Het volume van het depot bedroeg gemiddeld 2000 m³. De meest vervuilde grond werd afgevoerd, terwijl niet of nauwelijks vervuilde grond is gebruikt als vulmateriaal. In totaal is circa 120.000 m³ afgegraven. De saneringslocatie bevond zich in een woongebied nabij het centrum van de stad. De dichtst bijzijnde woningen lagen op ruim 10 m van de rand van het saneringsterrein. Aan één zijde van het terrein bevond zich een drukke weg. Het verkeer op deze weg emitteert onder andere BTEX, hetgeen bij windrichting van weg richting saneringsterrein een bijdrage levert aan de concentraties BTEX afkomstig van de ontgraving.

Berekeningen

Voor de berekeningen met DIVOCOS zijn gegevens verstrekt door de VROM-Inspectie Noord en door het ingenieursbureau MUG, dat verantwoordelijk was voor de milieukundige begeleiding van de sanering. Dit bureau heeft op verzoek van het RIVM een selectie gemaakt van de meest relevante gegevens omtrent de verontreiniging (lees: gehalten in bodem en grondwater) en deze in combinatie met een plattegrond van de meetlocaties aan het RIVM verstrekt. Voor deze benadering is gekozen, omdat de deskundigen van het bureau MUG het beste inzicht hadden in de bruikbaarheid van de beschikbare gegevens. Het aantal rapporten en ook andere informatie over de verontreiniging was namelijk zeer omvangrijk, van wisselende kwaliteit en van verschillende datum (enkele bodemonderzoeken waren al meer dan 10 jaar oud). De gebruikte parameters staan in Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Invoergegevens voor de berekeningen met DIVOCOS

Parameter	Gekozen waarde
Omgeving (i.v.m. ruwheid)	Bebouwd gebied
Bodemtype	Zand ¹⁾
Organisch stofgehalte	4% ¹⁾
Bodemtemperatuur	10°C
Watergehalte bodem	0,2 kg kg ⁻¹
Oppervlakte terrein	35.000 m ² ²⁾
Diepte van de ontgraving	3,5 m ²⁾
Volume ontgraven grond	120.500 m ³ ²⁾
Werkschema	laag voor laag ontgraven
Dagelijks grondverzet	1000 m ³ d ⁻¹
Grijpervolume	2,5 m ³
Ontgravingstijd per keer	0,01 h
Volume opslag	1000 m ³ ³⁾
Tijd vullen opslag	24 h

Opmerking: in de tabel staan alleen de parameters die door de gebruiker van DIVOCOS zelf kunnen worden ingevoerd of aangepast. Andere parameters zoals de bodemdichtheid en de porositeit zijn gekoppeld aan het bodemtype; deze zijn niet in de tabel opgenomen.

- 1) De bodem bestond uit een bovenlaag (gemiddeld 1,5 m) van zand met daaronder een laag klei (dikte gemiddeld 1 m) en daar weer onder een laag zand (tot 8 m diepte). Het humus- en organisch stofgehalte in de zandlaag bedroeg 2% (beide) en in de kleilaag 4,7% (organisch stof) respectievelijk 16% (lutum). Omdat de grootste verontreiniging zich op ongeveer 2 tot 2,5 m diepte bevond, is gerekend met klei als bodemmateriaal.
- 2) Omdat de verontreiniging geconcentreerd was rond één of enkele (afhankelijk van de component) kernen, is voor elke component de berekening gesplitst in twee delen, namelijk een berekening voor het (sterk) verontreinigde deel en een berekening voor het niet of nauwelijks verontreinigde deel.
- 3) Gemiddeld volume van de op het terrein opgeslagen grond. Tijdens de sanering varieerde het volume van enkele honderden tot 2000 m³.

Er zijn berekeningen gedaan voor de componenten benzeen, naftaleen (de meest vluchtige PAK), minerale olie en fenol. Zoals aangegeven in de tweede noot van Tabel 3.4, is voor elke component de berekening gesplitst in twee delen, namelijk een berekening voor het (sterk) verontreinigde deel en een berekening voor het niet of nauwelijks verontreinigde deel. Vervolgens zijn de resultaten van de deelberekeningen gemiddeld, waarbij de oppervlakten van beide delen als weegfactor zijn gebruikt. De indeling in twee oppervlakten verschilde per component, omdat de verontreiniging over het terrein voor elke component anders verdeeld was. Voor de berekeningen is, per component, een selectie van ongeveer 10 bodem- en grondwatergegevens gemaakt, gelijkelijk verdeeld over de twee oppervlakten.

Bij de berekeningen zijn de volgende aannames gedaan. Fenol is beschouwd als representant van de groep "fenolen". Tot deze groep behoren ook andere fenol-verbindingen zoals cresolen. In de rapportages waar de bodem- en grondwatergegevens

uit afkomstig zijn waren alleen totaalgehalten aan “fenolen” vermeld. Omdat fenol de meest vluchtige uit deze groep is, zullen de berekende immissieconcentraties een overschatting geven van de werkelijke concentraties “fenolen”. Een soortgelijke benadering is gekozen voor minerale olie, dat wil zeggen er is gerekend met drie verschillende fracties (een lichte, een middelzware en een zware fractie; in alle gevallen is uitgegaan van aromatische koolwaterstoffen, omdat die het meest toxisch zijn) als representant voor minerale olie. In dit geval is aangenomen dat elke fractie voor 10% in de olie voorkomt (grote aanname op basis van data uit andere bodemonderzoeken, waar gedetailleerdere analyses zijn uitgevoerd).

De berekeningen, de daarbij gedane aannames en de resultaten zijn kort beschreven in Broekman en Mennen (2001).

Metingen

Door het RIVM zijn in opdracht van de VROM-Inspectie Noord tijdsgemiddelde metingen op vluchtige organische verbindingen, waaronder benzeen, fenol en naftaleen, verricht met behulp van passieve samplers. Er zijn geen momentane metingen verricht, omdat op grond van de berekeningen de verwachte piekconcentraties in de woonomgeving ruim onder de acute MRL (de grenswaarde voor kortdurende blootstelling) lagen. Bovendien werden vanuit het oogpunt van omgevingsbewaking door bureau MUG aan de rand van het saneringsterrein op sommige dagen 8-uursgemiddelde concentraties VOC's gemeten met behulp van actief koolbuizen⁵.

De metingen met de samplers zijn gedaan op vier meetlocaties in 7 opeenvolgende series van steeds ongeveer één maand. De meetlocaties lagen aan de rand van het saneringsterrein, elk in een andere windrichting. De afstanden tussen de locaties en de plaats van saneringswerkzaamheden varieerde, afhankelijk van waar op een bepaald moment werd ontgraven, van 10 tot ruim 300 m. De totale meetperiode duurde van april tot december 2000. In december 2000 is, ondanks dat de sanering nog zou doorlopen tot de zomer van 2001, besloten te stoppen met de maandgemiddelde metingen, omdat in de voorafgaande maanden vrijwel geen verhoogde concentraties VOC's waren gemeten en een groot deel van de ernstigste verontreiniging toen al was afgegraven.

De metingen zijn gerapporteerd in Broekman en Mennen (2001).

⁵ De resultaten van deze metingen zijn niet gebruikt voor de validatie. Volgens opgave van bureau MUG werden op veruit de meeste dagen geen concentraties gevonden boven de relatief hoge detectielimiet van ongeveer $10 \mu\text{g m}^{-3}$. Bovendien waren er onvoldoende gegevens beschikbaar om de relatie tussen een gemeten daggemiddelde concentratie en de activiteiten (soort, locatie, omvang) op die dag te kunnen leggen.

3.3.6 Sanering Gorinchem

Uitvoering sanering

Tijdens bouw- en graafwerkzaamheden is in november 2000 een bodemverontreiniging aan het licht gekomen in het pand van de voormalige eierveiling, gelegen aan de Havendijk 74c te Gorinchem. De verontreiniging bestond uit minerale olieproducten, in het bijzonder benzine, en daarin voorkomende koolwaterstoffen. De verontreiniging bevond zich gedeeltelijk onder het gebouw.

In februari 2001 is deze locatie gesaneerd. De sanering bestond uit het ontgraven, afvoeren en reinigen van de verontreinigde grond en puin. Hiertoe is een gedeelte van de in het gebouw aanwezige fundering (vermoedelijk van een voormalige stoommachine) verwijderd. Doordat niet alle vervuilde grond afgegraven kon worden – een klein deel van de verontreiniging zou onder de bebouwing en aanwezige fundering achterblijven – is voorzien dat de resterende verontreiniging werd gesaneerd door onttrekking en reiniging van grondwater. De ontgravingswerkzaamheden namen ongeveer drie weken in beslag.

De saneringslocatie bevond zich in een woongebied. Binnen een afstand van 30 m van de werkput lagen enkele woningen.

Berekeningen

Voor de berekeningen met DIVOCOS zijn gegevens gebruikt uit het saneringsplan (TMO, 2001) en het rapport over het vooraf verrichte bodemonderzoek (Snijders, 2001). Verder is informatie betrokken van de uitvoerder van de sanering. De gebruikte parameters staan in Tabel 3.5.

Er zijn berekeningen gedaan voor de componenten benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen. Voor de andere in de verontreiniging aangetroffen koolwaterstoffen zijn geen berekeningen gedaan, omdat de berekeningen met BTEX al aangaven dat geen hoge immissieconcentraties werden verwacht. Voor de berekeningen zijn gegevens gebruikt van 7 grondwatermonsters uit het af te graven gebied.

Metingen

Door het RIVM zijn in opdracht van de gemeente Gorinchem tijdsgemiddelde metingen op vluchtige organische verbindingen, waaronder BTEX, verricht met behulp van passieve samplers. Er zijn geen momentane metingen verricht, omdat de berekeningen met DIVOCOS geen hoge immissieconcentraties voorspelden.

De metingen zijn gedaan op drie meetlocaties en in twee opeenvolgende series van respectievelijk één en twee weken. Elke meetlocatie bevond zich aan de zijde van een nabijgelegen woning en wel de zijde die naar de saneringslocatie was gesitueerd. De afstanden tussen de locaties en de werkput bedroegen ongeveer 20 tot 30 m.

De metingen zijn gerapporteerd in Van Putten *et al.* (2001).

Tabel 3.5. Invoergegevens voor de berekeningen met DIVOCOS

Parameter	Gekozen waarde
Omgeving (i.v.m. ruwheid)	Bebouwd gebied
Bodemtype	Humusrijk zand
Organisch stofgehalte	4% ¹⁾
Bodemtemperatuur	10°C
Watergehalte bodem	0,2 kg kg ⁻¹
Oppervlakte terrein	55 m ²
Diepte van de ontgraving	1,4 m ²⁾
Volume ontgraven grond	80 m ³ ²⁾
Werkschema	kolom voor kolom ontgraven
Dagelijks grondverzet	12 m ³ d ⁻¹
Grijpervolume	0,25 m ³
Ontgravingstijd per keer	0,05 h
Volume opslag	1,5 m ³
Tijd vullen opslag	1 h

Opmerking: in de tabel staan alleen de parameters die door de gebruiker van DIVOCOS zelf kunnen worden ingevoerd of aangepast. Andere parameters zoals de bodemdichtheid en de porositeit zijn gekoppeld aan het bodemtype; deze zijn niet in de tabel opgenomen.

- 1) Het organisch stofgehalte in de verschillende bodemonmonsters varieerde van 0,5 tot 8%. Bij de berekeningen is uitgegaan van de gemiddelde waarde (4%).
- 2) Bij aanvang van de ontgraving was de bovenste 90 cm grond al afgegraven. Er diende dus nog een resterende laag van 50 cm dikte (en een volume van ongeveer 25 m³) te worden ontgraven en verwijderd. In deze laag bevond zich het grootste deel van de verontreiniging. Bij de berekeningen met DIVOCOS is als eerste benadering uitgegaan van de diepte waarop de verontreiniging zich bevond (1,4 m diepte). De berekende emissies en immissieconcentraties zijn daardoor mogelijk overschat.

3.3.7 Sanering Zaltbommel

Uitvoering sanering

Eind 1999 werd in Zaltbommel een terrein gesaneerd, waar zich een tankstation had bevonden. Het terrein was gelegen aan de Oliestraat 50-54.

De verontreiniging bestond voornamelijk uit minerale olie. In het bodemonderzoek zijn naast het gehalte aan minerale olie ook de gehalten aan benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen (BTEX) bepaald. De sanering bestond uit een ontgraving tot het eerste watervoerende pakket, gevolgd door langdurige onttrekking van grondwater. De ontgraving vond plaats in november en begin december 1999. Een deel van de grond die bij de ontgraving vrijkwam, namelijk het deel dat niet verontreinigd was, werd tijdelijk opgeslagen in een depot op het terrein om uiteindelijk te worden teruggeplaatst. De overige, wel verontreinigde grond werd afgevoerd met vrachtwagens.

De saneringslocatie bevond zich in een woongebied. De dichtst bijzijnde woningen lagen op 5 tot 10 meter van de plaats van de ontgraving.

Berekeningen

Voor de berekeningen met DIVOCOS zijn gegevens gebruikt uit het rapport van het bodemonderzoek, verricht door Heidemij Advies (Heidemij, 1996) en uit het saneringsplan (IGN, 1998). Daarnaast zijn gegevens verstrekt door de Stichting Uitvoering Bodemsanering, uitvoerder van deze sanering. De gebruikte parameters staan in Tabel 3.6.

Tabel 3.6. Invoergegevens voor de berekeningen met DIVOCOS

Parameter	Gekozen waarde
Omgeving (i.v.m. ruwheid)	Bebouwd gebied
Bodemtype	Humusrijk zand ¹⁾
Organisch stofgehalte	4,6%
Bodemtemperatuur	10°C
Watergehalte bodem	0,2 kg kg ⁻¹
Oppervlakte terrein	600 m ²
Diepte van de ontgraving	3,5 m
Volume ontgraven grond	2100 m ³
Werkschema	laag voor laag ontgraven
Dagelijks grondverzet	100 m ³ d ⁻¹
Grijpervolume	0,7 m ³
Ontgravingstijd per keer	0,05 h
Volume opslag	25 m ³
Tijd vullen opslag	2 h

Opmerking: in de tabel staan alleen de parameters die door de gebruiker van DIVOCOS zelf kunnen worden ingevoerd of aangepast. Andere parameters zoals de bodemdichtheid en de porositeit zijn gekoppeld aan het bodemtype; deze zijn niet in de tabel opgenomen.

¹⁾ De bodem bestond uit zand en klei, waarbij zand het grootste aandeel vormde, zeker in de laag waar zich de grootste verontreiniging bevond.

Er zijn berekeningen gedaan voor de componenten benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen. De gebruikte gegevens zijn afkomstig van ongeveer 25 meetpunten waar gehalten in de bodem zijn gemeten en circa 20 meetpunten waar gehalten in het grondwater zijn bepaald. De verontreiniging was het grootst in het midden van het terrein, waar zich de afleverzuil en een tank hadden bevonden, in de laag tot 1,5 m diepte. De vlek strekte zich gelijkmatig uit in alle richtingen vanuit de verontreinigingskern.

Metingen

Door het RIVM zijn tijdens de sanering zowel tijdsgemiddelde als momentane metingen verricht.

De tijdsgemiddelde metingen werden gedaan met behulp van passieve samplers, op vier locaties verspreid rondom van het terrein, op afstanden van 5 tot 15 m van de terreinrand. De metingen duurden in totaal 30 dagen. Naast BTEX werden met de samplers ook

concentraties van circa 40 andere VOC's, waaronder alkanen, naftaleen en andere aromatische verbindingen en gechloreerde organische verbindingen, bepaald. De momentane metingen op BTEX werden verricht met behulp van een mobiele GC, op twee achtereenvolgende dagen tijdens de sanering. Op deze dagen werd het meest vervuilde stuk grond afgegraven en met vrachtwagens afgevoerd. Tijdens deze dagen was het droog weer, met een zwakke tot zeer zwakke wind uit voornamelijk oostelijke tot noordoostelijke richting. De metingen werden steeds benedenwinds van de graafwerkzaamheden gedaan, aan de rand van het saneringsterrein (5 tot 10 m van de verontreinigingskern).

De metingen zijn gerapporteerd in Mennen *et al.* (2000).

3.3.8 Sanering Epe

Uitvoering sanering

Aan de Achterste Molenweg in de gemeente Epe ligt een terrein waar een voormalige chemische wasserij was gehuisvest. Als gevolg het lozen van afvalstoffen, voornamelijk resten tetrachlooretheen, uit de wasserij is een bodemverontreiniging ontstaan met naast tetrachlooretheen ook afbraakproducten van deze stof (trichlooretheen en cis-1,2-dichlooretheen). In het bodemonderzoek is op één punt naast deze stoffen ook minerale olie aangetroffen.

De sanering bestond uit het afgraven van de zogenaamde afvalkuil, waar de hoogste gehalten aan gechloreerde ethenen in bodem en grondwater werden gevonden, en van een deel van de grond onder het gebouw waarin zich de chemische wasserij had bevonden. Het gebouw zelf diende gehandhaafd te worden, waardoor tijdens de sanering een tijdelijke constructie moest worden gemaakt om het afgraven van grond onder het gebouw vandaan mogelijk te maken. Omdat niet alle verontreinigde grond op deze wijze was te verwijderen, is besloten alleen de sterkst verontreinigde grond af te graven en deze te vervangen door grof zand, gevolgd door een bodemlucht- en grondwateronttrekking gedurende langere tijd.

De afgraving vond plaats in februari, maart en mei 2001. De saneringswerkzaamheden zijn tussentijds tijdelijk gestaakt vanwege de toenmalige MKZ crisis, waardoor het gebied gedurende enkele weken niet toegankelijk was.

De verontreinigde grond die bij de ontgraving vrijkwam werd steeds zo snel mogelijk afgevoerd met vrachtwagens.

De saneringslocatie bevond zich in landelijk gebied. In de directe omgeving lagen echter enkele woningen en bedrijfsgebouwen. De dichtst bij gelegen huizen lagen op minimaal 25 meter van de locatie.

Berekeningen

Voor de berekeningen met DIVOCOS zijn gegevens gebruikt uit het rapport van het bodemonderzoek, verricht door Tauw Milieu BV (Tauw, 1998). Daarnaast zijn gegevens

verstrekt door de Medisch Milieukundige die bij deze sanering betrokken was. De gebruikte parameters staan in Tabel 3.7.

Tabel 3.7. Invoergegevens voor de berekeningen met DIVOCOS

Parameter	Gekozen waarde
Omgeving (i.v.m. ruwheid)	Bebouwd gebied
Bodemtype	Humusrijk zand ¹⁾
Organisch stofgehalte	18% ¹⁾
Bodemtemperatuur	10°C
Watergehalte bodem	0,2 kg kg ⁻¹
Oppervlakte terrein	100 m ²
Diepte van de ontgraving	4 m
Volume ontgraven grond	400 m ³
Werkschema	laag voor laag ontgraven
Dagelijks grondverzet	80 m ³ d ⁻¹
Grijpervolume	0,7 m ³
Ontgravingstijd per keer	0,05 h
Volume opslag	25 m ³
Tijd vullen opslag	2 h

Opmerking: in de tabel staan alleen de parameters die door de gebruiker van DIVOCOS zelf kunnen worden ingevoerd of aangepast. Andere parameters zoals de bodemdichtheid en de porositeit zijn gekoppeld aan het bodemtype; deze zijn niet in de tabel opgenomen.

¹⁾ Het humus- en organisch stofgehalte varieerde sterk per bodemmonster. In enkele monsters lag het organisch stofgehalte onder de 0,1%, in andere monsters varieerde het van 13% tot 80%. De hogere waarden werden vooral gevonden in de bovenlaag (1,5 tot 2 m), waar zich tevens de sterkste verontreiniging bevond. Echter, ook op een diepte van meer dan 3,5 m werden nog verhoogde gehalten aan tetrachlooretheen gevonden. Om praktische redenen is bij de berekeningen uitgegaan van het gemiddelde organisch stofgehalte.

Er zijn berekeningen gedaan voor tetrachlooretheen, trichlooretheen en cis-1,2-dichlooretheen. De gebruikte gegevens zijn afkomstig van 9 bodemmonsters, genomen op enkele plaatsen op het terrein en op dieptes van 1,5 tot 3,5 m onder mv. In enkele monsters afkomstig uit een zogenaamde afvalkuil werden zeer hoge gehalten van met name tetrachlooretheen gevonden, tot 100.000 mg kg⁻¹ (dat wil zeggen dat het monster voor ongeveer 10% bestond uit tetrachlooretheen). De gehalten aan trichlooretheen en cis-1,2-dichlooretheen in het monster met de hoogste concentratie tetrachlooretheen bedroegen 1000 en 120 mg kg⁻¹. Het organisch stofgehalte in dit monster bedroeg 80%. In de bodem onder het gebouw waren de gehalten aan stoffen aanzienlijk lager, maar nog altijd ruim boven de achtergrondwaarde.

Een probleem bij de berekeningen was de grote variatie in het organisch stofgehalte. Bij de berekeningen is uitgegaan van het gemiddeld organisch stofgehalte over alle 9 monsters, omdat het praktisch ondoenlijk is per monster een aparte berekening te verrichten. Door deze keuze valt echter te verwachten dat de onzekerheid in de berekende

emissies en immissieconcentraties relatief groot is. Verder is uitgegaan van een gemiddeld dagelijks grondverzet, terwijl het afgraven van de afvalkuil sneller ging dan het afgraven van de grond onder de woning.

Metingen

Door het RIVM zijn tijdens de sanering zowel tijdsgemiddelde als momentane metingen verricht.

De tijdsgemiddelde metingen werden gedaan met behulp van passieve samplers, op vier locaties verspreid rondom van het terrein, op afstanden van 20 tot 70 m van de terreinrand. De metingen zijn uitgevoerd in drie opeenvolgende series van respectievelijk 28, 36 en 30 dagen. Bij vervanging van de eerste serie kon één sampler niet worden opgehaald en vervangen vanwege het toegangsverbod in verband met de MKZ crisis. Vanwege dit verbod heeft de tweede serie langer geduurd dan gepland en is een derde serie metingen ingezet nadat het toegangsverbod was opgeheven en weer met de saneringswerkzaamheden kon worden begonnen. De onderbreking van de werkzaamheden heeft invloed gehad op de gemiddelde immissieconcentraties van de vluchtige stoffen uit het saneringsterrein. De samplers zijn na afloop geanalyseerd op trichlooretheen, tetrachlooretheen en circa 40 andere VOC's. Ze zijn niet geschikt voor het meten van cis-1,2-dichlooretheen.

De momentane metingen op gechloreerde ethenen werden verricht met behulp van een mobiele GC op twee dagen, één in maart (tijdens de eerste serie metingen met de samplers) en één in mei (tijdens de derde serie). Op deze dagen werd het meest vervuilde stuk grond afgegraven en met vrachtwagens afgevoerd. De metingen werden steeds benedenwinds van de graafwerkzaamheden gedaan, aan de rand van het saneringsterrein zo dicht mogelijk bij de graafactiviteiten.

De metingen zijn gerapporteerd in Broekman *et al.* (2001).

3.3.9 Sanering Tiel

Uitvoering sanering

De sanering betrof het zogenaamde RIO-terrein aan de Heiligestraat te Tiel, een terrein waarop een voormalige tinfabriek was gevestigd. Het terrein is in het najaar van 1998 gesaneerd. Op het terrein bevond zich een bodemverontreiniging met onder andere tetrachlooretheen, trichlooretheen en cis-1,2-dichlooretheen. De sanering bestond uit een ontgraving tot het eerste watervoerende pakket, gevolgd door langdurige onttrekking van grondwater en bodemlucht. De grond die bij de ontgraving vrijkwam werd in dagelijkse porties opgeslagen in een depot op het terrein en steeds na enkele dagen afgevoerd. Tijdens de opslag werd de grond afgedekt. In de directe omgeving van de saneringslocatie bevonden zich woningen, een kantoor en een school, op afstanden van minimaal 20 m van de rand van het terrein.

Berekeningen

Voor de berekeningen met DIVOCOS zijn gegevens gebruikt uit het rapport van het bodemonderzoek (Marinussen, 1998). Daarnaast zijn gegevens verstrekt door de Medisch Milieukundige die bij deze sanering betrokken was. De gebruikte parameters staan in Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Invoergegevens voor de berekeningen met DIVOCOS

Parameter	Gekozen waarde
Omgeving (i.v.m. ruwheid)	Bebouwd gebied
Bodemtype	Humusrijke klei
Organisch stofgehalte	4%
Bodentemperatuur	10°C
Watergehalte bodem	0,2 kg kg ⁻¹
Werkschema	kolom voor kolom ontgraven
Oppervlakte terrein	10.000 m ²
Diepte van de ontgraving	3 tot 3,5 m
Volume ontgraven grond	32.000 m ³
Dagelijks grondverzet	250 m ³ d ⁻¹
Grijpervolume	1 m ³
Ontgravingstijd per keer	0,05 h
Volume opslag ¹⁾	20 m ³
Tijd vullen opslag ¹⁾	1 h

Opmerking: in de tabel staan alleen de parameters die door de gebruiker van DIVOCOS zelf kunnen worden ingevoerd of aangepast. Andere parameters zoals de bodemdichtheid en de porositeit zijn gekoppeld aan het bodemtype; deze zijn niet in de tabel opgenomen.

¹⁾ De afgegraven verontreinigde grond werd tijdelijk op het terrein opgeslagen. Deze opslag op het terrein lag echter relatief ver verwijderd van de plaats waar de ontgraving plaatsvond. Het verplaatsen van de afgegraven grond naar de lokale opslag werd gedaan met kleine vrachtwagens. Bij de berekeningen is er voor gekozen uit te gaan van de opslagcapaciteit en vultijd van deze vrachtwagens.

Er zijn berekeningen gedaan voor de componenten tetrachlooretheen, trichlooretheen en cis-1,2-dichlooretheen, gebaseerd op ongeveer 40 meetgegevens van de verontreiniging, namelijk circa 20 meetpunten voor de bodem en circa 20 meetpunten voor het grondwater. De verontreiniging was niet homogeen verdeeld over het terrein, zowel in horizontale als verticale richting. De grootste verontreiniging bevond zich iets ten zuiden van het midden van het terrein, op een diepte van 3 tot 7 m onder mv. De concentraties tetrachlooretheen, trichlooretheen en cis-1,2-dichlooretheen in het grondwater bedroegen daar respectievelijk 150.000, 4000 en 3400 µg ℓ⁻¹ (op 5,5 m diepte). Elders op het terrein werden lagere tot veel lagere (minder dan 1 µg ℓ⁻¹) gevonden. Ook de bodemgehalten varieerden sterk.

Metingen

Door het RIVM zijn tijdens de sanering zowel tijdsgemiddelde als momentane metingen verricht.

De tijdsgemiddelde metingen werden gedaan met behulp van passieve samplers, op 6 locaties verspreid rondom het terrein. De metingen duurden in totaal ongeveer 7 weken, verdeeld over twee series van 17 respectievelijk 30 dagen. De samplers zijn niet geschikt voor het meten van cis-1,2-dichlooretheen. Alleen trichlooretheen en tetrachlooretheen konden op deze wijze worden gemeten. Daarnaast zijn de samplers geanalyseerd op circa 40 andere VOC's.

De momentane metingen werden verricht met behulp van een mobiele GC, op drie achtereenvolgende dagen tijdens de sanering. Op deze dagen werd het meest vervuilde stuk grond afgegraven en in een depot op het terrein opgeslagen. De kans was dus groot dat juist op deze dagen relatief hoge concentraties gechloreerde ethenen in de lucht op en rond het terrein zouden voorkomen, al moet daarbij worden opgemerkt dat op alle drie de dagen een forse wind stond met als gevolg een relatief grote verdunning van concentraties. Op elk van de drie dagen zijn afwisselend metingen verricht aan de rand van het terrein, benedenwinds van de mogelijke bronnen (werkput en opslag), en op het terrein zelf, dicht bij deze bronnen.

De metingen zijn gerapporteerd in RIVM (1998).

3.3.10 Sanering Zwijndrecht

Uitvoering sanering

Op het terrein van de voormalige metaalfabriek Tomado te Zwijndrecht is in de jaren 1981 tot 1986 een onderzoek naar de bodemkwaliteit en daaropvolgend een sanering uitgevoerd. Vervolgens zijn op het terrein woningen gebouwd. Enkele jaren later werd geconstateerd dat de gehalten trichlooretheen in het grondwater, dat in het kader van de sanering aan de locatie werd onttrokken, niet afnamen. Daarop is besloten nader onderzoek te doen. Hieruit bleek dat er zich in de diepere, veenachtige lagen van de bodem onder het terrein bleek en te staan er zich onder de voormalige wasserij en de omgeving daarvan een nog steeds een verontreiniging bevond, waaruit stoffen werden nageleverd aan het freatisch grondwater. Na diverse vervolgonderzoeken werd besloten het terrein voor een tweede keer te saneren. Daartoe werden de woningen op het terrein ontruimd (de bewoners zijn tijdelijk in nadere woningen ondergebracht), waarna de klei- en veenlaag werd ontgraven tot op een diepte van 3 tot 4 m, gevolgd door onttrekken van grondwater om de verontreiniging in het eerste watervoerende pakket te verwijderen. De verontreiniging van bodem en grondwater op het terrein bestond uit trichlooretheen, cis-1,2-dichlooretheen en vinylchloride en daarnaast zijn verhoogde tot sterk verhoogde gehalten aan koper, lood, zink en PAK's aangetroffen. Verder zijn op een aantal plaatsen minerale olie en BTEX aangetoond, maar deze verontreiniging was minder ernstig dan die voor de andere genoemde componenten. Van die componenten richten we ons in dit

rapport alleen op de vluchtige, namelijk trichlooretheen, cis-1,2-dichlooretheen en vinylchloride.

De ontgraving vond plaats in de zomer van 2001, in de maanden mei tot en met augustus. De relatief lange periode van ontgraven had te maken met het feit dat de woningen intact moesten blijven. Daarnaast werd tijdens de ontgraving regelmatig onderzoek naar de kwaliteit van het resterende bodem en grondwater gedaan om te voorkomen dat er weer een restverontreiniging zou blijven bestaan.

Vervuilde grond is steeds zo snel mogelijk met vrachtwagens afgevoerd. Grond die schoon werd bevonden is tijdelijk opgeslagen op het werkterrein om later als opvulmateriaal te worden hergebruikt.

De saneringslocatie lag in een woongebied. De dichtstbijzijnde, niet ontruimde woningen lagen op ongeveer 10 m van de rand van het saneringsterrein en op circa 25 m van de sterkst verontreinigde hot spot.

Berekeningen

Bij deze sanering zijn de berekeningen met DIVOCOS uitgevoerd door de medisch milieukundige van de GGD Rotterdam e.o. Op verzoek van deze medisch milieukundige heeft het RIVM hierbij geadviseerd en enkele van de berekeningen gecontroleerd. De gegevens die voor de berekeningen met DIVOCOS zijn gebruikt, zijn afkomstig uit het saneringsplan en een bijbehorende plattegrond met alle meetlocaties en daarbij aangegeven de gehalten aan componenten in de bodem en het grondwater (Gemeentewerken Rotterdam, 2000). Daarnaast zijn gegevens verstrekt door de uitvoerder van de sanering. De gebruikte parameters staan in Tabel 3.9.

Er zijn aparte berekeningen gedaan voor de twee sterkst verontreinigde vakken op het saneringsterrein, namelijk de vakken 3 en 7. De bodem in vak 3 was voornamelijk verontreinigd met trichlooretheen en cis-1,2-dichlooretheen en in vak 7 kwam naast deze twee stoffen ook vinylchloride in hoge mate voor. De gebruikte gegevens zijn afkomstig van in totaal circa 10 bodem- en 10 grondwatermonsters, genomen op diverse plaatsen op het terrein en op dieptes van circa 1 tot 3,5 m onder mv plus, in vak 7, één grondwatermonster op 7,5 m diepte. In beide vakken was de verontreiniging geconcentreerd rond één hot spot met hoge tot zeer hoge concentraties, terwijl in andere monsters uit hetzelfde vak vrijwel geen gechloreerde ethenen werden gevonden. De hoogste gehalten werden aangetroffen in vak 7, namelijk 300.000 $\mu\text{g } \ell^{-1}$ trichlooretheen, 110.000 $\mu\text{g } \ell^{-1}$ cis-1,2-dichlooretheen en 33.000 $\mu\text{g } \ell^{-1}$ vinylchloride.

Verder zijn er aanvullende berekeningen gedaan met als bodemtype veen in plaats van klei en met enkele verschillende organisch stofgehalten. De redenen hiervoor waren de zeer gevarieerde opbouw van de bodem en de grote variatie in het organisch stofgehalte van de verschillende bodemmonsters (zie voetnoot 1 van Tabel 3.9). Bovendien was bekend dat de verontreiniging die tijdens deze sanering werd verwijderd – het terrein was al eens eerder gesaneerd – afkomstig was van de onderliggende veenlagen. De aanvullende berekeningen zijn gedaan om de invloed van het bodemtype en het organisch stofgehalte op de berekende concentraties te onderzoeken.

Tabel 3.9. Invoergegevens voor de berekeningen met DIVOCOS

Parameter	Gekozen waarde
Omgeving (i.v.m. ruwheid)	Bebouwd gebied
Bodemtype	Klei ¹⁾
Organisch stofgehalte	7,5% ¹⁾
Bodemtemperatuur	10°C
Watergehalte bodem	0,2 kg kg ⁻¹
Oppervlakte terrein	576 m ² ²⁾
Diepte van de ontgraving	3,5 m
Volume ontgraven grond	2000 m ³ ²⁾
Werkschema	laag voor laag ontgraven
Dagelijks grondverzet	250 m ³ d ⁻¹
Grijpervolume	1 m ³
Ontgravingstijd per keer	0,05 h
Volume opslag	20 m ³ ³⁾
Tijd vullen opslag	1 h

Opmerking: in de tabel staan alleen de parameters die door de gebruiker van DIVOCOS zelf kunnen worden ingevoerd of aangepast. Andere parameters zoals de bodemdichtheid en de porositeit zijn gekoppeld aan het bodemtype; deze zijn niet in de tabel opgenomen.

- ¹⁾ Op de meeste plaatsen bestond de bodem uit een bovenlaag (gemiddeld 0,7 m) van zand met daaronder een laag klei (dikte gemiddeld 1 m) en daar weer onder een laag veen. Het humus- en organisch stofgehalte varieerde sterk per bodemmonster, van minder dan 0,5 % tot ruim 60%. Om praktische redenen is bij de berekeningen uitgegaan van klei als grondmateriaal en van het gemiddelde organisch stofgehalte.
- ²⁾ Er zijn alleen berekeningen gedaan voor de twee sterkst verontreinigde vakken op het saneringsterrein. Beide vakken hadden een oppervlak van 576 m² en in beide vakken werd tot 3,5 m diepte ontgraven, waarbij (uit beide vakken) circa 2000 m³ werd verwijderd. In de totale sanering is circa 19.000 m³ grond weggehaald.
- ³⁾ Aan de zuidwestkant van het terrein werd vervuilde afgegraven grond tijdelijk opgeslagen. Er werd echter dagelijks weer grond uit deze opslag afgevoerd. Omdat de opslag enkele tientallen meters van de twee sterkst verontreinigde vakken lag, is bij de berekeningen alleen rekening gehouden met kortdurende opslag van afgegraven grond in het vervoermiddel waarmee de grond naar de opslag aan de zuidwestkant van het terrein werd getransporteerd.

Metingen

Tijdens een groot deel van de sanering, namelijk van 10 mei tot 8 augustus 2001, zijn door het RIVM tijdsgemiddelde metingen verricht. Daarnaast heeft RIVM op drie dagen momentane metingen uitgevoerd.

De tijdsgemiddelde metingen werden gedaan met behulp van passieve samplers, op vier locaties verspreid rondom het hele saneringsterrein, op afstanden van circa 20 tot 100 m van de plaats van de verontreinigingskernen⁶. De metingen zijn uitgevoerd in drie

⁶ De twee vakken waar zich de grootste verontreiniging bevond en dus de hoogste emissies werden verwacht lagen enkele tientallen meters van elkaar in de oostelijke respectievelijk de zuidelijke hoek van het saneringsterrein, dat in totaal ongeveer 100 bij 100 m groot was. De 4 samplers zijn bevestigd aan de

opeenvolgende series van respectievelijk 35, 29 en 26 dagen. Bij vervanging van de eerste en de laatste serie kon één sampler niet worden teruggevonden. De samplers zijn na afloop geanalyseerd op trichlooretheen en circa 40 andere VOC's. Ze zijn niet geschikt voor het meten van cis-1,2-dichlooretheen en vinylchloride

De momentane metingen op gechloreerde ethenen werden verricht met behulp van een mobiele GC op drie dagen, namelijk op 21 en 22 mei en op 29 juni. Op deze dagen werd vak 7, het meest vervuilde vak, afgegraven. De metingen werden steeds benedenwinds van de graafwerkzaamheden gedaan, zo dicht mogelijk bij de graafactiviteiten. Een deel van de ontgravingswerkzaamheden vond plaats tussen en onder enkele woningen op het terrein. Hierbij zouden hogere concentraties aan vrijgekomen vluchtige stoffen kunnen voorkomen, omdat door de lage lokale windsnelheid tussen de huizen minder verdunning optreedt. Omdat de GC onvoldoende nauwkeurig is voor het meten van concentraties vinylchloride, zijn tegelijk met de GC metingen luchtmonsters genomen op speciale actief koolbuisjes. Deze buisjes zijn achteraf geanalyseerd op vinylchloride. Op deze wijze werden uurgemiddelde tot 3-uurgemiddelde concentraties bepaald (opmerking: de bemonsteringstijd verschilde per meting, omdat de bemonstering steeds werd afgestemd op de locatie van de werkzaamheden en de windrichting).

De metingen zijn gerapporteerd in Broekman en Van Putten (2001).

3.3.11 Sanering Grave

Uitvoering sanering

Aan de Hamstraat 22 in Grave is van ongeveer 1960 tot 1970 een chemische wasserij gehuisvest geweest. In de jaren '90 is vast komen te staan dat er zich onder de voormalige wasserij en de omgeving daarvan een ernstige bodemverontreiniging bevond. Het gebouw was toen in gebruik als meubelopslagplaats. Ten tijde van de chemische wasserij bevond zich naast het gebouw een binnenplaats waar waarschijnlijk oplosmiddelen werden opgeslagen en vermoedelijk ook geloosd. De binnenplaats is later bebouwd en bij de meubelopslagplaats getrokken.

Onder de voormalige binnenplaats en ten zuidoosten daarvan waren de bodem en het grondwater zeer ernstig verontreinigd met tetrachlooretheen en de afbraakproducten trichlooretheen, cis-1,2-dichlooretheen en vinylchloride. Via het freatische grondwater heeft de verontreiniging zich in met name westelijke en oostelijke richting verspreid tot meer dan 50 m vanaf de binnenplaats. In verticale richting heeft de verontreiniging zich verspreid tot in het eerste watervoerende pakket, op 7 tot 8 m onder mv. Tijdens het bodemonderzoek is geconstateerd dat zich nabij de voormalige binnenplaats ook een dieselverontreiniging bevond. De herkomst en omvang van deze verontreiniging waren toen niet bekend.

rand van het terrein, elk in een andere windrichting. Afhankelijk van waar op dat moment ontgraven werd, bedroeg de afstand van een sampler tot de plaats van de ontgraving circa 20 tot 100 m. De sampler aan de westkant lag relatief dicht bij de opslag (zie noot 3 in Tabel 3.9).

Vanaf 2002 is begonnen met de sanering van de verontreiniging. De sanering bestond uit het ontgraven van de sterkst verontreinigde grond, gevolgd door langdurige onttrekking van grondwater. De ontgraving vond plaats in de periode van maart tot juni 2002 en nam meer dan de ruim twee weken in beslag, die gepland waren. In totaal is ongeveer 2700 m³ grond afgegraven, waarvan 1200 m³ ernstig vervuilde grond steeds zo snel mogelijk werd afgevoerd met vrachtwagens. De overige 1500 m³, afkomstig uit de niet of nauwelijks verontreinigde bovenlaag, is tijdelijk nabij het terrein opgeslagen om na de ontgraving te worden teruggeplaatst. Voorafgaand aan de ontgraving is de bebouwing boven het meest vervuilde terrein gesloopt.

De saneringslocatie bevond zich in een woonwijk. De dichtstbijzijnde woningen grensden direct aan het saneringsterrein.

Berekeningen

Voor de berekeningen met DIVOCOS zijn gegevens gebruikt uit het rapport van het bodemonderzoek en het rapport van een onderzoek naar mogelijke saneringsvarianten (Cruts, 1996; 1997). Daarnaast zijn gegevens verstrekt door de Medisch Milieukundige die bij deze sanering betrokken was. De gebruikte parameters staan in Tabel 3.10.

Tabel 3.10. Invoergegevens voor de berekeningen met DIVOCOS

Parameter	Gekozen waarde
Omgeving (i.v.m. ruwheid)	Bebouwd gebied
Bodemtype	Zand
Organisch stofgehalte	1%
Bodemtemperatuur	10°C
Watergehalte bodem	0,2 kg kg ⁻¹
Oppervlakte terrein	800 m ²
Diepte van de ontgraving	3,4 m ¹⁾
Volume ontgraven grond	2700 m ³
Werkschema	kolom voor kolom ontgraven
Dagelijks grondverzet	300 m ³ d ⁻¹
Grijpervolume	0,7 m ³
Ontgravingstijd per keer	0,05 h
Volume opslag	20 m ³
Tijd vullen opslag	2 h

Opmerking: in de tabel staan alleen de parameters die door de gebruiker van DIVOCOS zelf kunnen worden ingevoerd of aangepast. Andere parameters zoals de bodemdichtheid en de porositeit zijn gekoppeld aan het bodemtype; deze zijn niet in de tabel opgenomen.

¹⁾ De diepte tot waarop werd gesaneerd varieerde van ongeveer 2,5 tot 5 m. Er is gerekend met de gemiddelde diepte over het hele oppervlak.

Er zijn berekeningen gedaan voor tetrachlooretheen, trichlooretheen, cis-1,2-dichlooretheen en vinylchloride. De gebruikte gegevens zijn afkomstig van 5 bodem- en circa 25 grondwatermonsters, genomen op diverse plaatsen op het terrein en op dieptes van circa 2 tot 7,5 m onder mv. In de kern van de verontreiniging zijn in het grondwater zeer hoge gehalten aan gechloreerde ethenen aangetroffen, tot $140.000 \mu\text{g } \ell^{-1}$ tetrachlooretheen, $80.000 \mu\text{g } \ell^{-1}$ trichlooretheen, $130.000 \mu\text{g } \ell^{-1}$ cis-1,2-dichlooretheen en $36.000 \mu\text{g } \ell^{-1}$ vinylchloride.

Verder zijn er aanvullende berekeningen gedaan met een organisch stofgehalte van 4% in plaats van 1%. De reden hiervoor was dat er zeer weinig data beschikbaar waren van het organische stofgehalte. Bovendien is bekend dat het organische stofgehalte sterk bepalend kan zijn voor de emissies van de vluchtige componenten tijdens de sanering. De aanvullende berekeningen zijn gedaan om dit mogelijke effect bij deze sanering te onderzoeken.

Metingen

Het Bureau Milieumetingen van de provincie Noord Brabant heeft tijdens vrijwel de hele ontgraving metingen verricht op tetrachlooretheen, trichlooretheen, cis-1,2-dichlooretheen en vinylchloride. Met behulp van actief koolbuizen zijn op 8 werkdagen 6-uurs gemiddelde concentraties gemeten. De 4 meetlocaties lagen aan of dichtbij de rand van de werkput, ten westen, zuidwesten, zuidoosten en noordoosten van de verontreinigingskern (in noordelijke richting kon om praktische redenen geen meetpunt worden ingericht). Op grotere afstand zijn twee meetlocaties ingericht ter bepaling van de achtergrondniveaus van de gechloreerde ethenen. Verder zijn in vier woningen rondom het terrein concentraties gechloreerde ethenen in de binnenlucht gemeten. Ook hiervoor werden actief koolbuizen gebruikt, maar de bemonsteringsperiode duurde langer dan een werkdag, namelijk 24, 36 of 72 uur.

Naast de metingen met actief koolbuizen zijn dagelijks momentane metingen verricht aan de rand van de ontgravingsput, met behulp van een GC-MS. Tevens werd in en op de rand van de put met een draagbare PID/FID de concentratie totaal koolwaterstoffen gemonitord.

Tenslotte zijn metingen gedaan met passieve samplers. Deze hadden voornamelijk tot doel te testen of de samplers vergelijkbare resultaten gaven als de actief koolbuizen. Uit dit deelonderzoek bleek dat, als met de samplers langer dan 24 uur werd gemeten, de resultaten vergelijkbaar waren met die van de metingen op actief koolbuizen, maar bij kortere bemonsteringstijd werden met de samplers aanmerkelijk lagere concentraties gevonden. In het algemeen wordt gebruik van passieve samplers bij kortdurende buitenluchtmetingen afgeraden, omdat de concentraties dusdanig laag zijn dat de stoffen bij analyse amper kunnen worden aangetoond. Om die reden worden passieve samplers bij saneringen voornamelijk ingezet voor tijdsgemiddelde metingen over minimaal een week. De resultaten van de vergelijking door Bureau Milieumetingen zijn dus niet onverwacht. In dit rapport worden de meetresultaten met de samplers verder niet gebruikt.

De metingen zijn gerapporteerd in Van Loon (2002).

3.3.12 Sanering Zwolle

Uitvoering sanering

Op de locatie “Dellen Wuijts” aan de Groeneweg 71-75 te Zwolle was voorheen een chemische wasserij gevestigd. De bodem en het grondwater op de locatie waren sterk verontreinigd met vluchtige organische koolwaterstoffen, met name tetrachlooretheen en afbraakproducten van deze stof (trichlooretheen en cis-1,2-dichlooretheen). Daarnaast was een deel van de grond verontreinigd met asbest.

Het terrein is in 2003 gesaneerd. De sanering was verdeeld in drie perioden. Van 10 tot en met 17 juli werd de kern van de verontreiniging ontgraven. Tussen 28 juli en 7 augustus werd een ander deel van grond afgegraven, dat vooral verontreinigd was met asbest en daarnaast restanten koolwaterstoffen bevatte. Ten slotte werden van 10 tot en met 19 september de laatste ontgravingen gedaan, opslagdepots afgevoerd en het terrein geëgaliseerd.

De meeste verontreinigde grond die bij de ontgraving vrijkwam werd steeds zo snel mogelijk afgevoerd met vrachtwagens. Een deel van de grond, namelijk het deel dat niet of nauwelijks verontreinigd was, werd echter tijdelijk opgeslagen en later afgevoerd. De saneringslocatie bevond zich in een oude woonwijk. Het dichtstbijzijnde huis lag op circa 2 meter van de rand van het terrein en de overige omringende woningen op 10 tot 20 meter.

Berekeningen

Bij deze sanering zijn de berekeningen met DIVOCOS niet uitgevoerd door het RIVM, maar door de medisch milieukundige van de GGD Regio IJssel-Vecht. De uitkomsten zijn ten behoeve van de validatie aan het RIVM ter beschikking gesteld. In Van de Weerd en Van Ass (2003) is kort beschreven hoe en met welke gegevens de berekeningen zijn uitgevoerd en waar deze gegevens van afkomstig zijn. De gebruikte parameters staan in Tabel 3.11.

Er zijn uitsluitend berekeningen gedaan voor tetrachlooretheen. De gehalten aan trichlooretheen en cis-1,2-dichlooretheen in de verontreinigde grond waren dusdanig laag, dat daarvan tijdens de sanering geen hoge concentraties in de lucht werden verwacht. De gebruikte gegevens zijn afkomstig van 8 bodemmonsters, genomen op enkele plaatsen op het terrein en op dieptes van 0,5 tot 1,7 m onder mv. De gehalten aan tetrachlooretheen varieerden van 19 tot 200 mg kg⁻¹.

Er zijn aanvullende berekeningen gedaan voor het geval de sanering vaksgewijs (kolom voor kolom) zou worden uitgevoerd in plaats van laag voor laag. Uit de berekeningen blijkt dat het model een lagere uitdamping voorspelt voor het graven in kolommen. Dit heeft niet geleid tot een wijziging in de opzet van de sanering, dat wil zeggen die is laag voor laag uitgevoerd.

Tabel 3.11. Invoergegevens voor de berekeningen met DIVOCOS

Parameter	Gekozen waarde
Omgeving (i.v.m. ruwheid)	Bebouwd gebied
Bodemtype	Zand
Organisch stofgehalte	1%
Bodemtemperatuur	10°C
Watergehalte bodem	0,2 kg kg ⁻¹
Oppervlakte terrein	400 m ²
Diepte van de ontgraving	2 m
Volume ontgraven grond	800 m ³
Werkschema	laag voor laag ontgraven
Dagelijks grondverzet	150 m ³ d ⁻¹
Grijpervolume	0,5 m ³
Ontgravingstijd per keer	0,5 h
Volume opslag	10 m ³
Tijd vullen opslag	2 h

Opmerking: in de tabel staan alleen de parameters die door de gebruiker van DIVOCOS zelf kunnen worden ingevoerd of aangepast. Andere parameters zoals de bodemdichtheid en de porositeit zijn gekoppeld aan het bodemtype; deze zijn niet in de tabel opgenomen.

Metingen

De GGD Regio IJssel-Vecht heeft tijdens de sanering op twee dagen kortdurende tijdsgemiddelde metingen op tetrachlooretheen, trichlooretheen en cis-1,2-dichlooretheen verricht met behulp van actief koolbuizen. De eerste meetdag was 31 juli. Op deze dag werden aan twee zijden van het saneringsterrein gedurende 4 uur metingen uitgevoerd. De locaties lagen aan rand van het terrein, ten zuiden en ten westen van de werkput. Deze meetplaatsen werden gekozen, omdat er die dag gegraven werd in de zuidwesthoek van het terrein en de wind uit noordoostelijke richting kwam. De tweede meetdag was 16 september. Op deze dag werd aan de noord- en westrand van het terrein gedurende 6 tot 7 uur gemeten. De keuze van de locaties was wederom gebaseerd op de windrichting en de plaats waar saneringswerkzaamheden werden gedaan. Daarnaast heeft de GGD tijdsgemiddelde metingen gedaan met behulp van passieve samplers, op 4 locaties verspreid rondom van het terrein. Drie locaties lagen aan of nagenoeg aan de rand van het terrein. Alleen de meetlocatie aan de zuidzijde lag enkele meters van de rand, namelijk nabij de in die richting dichtstbijzijnde woning. De metingen zijn uitgevoerd in drie opeenvolgende series van 18, 10 en 6 dagen. De eerste periode, van 10 tot en met 28 juli, overlapte met de periode waarin de kern van de verontreiniging werd ontgraven. De tweede andere perioden kwamen grotendeels overeen met de perioden waarin de met asbest verontreinigde grond werd afgegraven respectievelijk de resterende werkzaamheden werden gedaan (zie onder "Uitvoering

sanering”). De samplers zijn na afloop geanalyseerd op trichlooretheen en tetrachlooretheen. Ze zijn niet geschikt voor het meten van cis-1,2-dichlooretheen⁷.

Tijdens de graafwerkzaamheden zijn door het bedrijf dat de sanering uitvoerde ook nog momentane metingen verricht met behulp van meetbuisjes. Deze buisjes meten de concentratie tetrachlooretheen en zijn tevens kruisgevoelig voor trichlooretheen cis-1,2-dichlooretheen. De metingen werden twee maal daags gedaan aan de gevels van enkele omliggende woningen. Aanvankelijk werden meetbuisjes gebruikt met een detectielimiet van 2 ppm, maar na 30 juli is overgestapt op meetbuisjes met een detectielimiet van 1 ppm.

De metingen zijn gerapporteerd in Van de Weerd en Van Ass (2003).

⁷ In de rapportage van de GGD (Van de Weerd en Van Ass, 2003) worden wel meetresultaten van cis-1,2-dichlooretheen gepresenteerd. Deze liggen echter alle onder de detectielimiet, hetgeen mogelijk een gevolg kan zijn van het feit dat deze component al tijdens de bemonstering ten dele van de sampler is verdampt..

4. Resultaten

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de berekende en gemeten concentraties vergeleken om inzicht te krijgen in de voorspellende waarde van het model DIVOCOS. Daarnaast zullen we ook per onderzochte sanering nagaan of op grond van de berekeningen met het model een juiste keuze is gemaakt voor het meetplan om tijdens de sanering de luchtkwaliteit in de omgeving te bewaken. Dit is immers het belangrijkste doel waarvoor het model is gemaakt. De werkwijze, die we hierbij hebben gebruikt, wordt nader toegelicht in paragraaf 4.2.

Bij de vergelijking wordt de tijdsduur van een meting zo goed mogelijk afgestemd op de tijdsduur van de berekende concentratie. Zo worden in het algemeen gemeten gemiddelde concentraties over de hele sanering vergeleken met de met DIVOCOS berekende gemiddelde concentraties. Analooq worden tijdelijk optredende hoge concentraties vergeleken met de berekende 99,7-percentielen van uurgemiddelde concentraties. Bij de bespreking van de vergelijking, in paragraaf 4.3, zal per sanering een korte toelichting worden gegeven op de gemaakte keuzes.

Eerst wordt in paragraaf 4.2 een toelichting gegeven op de toetsingcriteria voor het opstellen van het meetplan en de wijze waarop hier in de validatie mee is omgegaan. Vervolgens worden in paragraaf 4.3 per sanering de resultaten van de vergelijking beschreven en uitgewerkt. Tenslotte volgt in paragraaf 4.4 een eindbespreking van alle resultaten.

4.2 Toelichting toetsingscriteria

4.2.1 De toetsingscriteria

In deze paragraaf wordt uitgelegd hoe in het protocol “risico’s blootstelling bij bodemsaneringen” de resultaten van de berekeningen met DIVOCOS worden gebruikt om te bepalen of en in welke vorm er een meetplan wordt opgesteld om tijdens de sanering de luchtkwaliteit in de omgeving te bewaken. Een volledige beschrijving van de toetsing is gegeven in paragraaf 3.5.1 van het protocol.

We lichten eerst de werkwijze toe voor een verontreiniging met één stof. DIVOCOS berekent, na invoer van alle gegevens, voor die stof de volgende immisatieconcentraties:

- gemiddelde concentraties;
- 92-percentielen van uurgemiddelde concentraties;
- 99,7-percentielen van uurgemiddelde concentraties.

Deze concentraties worden berekend voor verschillende afstanden tot het saneringsterrein, tot maximaal 500 m. Voor een berekening moet eerst bepaald worden

wat de afstand is tussen saneringsterrein, in de regel de plaats waar de meeste verontreiniging voorkomt (de verontreinigingskern), en de plaats(en) waar de hoogste mogelijke blootstelling door omwonenden verwacht wordt, in het algemeen de dichtstbijzijnde woning(en). De bij die afstand berekende concentraties vormen het uitgangspunt voor de toetsing.

Bij de berekeningen met DIVOCOS wordt uitgegaan van langjarig gemiddelde meteorologische gegevens. Voor een sanering die een jaar of langer duurt staan de berekende gemiddelde concentraties daarom op één lijn met de jaargemiddelde concentraties, de 92-percentielen van uurgemiddelde concentraties met de concentraties die niet meer dan circa 700 uren per jaar worden overschreden en 99,7-percentielen van uurgemiddelde concentraties met de concentraties die niet meer dan 26 uren per jaar worden overschreden. Saneringen duren echter meestal korter dan een jaar, zodat de werkelijke concentraties vanwege de meteorologische omstandigheden tijdens de saneringsperiode kunnen afwijken van de berekende waarden.

In het toxicologisch beoordelingskader wordt onderscheid gemaakt in langdurige blootstelling, middellange blootstelling en kortdurende blootstelling. Hiertoe worden chronische, middellange en korte termijn grenswaarden gebruikt, respectievelijk aangeduid als *chronic MRL*, *intermediate MRL* en *acute MRL*, in het vervolg van dit rapport respectievelijk chronische MRL, intermediate MRL en acute MRL genoemd. MRL staat voor Minimum Risk Level, een door de ATSDR (zie voetnoot 2 in paragraaf 2.3) vastgestelde grenswaarde. De ATSDR heeft inhalatoire en orale MRL waarden afgeleid voor verschillende blootstellingsduur en voor een groot aantal bodemcontaminanten. De chronische MRL staat op één lijn met de in Nederland gebruikte Toelaatbare Concentratie in Lucht.

Als pragmatische aanpak is ervoor gekozen de 99,7-percentielen te beschouwen als acute exposities en de desbetreffende getalswaarde daarom te vergelijken met de acute MRL. Analoot daaraan worden de 92-percentielen vergeleken met de intermediate MRL en de gemiddelde concentraties met de chronische MRL. Deze keuze wordt nader toegelicht in het toxicologisch beoordelingskader in paragraaf 3.6 van het protocol ‘risico’s blootstelling bij bodemsaneringen’.

Voor de toetsing wordt een berekende concentratie gedeeld door haar analogon uit het toxicologisch beoordelingskader, dat wil zeggen:

- de gemiddelde concentratie wordt gedeeld door de chronische MRL;
- het 92-percentiel wordt gedeeld door de intermediate MRL;
- het 99,7-percentiel wordt gedeeld door de acute MRL.

Op deze wijze worden drie dimensieloze quotiënten berekend, die de verhouding van de berekende concentraties tot de bijbehorende toxicologische grenswaarden weergeven.

Voor elk van de drie te toetsen grenswaarden kan dan sprake zijn van één van de volgende situaties:

1. De berekende immissieconcentratie ligt ruim beneden de bijbehorende toxicologische grenswaarde. Met ruim wordt hier bedoeld dat het quotiënt van de berekende immissieconcentratie en de bijbehorende MRL lager is dan 0,2.

2. De berekende immissieconcentratie ligt wel beneden de bijbehorende toxicologische grenswaarde, maar niet ruim. Als richtlijn wordt gehanteerd dat het quotiënt van de berekende immissieconcentratie en de bijbehorende MRL ligt tussen 0,2 en 1.
3. De immissieconcentratie ligt boven de bijbehorende toxicologische grenswaarde, dat wil zeggen het quotiënt van de berekende immissieconcentratie en de bijbehorende MRL is hoger dan 1.

De volgende stap is een afweging te maken, als de quotiënten voor de drie typen concentraties onderling verschillen⁸. Het ligt het meest voor de hand de quotiënten van de afzonderlijke vergelijkingen te middelen. Als de quotiënten echter sterk verschillen of als een stof met name toxisch is bij kortdurende of juist bij langdurige blootstelling, is middelen geen logische stap. In dat geval zal het hogere quotiënt respectievelijk het sterkste toxische effect zwaarder worden meegewogen.

Bij bodemverontreinigingen heeft men zelden of nooit te maken met slechts één stof. Er zullen dus voor meerdere stoffen berekeningen met DIVOCOS moet worden gedaan. De uitkomsten van de berekeningen voor die stoffen, dat wil zeggen de gemiddelde of gewogen gemiddelde quotiënten, moeten ook gezamenlijk worden afgewogen om een keuze te maken voor het meetplan. Op grond van de afwegingen, zowel voor de verschillende typen concentraties per stof als voor de stoffen, wordt besloten om al dan niet een meetplan op te stellen. Daarbij kan grofweg de keuze worden gemaakt voor geen meetplan, een beperkt meetplan of een uitgebreid meetplan.

In paragraaf 3.5 van het protocol wordt een uitgebreide toelichting gegeven op het wegen van de quotiënten en de daarbij eventueel te maken afwegingen en op de mogelijkheden voor het opstellen van een meetplan.

4.2.2 Validatie op basis van de toetsingscriteria

Voor de validatie is alleen van belang dat de met DIVOCOS berekende concentraties de juiste quotiënten opleveren om vast te stellen of men van doen heeft met situatie 1, 2 of 3 (zie paragraaf 4.2.1). Immers, de stappen die daarna worden gevolgd om tot een meetplan te komen hebben te maken met het wegen van de quotiënten en niet meer met de berekeningsresultaten zelf.

In dit validatierapport wordt daarom onderzocht of een met DIVOCOS berekende en een gemeten concentratie hetzelfde resultaat geven bij toepassen van de toetsingsberekening. Een voorbeeld: met DIVOCOS is voorafgaand aan een sanering berekend dat de te verwachten gemiddelde concentratie tetrachloormethaan aan de rand van het sanerings-terrein $48 \mu\text{g m}^{-3}$ bedraagt. Voor de toetsing wordt deze waarde gedeeld door de chronische MRL voor tetrachloormethaan, namelijk $60 \mu\text{g m}^{-3}$. Het quotiënt bedraagt dan

⁸ Voor de meeste stoffen ontbreken één of meer grenswaarden. In die gevallen kan de gebruiker ófwel zelf een grenswaarde vaststellen (hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 3.6.1 van het protocol) ófwel besluiten geen toetsing op die grenswaarde uit te voeren. Het is dus mogelijk dat een toetsing wordt uitgevoerd op alle drie de berekende concentraties (gemiddelde, 92-percentiel en 99,7-percentiel), maar ook op één of twee daarvan. Bij voorkeur wordt op meer dan één concentratie getoetst.

0,8 en dan hebben we te maken met situatie 2. Tijdens de sanering wordt gemiddeld $22 \mu\text{g m}^{-3}$ tetrachloormethaan gemeten, ruim 2 maal zo weinig als berekend. Ook deze meetwaarde wordt gedeeld door de chronische MRL, wat een quotiënt geeft van 0,37. Ook dan hebben we te maken met situatie 2. In dit geval leidt de berekening met DIVOCOS bij de toetsing tot hetzelfde resultaat als de gemeten concentratie, ondanks het verschil van meer dan een factor 2 tussen de berekende en gemeten waarde. Deze werkwijze zal bij elke sanering uit deze validatiestudie worden toegepast. De resultaten worden voor elke sanering apart besproken in paragraaf 4.3, steeds na de vergelijking van de berekende en gemeten concentraties zelf.

4.3 Uitwerking van de vergelijkingen per sanering

4.3.1 Sanering Enschede

Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties

Rondom de saneringslocatie aan de Perikweg in Enschede zijn op twee werkdagen momentane en tijdsgemiddelde metingen van BTEX verricht.

De momentane metingen zijn verspreid over de dag uitgevoerd op verschillende plaatsen op en rondom het terrein en bij verschillende activiteiten variërend van het uitgraven van een tank tot het storten van grond in de vrachtwagen. Omdat het steeds zeer kortdurende metingen waren (geen uurgemiddelden) en een GC werd gebruikt met een relatief hoge detectielimiet, zijn de resultaten van de GC metingen niet gebruikt voor de validatie.

Op beide dagen zijn daarnaast tijdsgemiddelde metingen gedaan met actief koolbuizen, enkele metingen van anderhalf uur en enkele metingen van 4 tot 6 uur. Deze metingen zijn steeds benedenwinds van de graafwerkzaamheden gedaan op enkele meters van het terrein. De resultaten zijn als volgt verwerkt in Tabel 4.1.

In de rijen die zijn aangeduid met 99,7-percentiel, zijn in de kolom met gemeten concentraties de maximaal gemeten concentraties van de metingen over anderhalf uur gegeven, naast de met DIVOCOS uitgerekende 99,7-percentielen, berekend voor een afstand van 10 m (zowel de dichtstbijzijnde woningen als de meetlocaties lagen gemiddeld genomen op ongeveer 10 m van de verontreinigingskern). De hoogste anderhalf uurgemiddelde concentratie ligt statistisch gezien ongeveer op één lijn met het 99,7-percentiel van de saneringsperiode (circa 25 dagen).

In de rijen die zijn aangeduid met 92-percentiel, zijn in de kolom met gemeten concentraties de gemiddelde waarden van alle metingen met de actief koolbuizen vermeld. Ook hier zijn de met DIVOCOS uitgerekende concentraties berekend voor een afstand van 10 m. De vergelijking van de gemiddelde concentraties (totale meettijd circa 15 uur) met het berekende 92-percentiel gaat niet helemaal op, omdat het 92-percentiel over 25 dagen de concentratie is die gedurende 48 uur wordt overschreden. Er zijn echter geen geschiktere gegevens voorhanden.

In de rechterkolom zijn de verhoudingen van gemeten tot berekende concentraties vermeld.

Tabel 4.1. Gemeten en berekende concentraties BTEX en de verhouding daartussen bij de sanering in Enschede

Component	Type concentratie	Berekend ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Gemeten ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Verhouding
Benzeen	92-percentiel	69	81	1,2
Tolueen	92-percentiel	180	442	2,5
Ethylbenzeen	92-percentiel	40	105	2,6
Xylenen	92-percentiel	189	424	2,2
Benzeen	99,7-percentiel	450	225	0,5
Tolueen	99,7-percentiel	1185	1214	1,0
Ethylbenzeen	99,7-percentiel	262	245	0,9
Xylenen	99,7-percentiel	1244	991	0,8

De vergelijking laat zien dat de met DIVOCOS berekende 99,7-percentielen ten hoogste een factor 2 afwijken van de gemeten waarden. De berekende 92-percentielen liggen systematisch lager dan de gemeten concentraties, maar dat was te verwachten omdat zoals gezegd de vergelijking niet helemaal op gaat. In het algemeen is de overeenkomst tussen gemeten en berekende concentraties goed.

Validatie op basis van de toetsingscriteria

Hiertoe zijn de berekende en gemeten concentraties gedeeld door de bijbehorende MRL waarden, waarna uit het berekende quotiënt de bijbehorende situatie uit paragraaf 4.2.1 is afgeleid. De resultaten zijn gegeven in Tabel 4.2. Uit de tabel blijkt dat in alle gevallen de voorspelde situatie overeenkomt met situatie afgeleid uit de gemeten concentratie.

Deze sanering vond plaats toen het model DIVOCOS nog niet was ontwikkeld. Als het model destijds was gebruikt, zou op grond van de berekeningen – in het bijzonder het voorspelde gemiddelde⁹ en 99,7-percentiel voor benzeen – geadviseerd zijn om tijdens de sanering een uitgebreid meetplan (dus zowel tijdsgemiddelde metingen over de sanering als momentane metingen op enkele dagen) in te stellen. Op grond van de relatief hoge gemeten concentraties kan worden geconcludeerd dat dit een juist advies zou zijn geweest.

⁹ Het gemiddelde is niet opgenomen in Tabel 4.2. De voorspelde situatie op grond van het berekende gemiddelde was 3.

Tabel 4.2. Gemeten en berekende concentraties BTEX bij de sanering in Enschede en de daaruit afgeleide situatie op basis van de toetsing

Component	Type concentratie	MRL	Berekende concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Voorspelde situatie	Gemeten concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Situatie op basis van meetwaarde
Benzeen	92-perc	n.v. ¹⁾	69	–	81	–
Tolueen	92-perc	n.v. ¹⁾	180	–	442	–
Ethylbenzeen	92-perc	4424	40	1	105	1
Xylenen	92-perc	3097	189	1	424	1
Benzeen	99,7-perc	163	450	3	225	3
Tolueen	99,7-perc	3839	1185	2	1214	2
Ethylbenzeen	99,7-perc	n.v. ¹⁾	262	–	245	–
Xylenen	99,7-perc	4424	1244	2	991	2

¹⁾ n.v. = niet vastgesteld

4.3.2 Sanering Bergen op Zoom

Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties

In Bergen op Zoom zijn gedurende een groot deel van de sanering momentane metingen gedaan op BTEX met behulp van een GC en daarnaast ook 8-uursgemiddelde metingen met actief koolbuizen op twee vaste locaties rond het saneringsterrein. De GC metingen vonden steeds benedenwinds van de ontgravingswerkzaamheden plaats, op enkele meters van de werkput. De resultaten zijn als volgt verwerkt in Tabel 4.3.

In de rijen die zijn aangeduid met 99,7-percentiel, zijn in de kolom met gemeten concentraties de 99,7-percentielen van de uurgemiddelde concentraties van de GC metingen vermeld. Deze zijn vergeleken met de met DIVOCOS uitgerekende 99,7-percentielen, berekend voor een afstand van 10 m. De GC metingen vonden weliswaar plaats op 3 tot 10 m van de werkput, maar DIVOCOS berekent geen concentraties voor afstanden kleiner dan 10 m. Daardoor zijn de berekende concentraties mogelijk onderschat.

In de rijen die zijn aangeduid met 92-percentiel, zijn de 92-percentielen van de uurgemiddelde concentraties van de GC metingen weergegeven. Ook deze zijn vergeleken met berekende 92-percentielen voor een afstand van 10 m.

De gemiddelde concentraties zijn berekend uit alle meetwaarden van de 8-uursmetingen over beide locaties. Een andere mogelijkheid was de meetresultaten van de GC metingen te middelen, maar dat zou een vertekend beeld geven omdat met de GC niet op een vaste locatie werd gemeten maar steeds benedenwinds van de werkput. Tussen haakjes is vermeld de gemiddelde gemeten concentratie na correctie voor de achtergrondwaarde in buitenlucht, dat wil zeggen de aanwezige concentratie zonder invloed van de sanering. Omdat benzeen en ethylbenzeen niet of nauwelijks zijn aangetoond boven de detectielimiet van $3 \mu\text{g m}^{-3}$, ligt de gemiddelde concentratie voor deze componenten rond of onder deze detectielimiet. De met DIVOCOS vastgestelde concentraties zijn berekend

voor een afstand van 20 m. Dat is ongeveer de gemiddelde afstand van de meetlocaties tot de werkput.

In de rechterkolom zijn de verhoudingen van gemeten tot berekende concentraties vermeld. Voor de gemiddelde concentraties zijn de verhoudingen berekend na correctie voor de achtergrondwaarde in lucht. Dit geeft een betere vergelijking, omdat immers bij de berekeningen met DIVOCOS de achtergrondwaarden ook niet zijn verdisconteerd. Voor de 92- en 99,7-percentielen is geen correctie gedaan, omdat de bijdrage van de achtergrond aan deze concentraties (verwaarloosbaar) klein is. In een aantal gevallen kon geen verhouding worden berekend omdat teveel meetwaarden onder de detectielimiet lagen.

Tabel 4.3. Gemeten en berekende concentraties BTEX en de verhouding daartussen bij de sanering in Bergen op Zoom

Component	Type concentratie	Berekend ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Gemeten ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Verhouding
Benzeen	Gemiddeld	0,5	< 3 (< 1,5)	–
Tolueen	Gemiddeld	3,3	10,7 (6,7)	2,0
Ethylbenzeen	Gemiddeld	1,6	< 3 (< 2)	–
Xylenen	Gemiddeld	3,3	7,0 (4,0)	1,2
Benzeen	92-percentiel	5,9	2,2	0,4
Tolueen	92-percentiel	40,1	37,9	0,9
Ethylbenzeen	92-percentiel	20,0	n.v.	–
Xylenen	92-percentiel	40,7	44,7	1,1
Benzeen	99,7-percentiel	37	22	0,6
Tolueen	99,7-percentiel	249	161	0,6
Ethylbenzeen	99,7-percentiel	124	n.v.	–
Xylenen	99,7-percentiel	253	592	2,3

¹⁾ n.v. = niet vastgesteld, omdat er teveel waarden onder de detectielimiet lagen.

De vergelijking laat zien dat de met DIVOCOS berekende concentraties ten hoogste een factor 2,5 afwijken van de gemeten waarden. Alleen voor ethylbenzeen liggen de gemeten concentraties, die bijna alle onder de detectielimiet lagen, ruim onder de berekende waarden. Op grond van de gegevens over de bodemverontreiniging, dat wil zeggen de gehalten in bodem en grondwater, werd verwacht dat alle vier de componenten in ongeveer gelijke mate zouden vrijkomen, maar de metingen wijzen anders uit. Onduidelijk is of de oorzaak hiervan moet worden gezocht in de gegevens over de verontreiniging of in de gebruikte meetmethoden.

De verwachting dat de berekende percentielen lager zouden zijn dan de gemeten waarden (vanwege de geringe afstand van de GC tot de werkput) is niet uitgekomen.

Validatie op basis van de toetsingscriteria

Hiertoe zijn de berekende en gemeten concentraties gedeeld door de bijbehorende MRL waarde, waarna op grond het berekende quotiënt de bijbehorende situatie uit paragraaf 4.2.1 is afgeleid. De resultaten zijn gegeven in Tabel 4.4. Uit de tabel blijkt dat in bijna alle gevallen de voorspelde situatie overeenkomt met situatie afgeleid uit de gemeten concentratie. Alleen voor het berekende 99,7-percentiel voor benzeen werd een afwijkende waarde gevonden ten opzichte van de gemeten concentratie.

Bij deze sanering zijn vooraf geen berekeningen gedaan met het model DIVOCOS; het model was toen maar net ontwikkeld en werd nog niet breed toegepast. Als het model destijds was gebruikt, zou het op grond van de berekeningen het meest voor de hand liggen tijdens de sanering geen of een beperkt meetplan uit te voeren. De metingen tonen aan dat dit een juiste beslissing was geweest, aangezien geen van de MRL waarden zijn overschreden. Dat tijdens deze sanering toch intensief is gemeten heeft te maken met de volgende redenen:

- Enkele woningen lagen aan de rand van het saneringsterrein, dus er werd mogelijk een hoge blootstelling verwacht;
- Er werd aanzienlijke stankoverlast verwacht;
- Op de eerste dag van de ontgraving werd de signaalwaarde voor xyleen, die destijds was vastgesteld op $270 \mu\text{g m}^{-3}$ (de signaalwaarde is inmiddels bijgesteld tot ruim $13.000 \mu\text{g m}^{-3}$), enkele malen overschreden. Naar aanleiding daarvan zijn de 8-uursmetingen ingezet.

Tabel 4.4. Gemeten en berekende concentraties BTEX bij de sanering in Bergen op Zoom en de daaruit afgeleide situatie op basis van de toetsing

Component	Type concentratie	MRL	Berekende concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Voorspelde situatie	Gemeten concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Situatie op basis van meetwaarde
Benzeen	Gemiddeld	20	0,5	1	< 1,5	1
Tolueen	Gemiddeld	400	3,3	1	6,7	1
Ethylbenzeen	Gemiddeld	770	1,6	1	< 2	1
Xylenen	Gemiddeld	870	3,3	1	4,0	1
Benzeen	92-perc	n.v. ¹⁾	5,9	–	2,2	–
Tolueen	92-perc	n.v. ¹⁾	40,1	–	37,9	–
Ethylbenzeen	92-perc	4424	20,0	1	n.v.	1
Xylenen	92-perc	3097	40,7	1	44,7	1
Benzeen	99,7-perc	163	37	2	22	1
Tolueen	99,7-perc	3839	249	1	161	1
Ethylbenzeen	99,7-perc	n.v. ¹⁾	124	–	n.v.	–
Xylenen	99,7-perc	4424	253	1	592	1

¹⁾ n.v. = niet vastgesteld

4.3.3 Sanering Groningen

Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties

Gedurende de eerste maanden van de sanering van het Ciboga-terrein heeft het RIVM tijdsgemiddelde concentraties VOC's bepaald. Deze metingen zijn gedaan in zeven opeenvolgende series van steeds ongeveer een maand op vier meetlocaties rondom het saneringsterrein. Daarnaast zijn door bureau MUG aan de rand van het saneringsterrein 8-uursgemiddelde concentraties VOC's gemeten met behulp van actief koolbuizen, maar deze waarden worden niet gebruikt bij de validatie. In paragraaf 3.3.5 is uitgelegd waarom.

Omdat de afzonderlijke gemeten concentraties over de meetlocaties en de perioden onderling vrijwel niet verschilden, zijn alle meetwaarden gemiddeld. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 4.5, in de kolom met gemeten concentraties. Alleen de componenten waarvoor met DIVOCOS berekeningen zijn gedaan zijn in de tabel opgenomen.

Fenol en naftaleen zijn niet aangetoond boven de detectielimiet van $0,2 \mu\text{g m}^{-3}$. Omdat de achtergrondconcentraties van deze stoffen in de lucht rond de $0,1 \mu\text{g m}^{-3}$ liggen, kan worden gesteld dat de emissies tijdens de sanering niet tot nauwelijks hebben bijgedragen aan de concentraties in de omgeving. Dezelfde conclusie kan worden getrokken voor benzeen, waarvoor de gemeten concentratie zelfs lager is dan de achtergrondwaarde¹⁰. In de tabel zijn voor fenol en naftaleen dan ook geen voor de achtergrond gecorrigeerde concentraties gegeven. Voor benzeen is de gecorrigeerde waarde ongeveer 0, aangegeven tussen haakjes achter de meetwaarde. De totale concentratie vluchtige niet-gechloreerde aromatische verbindingen lag wel boven de achtergrondconcentratie (deze bedraagt gemiddeld $3 \mu\text{g m}^{-3}$), maar gelet op de variatie in achtergrondwaarden (zie voetnoot 10) kan hier niet van een significant verschil worden gesproken. Anders gezegd, voor deze groep componenten kan niet worden vastgesteld of de emissies tijdens de sanering hebben bijgedragen aan de concentratie in de lucht en zeker niet hoe hoog deze bijdrage zou zijn.

In paragraaf 3.3.5 is uitgelegd hoe met DIVOCOS de gemiddelde concentraties zijn berekend, namelijk door het terrein in twee deeloppervlakken te verdelen, een sterk verontreinigd deel en een nauwelijks verontreinigd deel. Voor de validatie is eerst de afstand van elke sampler tot het centrum van elke deeloppervlak bepaald. Daarna zijn de berekende concentraties bij die afstanden afgelezen en vervolgens is een gewogen gemiddelde over de vier samplers berekend. Als weegfactor is gebruikt de tijdsduur voor de sanering van de betreffende deeloppervlakken.

De resultaten van de berekeningen staan eveneens in Tabel 4.5. De berekende concentraties voor fenol en naftaleen zijn laag tot zeer laag, in overeenstemming met de

¹⁰ Het zij opgemerkt dat achtergrondconcentraties van stoffen in de lucht variëren in tijd en plaats. Deze variatie kan aanzienlijk zijn. Voor benzeen bijvoorbeeld kan de weekgemiddelde achtergrondconcentratie, afhankelijk van plaats en tijd, variëren van $0,5$ tot $2,5 \mu\text{g m}^{-3}$. In dit validatie-onderzoek wordt in principe gerekend met gemiddelde waarden afkomstig van een groot aantal meetgegevens uit het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit, namelijk $1,5 \mu\text{g m}^{-3}$.

resultaten van de metingen. Voor benzeen werd een concentratie voorspeld, die duidelijk hoger is dan de gemeten waarde. De laatste wijkt immers niet af van de achtergrondwaarde, terwijl de berekening een duidelijk verhoogde bijdrage door de emissies tijdens de sanering voorspelt. Ook werd op grond van het berekende 99,7-percentiel (ongeveer $50 \mu\text{g m}^{-3}$) verwacht dat de 8-uursgemiddelde metingen door bureau MUG regelmatig een verhoogde waarde boven de detectielimiet van $10 \mu\text{g m}^{-3}$ zou hebben gegeven, hetgeen nauwelijks is voorgekomen. De interpretatie ten aanzien van de groep concentratie vluchtige niet-gechloreerde aromatische verbindingen wordt bemoeilijkt, doordat niet bekend is hoe de minerale olie in de verontreiniging is samengesteld. In paragraaf zijn met de nodige aannames berekeningen gedaan voor drie fracties vluchtige niet-gechloreerde aromatische verbindingen. De resultaten daarvan staan in de tabel, maar de vergelijking met de gemeten waarde wordt bemoeilijkt doordat niet alle componenten uit de verschillende fracties tot de set VOC's behoren waarop is geanalyseerd. De vergelijking is daarom niet goed te maken. Wel wordt duidelijk dat als de minerale olie vooral uit lichtere verbindingen zou hebben bestaan de berekende waarde hoger zou uitvallen dan de gemeten.

In de tabel zijn vanwege alle genoemde beperkingen geen verhoudingen van gemeten tot berekende concentraties vermeld.

Tabel 4.5. Gemeten en berekende concentraties BTEX en de verhouding daartussen bij de sanering in Groningen

Component	Type concentratie	Berekend ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Gemeten ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Benzeen	Gemiddeld	1,6	1,1 (≈ 0) ¹⁾
Fenol	Gemiddeld	0,002	< 0,2
Naftaleen	Gemiddeld	0,1	< 0,2
VnGAV, lichte fractie	Gemiddeld	13,3	3,6 (≈ 0) ¹⁾
VnGAV, middelzware fractie	Gemiddeld	2,3	
VnGAV, zware fractie	Gemiddeld	0,01	

¹⁾ De achtergrondconcentratie van benzeen bedraagt gemiddeld $1,5 \mu\text{g m}^{-3}$. De gemeten concentratie ligt daar iets onder. Omdat negatieve concentraties in de lucht niet kunnen voorkomen, is gerekend met een iets lagere achtergrondconcentratie (zie ook voetnoot 10). De achtergrondconcentratie van de groep vluchtige niet-gechloreerde aromatische verbindingen bedraagt gemiddeld ongeveer $3 \mu\text{g m}^{-3}$, maar vanwege de variatie in achtergrondwaarden is het verschil tussen meetwaarde en achtergrondwaarde niet significant te noemen.

²⁾ VnGAV = vluchtige niet-gechloreerde aromatische verbindingen

De vergelijking laat zien dat de met DIVOCOS berekende concentraties benzeen hoger zijn dan de gemeten waarden. Een mogelijke reden hiervoor is dat bij de berekeningen de hoge gehalten in de verontreiniging te zwaar zijn meegewogen. Zoals in paragraaf 3.3.5 is aangegeven, is vanwege de enorme omvang van de hoeveelheid gegevens uit de aanwezige bodemonderzoeken een selectie gemaakt van een aantal waarden verspreid

over het terrein. Mogelijk zijn bij deze selectie hoge gehalten oververtegenwoordigd geweest.

Voor fenol en naftaleen zijn de berekende en gemeten concentraties beide laag tot zeer laag. Voor de groep vluchtige niet-gechloroerde aromatische verbindingen kan de vergelijking niet worden gemaakt.

Validatie op basis van de toetsingscriteria

Hiertoe zijn de berekende en gemeten concentraties gedeeld door de bijbehorende MRL waarde, waarna op grond het berekende quotiënt de bijbehorende situatie uit paragraaf 4.2.1 is afgeleid. De resultaten zijn gegeven in Tabel 4.6. Uit de tabel blijkt dat in alle gevallen de voorspelde situatie overeenkomt met de situatie afgeleid uit de gemeten concentratie.

Voorafgaand aan de sanering hebben wij in opdracht van de VROM-Inspectie Noord indicatieve berekeningen gedaan met DIVOCOS, waarbij alleen is uitgegaan van de hoogste gehalten in de verontreiniging (meer gegevens waren ons toen niet bekend). Deze berekeningen gaven aan dat het gewenst was om tijdens de sanering in ieder geval een beperkt meetprogramma in te stellen. De VROM-Inspectie Noord heeft het RIVM daar opdracht toe gegeven, mede om data te verzamelen voor het valideren van DIVOCOS.

Vanuit het oogpunt van directe omgevingsbewaking heeft de gemeente Groningen bureau MUG de aanvullende 8-uursgemiddelde metingen laten verrichten.

Uiteindelijk bleek na herberekening op basis van de geselecteerde gegevens dat voor geen van de componenten een blootstellingsrisico werd verwacht. De metingen hebben aangetoond dat deze voorspelling terecht was. Achteraf gezien was zelfs een beperkt meetprogramma niet nodig geweest.

Tabel 4.6. Gemeten en berekende concentraties BTEX bij de sanering in Groningen en de daaruit afgeleide situatie op basis van de toetsing

Component	Type concentratie	MRL	Berekende concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Voorspelde situatie	Gemeten concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Situatie op basis van meetwaarde
Benzeen	Gemiddeld	20	1,6	1	≈ 0	1
Fenol	gemiddeld	20	0,002	1	≈ 0	1
Naftaleen	gemiddeld	10	0,1	1	≈ 0	1
VnGAV, lichte fractie	Gemiddeld	400	13,3	1		1
VnGAV, middelzware fractie	Gemiddeld	200	2,3	1	≈ 0	1
VnGAV, zware fractie	Gemiddeld	200	0,01	1		1

4.3.4 Sanering Gorinchem

Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties

Bij de sanering in Gorinchem zijn uitsluitend tijdsgemiddelde metingen van VOC's verricht. Deze metingen zijn gedaan in twee opeenvolgende series van respectievelijk één en twee weken op drie meetlocaties verspreid rondom het saneringsterrein. De afstand tussen de locaties en de werkput bedroeg 20 tot 30 m.

De resultaten voor BTEX, de meest relevante VOC's bij deze sanering, zijn weergegeven in Tabel 4.7. In de kolom met gemeten concentraties zijn de gemiddelde waarden over de drie locaties en de twee perioden vermeld. De meetwaarden zijn op deze wijze gemiddeld, omdat de afzonderlijke gemeten concentraties over de meetlocaties en de perioden onderling vrijwel niet verschilden. Tussen haakjes staat in deze kolom de gemiddelde gemeten concentratie na correctie voor de achtergrondwaarde in buitenlucht, dat wil zeggen de aanwezige concentratie zonder invloed van de sanering. De gecorrigeerde concentraties liggen alle rond de 0 – voor benzeen is de gemeten concentratie zelfs lager dan de achtergrond – hetgeen betekent dat de emissies tijdens de sanering niet of nauwelijks hebben bijgedragen aan de concentraties in de omgeving. Dit komt overeen met de van tevoren met DIVOCOS berekende concentraties; de in de tabel gegeven waarden zijn de concentraties berekend voor de gemiddelde afstand van de samplers tot de verontreinigingskern, namelijk 25 m. Alleen xylenen zijn in enige mate aangetoond, overeenkomstig de voorspelling met DIVOCOS (gemeten: $0,4 \mu\text{g m}^{-3}$, berekend: $0,6 \mu\text{g m}^{-3}$). Hierbij moet wel de kanttekening worden gemaakt dat vanwege de variatie in achtergrondwaarden (zie voetnoot 10) de voor de achtergrond gecorrigeerde waarde als indicatief moet worden beschouwd.

Het heeft geen zin verhoudingen van gemeten tot berekende concentraties te berekenen, omdat de berekende waarden zo dicht bij 0 liggen dat de verhoudingen onevenredig groot worden. Daarom zijn in Tabel 4.7 de verschillen tussen de gemeten tot berekende concentraties gegeven.

Tabel 4.7. Gemeten en berekende concentraties BTEX en de verschillen daartussen bij de sanering in Gorinchem

Component	Type concentratie	Berekend ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Gemeten ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Vershil ($\mu\text{g m}^{-3}$)
Benzeen	Gemiddeld	0,01	1,3 (≈ 0) ¹⁾	≈ 0
Tolueen	gemiddeld	0,01	4,2 (0,2)	< 0,2
Ethylbenzeen	gemiddeld	0,1	1,1 (0,1)	≈ 0
Xylenen	gemiddeld	0,4	3,6 (0,6)	0,2

¹⁾ De achtergrondconcentratie van benzeen bedraagt gemiddeld $1,5 \mu\text{g m}^{-3}$. De gemeten concentratie ligt daar iets onder. Omdat negatieve concentraties in de lucht niet kunnen voorkomen, is gerekend met een iets lagere achtergrondconcentratie (zie ook voetnoot 10).

De vergelijking laat zien dat de met DIVOCOS berekende gemiddelde concentraties overeenkomen met de gemeten waarden. Beide zijn laag tot zeer laag. In paragraaf 3.3.6 (voetnoot 2 bij Tabel 3.5) werd aangegeven, dat door de keuze van de diepte tot waarop werd afgegraven de berekende concentraties mogelijk overschat zouden zijn. Dit blijkt echter niet het geval, al moet daarbij worden gezegd dat de concentraties zo laag zijn dat een eventuele onderschatting waarschijnlijk binnen de onzekerheidsmarges van de berekende waarden valt.

Validatie op basis van de toetsingscriteria

Hiertoe zijn de berekende en gemeten concentraties gedeeld door de bijbehorende MRL waarde, waarna op grond het berekende quotiënt de bijbehorende situatie uit paragraaf 4.2.1 is afgeleid. De resultaten zijn gegeven in Tabel 4.8. Uit de tabel blijkt dat in alle gevallen de voorspelde situatie overeenkomt met de situatie afgeleid uit de gemeten concentratie.

Op grond van de voorspelling met DIVOCOS heeft de GGD destijds aan de gemeente Gorinchem geadviseerd een beperkt meetprogramma uit te voeren door op 4 locaties rond het terrein tijdsgemiddelde concentraties te bepalen. Hoewel volgens de berekeningen met DIVOCOS voor geen van de componenten een blootstellingsrisico werd verwacht, is toch geadviseerd te meten opdat omwonenden zich geruster zouden voelen als met metingen werd aangetoond dat ze geen risico's liepen. Een bijkomend argument was dat de sanering van zodanig korte duur was, dat de resultaten van de modelberekeningen mogelijk te onzeker waren. De metingen hebben echter aangetoond dat de voorspelling met DIVOCOS, namelijk voor alle gevallen situatie 1, terecht was.

Tabel 4.8. Gemeten en berekende concentraties BTEX bij de sanering in Gorinchem en de daaruit afgeleide situatie op basis van de toetsing

Component	Type concentratie	MRL	Berekende concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Voorspelde situatie	Gemeten concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Situatie op basis van meetwaarde
Benzeen	gemiddeld	20	0,01	1	≈ 0	1
Tolueen	gemiddeld	400	0,01	1	0,2	1
Ethylbenzeen	gemiddeld	770	0,1	1	0,1	1
Xylenen	gemiddeld	870	0,4	1	0,6	1

4.3.5 Sanering Zaltbommel

Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties

Bij de sanering in Zaltbommel zijn tijdsgemiddelde metingen van VOC's verricht over de hele saneringsperiode van ongeveer 6 weken en momentane metingen van BTEX op de twee werkdagen, waarop de sterkst verontreinigde grond werd afgegraven. De

meetresultaten zijn weergegeven in Tabel 4.9, naast de met DIVOCOS berekende waarden.

In de rijen die zijn aangeduid met Gemiddeld, zijn in de kolom met gemeten concentraties de gemiddelde waarden van alle metingen met de passieve samplers (twee opeenvolgende series op 4 locaties rondom het saneringsterrein) vermeld. In eerste instantie zijn per locatie de meetwaarden van beide series gemiddeld. De locatiegemiddelde concentraties bleken onderling aanzienlijk te verschillen, als gevolg van een overheersend westelijke windrichting tijdens de sanering en ook vanwege verschillen in de afstand van de samplers tot de verontreinigingskern (5 tot 15 m). Door over alle locaties te middelen wordt als het ware gecorrigeerd voor de windrichting¹¹ en de verschillen in afstanden. Tussen haakjes staat in deze kolom de gemiddelde gemeten concentratie na correctie voor de achtergrondwaarde in buitenlucht, dat wil zeggen de aanwezige concentratie zonder invloed van de sanering. De met DIVOCOS uitgerekende concentraties zijn berekend voor de gemiddelde afstand van de samplers tot de verontreinigingskern (10 m).

In de rijen die zijn aangeduid met 99,7-percentiel, zijn in de kolom met gemeten concentraties de maximum uurgemiddelde concentraties op de twee werkdagen vermeld (geometrisch gemiddelde van de maxima op beide dagen; deze parameter komt statistisch gezien het best overeen met het 99,7-percentiel over een periode van 6 weken). Ook hier hebben de met DIVOCOS uitgerekende concentraties betrekking op de gemiddelde afstand van elke sampler tot de verontreinigingskern (10 m).

In de rechterkolom zijn de verhoudingen van gemeten tot berekende concentraties vermeld, waarbij voor de gemiddelde concentraties is uitgegaan van de voor de achtergrondwaarde gecorrigeerde concentratie.

Tabel 4.9. Gemeten en berekende concentraties BTEX en de verhouding daartussen bij de sanering in Zaltbommel

Component	Type concentratie	Berekend ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Gemeten ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Verhouding
Benzeen	Gemiddeld	4,4	8,3 (6,8)	1,5
Tolueen	Gemiddeld	20,2	30,2 (26,2)	1,3
Ethylbenzeen	Gemiddeld	6,7	6,2 (5,2)	0,8
Xylenen	Gemiddeld	28	29,9 (26,9)	1,0
Benzeen	99,7-percentiel	92	142	1,5
Tolueen	99,7-percentiel	425	443	1,0
Ethylbenzeen	99,7-percentiel	141	754	5,3
Xylenen	99,7-percentiel	588	117	0,2

¹¹ Hiermee wordt bedoeld dat gecorrigeerd wordt voor het feit dat de meteorologische condities tijdens de 6 weken dat de sanering plaatsvond afweken van jaargemiddelde meteorologische condities.

De vergelijking laat zien dat de met DIVOCOS berekende gemiddelde concentraties minder dan 50% afwijken van de gemeten waarden. De verschillen voor de 99,7-percentielen zijn groter, variërend van circa 5% (voor toluen) tot ongeveer een factor 5 (voor ethylbenzeen en xylenen).

Validatie op basis van de toetsingscriteria

Hiertoe zijn de berekende en gemeten concentraties gedeeld door de bijbehorende MRL waarden, waarna op grond van het berekende quotiënt de bijbehorende situatie uit paragraaf 4.2.1 is afgeleid. De resultaten zijn gegeven in Tabel 4.10. Uit de tabel blijkt dat in alle gevallen de voorspelde situatie overeenkomt met situatie afgeleid uit de gemeten concentratie. Op grond van de voorspelling met DIVOCOS is destijds aan de gemeente Zaltbommel geadviseerd in ieder geval een beperkt meetprogramma uit te voeren door op 4 locaties rond het terrein tijdsgemiddelde concentraties te bepalen. Dit advies was met name gebaseerd op de voorspelde concentraties aan benzeen. Tijdens de sanering zijn naast dit meetprogramma ook momentane metingen gedaan op twee werkdagen, waarop het meest vervuilde stuk grond werd afgegraven. Deze aanvullende metingen zijn met name gedaan uit voorzorg. Tijdens deze dagen is gedurende één uur de signaalwaarde voor ethylbenzeen licht overschreden geweest. Daar het een kortdurende en lichte overschrijding betrof zijn toen geen emissiebeperkende maatregelen getroffen. Gedurende de rest van de tijd lagen de meetwaarden voor alle componenten onder de signaalwaarden.

Tabel 4.10. Gemeten en berekende concentraties BTEX bij de sanering in Zaltbommel en de daaruit afgeleide situatie op basis van de toetsing

Component	Type concentratie	MRL	Berekende concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Voorspelde situatie	Gemeten concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Situatie op basis van meetwaarde
Benzeen	Gemiddeld	20	4,4	2	6,8	2
Tolueen	Gemiddeld	400	20,2	1	26,2	1
Ethylbenzeen	Gemiddeld	770	6,7	1	5,2	1
Xylenen	Gemiddeld	870	28	1	26,9	1
Benzeen	99,7-perc	163	92	2	142	2
Tolueen	99,7-perc	3839	425	1	443	1
Ethylbenzeen	99,7-perc	n.v. ¹⁾	141	–	754	–
Xylenen	99,7-perc	4424	588	1	117	1

¹⁾ n.v. = niet vastgesteld

4.3.6 Sanering Epe

Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties

In Epe zijn tijdens de sanering aan de Achterste Molenweg op 4 locaties met passieve samplers tijdsgemiddelde metingen van VOC's verricht. Verder zijn op twee werkdagen momentane metingen gedaan op gechlloreerde ethenen. In dit rapport worden alleen de resultaten van metingen op gechlloreerde ethenen uitgewerkt, omdat deze als voornaamste verontreiniging in de bodem van het terrein voorkwamen. De meetresultaten zijn weergegeven in Tabel 4.11, naast de met DIVOCOS berekende waarden.

Voor de verwerking van de meetgegevens met de passieve samplers is onderscheid gemaakt in twee groepen locaties. De eerste groep lag op 20 tot 25 m van de werkput, de tweede groep op 40 tot 70 m. Voor beide groepen zijn eerst de gemiddelde concentraties van elke meetserie berekend, waarna de waarden van de afzonderlijke series weer zijn gemiddeld om, per groep, de gemiddelde concentratie over de hele saneringsperiode te krijgen. Deze gemiddelden zijn vermeld in Tabel 4.11 in de kolom met gemeten concentraties. Tussen haakjes staat de gemiddelde gemeten concentratie na correctie voor de achtergrondwaarde in buitenlucht, dat wil zeggen de aanwezige concentratie zonder invloed van de sanering. De met DIVOCOS uitgerekende concentraties zijn berekend een afstand van 20 m (eerste groep) en 50 m (tweede groep).

De meetwaarden van de momentane metingen zijn verwerkt tot uurgemiddelde concentraties, die vervolgens zijn gerangschikt, waarna de hoogste 5 meetwaarden zijn geselecteerd. Van die 5 waarden is het geometrisch gemiddelde berekend. Deze waarde staat statistisch gezien ongeveer op één lijn met het 99,7-percentiel over de saneringsperiode¹². Deze zijn vergeleken met de berekende 99,7-percentielen voor vergelijkbare afstanden als waarop is gemeten, namelijk 20 m.

In de rechterkolom zijn de verhoudingen van gemeten tot berekende concentraties vermeld, waarbij voor de gemiddelde concentraties is uitgegaan van de voor de achtergrondwaarde gecorrigeerde concentratie.

¹² Hierbij wordt bedoeld het aantal dagen tussen aanvang en beëindiging van de sanering gecorrigeerd voor het aantal dagen dat niet werd ontgraven vanwege de MKZ crisis. Op deze dagen vond namelijk nagenoeg geen uitdamping plaats.

Tabel 4.11. Gemeten en berekende concentraties tri, per en cis en de verhouding daartussen bij de sanering in Epe

Component	Type concentratie	Berekend ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Gemeten ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Verhouding
Trichlooretheen	Gemiddeld (20 m)	6,7	0,9 (0,6)	0,1
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (20 m)	35,7	44,1 (43,6)	1,2
Trichlooretheen	Gemiddeld (50 m)	1,2	0,4 (0,1)	0,1
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (50 m)	6,4	13,2 (12,7)	2,0
Trichlooretheen	99,7-percentiel (20 m)	155	26	0,2
Tetrachlooretheen	99,7-percentiel (20 m)	825	1872	2,3
1,2-cis-dichlooretheen	99,7-percentiel (20 m)	113	14	0,1

De vergelijking laat zien dat de berekende concentraties tetrachlooretheen minder dan een factor 2,5 afwijken van de gemeten waarden. De berekende concentraties trichlooretheen en 1,2-cis-dichlooretheen zijn echter ongeveer een factor 5 tot 10 hoger dan de meetwaarden. Uit de gegevens over de bodemverontreiniging bleek dat tetrachlooretheen verreweg het meest aanwezig was (zie paragraaf 3.3.8). Omdat trichlooretheen en 1,2-cis-dichlooretheen echter vluchtiger zijn dan tetrachlooretheen, werden met DIVOCOS ook voor deze componenten redelijk hoge concentraties voorspeld. De praktijk wijst echter uit dat de voorspelde waarden te hoog waren.

Een ander effect dat een rol kan hebben gespeeld is het feit dat het gehalte aan tetrachlooretheen in het meest verontreinigde monster zo hoog was, dat in de bodemlucht daaromheen de verzadigde dampspanning werd bereikt. Dit kan tot een onderschatting in de berekende emissies van tetrachlooretheen hebben geleid. Tenslotte kan de grote variatie in het organisch stofgehalte (0,1% tot 80%) een rol hebben gespeeld bij de gevonden afwijkingen. Bij de berekeningen is uitgegaan van het gemiddelde organisch stofgehalte van 18%.

De invloed van de MKZ crisis op de gemiddelde concentraties is niet merkbaar. Doordat vanwege deze crisis de ontgraving enkele weken heeft stilgelegen en er in die tijd nauwelijks uitdamping van vluchtige stoffen plaatsvond, hadden we verwacht dat de gemiddelde concentraties daardoor lager zouden uitvallen (soort verdunningseffect). Dat blijkt echter niet duidelijk uit de meetwaarden.

Validatie op basis van de toetsingscriteria

Voor elke groep meetwaarden zijn de berekende en gemeten concentraties gedeeld door de bijbehorende MRL waarde, waarna op grond van het berekende quotiënt de bijbehorende situatie uit paragraaf 4.2.1 is afgeleid. De resultaten zijn gegeven in Tabel 4.12, samen met de berekende en gemeten concentraties en de MRL waarde. Uit de tabel blijkt dat in bijna alle gevallen de voorspelde situatie overeenkomt met situatie afgeleid uit de gemeten concentratie. Alleen het 99,7-percentiel voor tetrachlooretheen blijkt in de praktijk boven de acute MRL te liggen, terwijl DIVOCOS een waarde iets onder de acute MRL voorspelde.

Het uitgevoerde meetplan was gebaseerd op de voorspelling voor tetrachlooretheen: situatie 2, waarbij wordt geadviseerd in ieder geval tijdsgemiddelde metingen te doen (beperkt meetplan) mogelijk aangevuld met intensieve metingen. Vanwege de eerder genoemde onzekerheden in de berekende concentraties (grote variatie in organisch stofgehalte en bereiken verzadigde dampspanning in de bodemlucht) is besloten op enkele dagen intensieve metingen te doen. De resultaten wijzen uit dat dit een juiste beslissing was. Het gemeten 99,7-percentiel lag boven de acute MRL en de hoogste uurgemiddelde concentratie bedroeg $3400 \mu\text{g m}^{-3}$, hetgeen vrijwel gelijk is aan de signaalwaarde.

Tabel 4.12. Gemeten en berekende concentraties tri, per en cis bij de sanering in Epe en de daaruit afgeleide situatie op basis van de toetsing

Component	Type concentratie	MRL	Berekende concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Voorspelde situatie	Gemeten concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Situatie op basis van meetwaarde
Trichlooretheen	Gemiddeld (20 m)	200	6,7	1	0,6	1
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (20 m)	250	35,7	1	43,6	1
Trichlooretheen	Gemiddeld (50 m)	200	1,2	1	0,1	1
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (50 m)	250	6,4	1	12,7	1
Trichlooretheen	99,7-perc (20 m)	10950	155	1	26	1
Tetrachlooretheen	99,7-perc (20 m)	1382	825	2	1872	3
1,2-cis-dichlooretheen	99,7-perc (20 m)	4040	113	1	14	1

4.3.7 Sanering Tiel

Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties

Bij de sanering van het RIO-terrein zijn op 6 locaties tijdsgemiddelde metingen van VOC's verricht over de hele saneringsperiode van ongeveer 7 weken. Verder zijn op drie werkdagen momentane metingen op gechloreerde ethenen en ook op andere VOC's gedaan. In dit rapport worden alleen de resultaten van metingen op gechloreerde ethenen uitgewerkt, omdat deze als voornaamste verontreiniging in de bodem van het terrein voorkwamen¹³. De meetresultaten zijn weergegeven in Tabel 4.13, naast de met DIVOCOS berekende waarden.

In eerste instantie zijn per locatie de meetwaarden van de twee opeenvolgende series met de passieve samplers gemiddeld. Hierdoor werd per locatie de gemiddelde concentratie over de hele saneringsperiode verkregen. De locatiegemiddelde concentraties bleken onderling te verschillen, voornamelijk ten gevolge van het feit dat twee locaties relatief

¹³ De gemeten concentraties aan BTEX lagen iets boven de achtergrondwaarde, maar dat is waarschijnlijk veroorzaakt door emissies van bij de sanering gebruikte graafwerktuigen en vervoermiddelen.

dicht bij de verontreinigingskern en het opslagdepot lagen (ongeveer 25 m), terwijl de andere samplers daar verder van verwijderd waren (gemiddeld 65 m). Daarom is bij de uitwerking van de gemiddelde concentraties onderscheid gemaakt tussen de dichtbij gelegen en verder weg gelegen samplers. Voor beide groepen zijn de gemiddelde waarden over de locaties uitgerekend en opgenomen in de kolom met gemeten concentraties. Tussen haakjes staat in deze kolom de concentratie na correctie voor de achtergrondwaarde in buitenlucht, dat wil zeggen de aanwezige concentratie zonder invloed van de sanering. De met DIVOCOS uitgerekende concentraties zijn berekend voor de gemiddelde afstand van de samplers tot de verontreinigingskern (25 m voor de eerste groep en 65 m voor de tweede).

Bij de uitwerking van de momentane metingen is een vergelijkbare werkwijze gehanteerd. De meetwaarden zijn in twee groepen verdeeld, namelijk een groep met waarden die op enkele meters van de ontgraving zijn bepaald en een groep met waarden die op afstanden van 10 tot 30 m zijn gemeten. Van beide groepen zijn de hoogste 5 meetwaarden geselecteerd en van die 5 waarden is het geometrisch gemiddelde berekend. Deze zijn vergeleken met de berekende 99,7-percentielen voor vergelijkbare afstanden als waarop is gemeten (10 m voor de eerste groep en 20 m voor de tweede; het zij vermeld dat DIVOCOS geen concentraties berekent voor afstanden kleiner dan 10 m).

In de rechterkolom zijn de verhoudingen van gemeten tot berekende concentraties vermeld. Voor de verhouding van gemiddelde concentraties is uitgegaan van de voor de achtergrondwaarde gecorrigeerde concentratie. Voor de 99,7-percentielen is geen correctie gedaan, omdat de bijdrage van de achtergrond aan optredende piekconcentraties verwaarloosbaar klein is.

Tabel 4.13. Gemeten en berekende concentraties tri, per en cis en de verhouding daartussen bij de sanering in Tiel

Component	Type concentratie	Berekend ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Gemeten ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Verhouding
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (25 m)	14,8	14,8 (14,3)	1,0
Trichlooretheen	Gemiddeld (25 m)	1,2	1,9 (1,6)	1,3
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (65 m)	2,5	3,3 (2,8)	1,1
Trichlooretheen	Gemiddeld (65 m)	0,22	0,9 (0,6)	2,7
Tetrachlooretheen	99,7-perc (10 m)	1747	1931	1,1
Trichlooretheen	99,7-perc (10 m)	146	50,9	0,3
1,2-cis-dichlooretheen	99,7-perc (10 m)	663	20	0,03
Tetrachlooretheen	99,7-perc (20 m)	362	226	0,6
Trichlooretheen	99,7-perc (20 m)	30,3	30,4	1,0
1,2-cis-dichlooretheen	99,7-perc (20 m)	202	12,5	0,1

De vergelijking laat zien dat de met DIVOCOS berekende gemiddelde concentraties minder dan 50% afwijken van de gemeten waarden, behalve voor trichlooretheen op 65 m. De afwijking daar bedraagt een factor 2,7, maar daar moet bij worden aangetekend dat het om zeer lage concentraties gaat, die absoluut gezien minder dan $0,5 \mu\text{g m}^{-3}$ verschillen.

De verschillen voor de 99,7-percentielen zijn groter, met name voor 1,2-cis-dichlooretheen waarvoor de berekende concentraties veel hoger uitvallen dan de gemeten waarden. Op grond van de gehalten in de bodem en het grondwater – die voor trichlooretheen en 1,2-cis-dichlooretheen lagen in dezelfde orde van grootte – zouden voor 1,2-cis-dichlooretheen iets hogere concentraties in de lucht worden verwacht, aangezien deze component het meest vluchtig is. De meetresultaten wijzen echter anders uit.

Validatie op basis van de toetsingscriteria

Voor elke groep meetwaarden zijn de berekende en gemeten concentraties gedeeld door de bijbehorende MRL waarden, waarna op grond van het berekende quotiënt de bijbehorende situatie uit paragraaf 4.2.1 is afgeleid. De resultaten zijn gegeven in Tabel 4.14, samen met de berekende en gemeten concentraties en de MRL waarde. Uit de tabel blijkt dat in vrijwel alle gevallen de voorspelde situatie overeenkomt met situatie afgeleid uit de gemeten concentratie. Alleen voor het 99,7-percentiel van de concentratie tetrachlooretheen op 20 m werd situatie 2 voorspeld, terwijl de metingen duiden op situatie 1.

Deze sanering vond plaats voordat DIVOCOS is ontwikkeld. Op grond van de nu gedane berekeningen zou het voor de hand liggen een uitgebreid meetprogramma in te stellen, gelet op de hoge voorspelde concentraties aan tetrachlooretheen en de meetresultaten bevestigen dat dit een aannemelijke beslissing zou zijn geweest.

Tabel 4.14. Gemeten en berekende concentraties tri, per en cis bij de sanering in Tiel en de daaruit afgeleide situatie op basis van de toetsing

Component	Type concentratie	MRL	Berekende concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Voorspelde situatie	Gemeten concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Situatie op basis van meetwaarde
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (25 m)	250	14,8	1	14,3	1
Trichlooretheen	Gemiddeld (25 m)	200	1,2	1	1,6	1
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (65 m)	250	2,5	1	2,8	1
Trichlooretheen	Gemiddeld (65 m)	200	0,22	1	0,6	1
Tetrachlooretheen	99,7-perc (10 m)	1382	1747	3	1931	3
Trichlooretheen	99,7-perc (10 m)	10950	146	1	50,9	1
1,2-cis-dichlooretheen	99,7-perc (10 m)	4040	663	1	20	1
Tetrachlooretheen	99,7-perc (20 m)	1382	362	2	226	1
Trichlooretheen	99,7-perc (20 m)	10950	30,3	1	30,4	1
1,2-cis-dichlooretheen	99,7-perc (20 m)	4040	202	1	12,5	1

4.3.8 Sanering Zwijndrecht

Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties

Bij de sanering van het Tomado-terrein zijn op 4 locaties met passieve samplers tijdsgemiddelde metingen van VOC's verricht. Daarnaast zijn op drie werkdagen momentane metingen gedaan op gechloreerde ethenen. Met een mobiele GC werden concentraties 1,2-cis-dichlooretheen, trichlooretheen en tetrachlooretheen gemonitord en met actief koolbuizen werden uurgemiddelde tot 3-uurgemiddelde concentraties vinylchloride gemeten. In dit rapport worden alleen de resultaten van metingen op 1,2-cis-dichlooretheen, trichlooretheen en vinylchloride uitgewerkt, omdat deze als voornaamste verontreiniging in de bodem voorkwamen. De meetresultaten zijn vermeld in Tabel 4.15, naast de met DIVOCOS berekende waarden.

Voor de verwerking van de meetgegevens met de passieve samplers is onderscheid gemaakt in twee groepen locaties. De eerste groep lag op 20 tot 30 m van de plaatsen waar de meeste verontreiniging voorkwam (de vakken 3 en 7; zie paragraaf 3.3.10), de tweede groep lag op 60 tot 100 m hiervandaan. Voor beide groepen zijn eerst de gemiddelde concentraties over de afzonderlijke series berekend. Deze gemiddelden zijn vermeld in Tabel 4.15 in de kolom met gemeten concentraties. Er zijn alleen meetwaarden voor trichlooretheen vermeld, omdat met de passieve samplers geen 1,2-cis-dichlooretheen en vinylchloride zijn te meten. Tussen haakjes staat de gemiddelde gemeten concentratie na correctie voor de achtergrondwaarde in buitenlucht, dat wil zeggen de aanwezige concentratie zonder invloed van de sanering. De met DIVOCOS uitgerekende concentraties zijn berekend een afstand van 25 m (eerste groep) en 70 m (tweede groep).

De meetwaarden van de momentane metingen op trichlooretheen en 1,2-cis-dichlooretheen zijn verwerkt tot uurgemiddelde concentraties, die vervolgens zijn gerangschikt, waarna de hoogste 5 meetwaarden zijn geselecteerd. Van die 5 waarden is het geometrisch gemiddelde berekend. Deze waarde staat statistisch gezien ongeveer op één lijn met het 99,7-percentiel over de saneringsperiode. Ze zijn vergeleken met de berekende 99,7-percentielen voor vergelijkbare afstanden als waarop is gemeten, namelijk 20 m.

Voor vinylchloride zijn de gemiddelde concentraties over de intensieve meetdagen vermeld en vergeleken met het berekende 92-percentiel. Verder is de hoogst gemeten waarde vergeleken met het berekende 99,7-percentiel. Deze vergelijkingen moeten als indicatief worden gezien, omdat de meetwaarden statistisch gezien niet helemaal op één lijn staan met de berekende. Het zij nog vermeld dat met de GC indicatieve metingen op vinylchloride zijn gedaan¹⁴, waarbij dicht bij de werkput piekwaarden werden gemeten tot $6700 \mu\text{g m}^{-3}$, hetgeen qua orde van grootte overeenkwam met het met DIVOCOS voorspelde 99,7-percentiel op 10 m (ongeveer $10.000 \mu\text{g m}^{-3}$).

¹⁴ Bij deze sanering werd het instrument voor het eerst in het veld getest om vinylchloride te kunnen meten, maar het was nog niet gekalibreerd voor deze component.

In de rechterkolom zijn de verhoudingen van gemeten tot berekende concentraties vermeld, waarbij voor de gemiddelde concentraties is uitgegaan van de voor de achtergrondwaarde gecorrigeerde concentratie.

Tabel 4.15. Gemeten en berekende concentraties gechloreerde ethenen en de verhouding daartussen bij de sanering in Zwijndrecht

Component	Type concentratie	Berekend ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Gemeten ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Verhouding
Trichlooretheen	Gemiddeld (25 m)	13,3	5,2 (4,9)	0,4
Trichlooretheen	Gemiddeld (70 m)	2,0	1,5 (1,2)	0,6
Trichlooretheen	99,7-perc (20 m)	624	426	0,7
1,2-cis-dichlooretheen	99,7-perc (20 m)	391	212	0,5
Vinylchloride	92-perc (20 m)	424	170	0,4
Vinylchloride	99,7-perc (20 m)	3100	305	0,1

De vergelijking laat zien dat de berekende concentraties trichlooretheen en 1,2-cis-dichlooretheen minder dan een factor 2,5 afwijken van de gemeten waarden. Voor vinylchloride bedraagt het verschil een factor 2,5 tot 10. Zoals gezegd zijn de berekende en gemeten concentraties vinylchloride statistisch echter niet helemaal vergelijkbaar. Dat geldt met name voor de hoogste gemeten concentratie van $305 \mu\text{g m}^{-3}$, dat een gemiddelde is over ongeveer 2 uur, terwijl het berekende 99,7-percentiel zou moeten worden vergeleken met de hoogste uurgemiddelde concentratie.

In paragraaf 3.3.10 is aangegeven dat vanwege de gevarieerde bodemopbouw en het uiteenlopende organisch stofgehalte in de bodem er extra berekeningen met DIVOCOS zijn gedaan, waarbij is gerekend met veen in plaats van klei en met verschillende organisch stofgehalten tussen 5% en 20%. De resultaten van deze berekeningen wijken minder dan 20% af van de waarden in Tabel 4.15; de mate van afwijking verschilt per component. Hieruit blijkt dat het bodemtype en het organisch stofgehalte bij deze verontreiniging geen grote invloed hebben op de uitdamping van de vluchtige stoffen tijdens de sanering.

Validatie op basis van de toetsingscriteria

Voor elke groep meetwaarden zijn de berekende en gemeten concentraties gedeeld door de bijbehorende MRL waarde, waarna op grond van het berekende quotiënt de bijbehorende situatie uit paragraaf 4.2.1 is afgeleid. De resultaten zijn gegeven in Tabel 4.16, samen met de berekende en gemeten concentraties en de MRL waarde. Voor de volledigheid is ook de berekende gemiddelde concentratie vinylchloride vermeld, omdat deze mede bepalend is geweest in de beslissing over het meetplan tijdens de sanering. Uit de tabel blijkt dat in bijna alle gevallen de voorspelde situatie overeenkomt met de situatie afgeleid uit de gemeten concentratie. Alleen het berekende 99,7-percentiel voor vinylchloride ligt boven de acute MRL, terwijl de hoogste gemeten concentratie

onder de acute MRL ligt. Echter, de meetwaarde is statistisch gezien niet helemaal vergelijkbaar met de berekende waarde.

Het uitgevoerde meetplan was gebaseerd op de voorspelling voor vinylchloride. Voor elk type concentratie werd een overschrijding van de bijbehorende MRL voorzien. Op grond hiervan is besloten een uitgebreid meetplan uit te voeren. De hoge gemeten concentraties vinylchloride, in het bijzonder ook de indicatieve piekwaarden die met de GC zijn gemeten, tonen aan dat dit een juiste beslissing was.

De berekeningen waarbij is uitgegaan van veen in plaats van klei en van een ander organisch stofgehalte geven voor wat betreft de vergelijking tussen de voorspelde situatie en de situatie afgeleid uit de gemeten concentraties hetzelfde resultaat bij de toetsing.

Tabel 4.16. Gemeten en berekende concentraties gechloreerde ethenen bij de sanering in Zwijndrecht en de daaruit afgeleide situatie op basis van de toetsing

Component	Type concentratie	MRL	Berekende concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Voorspelde situatie	Gemeten concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Situatie op basis van meetwaarde
Trichlooretheen	Gemiddeld (25 m)	200	13,3	1	4,9	1
Trichlooretheen	Gemiddeld (70 m)	200	2,0	1	1,2	1
Trichlooretheen	99,7-perc (20 m)	10950	624	1	426	1
1,2-cis-dichlooretheen	99,7-perc (20 m)	4040	391	1	212	1
Vinylchloride	Gemiddeld (25 m)	3,6	86,3	3	n.g. ¹⁾	–
Vinylchloride	92-perc (20 m)	78	424	3	170	3
Vinylchloride	99,7-perc (20 m)	1302	3100	3	305	2

¹⁾ n.g. = niet gemeten

4.3.9 Sanering Grave

Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties

In Grave heeft het Bureau Milieumetingen van de provincie Noord Brabant bijna dagelijks 6-uurs gemiddelde concentraties tetrachlooretheen, trichlooretheen, 1,2-cis-dichlooretheen en vinylchloride bepaald op 4 locaties rondom het saneringsterrein. Verder zijn op twee verder weg gelegen plaatsen referentiemetingen uitgevoerd en zijn in vier woningen rondom het terrein concentraties van dezelfde stoffen gemeten in de binnenlucht. De bemonsteringsperioden van de binnenluchtmetingen bedroegen 24, 36 of 72 uur.

Naast de metingen met actief koolbuizen zijn dagelijks momentane metingen verricht aan de rand van de werkput, met behulp van een GC-MS. Tevens werd in en op de rand van de put met een draagbare PID/FID de concentratie totaal koolwaterstoffen gemonitord. In het rapport van het Bureau Milieumetingen zijn echter geen resultaten van de GC-MS en PID metingen opgenomen. In het rapport wordt vermeld dat de GC-MS en PID metingen “geen aantoonbare resultaten hebben opgeleverd”, wat wordt toegelicht met de

mededeling dat er “geen onaanvaardbare overschrijdingen van normen (signaalwaarden respectievelijk MAC-waarden) heeft plaatsgevonden”. Voor de validatie zijn daarom alleen de resultaten van de metingen met actief koolbuizen gebruikt. De meetresultaten zijn vermeld in Tabel 4.17, naast de met DIVOCOS berekende waarden.

De meetgegevens zijn als volgt verwerkt. De dagelijks gemeten 6-uurs gemiddelde concentraties op de 4 meetpunten rondom het saneringsterrein zijn gemiddeld. Deze waarden worden beschouwd als de gemiddelde concentraties over de hele sanering. De werkelijke gemiddelde concentraties tijdens de sanering zijn waarschijnlijk lager dan deze waarden, omdat er alleen op werkdagen is gemeten en de uitdamping aan vluchtige stoffen op andere tijden ('s nachts en in het weekend) lager is dan tijdens het ontgraven. De gemiddelde gemeten concentraties worden in Tabel 4.17 vergeleken met de met DIVOCOS berekende concentraties voor een afstand van 10 m. Dat is ongeveer de gemiddelde afstand van de meetpunten tot de werkput. Tussen haakjes zijn de voor de achtergrondwaarde gecorrigeerde gemiddelde meetwaarden vermeld.

In de tabel zijn ook de gemiddelde concentraties van de binnenluchtmetingen gegeven. Deze meetpunten lagen iets verder van de werkput af dan die in de buitenlucht. De concentraties in de binnenlucht zijn lager dan die in de buitenlucht, maar daarbij speelt mee dat in de binnenlucht vrijwel continu is gemeten en in de buitenlucht alleen tijdens werkuren. Qua orde van grootte liggen de waarden in de binnenlucht en buitenlucht op hetzelfde niveau. De resultaten van de binnenluchtmetingen worden niet gebruikt voor de validatie, omdat DIVOCOS uitgaat van verspreidingsgedrag in de buitenlucht. Dit gedrag wijkt wezenlijk af van verspreiding in de binnenlucht.

In de rijen die zijn aangeduid met 92-percentiel, zijn in de kolom met gemeten concentraties de hoogste 6-uursgemiddelde concentraties, gemiddeld over alle vier de meetpunten in de buitenlucht, vermeld. Deze waarden staan statistisch gezien ongeveer op één lijn met het 92-percentiel over de saneringsperiode en worden daarom vergeleken met de met DIVOCOS berekende 92-percentielen, ook voor een afstand van 10 m. Ten slotte zijn de berekende 99,7-percentielen vergeleken met de hoogste 6-uursgemiddelde concentraties op één van de vier meetpunten in de buitenlucht. Deze vergelijking gaat statistisch gezien niet helemaal op; het 99,7-percentiel over de saneringsperiode komt eerder overeen met de hoogste uurgemiddelde concentratie. De vergelijking moet dus als indicatief worden beschouwd.

Het zij nog vermeld dat op grond van de resultaten van de metingen met de actief koolbuizen verwacht zou worden dat met de GC-MS regelmatig hoge concentraties zouden zijn gemeten. Voor tetrachlooretheen bijvoorbeeld bedraagt de hoogste 6-uursgemiddelde concentratie $1320 \mu\text{g m}^{-3}$. De hoogste uurgemiddelde concentratie op deze werkdag is dan mogelijk 2000 tot $3000 \mu\text{g m}^{-3}$ geweest en misschien nog iets hoger. In het rapport van het Bureau Milieumetingen is helaas niet vermeld wat de detectielimiet van de gebruikte GC-MS was.

In de rechterkolom van Tabel 4.17 zijn de verhoudingen van gemeten tot berekende concentraties vermeld, waarbij voor de gemiddelde concentraties is uitgegaan van de voor de achtergrondwaarde gecorrigeerde concentratie in de buitenlucht.

Tabel 4.17. Gemeten en berekende concentraties gechloreerde ethenen en de verhouding daartussen bij de sanering in Grave

Component	Type concentratie	Berekend ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Gemeten buiten ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Gemeten binnen ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Verhouding
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (10 m)	30,4	185 (184)	61,4	6,1
Trichlooretheen	Gemiddeld (10 m)	4,4	5,7 (5,4)	1,9	1,2
1,2-cis-dichlooretheen	Gemiddeld (10 m)	9,8	7,3 (7,2)	1,4	0,7
Vinylchloride	Gemiddeld (10 m)	12	3,3 (3,2)	0,9	0,3
Tetrachlooretheen	92-perc (10 m)	96,9	465	231	4,8
Trichlooretheen	92-perc (10 m)	13,9	18,8	3,8	1,4
1,2-cis-dichlooretheen	92-perc (10 m)	31,1	27,5	2,4	0,9
Vinylchloride	92-perc (10 m)	38,3	15,5	2,8	0,4
Tetrachlooretheen	99,7-perc (10 m)	601	1320		2,2
Trichlooretheen	99,7-perc (10 m)	87	46		0,5
1,2-cis-dichlooretheen	99,7-perc (10 m)	193	64		0,3
Vinylchloride	99,7-perc (10 m)	238	28		0,1

Uit de vergelijking blijkt dat de gemeten concentraties tetrachlooretheen systematisch hoger zijn dan de berekende concentraties. Voor de gemiddelde concentraties bedraagt de overschatting een factor 6, al moet daarbij worden aangetekend dat de werkelijke overschatting waarschijnlijk lager uitvalt, omdat de concentratiemetingen alleen tijdens werkuren plaatsvonden. Ook voor het 99,7-percentiel is de berekende concentratie te laag, te meer daar de vermelde gemeten concentratie de hoogste 6-uursgemiddelde waarde is terwijl eigenlijk uitgegaan zou moeten zijn van de hoogste uurgemiddelde waarde. Gesteld kan worden dat bij deze sanering DIVOCOS systematisch te lage concentraties tetrachlooretheen heeft berekend.

De berekende concentraties trichlooretheen komen wel redelijk overeen met de gemeten waarden, zeker als de eerder genoemde kanttekeningen – de gemeten gemiddelde concentratie is alleen bepaald tijdens werkuren en het gemeten 99,7-percentiel is gelijkgesteld aan de hoogste 6-uursgemiddelde waarde in plaats van de hoogste uurgemiddelde waarde – in ogenschouw worden genomen. Voor 1,2-cis-dichlooretheen en vinylchloride zijn de berekende concentraties systematisch te hoog ten opzichte van de gemeten waarden. Voor vinylchloride bedraagt het verschil een factor 2,5 tot 10, al is de laatstgenoemde waarde te hoog omdat de hoogste 6-uursgemiddelde waarde statistisch niet helemaal vergelijkbaar is met het berekende 99,7-percentiel.

Bij deze sanering kan geconcludeerd worden dat naarmate een component vluchtiger is de met DIVOCOS voorspelde waarden relatief gezien steeds hoger uitvallen. Voor de meest vluchtige component, namelijk vinylchloride, zijn de berekende concentraties duidelijk overschat en voor de minst vluchtige component, namelijk tetrachlooretheen, zijn de berekende concentraties aanzienlijk onderschat. Overigens kan bij deze onderschatting ook mee hebben gespeeld dat het gehalte aan tetrachlooretheen in de

meest verontreinigde monsters zo hoog was, dat in de bodemlucht daaromheen de verzadigde dampspanning werd bereikt.

In paragraaf 3.3.11 is aangegeven dat vanwege het zeer beperkte aantal gegevens over het organische stofgehalte extra berekeningen met DIVOCOS zijn gedaan, waarbij is gerekend met een organisch stofgehalte van 4% in plaats van 1%. Als wordt uitgegaan van een organisch stofgehalte van 4% worden de berekende concentraties 2 tot 3 maal hoger dan de in Tabel 4.17 vermelde waarden, voor elk van de vier gechloroerde ethenen. Voor tetrachlooretheen wordt de overeenkomst tussen gemeten en berekende concentraties dan beter, maar voor de andere componenten juist niet. De geconstateerde discrepantie tussen gemeten en berekende concentraties is dus niet toe te schrijven aan een “onjuist” organisch stofgehalte.

Validatie op basis van de toetsingscriteria

Voor elke groep meetwaarden zijn de berekende en gemeten concentraties gedeeld door de bijbehorende MRL waarde, waarna op grond van het berekende quotiënt de bijbehorende situatie uit paragraaf 4.2.1 is afgeleid. De resultaten zijn gegeven in Tabel 4.18, samen met de berekende en gemeten concentraties en de MRL waarde. Uit de tabel blijkt dat de voorspelde situatie niet altijd overeenkomt met de situatie afgeleid uit de gemeten concentratie. Er zijn afwijkingen voor de gemiddelde concentraties tetrachlooretheen en vinylchloride en voor het 92-percentiel voor vinylchloride. Voor tetrachlooretheen zou de voorspelde situatie wel overeenkomen, als was uitgegaan van een organisch stofgehalte van 4%, maar voor vinylchloride wordt het verschil dan alleen maar groter.

Het uitgevoerde meetplan was gebaseerd op de voorspelling dat voor vinylchloride een overschrijding van de chronische MRL werd voorspeld. Daarnaast werd in een aantal gevallen een concentratie berekend die ongeveer een factor 2 onder de bijbehorende MRL lag (situatie 2). Op grond hiervan is besloten een uitgebreid meetplan uit te voeren. Uit de metingen is gebleken dat voor vinylchloride geen overschrijdingen van de MRL waarden zijn geconstateerd. Daarentegen zijn er wel hoge concentraties tetrachlooretheen gemeten. De gemiddelde concentratie lag niet ver beneden de chronische MRL en de hoogste 6-uursgemiddelde concentratie was ongeveer gelijk aan de acute MRL. Vreemd genoeg zijn met de GC-MS “geen onaanvaardbare overschrijdingen van normen (signaalwaarden) gevonden”. Helaas is in het rapport van het Bureau Milieumetingen de detectielimiet van de GC-MS niet vermeld.

Tabel 4.18. Gemeten en berekende concentraties gechloreerde ethenen bij de sanering in Grave en de daaruit afgeleide situatie op basis van de toetsing

Component	Type concentratie	MRL	Berekende concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Voorspelde situatie	Gemeten concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Situatie op basis van meetwaarde
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (10 m)	250	30,4	1	184	2
Trichlooretheen	Gemiddeld (10 m)	200	4,4	1	5,4	1
1,2-cis-dichlooretheen	Gemiddeld (10 m)	30	9,8	2	7,2	2
Vinylchloride	Gemiddeld (10 m)	3,6	12	3	3,2	2
Tetrachlooretheen	92-perc (10 m)	n.v. ¹⁾	96,9	–	465	–
Trichlooretheen	92-perc (10 m)	548	13,9	1	18,8	1
1,2-cis-dichlooretheen	92-perc (10 m)	1212	31,1	1	27,5	1
Vinylchloride	92-perc (10 m)	78	38,3	2	15,5	1
Tetrachlooretheen	99,7-perc (10 m)	1382	601	2	1320	2
Trichlooretheen	99,7-perc (10 m)	10950	87	1	46	1
1,2-cis-dichlooretheen	99,7-perc (10 m)	4040	193	1	64	1
Vinylchloride	99,7-perc (10 m)	1302	238	1	28	1

¹⁾ n.v. = niet vastgesteld

4.3.10 Sanering Zwolle

Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties

In Zwolle zijn tijdens de sanering van het terrein Dellen-Wuijts op 4 locaties drie series metingen verricht met passieve samplers over een totale looptijd van ruim 2 maanden. Daarnaast zijn op twee werkdagen metingen gedaan met behulp van actief koolbuisjes. Verder zijn gedurende de hele sanering tweemaal daags metingen verricht met Dräger buisjes, maar deze hebben een zodanige onnauwkeurigheid dat ze niet geschikt zijn voor de validatie. Er is gemeten op tetrachlooretheen, trichlooretheen en cis-1,2-dichlooretheen. Omdat de medisch milieukundige van de GGD alleen DIVOCOS berekeningen heeft gedaan voor tetrachlooretheen – de reden daarvoor was dat de gehalten van deze component in de bodem en het grondwater veel hoger waren dan die van de andere gechloreerde ethenen – zullen we bij de validatie alleen de meetwaarden voor tetrachlooretheen gebruiken. Deze meetresultaten zijn weergegeven in Tabel 4.19, naast de met DIVOCOS berekende waarden.

Voor de verwerking van de meetgegevens is onderscheid gemaakt in twee groepen locaties. De eerste groep passieve samplers (meetpunten 1 en 2) lag op 15 tot 20 m van de verontreinigingskern, de tweede groep (meetpunten 3 en 4) aan de rand van het terrein, op enkele meters van de verontreinigingskern. Voor beide groepen zijn eerst de gemiddelde concentraties van elke meetserie berekend, waarna de waarden van de afzonderlijke series weer zijn gemiddeld om, per groep, de gemiddelde concentratie over de hele saneringsperiode te krijgen. Deze gemiddelden zijn vermeld in Tabel 4.19 in de kolom met gemeten concentraties. Tussen haakjes staat in deze kolom de gemiddelde

gemeten concentratie na correctie voor de achtergrondwaarde in buitenlucht, dat wil zeggen de aanwezige concentratie zonder invloed van de sanering. De met DIVOCOS uitgerekende concentraties zijn berekend een afstand van 20 m (eerste groep) en 10 m (tweede groep). De samplers uit de tweede groep lagen weliswaar op minder dan 10 m van de verontreinigingskern, maar DIVOCOS berekent geen waarden voor afstanden kleiner dan 10 m.

Verder zijn de hoogste waarden van de afzonderlijke series (voor beide groepen betrof dit de derde serie met een meetperiode van 6 dagen) vergeleken met de met DIVOCOS berekende 92-percentielen. Statistisch gezien liggen deze waarden ongeveer op één lijn¹⁵. De metingen met de actief koolbuisjes zijn alle uitgevoerd aan de rand van het terrein, op enkele meters van de verontreinigingskern. Van deze metingen is de hoogste waarde (gemiddeld over de twee meetlocaties), gemeten op 16 september, vermeld in Tabel 4.19. Deze waarde wordt vergeleken met het berekende 99,7-percentiel voor een afstand van 10 m. Ook hiervoor geldt dat de gemeten waarde, een gemiddelde concentratie over 6 uur, statistisch gezien ongeveer op één lijn ligt met het 99,7-percentiel van de sanerings-periode (een periode van 68 dagen).

Opmerking: ongeveer halverwege de sanering is op advies van de GGD overgestapt van het ontgraven in lagen naar het ontgraven in kolommen, omdat volgens de berekeningen met DIVOCOS de emissies daardoor zouden afnemen. De in Tabel 4.19 gegeven berekende concentraties zijn tijdsgewogen gemiddelden van berekende waarden volgens beide werkwijzen.

Tabel 4.19. Gemeten en berekende concentraties tetrachlooretheen en de verhouding daartussen bij de sanering in Zwolle

Component	Type concentratie	Berekend ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Gemeten ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Verhouding
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (20 m)	38	41,1 (40,6)	1,1
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (10 m)	147	611,5 (611)	4,2
Tetrachlooretheen	92-percentiel (20 m)	120	84,8	0,7
Tetrachlooretheen	92-percentiel (10 m)	469	1403	3,0
Tetrachlooretheen	99,7-percentiel (10 m)	3081	5565	1,8

In de rechterkolom zijn de verhoudingen van gemeten tot berekende concentraties vermeld. Voor de verhouding van gemiddelde concentraties is uitgegaan van de voor de achtergrondwaarde gecorrigeerde concentratie. Dit geeft een betere vergelijking, omdat bij de berekeningen met DIVOCOS ook geen rekening wordt gehouden met deze

¹⁵ Bedoeld wordt dat het 92-percentiel van waarden over een periode van 68 dagen – de periode waarin de sanering plaatsvond – overeenkomt met de waarde die gedurende 8% van de tijd, oftewel 5,4 dagen, wordt overschreden. Omdat in de 6 dagen waarin de laatste serie zijn gedaan de hoogste concentraties voorkwamen, is de gemiddelde concentratie over deze 6 dagen op één lijn gesteld met het 92-percentiel. Uiteraard is dit slechts een benadering.

achtergrondwaarden. Voor de 92- en de 99,7-percentielen is geen correctie gedaan, omdat de bijdrage van de achtergrond hieraan verwaarloosbaar klein is.

De vergelijking laat zien dat de met DIVOCOS berekende gemiddelde concentraties en 92-percentielen voor de eerste groep (afstand 20 m) redelijk overeenkomen met de gemeten concentraties. Voor de tweede groep (10 m) liggen de gemeten waarden duidelijk boven de berekende concentraties, waarschijnlijk omdat de afstand van de meetpunten tot de verontreinigingskern korter was dan de 10 m, waarmee is gerekend.

Validatie op basis van de toetsingscriteria

Voor de gemiddelden en het 99,7-percentiel – er is geen intermediate MRL voor tetrachlooretheen vastgesteld, zodat geen toetsing op het 92-percentiel mogelijk is – zijn de berekende en gemeten concentraties gedeeld door de bijbehorende MRL waarde, waarna op grond van het berekende quotiënt de bijbehorende situatie uit paragraaf 4.2.1 is afgeleid. De resultaten zijn gegeven in Tabel 4.20. Uit de tabel blijkt dat op één uitzondering na de voorspelde situatie overeenkomt met de situatie afgeleid uit de gemeten concentratie. Met name op basis van het berekende 99,7-percentiel op 10 m is destijds besloten een uitgebreid meetprogramma in te stellen. Achteraf gezien is dat, gelet op de hoge gemeten concentraties, terecht gebleken. In die zin heeft de voorspelling met DIVOCOS tot de juiste keuze geleid.

Tabel 4.20. Gemeten en berekende concentraties tri, per en cis en de daaruit afgeleide situatie op basis van de toetsing

Component	Type concentratie	MRL	Berekende concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Voorspelde situatie	Gemeten concentratie ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Situatie op basis van meetwaarde
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (20 m)	250	38	1	41,1	1
Tetrachlooretheen	Gemiddeld (10 m)	250	147	2	611,5	3
Tetrachlooretheen	99,7-perc (10 m)	1382	3081	3	5565	3

4.4 Bespreking overall resultaten

In deze paragraaf zullen we de algemene resultaten van de vergelijkingen uit de voorafgaande paragraaf bespreken. In navolging van de indeling in paragraaf 4.3 zullen we ook in deze paragraaf eerst ingaan op de gemeten en berekende concentraties en daarna op de resultaten bij toepassing van de toetsingscriteria, waarbij de centrale vraag is: “Leiden de berekeningen met DIVOCOS tot een juiste inschatting van de risico’s, op grond waarvan een eventueel meetplan wordt opgesteld?”. Tenslotte zullen enkele aanvullende zaken worden besproken.

4.4.1 Validatie op basis van gemeten en berekende concentraties

Allereerst bespreken we de vijf saneringen van de met BTEX vervuilde locaties (Enschede, Bergen op Zoom, Groningen, Gorinchem en Zaltbommel). Uit de gemaakte vergelijkingen blijkt dat de met het model DIVOCOS berekende concentraties veelal redelijk tot goed overeenkomen met de gemeten concentraties. De verschillen zijn, enkele uitzonderingen daargelaten, kleiner dan een factor 3 of, voor lage concentraties, minder dan $1 \mu\text{g m}^{-3}$. Gemiddelde concentraties worden beter voorspeld dan percentielen van uurgemiddelde concentraties, hetgeen is te verwachten op grond van statistische overwegingen.

In enkele gevallen weken de berekende concentraties wel duidelijk af van de gemeten waarden. In Bergen op Zoom werden lage concentraties ethylbenzeen gemeten, ruim onder de berekende waarden. Onduidelijk is of de oorzaak hiervan moet worden gezocht in de gegevens over de verontreiniging of in de gebruikte meetmethoden. In theorie zouden de fysisch-chemische parameters – in het bijzonder de vluchtigheid en oplosbaarheid – waar DIVOCOS mee rekent, onjuist kunnen zijn geweest. Echter, voor toluen en xylenen waren de voorspelde waarden wel goed en de vluchtigheid en oplosbaarheid van ethylbenzeen liggen tussen die van toluen en xylenen in. Bovendien werden in Zaltbommel juist hogere concentraties ethylbenzeen gemeten dan berekend (alleen voor het 99,7-percentiel) en werd daar voor xylenen het omgekeerde gevonden, terwijl de gemeten en berekende concentraties benzeen en toluen goed overeenkwamen, zowel de gemiddelden als de 99,7-percentielen.

Bij de sanering in Groningen lagen de met DIVOCOS berekende concentraties benzeen boven de gemeten waarden. Voor de berekeningen is uit een grote hoeveelheid gegevens in de rapporten van de verrichte bodemonderzoeken een beperkte selectie gemaakt van gehalten in bodem en grondwater, gemeten op locaties verspreid over het terrein. Mogelijk zijn door deze selectie de hoge gehalten aan benzeen in de totale verontreiniging te zwaar meegewogen, waardoor de berekende concentraties overschat zijn. Bij de andere onderzochte saneringen (Enschede, Bergen op Zoom, Gorinchem en Zaltbommel) waren de resultaten voor benzeen wel goed.

Bij de andere vijf saneringen bestond de verontreiniging voornamelijk uit één of meer gechloreerde ethenen.

Voor tetrachlooretheen zijn de gemeten concentraties in het algemeen ongeveer even hoog als de berekende waarden. Uitzonderingen hierop vormen de saneringen in Grave en Zwolle, waar in beide gevallen hogere concentraties werden gemeten, maar deze verschillen waren gedeeltelijk te verklaren. In Grave vonden de concentratiemetingen alleen plaats tijdens werkuren, waardoor de gemiddelde concentraties waarschijnlijk overschat zijn. In Zwolle waren de berekeningen verricht voor een afstand van 10 m, terwijl de metingen op enkele meters plaatsvonden. Ook kan mee hebben gespeeld dat het gehalte aan tetrachlooretheen in de meest verontreinigde monsters zo hoog was, dat in de bodemlucht daaromheen de verzadigde dampspanning werd bereikt, waardoor de berekende emissie en concentraties te laag uitvallen. Dit effect speelt echter niet alleen

een rol bij de saneringen in Grave en Zwolle, maar ook in Epe en Tiel, waar eveneens zeer hoge gehalten tetrachlooretheen in bodem en grondwater zijn gevonden en waar de gemeten en berekende concentraties wel overeenkwamen.

De berekende concentraties trichlooretheen lagen veelal boven de gemeten waarden. Het verschil varieerde van “ongeveer even hoog” (bij de sanering in Tiel) tot een factor 5 à 10 (bij de sanering in Epe). Bij de andere saneringen was het verschil beperkt tot een factor 2. In Epe kan de grote variatie in het organisch stofgehalte (0,1% tot 80%) een rol hebben gespeeld bij de gevonden afwijkingen; bij de berekeningen is uitgegaan van het gemiddelde organisch stofgehalte (18%). Ook de sterk inhomogene verdeling van de verontreiniging kan hebben bijgedragen tot de gevonden verschillen.

De berekende concentraties 1,2-cis-dichlooretheen en vinylchloride lagen in alle gevallen boven de gemeten waarden. De verschillen varieerden van een factor 2 tot meer dan een factor 10. De grootste afwijking werd gevonden in Tiel, waar op grond van de gehalten in de bodem en het grondwater relatief hoge concentraties 1,2-cis-dichlooretheen werden verwacht, in ieder geval hoger dan voor trichlooretheen. De meetresultaten wezen echter anders uit (zie Tabel 4.13).

Bij de sanering in Grave is onderzocht of het organisch stofgehalte enig effect had op de berekende concentraties. Hieruit bleek dat voor elk van de vier gechloreerde ethenen 2 tot 3 maal hogere concentraties werden berekend bij een organisch stofgehalte van 4% in plaats van 1%. Hiermee kunnen de gevonden verschillen tussen de vier gechloreerde ethenen dus niet worden verklaard.

Het lijkt er op dat voor de onderzochte stoffen (BTEX en de vier gechloreerde ethenen) de met DIVOCOS voorspelde waarden te hoog uitvallen naarmate een component vluchtiger is. Voor de meest vluchtige componenten, namelijk vinylchloride (dampspanning: 229.863 Pa) en 1,2-cis-dichlooretheen (dampspanning: 15.461 Pa), zijn consequent overschatte concentraties berekend, terwijl voor de andere componenten (met dampspanningen van ongeveer 400 tot 6000 Pa) geen systematische over- of onderschatting is gevonden. Echter, op grond van deze beperkte analyse kan niet worden vastgesteld of het model *altijd* systematisch te hoge concentraties voorspelt voor componenten met een hoge dampdruk. Ook andere eigenschappen – zoals de oplosbaarheid, de halfwaardetijd van de stof in de bodem en de partiticoëfficiënt tussen de organische fase en de waterfase (K_{oc}) – of een combinatie daarvan zouden een rol kunnen spelen bij de afwijkingen. Verder kan op grond van deze analyse niet worden beoordeeld of de afwijkingen mogelijk een gevolg zijn van onjuiste waarden van de eigenschappen¹⁶ of van aannames in het model.

Omdat DIVOCOS rekent met meerjarige meteorologische gegevens, zou verwacht kunnen worden dat berekende concentraties beter overeenkomen met gemeten waarden,

¹⁶ De gekozen waarden van de eigenschappen zijn weliswaar gebaseerd op een zorgvuldige gewogen middeling van gegevens afkomstig uit diverse databanken en handboeken, maar deze gegevens vertonen veelal een grote spreiding.

naarmate een sanering langer duurt. Immers, bij kortdurende saneringen kunnen de meteorologische omstandigheden sterk afwijken van de jaargemiddelden. Bij de hier bestudeerde saneringen blijkt echter geen verband te zijn tussen de duur van de sanering en het resultaat van de vergelijking. Bij zowel de langste sanering (Groningen) als de kortste (Enschede) werden geen grote afwijkingen tussen berekende en gemeten concentraties geconstateerd, terwijl bij enkele saneringen van middellange duur (2 tot 3 maanden) wel verschillen zijn gevonden. We hebben overigens geen gedetailleerde analyse gemaakt van de meteorologische omstandigheden bij elke sanering om na te gaan of eventuele afwijkingen daarin van invloed zijn geweest op de verschillen tussen berekende en gemeten concentraties.

Samengevat kunnen we concluderen dat het model in de meeste gevallen de concentraties BTEX in de omgeving *qua orde van grootte* goed voorspelt. Voor de groep gechloreerde ethenen lijken de voorspelde waarden sterker af te wijken van de gemeten concentraties, naarmate de component vluchtiger is. Voor tetrachlooretheen en trichlooretheen zijn de gevonden verschillen meestal beperkt, maar voor 1,2-cis-dichlooretheen en vinylchloride bedragen de verschillen een factor 2 tot meer dan een factor 10.

Bij toepassing van het model op saneringen waar veel gegevens over de verontreiniging zijn, zoals in Groningen, *kan* een eventuele selectie van gehalten in bodem en grondwater van invloed zijn op de berekende concentraties. Een gebruiker van het model dient bij voorkeur een zo representatief mogelijk selectie van beschikbare gegevens over de verontreiniging in de berekening te verwerken. In paragraaf 3.4.4 en Bijlage 7 van het “protocol risico’s blootstelling bij bodemsanering” wordt dit met enkele voorbeelden toegelicht.

Zoals te verwachten valt worden de gemiddelde concentraties tijdens de saneringsperiode over het algemeen beter voorspeld dan de percentielen van uurgemiddelde concentraties.

4.4.2 Validatie op basis van de toetsingscriteria

Bij vier van de tien onderzochte saneringen kwam in alle gevallen de voorspelde situatie overeen met de situatie afgeleid uit de gemeten concentratie. In al deze gevallen bestond de verontreiniging uit BTEX en andere koolwaterstoffen.

Bij vijf van de onderzochte saneringen week één voorspelling af van de situatie afgeleid uit de gemeten concentratie. In de meeste gevallen ging het om 99,7-percentielen waarvoor men statistisch gezien de grootste afwijkingen zou verwachten. Veelal betrof de afwijking een te hoog voorspelde concentratie vinylchloride of een te laag voorspelde concentratie tetrachlooretheen. In twee gevallen was de afwijking duidelijk verklaarbaar. In Zwijndrecht werd met DIVOCOS voor het 99,7-percentiel van vinylchloride situatie 3 voorspeld, terwijl de metingen uitkwamen op situatie 2. De reden voor het verschil was dat de beide waarden statistisch gezien niet helemaal vergelijkbaar waren. In Zwolle bleek de gemiddelde concentratie tetrachlooretheen op korte afstand op een ernstiger situatie (namelijk 3) te wijzen dan aanvankelijk berekend (situatie 2). De reden hiervoor

was dat de metingen op enkele meters van de verontreinigingskern zijn gedaan, terwijl concentraties zijn berekend voor een afstand van 10 m. DIVOCOS berekent namelijk geen concentraties voor afstanden korter dan 10 m.

Bij één sanering, namelijk die in Grave, zijn drie afwijkingen gevonden van voorspelde situaties, namelijk voor de gemiddelde concentraties tetrachlooretheen (voorspelling te laag) en vinylchloride (voorspelling te hoog) en voor het 92-percentiel voor vinylchloride (voorspelling te hoog).

Het belangrijkste doel van de berekeningen met DIVOCOS is te bepalen of het al dan niet nodig is om vanwege de bewaking van de luchtkwaliteit tijdens een sanering concentraties in de leefomgeving te meten. Voor dit doel is het van belang te analyseren hoe vaak een te laag risico werd voorspeld. Anders gezegd, hoe vaak gaf een berekening met DIVOCOS aan dat er geen of een beperkt meetprogramma nodig was, terwijl er tijdens de sanering toch hoge concentraties zijn gemeten. Men zou dit een “vals-negatief” meetadvies kunnen noemen. Vanuit de visie dat men blootstelling aan te hoge concentraties zo veel mogelijk wil voorkomen, is het van belang dat “vals-negatieve” meetadviezen zo weinig mogelijk voorkomen. De omgekeerde situatie, een “vals-positief” meetadvies, komt ook voor, maar voor het voorkomen van blootstelling aan te hoge concentraties is dat van minder belang. Wel worden in die gevallen onnodig kosten gemaakt om metingen te doen.

Om te analyseren hoe vaak een afwijkende situatie werd voorspeld hebben we een overzichtstabel gemaakt, waarin voor alle berekeningen uit paragraaf 4.3 per risicoklasse (1, 2 of 3) is aangegeven hoe vaak de voorspelde situatie overeenkomt met dan wel afwijkt van de situatie afgeleid uit de gemeten concentratie. De resultaten staan in Tabel 4.21.

Tabel 4.21. Overzicht van de aantallen correct voorspelde en afwijkend voorspelde situaties ten opzichte van de gemeten situaties.

Gemeten situatie	1	2	3
Voorspelde situatie			
1	50	1	0
2	3	6	2
3	0	2	4

Uit de tabel is af te lezen dat in 60 van de 68 gevallen (88%) de voorspelde situatie overeenkomt met de gemeten situatie (groen gekleurde vakjes). Overigens vallen 50 van de 60 correct voorspelde situaties in de laagste risicoklasse.

Daarnaast zou in 5 gevallen (7,4%) uit de berekening een “vals-positief” meetadvies volgen (geel gekleurde vakjes) en in 3 gevallen (4,4%) een “vals-negatief” meetadvies (rood gekleurde vakjes). De “vals-negatieve” meetadviezen betreffen alle drie de

component tetrachlooretheen, de “vals-positieve” meetadviezen betreffen vinylchloride (drie keer), tetrachlooretheen (één keer) en benzeen (één keer).

Een percentage van 4,4% “vals-negatieve” meetadviezen kan acceptabel worden genoemd, al zou het aantal bij voorkeur 0 moeten bedragen. Echter, een meetadvies bij een sanering wordt meestal niet vastgesteld op grond van de berekening voor één stof, maar voor meerdere stoffen en ook voor zowel gemiddelde concentraties als percentielen. Hieronder zullen we voor elk van de 10 onderzochte saneringen kort bespreken op grond van welke berekeningsresultaten met DIVOCOS een meetplan is bedacht en welke afwegingen nog meer een rol hebben gespeeld bij die keuze.

Bij de saneringen in Groningen en Gorinchem is op grond van de lage voorspelde concentraties gekozen voor een beperkt meetprogramma. Men had er op basis van de berekende waarden ook voor kunnen kiezen geen metingen te doen – achteraf is gebleken dat de gemeten concentraties ruim onder de grenswaarden lagen – maar uit voorzorg is toch voor beperkt meten gekozen.

In Zaltbommel en Epe gaven de berekeningen aan: minimaal een beperkt meetplan en eventueel een uitgebreid meetplan. In beide gevallen zijn naast de beperkte metingen gedurende de hele sanering ook uitgebreide metingen gedaan op enkele dagen, namelijk de dagen dat de grootste verontreiniging werd afgegraven. De meetresultaten geven aan dat dit een juiste strategie was.

Ook in Zwijndrecht en Zwolle is gekozen voor een uitgebreid meetplan, in deze gevallen omdat de berekeningen met DIVOCOS voor minimaal één stof een overschrijding van een grenswaarde voorspelden. Tijdens de metingen zijn die overschrijdingen ook daadwerkelijk waargenomen.

Bij de sanering in Grave is eveneens gekozen voor een uitgebreid meetplan, gebaseerd op het feit dat voor vinylchloride een overschrijding van de chronische MRL werd voorspeld. De metingen gaven voor vinylchloride geen overschrijdingen van de MRL waarden te zien, maar er zijn wel hoge concentraties tetrachlooretheen gemeten. De keuze voor een uitgebreid meetplan was achteraf gezien terecht, maar gebaseerd op “de verkeerde stof”.

De saneringen in Enschede, Bergen op Zoom en Tiel zijn gedaan, toen DIVOCOS niet of nog maar net was ontwikkeld. De uitgevoerde meetprogramma's waren niet gebaseerd op de resultaten van modelberekeningen, maar achteraf kan worden gesteld dat ook bij deze saneringen de gekozen meetstrategie gerechtvaardigd was, gelet op de gevonden concentraties. Alleen in Bergen op Zoom was het uitgevoerde meetplan intensiever dan nodig volgens de berekeningen met DIVOCOS. Echter, bij de keuze voor het meetplan hebben ook andere argumenten (verwachte stankoverlast; woningen direct aan de rand van het saneringsterrein) een rol gespeeld.

Samengevat kan worden vastgesteld dat in nagenoeg alle doorgerekende gevallen de juiste keuze is gemaakt ten aanzien van het meetprogramma.

4.4.3 Overige bevindingen

Met de gegevens uit de tien geselecteerde saneringen hebben we het model voor slechts een beperkt aantal componenten kunnen valideren, namelijk benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen, vinylchloride, 1,2-cis-dichlooretheen, trichlooretheen en tetrachlooretheen.

In Groningen zijn ook berekeningen en metingen gedaan op fenol, naftaleen en vluchtige niet-gechloreerde aromatische verbindingen. Voor fenol en naftaleen kwamen de berekende en gemeten concentraties, en daardoor ook de voorspelde situatie en de situatie afgeleid uit de meetwaarden, overeen. De concentraties waren echter zeer laag, zodat voor deze stoffen geen uitspraak kan worden gedaan over de voorspellende kracht van DIVOCOS bij hogere concentraties. Bovendien is dit resultaat gebaseerd op gegevens van slechts één sanering. De berekende en gemeten concentraties vluchtige niet-gechloreerde aromatische verbindingen konden niet worden vergeleken, omdat de samenstelling van de groep VOC's waarop is gemeten niet overeenkomt met die in DIVOCOS.

Bij enkele van de geselecteerde saneringen zijn ook metingen verricht op andere VOC's, veelal omdat die deel uitmaken van het totale analysepakket waartoe ook BTEX en de gechloreerde ethenen behoren. De resultaten van deze metingen zijn niet meegenomen in deze validatie, omdat ofwel

- er geen of onvoldoende stof-specifieke gegevens beschikbaar waren van de gehalten van deze componenten in bodem en grondwater;
- de verontreiniging uit andere componenten bestond (bijvoorbeeld alleen tetrachlooretheen zoals in Zwolle);
- de gemeten concentraties VOC's niet of nauwelijks boven de achtergrondwaarden in de buitenlucht lagen.

Alles bij elkaar waren er te weinig bruikbare gegevens om het model voor andere VOC's te kunnen valideren.

Op grond van dit onderzoek kunnen we vaststellen dat het model DIVOCOS bruikbaar is voor de stoffen benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen, vinylchloride, 1,2-cis-dichlooretheen, trichlooretheen en tetrachlooretheen. Dit zijn de stoffen die verreweg het meest voorkomen bij bodem- en grondwaterverontreinigingen in Nederland.

Naar verwachting zal het model ook bruikbaar zijn voor stoffen, waarvan de fysisch-chemische eigenschappen in dezelfde range liggen als die van BTEX en de gechloreerde ethenen (voorbeelden van die stoffen zijn cyclohexaan, 1,1,1-trichloorethaan, alkanen met 6 tot 12 koolstofatomen en ethylacetaat), maar op grond van deze validatiestudie is deze uitspraak onvoldoende hard te maken. Voor stoffen waarvan de fysisch-chemische eigenschappen sterk afwijken van die van de in deze studie onderzochte componenten, is het model (nog) niet gevalideerd.

Om vast te stellen in hoeverre het noodzakelijk is om DIVOCOS ook voor andere stoffen te valideren zou de volgende aanpak kunnen worden gehanteerd. Op dit moment wordt door VROM, de provincies en gemeenten een landsdekkende inventarisatie gemaakt van

alle bodemverontreinigingssituaties in Nederland. Op grond van ervaringscijfers wordt geschat dat ongeveer 60.000 verontreinigde locaties gesaneerd moeten worden. Aan de hand van het overzicht van de te saneren locaties, waarbij vooral gekeken moet worden naar de aard van de verontreiniging voor elke locatie, kan worden geschat op hoeveel te saneren locaties DIVOCOS “gevalideerd” kan worden toegepast¹⁷ en op hoeveel locaties niet. Van de laatste groep locaties kan worden onderzocht of bepaalde stoffen relatief vaak voorkomen en dan vooral stoffen met andere eigenschappen (dampdruk, oplosbaarheid, halfwaardetijd in de bodem en partiticoëfficiënt tussen de organische fase en de waterfase) dan de in deze studie onderzochte componenten. Voor deze stoffen kan eventueel een aanvullende validatiestudie worden uitgevoerd met gegevens uit saneringen waarin deze stoffen voorkomen.

Aangezien het niet haalbaar is het model voor alle stoffen te valideren, is het van belang een verantwoorde keuze te maken. Hiertoe zou een criterium gesteld kunnen worden, bijvoorbeeld een minimaal gewenst percentage locaties, waarbij DIVOCOS “gevalideerd” moet kunnen worden toegepast.

¹⁷ Bedoeld worden de locaties die verontreinigd zijn met de in deze studie onderzochte componenten. Hierbij kan men denken aan voormalige chemische wasserijen, gasfabrieken en autosloperijen.

5. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

1. Voor de meeste van de in deze studie onderzochte stoffen, namelijk benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen, trichlooretheen en tetrachlooretheen, berekent het model DIVOCOS concentraties in de leefomgeving van een sanering die *qua orde van grootte* goed overeenkomen met gemeten waarden. Gemiddelde concentraties worden over het algemeen beter voorspeld dan percentielen van uurgemiddelde concentraties.
2. Voor vinylchloride en 1,2-cis-dichlooretheen vallen de met DIVOCOS berekende concentraties hoger uit dan de gemeten waarden. Van de onderzochte stoffen hebben deze twee componenten de hoogste dampdruk. Echter, op grond van de beperkte hoeveelheid data in deze studie kan niet worden vastgesteld of de afwijkingen zijn toe te schrijven aan de hoge dampdruk of dat ook andere factoren – bijvoorbeeld andere stoffeigenschappen of bepaalde aannames in het model – een rol spelen.
3. Bij één sanering, namelijk die in Groningen, is mogelijk een niet-representatieve selectie gemaakt van de uit de bodemonderzoeken beschikbare gegevens van gehalten in bodem en grondwater om de berekeningen uit te voeren. Hierdoor werden te hoge concentraties benzeen berekend. In dit geval werd de selectie overigens bemoeilijkt doordat er veel gegevens uit diverse bodemonderzoeken waren die over een lange periode en door verschillende instanties zijn uitgevoerd. Niettemin kan worden geconcludeerd dat een gebruiker van het model bij voorkeur een zo representatief mogelijke selectie uit de beschikbare gegevens over de verontreiniging in de berekening verwerkt. Dit is min of meer al voorgeschreven in het protocol.
4. Voor deze studie zijn 68 berekeningen met DIVOCOS gedaan. In 60 van deze gevallen (88%) kwam de voorspelde situatie overeen met de gemeten situatie. In vijf gevallen (7,4%) volgde uit de berekening een “vals-positief” meetadvies en in drie gevallen (4,4%) een “vals-negatief” meetadvies. De “vals-negatieve” meetadviezen betroffen tetrachlooretheen, de “vals-positieve” meetadviezen betroffen met name vinylchloride. Vanuit de visie dat men blootstelling aan te hoge concentraties zo veel mogelijk wil voorkomen, kan een percentage van 4,4% “vals-negatieve” meetadviezen acceptabel worden genoemd.
5. Bij vrijwel alle onderzochte saneringen is de juiste keuze gemaakt ten aanzien van het meetplan tijdens de sanering, het belangrijkste doel van de berekeningen met DIVOCOS. Soms is een intensiever meetprogramma uitgevoerd dan uit de metingen achteraf noodzakelijk bleek, maar veelal speelden daar andere redenen mee zoals verwachte stankoverlast, het feit dat enkele woningen direct aan de rand van het saneringsterrein lagen of een complexe omgeving.
6. In deze studie hebben we ons voornamelijk gericht op de stoffen benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen, vinylchloride, 1,2-cis-dichlooretheen, trichlooretheen en tetrachlooretheen. Deze stoffen komen verreweg het meest voor in bodem- en

grondwaterverontreinigingen in Nederland. Van andere stoffen waren te weinig gegevens beschikbaar om DIVOCOS te kunnen valideren.

Samengevat kan worden geconcludeerd dat het model DIVOCOS bruikbaar is voor het doel waarvoor het is ontworpen, namelijk het bepalen of en in welke vorm er tijdens de sanering een meetplan moet worden uitgevoerd om de luchtkwaliteit in de omgeving te bewaken en eventuele blootstellingsrisico's voor omwonenden te beperken. Dat geldt in ieder geval voor de onder conclusie 6 genoemde stoffen. Naar verwachting zal het model ook bruikbaar zijn voor stoffen, waarvan de fysisch-chemische eigenschappen in dezelfde range liggen als die van de onderzochte stoffen.

Aanbevelingen

1. Om vast te stellen in hoeverre het noodzakelijk is om DIVOCOS ook voor andere stoffen te valideren zou de volgende aanpak kunnen worden gehanteerd. Als eerste stap wordt op basis van de inventarisatie van alle bodemverontreinigingssituaties in Nederland wordt geschat bij hoeveel van deze locaties de verontreiniging bestaat uit (enkele van de) de stoffen waarvoor DIVOCOS nu is gevalideerd.
2. Daarnaast wordt een criterium vastgesteld, bijvoorbeeld een minimaal gewenst percentage locaties waarbij DIVOCOS gevalideerd moet kunnen worden toegepast, en wordt het resultaat van de eerste stap vergeleken met dit criterium.
3. Als het criterium niet wordt gehaald, wordt onderzocht welke andere stoffen relatief vaak voorkomen in bodemverontreinigingen in Nederland. Voor deze stoffen zou eventueel een aanvullende validatiestudie kunnen worden uitgevoerd met gegevens uit saneringen waarin deze stoffen voorkomen. Daarbij is het gewenst om vooral stoffen te kiezen met andere eigenschappen (dampdruk, oplosbaarheid, halfwaardetijd in de bodem en partiticoëfficiënt tussen de organische fase en de waterfase) dan de in deze studie onderzochte componenten.

Literatuur

- Beck J., Breugel P. van, Buijsman E., Diederer H., Noordijk E., Ruiters J. de, Tromp J., Velders G., Velze K. van en Hammingh P. (2002) Jaaroverzicht luchtkwaliteit 2001. Rapport nr. 725301009, RIVM, Bilthoven.
- Brederode N.E. van (2004) GGD-richtlijn Gezondheidsrisico's voor omgeving bij bodemsanering. GGD Nederland, Rotterdam.
- Breugel P. van, Diederer H., Hammingh P., Jimmink B., Kamst A., Noordijk E., Swaan P., Velders G., en Velze K. van (2002) Jaaroverzicht luchtkwaliteit 2000. Rapport nr. 725301008, RIVM, Bilthoven.
- Broekman M.H. en Mennen M.G. (2001) Eindrapportage metingen Ciboga-terrein. Briefrapport RIVM/IEM 447/01. RIVM, Bilthoven.
- Broekman M.H. en van Putten E.M. (2001) Eindverslag van de immissiemetingen van gechloreerde ethenen tijdens de sanering van het voormalig Tomadoterrein te Zwijndrecht. Briefrapport RIVM/IEM 601/01. RIVM, Bilthoven.
- Broekman M.H., Putten E.M. van, Fortezza F. en Mennen M.G. (2001) Eindrapportage van de immissiemetingen van gechloreerde ethenen tijdens de sanering van het terrein aan de Achterste Molenweg te Epe. Briefrapport RIVM/IEM 390/01. RIVM, Bilthoven.
- Buijsman E. (2004) Jaaroverzicht luchtkwaliteit 2002. Rapport nr. 500037004, RIVM, Bilthoven.
- Cruts G.L.A. (1996) Nader bodemonderzoek in de omgeving van de Hamstraat 22 te Grave. Rapport nr. L323.95, CSO adviesbureau voor milieuonderzoek, Meerssen.
- Cruts G.L.A. (1997) Saneringsonderzoek in de omgeving van de Hamstraat 22 te Grave. Rapport nr. R196.96, CSO adviesbureau voor milieuonderzoek, Meerssen.
- Elderman R. (1996) Nader bodemonderzoek op een locatie aan de Perikweg 14 te Enschede. Rapport nr. 332153. Tebodin BV, Hengelo.
- Gemeentewerken Rotterdam (2000) Saneringsplan voormalig Tomadoterrein. Rapport nummer 2000-0703. Gemeentewerken Rotterdam.
- Heidemij (1996) Milieukundig bodemonderzoek tankstation aan de Oliestraat 50-54 te Zaltbommel. Rapport nr. 684/OE96/2399/70513/SvL. Heidemij Advies, Deventer.
- IGN (1998) Saneringsplan bodemsanering voormalig tankstation Oliestraat 50-54 te Zaltbommel. Rapport nr. MH 97.2728, IGN, Rotterdam.
- Jans H.W.A. (1999) Sanering Noordzijde Haven Bergen op Zoom. Briefrapport HJ/MvD/MMK99-u60. Provinciaal Bureau Medische Milieukunde voor Noord Brabant en Zeeland, Breda.
- Knol-de Vos T. (1998) Luchtmetingen tijdens een bodemsanering in Enschede, Perikweg, 5 en 25 mei 1998. Briefrapport 527/98 IEM/TK. RIVM, Bilthoven.
- Marinussen M.P.J.C. (1998) Verslag van bodemonderzoek naar bodemverontreiniging in de gemeente Tiel. Rapport nr. 3362450\002, Iwaco BV Zuid, 's Hertogenbosch.
- Mennen M.G. (2002) Resultaten van metingen door de Milieuongevallendienst bij branden. Rapport nr. 609100002, RIVM, Bilthoven.

- Mennen M.G., Freijer J.I., Delmaar J.E. en Janssen P.C.J.M. (2004) Protocol risico's blootstelling bij bodemsanering, versie 2, februari 2004. RIVM, Bilthoven.
- Mennen M.G., Knol-de Vos T., Fortezza F., Groenemeijer G., Zwartjes R.J.W. en Wammes J. IJ. (2000) Verslag van de luchtmetingen van benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen tijdens de uitvoering van een bodemsanering in Zaltbommel. Briefrapport RIVM/IEM 052/00. RIVM, Bilthoven.
- Mennen M.G., Putten E.M. van en Krystek P. (2004) Immissie-, gewas- en depositie-onderzoek in de omgeving van Van Voorden gieterij BV te Zaltbommel. Rapport nr. 609021027, RIVM, Bilthoven.
- Remmits J.G.M. (1997) Saneringsplan locatie Noordzijde Haven te Bergen op Zoom. Rapport nr. R3577465.T01/SLI. Tauw Milieu BV, Deventer.
- RIVM (1998) Verslag van de luchtmetingen van gechloreerde ethenen op het voormalig RIO terrein te Tiel. Briefrapport RIVM/IEM 884/98. RIVM, Bilthoven.
- Snijders P. (2001) Onderzoek bodemkwaliteit en stucwerk Eierveiling Havendijk 74c te Gorinchem. Rapport nr. GOR/CD2001/82/2013120, Tukkers Milieu Onderzoek BV, 's Hertogenbosch.
- Stolk A.P. (2002) Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit. Meetresultaten 2000. Delen 1 t/m 4. Rapporten nrs. 723101062, 723101063, 723101064 en 723101065. RIVM, Bilthoven.
- Tauw (1998) Verslag van onderzoek naar bodemverontreiniging in de gemeente Epe. Rapport nr. R3719316/IKO/DO2, Tauw Milieu BV, Deventer.
- Tauw (1991) Nader onderzoek Fase I tot en met III. Eindrapport Noordzijde Haven Bergen op Zoom. Rapport nr. R3144305.P01/RJS, Tauw Infra Consult BV, Deventer.
- Tauw (1992) Nader bodemonderzoek Fase IV en haalbaarheidsonderzoek in-situ reiniging Noordzijde Haven Bergen op Zoom. Rapport nr. R3197026.Q01/MSO, Tauw Infra Consult BV, Deventer.
- TMO (2001) Plan van aanpak sanering Eierveiling te Gorinchem. Rapport nr. GOR/CD2001/40/2013120, Tukkers Milieu Onderzoek BV, 's Hertogenbosch.
- Van Loon J. (2002) Emissie/immissieonderzoek Grave. Emissie/immissieonderzoek in Grave als aanvulling op het monitorings/veiligheidsplan van de uitgevoerde sanering aan de Hamstraat in maart/april 2002. Rapport nr. 01-257-L-O, Provincie Noord Brabant, 's Hertogenbosch.
- Van Putten E.M., Mennen M.G., Zwartjes R.J.W. en Bloemen H.J.Th. (2001) Verslag van resultaten van VOC metingen met samplers tijdens de uitvoering van een bodemsanering in Gorinchem. Briefrapport RIVM/IEM 238/01. RIVM, Bilthoven.
- Van de Weerd D.H.J. en Ass M. van (2003) Uitdamping van chloorkoolwaterstoffen tijdens de grondsanering "Dellen Wuijts". GGD Regio IJssel-Vecht, Zwolle.
- Van de Weerd D.H.J. en Köhne J. (1998) Bodemsanering aan de Perikweg te Enschede – Uitdamping van vluchtige organische verbindingen en bescherming van omwonenden. GGD Regio Twente, Enschede.
- VROM (1999) Stoffen en normen. Overzicht van belangrijke stoffen en normen in het milieubeleid. Samson, Alphen aan den Rijn. VROM, Den Haag.

Bijlage 1: Beschrijving van het model DIVOCOS

Deze modelbeschrijving omvat de uitwerking van een tweetal analytische oplossingen van de algemene differentiaalvergelijking voor ééndimensionaal transport van een vluchtige stof door een poreus medium. Tevens is er aandacht voor de in het model gebruikte parameterwaarden, in het bijzonder de diffusiecoëfficiënt van stoffen. De oplossingen worden gebruikt in het computermodel DIVOCOS voor de berekening van emissies van vluchtige stoffen uit vervuilde grond tijdens saneringswerkzaamheden.

B1.1 Inleiding

DIVOCOS (DIspersion of VOlatile COntaminantS) is een rekenmodel dat op basis van gemeten concentraties van vluchtige stoffen in de bodem een schatting maakt van de emissies tijdens een bodemsanering. Het model veronderstelt een continue afgraving en afvoer van grond waarbij vluchtige stoffen kunnen vrijkomen in de atmosfeer. Daarbij worden de volgende emissieroutes uit de grond naar de atmosfeer onderscheiden:

1. Emissie van de stof uit nog niet afgegraven grond
2. Emissie uit de werkput
3. Emissie tijdens de overslag van de grond
4. Emissie tijdens opslag van de grond op het terrein (b.v. in een dieplader)

Deze emissies worden in DIVOCOS uitgerekend m.b.v. een tweetal analytische oplossingen van de transportvergelijking voor stoffen in poreuze media (Carslaw and Jaeger, 1959; Crank, 1975). De keuze van de basisdifferentiaalvergelijking en de gebruikte randvoorwaarden bij de oplossing hangen sterk samen met de aard van de routes. Zo is er bij de emissie van de vluchtige stoffen uit de in situ grond (routes 1 en 2) sprake van verticaal transport als gevolg van de concentratiegradiënt tussen atmosfeer en bodem en verticale advectiestromen (met percolerend regenwater en luchtdruk en temperatuur gerelateerde gasbeweging). Bij de overslag en opslag van grond is er sprake van een volume grond dat geheel of deels omgeven is door atmosferische lucht. De emissies zullen hier vooral plaatsvinden via radiaal transport uit de kern van de pakketten grond, waar de concentraties hoog zijn naar hun contactoppervlak met de atmosfeer, alwaar de concentratie laag is.

Deze bijlage is als volgt opgebouwd. In paragraaf B1.2 wordt toegelicht hoe de algemene massabalans van een vluchtige stof in een ééndimensionaal poreus medium er uitziet, en hoe de differentiaalvergelijking eruit komt te zien voor diverse geometrieën. Vervolgens wordt in paragraaf B1.3 de oplossing besproken die gebruikt wordt in DIVOCOS voor emissie tijdens overslag en opslag van grond. In de volgende paragraaf wordt de oplossing uitgewerkt die de emissies uit nog niet afgegraven grond en uit de put benadert.

Tenslotte wordt in de paragrafen B1.5 t/m B1.7 toegelicht hoe het model de Henry coëfficiënt en de diffusiecoëfficiënt berekent, en welke default waarden worden gebruikt voor modelparameters.

B1.2 Algemene massabalans in een poreus medium

In principe zijn massabalans problemen driedimensionaal van aard, maar vanwege de symmetrie is de systemen beperken we ons tot één dimensie. We beschouwen een homogeen ééndimensionaal poreus medium bestaande uit N fasen, waarvan de volumefracties en transport eigenschappen constant zijn. In dit medium bevindt zich een vluchtige stof. De verdeling van de stof over de fasen is volgens een evenwichtverdeling. Verspreiding van de stof langs de plaatscoördinaat in het medium wordt bepaald door afbraak- en transportprocessen (diffusie, dispersie, en advectie). De massabalans van een vluchtige stof in dit medium wordt beschreven door de volgende differentiaal vergelijking:

$$A(z) \sum_{i=1}^N \frac{\partial(\varepsilon_i C_i(z,t))}{\partial t} = - \sum_{i=1}^N \frac{\partial(A(z) f_i(z))}{\partial z} - \sum_{i=1}^N A(z) k_i \varepsilon_i C_i(z,t) \quad (1)$$

waarin transport en afbraak van de vluchtige stof zorgen voor dynamische verandering van de massa in z . Een verklaring van de symbolen wordt gegeven in Appendix A. De fluxdichtheid f_i op elke afstand z is de som van diffusie, dispersie en advectief transport:

$$f_i = -D_i \varepsilon_i \frac{\partial C_i}{\partial z} + v_i \varepsilon_i C_i \quad (2)$$

De gecombineerde diffusie/dispersie coëfficiënt is de som van diffusie en dispersie:

$$D_i = \kappa_i D_{0i} + \alpha_i |v_i| \quad (3)$$

waarin κ_i een factor is die de barrière van de bodem matrix representeert en α_i een dispersielengte. De functie $A(z)$ geeft het oppervlak weer dat wordt gepasseerd als functie van de afstand langs de transportas. De massabalans kan bij bekende geometrie (cartesisch, cilindrisch, en sferisch) verder worden gespecificeerd:

Cartesisch

De oppervlakte-afstand relatie tussen twee grote gelijke vlakken is gegeven als

$$A(z) = C \quad (4)$$

zodat (1) geschreven kan worden als

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial(\varepsilon_i C_i)}{\partial t} = - \sum_{i=1}^N \frac{\partial(f_i(z))}{\partial z} - \sum_{i=1}^N k_i \varepsilon_i C_i \quad (5)$$

Combinatie van (5) en (2) geeft:

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial(\varepsilon_i C_i)}{\partial t} = \sum_{i=1}^N D_i \varepsilon_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - \sum_{i=1}^N v_i \varepsilon_i \frac{\partial C_i}{\partial z} - \sum_{i=1}^N k_i \varepsilon_i C_i \quad (6)$$

Cilindrisch

In dit geval wordt de plaatscoördinaat als r genoteerd i.p.v. z . De oppervlakte-afstand relatie voor een cilinder is gegeven als

$$A(r) = \pi r \quad (7)$$

waarin r de plaatscoördinaat op radiale afstandsas is, zodat de massabalans geschreven kan worden als:

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial(\varepsilon_i C_i)}{\partial t} = \sum_{i=1}^N D_i \varepsilon_i \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) - \sum_{i=1}^N v_i \varepsilon_i \frac{1}{r} \frac{\partial(r C_i)}{\partial r} - \sum_{i=1}^N k_i \varepsilon_i C_i \quad (8)$$

Sferisch

In dit geval wordt de plaatscoördinaat als r genoteerd i.p.v. z . De oppervlakte-afstand relatie voor een bol is gegeven als

$$A(r) = 4\pi r^2 \quad (9)$$

waarin r de plaatscoördinaat op radiale afstandsas is, zodat de massabalans geschreven kan worden als

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial(\varepsilon_i C_i)}{\partial t} = \sum_{i=1}^N D_i \varepsilon_i \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) - \sum_{i=1}^N v_i \varepsilon_i \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2 C_i)}{\partial r} - \sum_{i=1}^N k_i \varepsilon_i C_i \quad (10)$$

B1.3 Emissie tijdens grondverzet

Bij grondverzet door een graafmachine of door een dieplader is er sprake van emissie van vluchtige stoffen uit een eindige hoeveelheid grond, waarvan de buitenkant in contact is met de vrije atmosfeer. Als gevolg van concentratieverschillen tussen de vrije atmosfeer, waar de concentratie van de stof laag is en de grond, waar de concentratie hoog is zal er diffusie optreden naar het contactoppervlak. Het diffusief transport van een vluchtige component in een dergelijk volume grond wordt vooral bepaald door de transportweerstand en de bergingscapaciteit over de afstand van de kern tot het oppervlak van dit volume. Dit radiale transport kan benaderd worden door het transport in een bolvormig ééndimensionaal systeem, zoals beschreven in (10). Als wordt aangenomen dat de afbraakterm klein is ten opzichte van de transportterm en dat advectieve beweging van de component in gas en water niet op zullen treden tijdens grondverzet, dan versimpelt (10) tot:

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial(\varepsilon_i C_i)}{\partial t} = \sum_{i=1}^N D_i \varepsilon_i \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) \quad (11)$$

Door toepassing van de productregel krijgen we:

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial(\varepsilon_i C_i)}{\partial t} = \sum_{i=1}^N D_i \varepsilon_i \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial r^2}{\partial r} \frac{\partial C_i}{\partial r} + r^2 \frac{\partial^2 C_i}{\partial r^2} \right) \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{\partial(\varepsilon_i C_i)}{\partial t} = \sum_{i=1}^N D_i \varepsilon_i \left(\frac{2}{r} \frac{\partial C_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 C_i}{\partial r^2} \right) \quad (13)$$

Vergelijking (13) is de klassieke differentiaalvergelijking voor diffusie in een bol (Crank, 1975).

De totale flux dichtheid f op elke plek op de bolstraal is in bovenstaande formulering de som van de Fickiaanse diffusiefluxen door de verschillende fasen:

$$f = \sum_{i=1}^N -D_i \varepsilon_i \frac{\partial C_i}{\partial r} \quad (14)$$

Stel dat er 3 fasen zijn, de gasfase (bodemplucht), de vloeistoffase (poriewater) en de vaste fase (droge grond). Alleen door de gas en de vloeistoffase kan transport plaatsvinden. Dan kunnen we de concentraties in die fasen bijvoorbeeld relateren volgens een lineair partitiemodel (Jury, 1990)

$$C_l = \frac{1}{K_H} C_g \quad (15)$$

$$C_s = K_d C_l \quad (16)$$

en dus

$$C_s = \frac{K_d}{K_H} C_g \quad (17)$$

Voorts wordt de totale concentratie gevormd door de som van alle concentraties gewogen naar de volume of massa fractie:

$$C_T = \frac{\rho_b C_s + \varepsilon_g C_g + \varepsilon_l C_l}{\rho_b} \quad (18)$$

waarbij de totaalconcentratie en de concentratie in de droge grond zijn uitgedrukt per massa grond i.p.v. volume grond.

Combinatie van (13) met (15) t/m (18) geeft de volgende differentiaalvergelijking voor de concentratie in de gasfase:

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} = \frac{De}{R} \left(\frac{\partial^2 C_g}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_g}{\partial r} \right) \quad (19)$$

waarin de effectieve diffusiecoëfficiënt D_e gelijk is aan:

$$D_e = D_g \varepsilon_g + \frac{D_l \varepsilon_l}{K_H} \quad (20)$$

en de retardatiefactor R gelijk is aan:

$$R = \frac{1}{K_H} \varepsilon_l + \varepsilon_g + \rho_b \frac{K_d}{K_H} \quad (21)$$

Let op dat in (20) aangenomen wordt dat de diffusie door de vaste fase verwaarloosbaar wordt geacht.

Concentratie in de bol

De differentiaalvergelijking (19) kan opgelost worden voor C_g als randvoorwaarden en initiële conditie bekend zijn. Aangenomen wordt dat binnen de bol de concentratie van de componenten per volume-eenheid bij het begin van het afgraven homogeen verdeeld is:

$$C_g = C_{g0} \quad 0 < r < a \quad t = 0 \quad (22)$$

en dus met behulp van (18):

$$C_{g0} = \frac{C_{T0} \rho_b}{\rho_b K_d / K_H + \varepsilon_g + \varepsilon_l / K_H} \quad (23)$$

Voorts zal de concentratie in de omgevende buitenlucht relatief constant zijn t.o.v. die in de grond zodat:

$$C_g = C_a \quad r = a \quad t \geq 0 \quad (24)$$

Vanwege de bolsymmetrie geldt in het centrum van de bol:

$$\frac{\partial C_g}{\partial r} = 0 \quad r = 0 \quad t \geq 0 \quad (25)$$

De oplossing van bovenstaande differentiaalvergelijking voor een eindig domein gebeurt in het Laplace domein. Transformatie van (19) en oplossing in het Laplace domein geeft:

$$\tilde{C} = \frac{a}{r} \frac{C_a - C_{g0}}{p} \frac{\sinh(-\sqrt{Rp/D_e} r)}{\sinh(-\sqrt{Rp/D_e} a)} + \frac{C_{g0}}{p} \quad (26)$$

Terugtransformatie kan op verschillende manieren gebeuren. Expressie in partiële fracties (Crank, 1975) geeft als oplossing:

$$\frac{C_g - C_{g0}}{C_a - C_{g0}} = 1 + \frac{2a}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin \frac{n\pi r}{a} \exp(-D_e n^2 \pi^2 t / Ra^2) \quad (27)$$

Deze oplossing is alleen bruikbaar voor grote waarden van t , i.v.m. convergentie van de oneindige serie.

Door het binomiaal theorema te gebruiken ontstaat de volgende oplossing (Crank, 1975)

$$\frac{C_g - C_{g0}}{Ca - C_{g0}} = \frac{a}{r} \sum \left\{ \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)a - r}{2\sqrt{D_e t / R}} - \operatorname{erfc} \frac{(2n+1)a + r}{2\sqrt{D_e t / R}} \right\} \quad (28)$$

Deze oplossing is vooral bruikbaar bij kleine waarden van t , i.v.m. convergentie van de oneindige serie.

Emissie

We zijn vooral geïnteresseerd in het transport van de vluchtige componenten uit de bol aan het oppervlak binnen de tijd van graafwerkzaamheden (de totale emissie naar de buitenlucht). De relatieve massa verontreiniging die vanaf het begin tot een bepaald tijdstip is vervluchtigd kan worden berekend door de fluxdichtheid te integreren in de tijd en over het boloppervlak:

$$\frac{M_t}{M_0} = \frac{12\pi a^2}{4\rho_b \pi a^3 C_{T0}} \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (29)$$

waarin de massa die initieel aanwezig is in de bol berekend wordt volgens

$$M_0 = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_b C_{T0} \quad (30)$$

Gebruik makende van (27) krijgen we (Crank, 1975):

$$\frac{M_t}{M_0} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp(-D_e n^2 \pi^2 t / a^2 R) \quad (31)$$

Gebruik makende van (28) ontstaat (Crank, 1975):

$$\frac{M_t}{M_0} = 6 \left(\frac{D_e t}{Ra^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \pi^{-\frac{1}{2}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{ierfc} \frac{na}{\sqrt{D_e t / R}} \right\} - 3 \frac{D_e t}{Ra^2} \quad (32)$$

Het argument van de ierfc functie is voor het afgraven van grond altijd zeer groot, omdat we daarbij met relatief kleine tijden te maken hebben, en D_e vaak klein is terwijl R vaak groot is. Indien het argument van ierfc groter is dan 10.0, dan is de functiewaarde van ierfc nagenoeg 0.0, zodat:

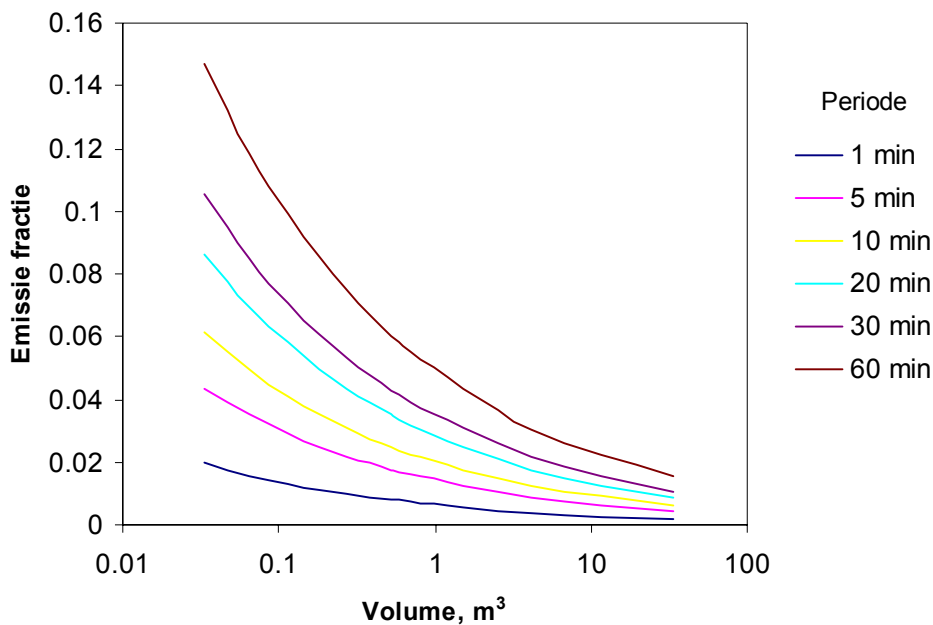
$$\frac{M_t}{M_0} = 6\pi^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{D_e t}{Ra^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 3 \frac{D_e t}{Ra^2}, \quad \text{als } \frac{a}{\sqrt{D_e t / R}} > 10.0 \quad (33)$$

In de praktijk van de bodemsanering wordt vrijwel altijd voldaan aan deze voorwaarde.

De gemiddelde emissiesnelheid over de periode $[0, t]$ volgt uit (33):

$$\bar{E}_m = \frac{M_t}{t} = M_0 6\pi^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{D_e t}{Ra^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 3M_0 \frac{D_e t}{Ra^2}, \quad \text{als } \frac{a}{\sqrt{D_e t / R}} > 10.0 \quad (34)$$

De belangrijkste parameters die gerelateerd zijn aan het grondverzet zijn a en t . De omvang van de pakketten grond die worden afgegraven en de tijd die daar voor nodig is bepalen in sterke mate hoeveel van de verontreiniging zal vrijkomen. In Figuur B1.1 is afgebeeld hoe de emissie samenhangt met de verwerkingstijd en het volume van de grond.

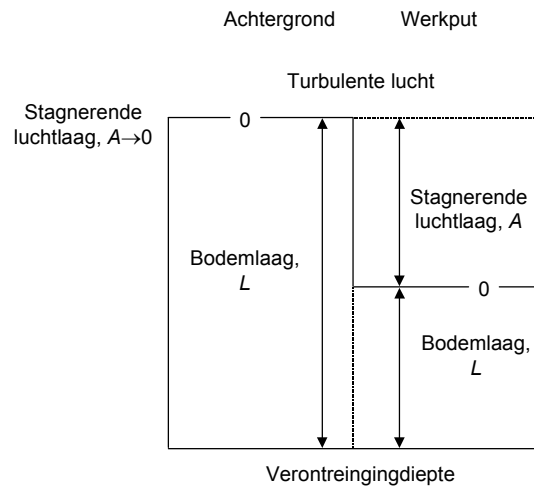


Figuur B1.1. De fractionele emissie tijdens grondverzet, bij verschillende volumes grond en gedurende verwerkingstijden van 1 tot 60 minuten. Overige parameterwaarden: $R=32.8$, $D_e=0.0645 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$. De verwerkingstijd tijdens overslag is over het algemeen 1-10 minuten, tijdelijke opslag op het terrein in een dieplader is ca 0.5-1 uur. Het volume is bij overslag 0.05-1.0 m^3 , bij opslag 5-10 m^3 .

B1.4 Emissie uit de in situ grond

De emissie uit de vervuilde grond voordat deze afgegraven is en emissie uit de werkput kunnen benaderd worden door 1 dimensionaal transport tussen twee vlakken: het eerste vlak is het vlak dat een bekende concentratie in de bodem kruist, het tweede vlak is het contactvlak tussen bodem en atmosfeer. Als dit contactvlak aan het oppervlak ligt, zoals het geval is voordat men gaat saneren, dan onderscheiden we een uiterst dun laagje van stagnerende lucht, waar geen turbulentie heerst, en dat als barrière optreedt tussen de goed gemengde vrije atmosfeer en de bodem. We nemen aan dat in de put die ontstaat na

het weggraven van vervuilde grond deze stagnerende luchtlaag reikt van het maaiveld niveau tot de bodem van de put (zie Figuur B1.2).



Figuur B1.2. Definitie van de bodemdikte L en de dikte van de stagnerende luchtlaag, A voor een ongestoorde verontreinigde bodem en een werkput. $L+A$ blijft constant.

Uitgaande van het 3-fase systeem dat in paragraaf 3 besproken is kunnen we voor het transport in de bodem (6) herschrijven in termen van concentraties in de gas fase:

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} = \frac{D_e}{R} \frac{\partial^2 C_g}{\partial z^2} - \frac{v_e}{R} \frac{\partial C_g}{\partial z} - k_T C_g \quad (35)$$

waarbij aangenomen wordt dat de afbraakconstante gelijk is voor elke fase:

$$k_T = \frac{\varepsilon_l}{K_H} k_l + \varepsilon_g k_g + \rho_b \frac{K_d}{K_H} k_s \quad (36)$$

De Halfwaardetijd van een stof is gerelateerd aan k_T als:

$$t_{50} = \ln(2) / k_T \quad (37)$$

Bij een sanering is de voorraad verontreiniging altijd zeer groot en de tijd waarin gesaneerd wordt kort, zodat de concentraties in bodem relatief weinig veranderen. We mogen daarom aannemen dat steady state transport benaderd wordt:

$$0 = D_e \frac{\partial^2 C_g}{\partial z^2} - v_e \frac{\partial C_g}{\partial z} - R k_T C_g \quad (38)$$

De expressie voor de fluxdichtheid is:

$$f = -D_e \frac{\partial C_g}{\partial z} + v_e C_g \quad (39)$$

waar

$$v_e = v_g \varepsilon_g + \frac{v_l \varepsilon_l}{K_H} \quad (40)$$

Concentratie

De differentiaalvergelijking (38) kan opgelost worden als randvoorwaarden bekend zijn. Aangenomen wordt dat aan het bodemoppervlak de emissie wordt beperkt door diffusie in het stagnerende luchtlaagje:

$$-D_e \frac{\partial C_g}{\partial z} + v_e C_g = D_{0g} \frac{C_a - C_g}{A} \quad z = 0 \quad (41)$$

Op een diepte L is de concentratie bekend zodat de randvoorwaarde als volgt luidt:

$$C_g = C_L \quad z = L \quad (42)$$

De algemene oplossing voor een differentiaalvergelijking met de vorm van (38) is:

$$C_g = C_1 \exp(\lambda_1 z) + C_2 \exp(\lambda_2 z) \quad (43)$$

Differentiëren levert:

$$\frac{dC_g}{dz} = \lambda_1 C_1 \exp(\lambda_1 z) + \lambda_2 C_2 \exp(\lambda_2 z) \quad (44)$$

waar:

$$\lambda_1 = \frac{v_e + \sqrt{v_e^2 + 4D_e k_T R}}{2D_e}, \quad \lambda_2 = \frac{v_e - \sqrt{v_e^2 + 4D_e k_T R}}{2D_e} \quad (45)$$

De integratieconstanten kunnen worden afgeleid uit de beschikbare randvoorwaarden.

Als $z=0$ dan geldt voor (39):

$$\frac{f}{v_e} = -\frac{D_e}{v_e} \frac{dC_g}{dz} + C_g(0) \quad (46)$$

en door gebruik te maken van (41) en (44):

$$\frac{1}{v_e} \frac{D_{0g} (C_a - C_g(0))}{A} = -\frac{D_e}{v_e} (\lambda_1 C_1 + \lambda_2 C_2) + C_g(0) \quad (47)$$

Door herschikking van (47) ontstaat:

$$C_1 = \frac{\alpha - \gamma C_2}{\beta} \quad (48)$$

waar:

$$\alpha = \frac{D_{0g} C_a}{D_e A} \quad (49)$$

$$\beta = -\lambda_1 + \frac{v_e}{D_e} \left(\frac{D_{0g}}{v_e A} + 1 \right) \quad (50)$$

$$\gamma = -\lambda_2 + \frac{v_e}{D_e} \left(\frac{D_{0g}}{v_e A} + 1 \right) \quad (51)$$

Bij $z=L$ kan voorts geschreven worden:

$$C_L = C_1 \exp(\lambda_1 L) + C_2 \exp(\lambda_2 L) \quad (52)$$

Combinatie van (48) en (52) levert:

$$C_2 = \frac{\alpha - \beta C_L \exp(-\lambda_1 L)}{\gamma - \beta \exp(\lambda_2 L - \lambda_1 L)} \quad (53)$$

en:

$$C_1 = \frac{\alpha - \gamma C_L \exp(-\lambda_2 L)}{\beta - \gamma \exp(\lambda_1 L - \lambda_2 L)} \quad (54)$$

Emissie

Een expressie voor de emissie volgt uit (39), (43) en (44). Voor de fluxdichtheid krijgen we:

$$f = (v_e C_1 - D_e \lambda_1 C_1) \exp(\lambda_1 z) + (v_e C_2 - D_e \lambda_2 C_2) \exp(\lambda_2 z) \quad (55)$$

Voor de emissie van een terrein met oppervlak S :

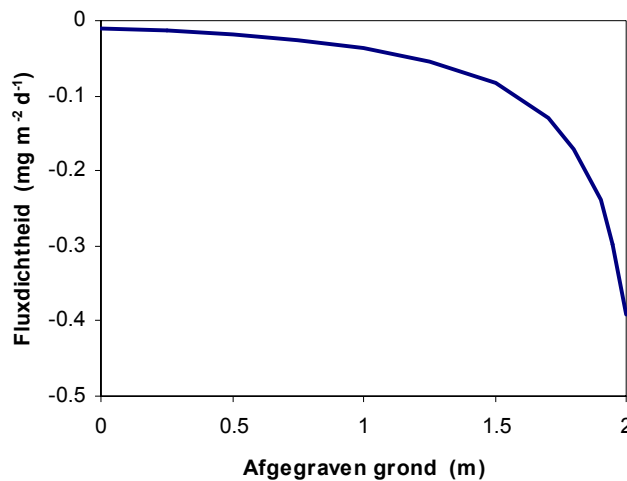
$$E_{in} = f S \quad (56)$$

De belangrijkste aan het grondverzet gerelateerde parameters zijn de afstand van de verontreiniging tot de bodem van de werkput en de dikte van de stagnerende luchtlaag in de put (zie Figuur B1.2). Naarmate het graven vordert wordt de laag tussen de bodem van de put en de verontreiniging kleiner. Echter, de stagnerende luchtlaag in de put wordt dikker. Netto is het resultaat van de tegengestelde invloeden dat de dikte van de laag tussen de bodem van de put en de verontreiniging dominant is, en de fluxdichtheid zal toenemen (zie Figuur B1.3). De mate van toename is natuurlijk afhankelijk van de effectieve diffusiecoëfficiënt van de vluchtige stof.

Vergelijking (55) wordt op verschillende manieren gebruikt in de berekening van de achtergrondemissie en de emissie uit de werkput. Voor de achtergrondemissie wordt de

concentratie op bekende diepte gebruikt om L en C_L te karakteriseren. Voor de dikte van de stagnerende luchtlaag, A , wordt aangenomen dat $A \rightarrow 0$.

De emissie uit de werkput noodzaakt een meer bewerkelijke methode. Op basis van de dikte van het af te graven pakket wordt vastgesteld hoe de fluxdichtheid zal veranderen bij het vorderen van de graafwerkzaamheden (zie b.v. figuur 3). Daarna wordt de gemiddelde fluxdichtheid berekend op basis van de integraal van fluxen over de afgegraven grond. De gemiddelde fluxdichtheid wordt tenslotte in combinatie met vergelijking (56) gebruikt bij de berekening van de emissie. Indien het afgegraven pakket dikker is dan de diepte L waarop de concentratie bekend is dan wordt aangenomen dat voor dieptes $> L$ de fluxdichtheid identiek is aan die bij het bereiken van L .



Figuur B1.3. De toename van de fluxdichtheid als functie van de dikte van het pakket reeds afgegraven grond (tot 2 m). Een negatieve teken van de flux wil zeggen dat deze naar boven gericht is, tegengesteld aan de plaatscoördinaat die de diepte weergeeft. Overige parameterwaarden $D_e=0.0645 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$, $R=32.8$.

B1.5 Verdelingscoëfficiënten

Het DIVOCOS model maakt gebruik van twee verdelingscoëfficiënten: de verdelingscoëfficiënt tussen water en lucht, K_H (Henry coëfficiënt) en de verdelingscoëfficiënt water/grond, K_d . Beide coëfficiënten passen in een beeld dat de contaminant lineair partitioneert tussen water, lucht en grond. Een dergelijk model wordt onbruikbaar bij hoge concentraties, omdat dan maximale oplosbaarheden en dampspanningen overschreden worden, zodat de pure contaminant als niet-gemengde fase aanwezig kan zijn.

De beide coëfficiënten zijn slechts bekend voor een beperkt aantal stof-bodem combinaties. Het is daarom noodzakelijk om ze af te leiden uit eenvoudig meetbare of

bekende grootheden. Uitgaande van lineaire partitionering kan de Henry coëfficiënt b.v. worden geschat uit de oplosbaarheid en de verzadigde dampspanning, die voor vrijwel alle stoffen bekend zijn:

$$K_H = \frac{P_v}{sRT} \quad (57)$$

waar R de universele gasconstante is ($R=8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$). De verzadigde dampspanning van een stof is afhankelijk van de temperatuur. Het volgende beschrijvende verband wordt toegepast (Sawyer en McCarty, 1989):

$$\frac{P_v}{p_v^*} = \exp(\alpha(T - T^*)) \quad (58)$$

waar $\alpha=0.041 \text{ K}^{-1}$, p_v de dampspanning bij temperatuur T , en p_v^* de dampspanning bij temperatuur T^* .

De water/grond partiticoëfficiënt voor organische contaminanten wordt vooral bepaald door het organische stofgehalte van de grond. Van veel contaminanten kan een schatting worden gemaakt van de partiticoëfficiënt voor water/organisch koolstof, K_{oc} . Als we voorts aannemen dat de fractie organisch materiaal zich verhoudt tot de fractie organisch koolstof als:

$$\frac{df_{om}}{df_{oc}} = \alpha \quad (59)$$

waar $\alpha=1.724$ (Chiou, 1989), dan geldt:

$$K_d = K_{oc} f_{om} \alpha \quad (60)$$

B1.6 Diffusiecoëfficiënten

Diffusiecoëfficiënten van stoffen in de media water en lucht zijn twee belangrijke invoergegevens in het model. Er is slechts van een beperkt aantal gassen en dampen exact bekend wat de diffusiecoëfficiënt is. Er kan echter op zowel empirische grond als fysische grond een goede beschrijving worden gegeven van de diffusiecoëfficiënt als functie van de molmassa van de moleculen. De volgende empirische relatie werd gevonden voor gasvormige stoffen in lucht:

$$D_{g0} = b(M_m / M_{ref})^c \quad (61)$$

waar b en c beide empirische parameters zijn ($b=0.20 \text{ m}^2 \text{ day}^{-1}$ en $c= -0.57$ bij $M_{ref}=1.0 \text{ kg mol}^{-1}$).

Een minder eenvoudige, maar fysische onderbouwde relatie kan ook worden afgeleid uit de Stokes-Einstein vergelijking (Stein, 1967; Allen en Raabe, 1985). De Stokes-Einstein

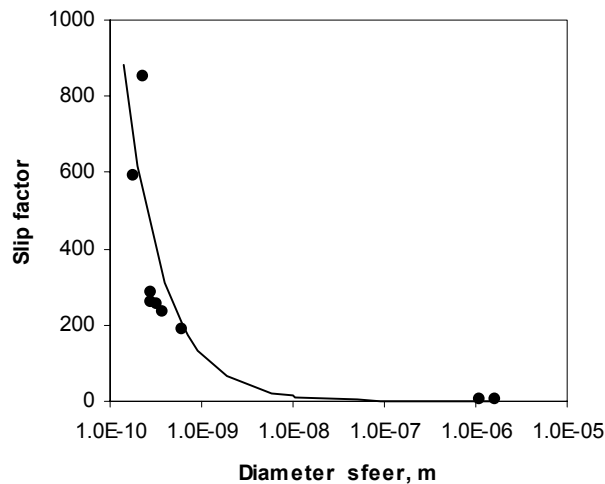
vergelijking geeft de diffusiecoëfficiënt van een Brown's sferisch deeltje in een vloeibaar of gasvormig medium:

$$D_{g0} = \frac{K_s kT}{6\pi r_B \mu} \quad (62)$$

waar de slip factor K_s een correctiefactor is voor het slip-effect. Dit effect behelst dat voor zeer kleine deeltjes de wrijvingskracht kleiner is dan voorspeld door de wet van Stokes (Allen and Raabe, 1985). Een benadering van de slip factor wordt gegeven volgens de Klinkenberg expressie (Thortenson en Pollock, 1989):

$$K_s = 1 + \frac{\gamma \lambda}{r_B} \quad (63)$$

waarin de slip correctiefactor wordt bepaald door de ratio van het vrije pad van moleculen en de radius van het molecuul en een proportionaliteitsfactor. Voor moleculen in een gasvormig mengsel zal de slipfactor groot zijn, voor moleculen in een vloeistof en grote deeltjes in gas benadert de slipfactor 1. Figuur B1.4 toont de relatie zoals afgeleid uit de molecuul radii, deeltjes diameters en gemeten diffusiecoëfficiënten van een aantal gassen. Diffusiecoëfficiënten in water zijn aanzienlijk lager dan die in lucht. Bij benadering bestaat er gemiddeld een factor 10000 verschil, waarvan een factor van ca 200 wordt veroorzaakt door verschillen in de Slip correctiefactor en een factor van ca 50 wordt veroorzaakt door verschil in viscositeit tussen lucht en water.

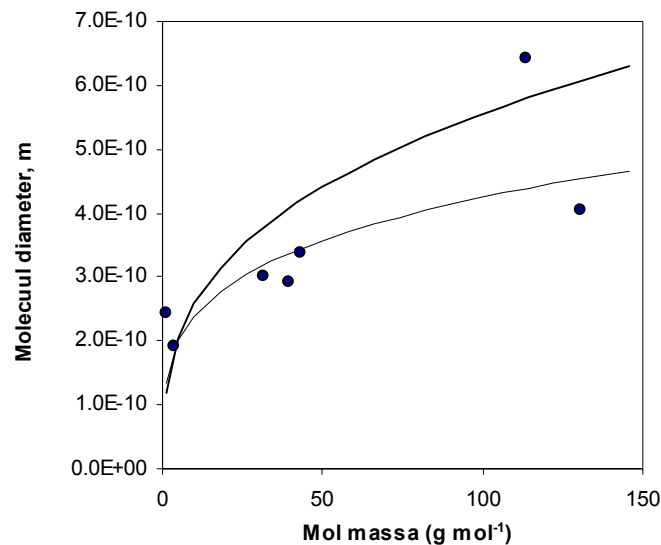


Figuur B1.4. Slip correctie factor voor deeltjes in lucht als functie van diameter. Observaties voor moleculen zijn ontleend aan Lide et al (1993) en voor deeltjes aan Allen en Raabe (1985).

Molecuuldiameters van stoffen zijn gerelateerd aan molecuulmassa's volgens (Stein, 1967):

$$r_B = r_{ref} (M_m / M_{ref})^p \quad (64)$$

De macht p wordt bepaald door de wijze waarop een molecuul ruimtelijk is opgebouwd. In Figuur B1.5 wordt duidelijk dat voor edelgassen $p=1/4$ en voor moleculen die samengesteld zijn uit lichte atomen (H, C, O, S, N) $p=1/3$ voor $r_{ref}=1.9 \cdot 10^{-10}$ m en $M_{ref}=4.0 \text{ g mol}^{-1}$. Door de vergelijkingen (62) tot en met (64) gezamenlijk te gebruiken kan op eenvoudige wijze op basis van fysische parameters de diffusiecoëfficiënt worden berekend. Tabel B1.1 geeft de parameterwaarden. Figuur B1.6 toont de overeenkomst tussen het empirisch gefitte en het op basis van de Stokes-Einstein voorspelde verband. Omdat geconcludeerd kan worden dat waarnemingen, theorie en de empirische beschrijving goed overeenkomen is besloten om in het DIVOCOS model het meest eenvoudige n.l. het empirische verband te gebruiken.



Figuur B1.5. Verband tussen molmassa en molecuul diameter. De dikke lijn representeert de relatie voor gassen en dampen samengesteld uit lichte atomen (C,H,O,S,N). De dunne lijn geeft het verband weer voor edelgassen. Observaties zijn ontleend aan Lide et al. (1993).

Vergelijking (62) laat zien dat de diffusiecoëfficiënt afhankelijk is van de temperatuur. Ook de viscositeit en het vrije pad van moleculen vertonen echter een afhankelijkheid van temperatuur. Een algemene temperatuurcorrectie voor de diffusiecoëfficiënt die alle effecten integreert volgens een empirisch verband luidt (Lugg, 1968; Bakker en Hidding, 1971):

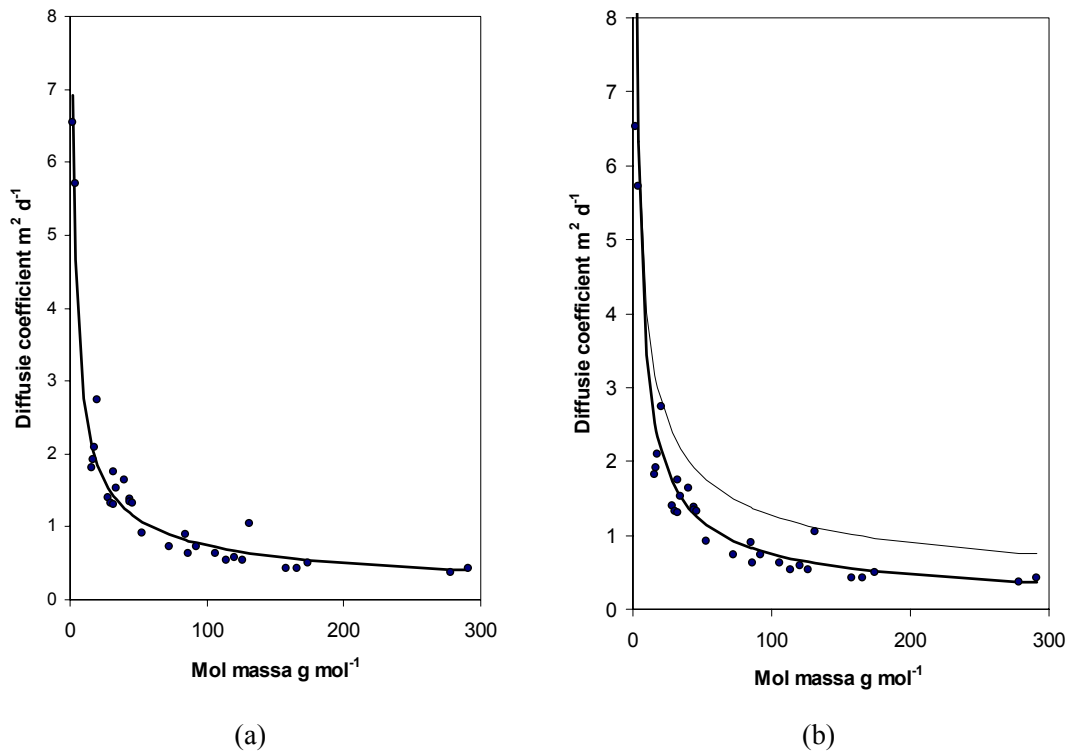
$$\frac{D_{0g}}{D_{0g}^*} = (T/T^*)^\alpha \quad (65)$$

waarin $\alpha=1.75$, D_{0g} de diffusiecoëfficiënt bij temperatuur T (K), en D_{0g}^* de diffusiecoëfficiënt bij temperatuur T^* (K).

Tabel B1.1. Parameterwaarden voor de berekening van de diffusiecoëfficiënt.

Symbol	Betekenis	Waarde	Eenheden
k	Boltzmann's constante	$1.38066 \cdot 10^{-23}$	J/K
T	Temperatuur	293	K
μ	Dynamische viscositeit bij 293 K	$2.0 \cdot 10^{-5}$	Pa s
λ	Gemiddelde vrije pad van moleculen in gas bij 293 K	$8.21 \cdot 10^{-8}$	m
γ	Proportionaliteitsfactor	0.75	m^{-1}
r_B	Brownse radius	-	m
M_m	molmassa	-	$kg \cdot mol^{-1}$

Pa = $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$; J = $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$



Figuur B1.6. Het verband tussen molmassa en diffusiecoëfficiënt (bij 293 K). (a) Op basis van gefitte empirische relatie, (b) Op basis van de Stokes-Einstein vergelijking. Punten geven de gemeten waarden weer (Lugg, 1968; Marrero en Mason, 1972; Spencer et al., 1988; Lide et al., 1993). Lijnen geven de gemodelleerde relatie weer. In de rechter figuur representeert de dikke lijn de relatie voor gassen en dampen samengesteld uit lichte atomen (C,H,O,S,N). De dunne lijn geeft het verband weer voor edelgassen.

B1.7 Parameterwaarden

Het DIVOCOS model behoeft een set parameterwaarden voor de modelberekeningen. De gebruiker is in staat via het user-interface een aantal parameters zelf in te vullen, zodat site specifieke gegevens kunnen worden gebruikt. Voor een aantal bodem-fysische parameters en stofeigenschappen worden default waardes gebruikt. In de modelbeschrijving zijn reeds een aantal van deze waarden vermeld. Tabel B1.2 geeft een overzicht van alle parameterwaarden, en een melding van de bron. Een deel van de waarden is afkomstig uit de literatuur, terwijl andere waarden moeten worden gezien als “educated guesses”.

Tabel B1.2. Default parameters gebruikt in DIVOCOS

Symbol	Betekenis	Waarde	Bron ¹
f_{om}	fractie organisch materiaal	-	bodemtabel
p_v	verzadigde dampspanning	-	stoffentabel
s	oplosbaarheid	-	stoffentabel
t_{50}	halfwaarde tijd	-	stoffentabel
$v_l \varepsilon_l$	neerslagoverschot	0.00137 m d ⁻¹	educated guess
$v_g \varepsilon_g$	netto advectieflux bodemlucht	0.00 m d ⁻¹	educated guess
D_{0g}	diffusiecoëfficiënt in lucht	-	(61) en (65)
D_{0l}	diffusiecoëfficiënt in water	$D_{0g}/10000$	(61) en (65)
M_m	molmassa	-	stoffentabel
K_{oc}	distributiecoëfficiënt water/organisch C	-	stoffentabel
K_H	Henry coëfficiënt	-	(57) en (58)
α_l	dispersielengte in water	0.1 m	educated guess
$\varepsilon_l + \varepsilon_g$	porositeit	-	bodemtabel
ρ_b	buldichtheid	-	bodemtabel
κ_l	matrixfactor diffusie bodemwater	0.5	educated guess
κ_g	matrixfactor diffusie bodemgas	0.5	educated guess

¹ De bodemtabel bestaat uit 10 grondsoorten en is samengesteld op basis van “educated guesses”. De stoffentabel omvat 117 stoffen en stofgroepen en is samengesteld op basis van literatuurgegevens (Waitz *et al.*, 1996; Jury *et al.*, 1990; Mackay *et al.*, 1999) en de schattingsprogramma’s PCKOCWIN programma v1.62 (1997), EPIWIN en het Biodegradation Probability Programma BIOWIN v.3.62 (1997). De onderliggende schattingstechnieken worden besproken in Meylan *et al.* (1992), Howard *et al.* (1992) en Boethling *et al.* (1994).

Referenties Bijlage 1

- Allan MD and Raabe OG (1985) Slip correction measurements for aerosol particles of doublet and triangular triplet aggregates of spheres. *J Aerosol Sci* 16:57-67.
- Bakker JW and Hidding AP (1970) The influence of soil structure and air content on gas diffusion in soils. *Neth J Agric Sci* 18:37-48.
- Boethling RS, Howard PH, Meylan W, Stiteler W, Beauman J, Tirado N (1994). Group Contribution Method for Predicting Probability and Rate of Aerobic Biodegradation. *Environ Sci Technol* 28: 459-65.
- Carslaw HS and Jaeger JC (1959) *Conduction of heat in solids*. Second edition. Oxford University Press. Oxford.
- Chiou CT (1989). Theoretical considerations of the partition uptake of nonionic organic compounds by soil organic matter. p 1-29. In Sawhney, BL and Brown, K. *Reaction*

- and movement of organic chemicals in soils. SSSA Special publication No 22. SSSA, Madison, WI.
- Crank J (1975) The mathematics of diffusion. Second edition. Oxford University Press. Oxford.
- Franken ROG, Baars AJ, Crommentuijn GH, Otte P (1999) Proposal for revised Intervention Values for petroleum hydrocarbons on base of fractions of petroleum hydrocarbons. Report no. 711701015, RIVM, Bilthoven.
- Howard PH, Boethling RS, Stiteler W, Meylan WM, Hueber AE, Beauman JA and Larosche ME (1992) Predictive Model for Aerobic Biodegradability Developed from a File of Evaluated Biodegradation Data. *Environ Toxicol Chem* 11: 593-603.
- Jury WA, Russo D, Streile G and El Abd, J (1990). Evaluation of volatilization by organic chemicals residing below the soil surface. *Water Resour Res* 26:13-20.
- Lide DR (1993). CRC Handbook of chemistry and physics, 74 th edition. CRC Press Boca Raton, FL.
- Lijzen JPA, Baars AJ, Otte PF, Rikken M, Swartjes FA, Verbruggen EMJ and Wezel AP van. (2001) Technical evaluation of the Intervention Values for Soil/Sediment and Groundwater. Human and ecotoxicological risk assessment and derivation of risk limits for soil, aquatic sediment and groundwater. Report no. 711701023, RIVM, Bilthoven.
- Lugg GA (1968). Diffusion coefficients of some organic and other vapors in air. *Analytical Chemistry* 40:1072-1076.
- Marrero TR and Mason EA (1972). Gaseous diffusion coefficients. *J Phys Chem Ref Data*:1:3-118.
- Mackay D, Shiu W-Y and Ma K-C (1999). Physical-chemical properties and environmental fate handbook. CRC netBASE, CRC Press LLC.
- Meylan W, Howard PH and Boethling RS (1992) Molecular Topology/Fragment Contribution Method for Predicting Soil Sorption Coefficients. *Environ Sci Technol* 26: 1560-1567.
- Otte PF, Lijzen JPA, Otte JG, Swartjes FA and Versluijs CW (2001) Evaluation and revision of the CSOIL parameter set. Proposed parameter set for human exposure modelling and deriving Intervention Values for the first series of compounds. Report no. 711701021, RIVM, Bilthoven.
- Sawyer CN and McCarty, PL (1989). Chemistry for environmental engineering. McGraw-Hill, Tokyo, Japan.
- Spencer WF, Cliath MM, Jury WA and Zhang L-Z (1988). Volatilization of organic chemicals from soil as related to their Henry's law constants. *J. Environ Qual* 17:504-509.
- Stein WD (1967). The movement of molecules across cell membranes. Academic press, New York.
- Thorsenson DC and Pollock DP (1989). Gas transport in unsaturated zones: multicomponent systems and the adequacy of Fick's law. *Water Resour Res* 25:477-507.

Waitz MFW, Freijer JI, Kreule P and Swartjes FA (1996). The VOLASOIL risk assessment model based on CSOIL for soils contaminated with volatile compounds. Report No. 715810014, National Institute of Public Health and the Environment.

Lijst van gebruikte symbolen Bijlage 1

a	bolstraal	L
f_i	fluxdichtheid door fase i	$M L^{-2} T^{-1}$
f	totale flux dichtheid	$M L^{-2} T^{-1}$
f_{om}	fractie organisch materiaal	$M M^{-1}$
f_{oc}	fractie organisch koolstof	$M M^{-1}$
k_i	snellheidsparameter afbraak in fase i	T^{-1}
k_T	snellheidsparameter totale afbraak bodem	T^{-1}
k	Boltzmann's constante	$M L^2 T^{-2} \Theta^{-1}$
p	Laplace parameter	-
p_v	Verzadigde dampspanning	$M L^{-1} T^{-2}$
r	plaatscoördinaat op radiale afstandsas	L
r_B	Brownse radius van een deeltje of molecuul	L
r_{ref}	referentie radius	L
s	Oplosbaarheid	$mol L^{-3}$
t	tijd	T
t_{50}	halfwaarde tijd	T
v_i	advectiesnelheid in fase i	$L T^{-1}$
v_e	effectieve advectiesnelheid in bodem	$L T^{-1}$
z	plaatscoördinaat in 1 dimensionaal systeem	L
$A(z)$	oppervlakte-afstand verband	L^2
C_i	Concentratie in fase i	$M L^{-3}$
C_g	Concentratie in de gas fase	$M L^{-3}$
C_{g0}	Initiële concentratie in de gas fase (op $t=0$)	$M L^{-3}$
C_a	Concentratie in de atmosfeer	$M L^{-3}$
C_l	Concentratie in de vloeistoffase	$M L^{-3}$
C_s	Concentratie in de vaste fase	$M M^{-1}$
C_L	Concentratie in gasfase op diepte L	$M L^{-3}$
C_T	Totale concentratie	$M M^{-1}$
C_{T0}	Initiële totaal concentratie (op $t=0$)	$M M^{-1}$
D_i	Diffusiecoëfficiënt in fase i	$L^2 T^{-1}$
D_1	Diffusiecoëfficiënt in bodem door vloeistoffase	$L^2 T^{-1}$
D_g	Diffusiecoëfficiënt in bodem door gasfase	$L^2 T^{-1}$
D_{0l}	Diffusiecoëfficiënt door vrije vloeistoffase	$L^2 T^{-1}$
D_{0g}	Diffusiecoëfficiënt door vrije gasfase	$L^2 T^{-1}$
D_e	Effectieve diffusiecoëfficiënt	$L^2 T^{-1}$

E_{in}	Emissie uit in situ grond	$M T^{-1}$
\bar{E}_m	Gemiddelde bolemissiesnelheid in het interval $[0,t]$	$M T^{-1}$
K_H	Henry coëfficiënt	$L^3 L^{-3}$
K_d	Distributiecoëfficiënt grond/water	$L^3 M^{-1}$
K_{oc}	Distributiecoëfficiënt water/organisch C	$L^3 M^{-1}$
K_s	Slip factor	-
M_t	Vervluchtigde massa contaminant van $t=0$ tot t	M
M_0	Totale massa contaminant op $t=0$	M
M_{ref}	Referentie molmassa	$M mol^{-1}$
M_m	Molmassa	$M mol^{-1}$
R	retardatiefactor	-
S	Oppervlak van verdampende vlak	L^2
T	Temperatuur	Θ
α_i	dispersielengte in fase i	L
ε_i	Volume fractie van fase i	$L^3 L^{-3}$
ε_l	Volume fractie vloeistof in de bodem	$L^3 L^{-3}$
ε_g	Volume fractie gas in de bodem	$L^3 L^{-3}$
ρ_b	Droge bulk dichtheid van de bodem	$M L^{-3}$
μ	Dynamische viscositeit	$M L^{-1} T^{-1}$
λ	Gemiddelde vrije pad van moleculen in gas	L
κ_i	Bodemmatrixfactor diffusie in fase i	-
τ	tijd	T