

SD-009

Kosteneffectiviteit van drie innovatieve  
saneringstechnieken voor  
bronzoneverwijdering

M.P. Koopmans (TNO-NITG)

J. Griffioen(TNO-NITG)

R.A.A. Heterschijt (TNO-NITG, thans werkzaam bij Shell Nederland Raffinaderij)

H. Veld (TNO-NITG)

C. Hofstee (TNO-NITG)

C. Pijls (Tauw BV)

M. Sumann (Tauw BV)

juli 2003

Gouda, SKB

### **Auteursrechten**

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze opgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van SKB.

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Kosteneffectiviteit van drie innovatieve saneringstechnieken voor bronzoneverwijdering", juli 2003, SKB, Gouda."

### **Aansprakelijkheid**

SKB en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het samenstellen van deze uitgave. Nochtans moet de mogelijkheid niet worden uitgesloten dat er toch fouten en onvolledigheden in deze uitgave voorkomen. Ieder gebruik van deze uitgave en gegevens daaruit is geheel voor eigen risico van de gebruiker en SKB sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze uitgave en de daarin opgenomen gegevens, tenzij de schade mocht voortvloeien uit opzet of grove schuld zijdens SKB en/of degenen die aan deze uitgave hebben meegewerkt.

### **Copyrights**

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording and/or otherwise, without the prior written permission of SKB.

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©"Cost-effectiveness of three innovative Remediation techniques for source zone removal", July 2003, SKB, Gouda, The Netherlands."

### **Liability**

SKB and all contributors to this publication have taken every possible care by the preparation of this publication. However, it can not be guaranteed that this publication is complete and/or free of faults. The use of this publication and data from this publication is entirely for the user's own risk and SKB hereby excludes any and all liability for any and all damage which may result from the use of this publication or data from this publication, except insofar as this damage is a result of intentional fault or gross negligence of SKB and/or the contributors.

**Titel rapport**

Kosteneffectiviteit van drie innovatieve saneringstechnieken voor bronzoneverwijdering

**SKB rapportnummer**

SD-009

**Project rapportnummer**

SD-009

---

**Auteur(s)**

M.P. Koopmans, J. Griffioen, R.A.A. Hetterschijt  
H. Veld, C. Hofstee, C. Pijls, M. Sumann

**Aantal bladzijden**

**Rapport:** 66

**Bijlagen:** 6

---

**Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)**

TNO-NITG (C. Hofstee, 030-2564704)  
Tauw BV (C. Pijls, 0570-699766)  
Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam (W. van Hattem, 010-2521447)  
Provincie Limburg (F.L. Martens, 043-3897446)  
Shell Global Solutions (K.L. Cerneaz, 070-3774742)  
Shell Nederland Raffinaderij BV (R.A.A. Hetterschijt, 010-4312108)

---

**Uitgever**

SKB, Gouda

---

**Samenvatting**

Bronzones van LNAPL en DNAPL worden niet vaak verwijderd, omdat het technisch moeilijk haalbaar wordt geacht en niet kosteneffectief zou zijn. Verschillende fysisch-chemische *in-situ* technieken hebben recent een sterke ontwikkeling doorgemaakt. De financiële en technische haalbaarheid van stoominjectie, co-solvent flushing en *in-situ* oxidatie is geëvalueerd middels de methodiek van Kwantificering van Financiële Risico's. Zes saneringsontwerpen zijn opgesteld door combinatie van de drie technieken met drie bestaande locaties. De ontwerpen zijn vergeleken met referentie-opties van beheersing of sanering door afgraving. De resultaten geven aan dat alle drie de bronverwijderingstechnieken kosteneffectief kunnen zijn ten opzichte van de referentie-opties. Zettingsgevaar, neerwaartse mobilisatie als gevolg van hittevorming en een verkeerde inschatting van het gebied, waarin de bronzone zich bevindt, vormen de grootste financiële risico's. Zettingsgevaar kan ontstaan door kalkoplossing en veenoxidatie bij *in-situ* oxidatie en mogelijk door compactie van veen en/of klei bij stoominjectie.

---

**Trefwoorden****Gecontroleerde termen:**

bodemverontreiniging, bronzone, haalbaarheid, *in-situ*, kosten, NAPL, risico's, sanering

**Vrije trefwoorden:**

---

**Titel project**

Kosteneffectiviteit van drie innovatieve saneringstechnieken voor bronzoneverwijdering

**Projectleiding**

TNO-NITG (C. Hofstee, 030-2564704)

---

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda

**Report title**

Cost-effectiveness of three innovative  
Remediation techniques for source zone removal

**SKB report number**

SD-009

**Project report number**

SD-009

**Author(s)**

M.P. Koopmans, J. Griffioen, R.A.A. Hetterschijt, H. Veld,  
C. Hofstee, C. Pijls, M. Sumann

**Number of pages**

**Report:** 66

**Appendices:** 6

**Executive organisation(s) (Consortium)**

TNO-NITG (C. Hofstee, 030-2564704)  
Tauw BV (C. Pijls, 0570-699766)  
Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam (W. van Hattem, 010-2521447)  
Provincie Limburg (F.L. Martens, 043-3897446)  
Shell Global Solutions (K.L. Cerneaz, 070-3774742)  
Shell Nederland Raffinaderij BV (R.A.A. Hetterschijt, 010-4312108)

**Publisher**

SKB, Gouda

**Abstract**

Source zones of LNAPL and DNAPL are frequently not removed due to considerations of technical feasibility and cost-effectiveness. Various physical/chemical *on-site* techniques have recently undergone rapid development. The financial and technical feasibility of steam injection, co-solvent flushing and *on-site* oxidation were evaluated by means of the Quantification of Financial Risks method. Six remediation designs were drawn up by combining the three techniques with three existing sites. The designs were compared with reference options of management or remediation by means of excavation. The results indicate that all three source removal techniques can be cost-effective in relation to the reference options. The threat of subsidence, downward mobilisation as a consequence of heat and an incorrect estimation of the area in which the source zone is located are the greatest financial risks. Subsidence may be caused by the dissolving of calcium and fen oxidation during *on-site* oxidation and possibly by compaction of fens and/or clay during steam injection.

**Keywords****Controlled terms:**

costs, feasibility, NAPL, *on-site*, remediation, risks,  
soil contamination, source zone

**Uncontrolled terms:****Project title**

Cost-effectiveness of three innovative Remediation  
techniques for source zone removal

**Projectmanagement**

TNO-NITG (C. Hofstee, 030-2564704)

This report can be obtained by: SKB, PO Box 420, 2800 AK Gouda, The Netherlands  
Netherlands Centre for Soil Quality Management and Knowledge Transfer (SKB)

# INHOUD

|           |       |  |      |
|-----------|-------|--|------|
|           |       | SAMENVATTING.....  | V    |
|           |       | SUMMARY.....   | VIII |
| Hoofdstuk | 1     | INLEIDING .....  | 1    |
|           | 1.1   | Achtergrond .....  | 1    |
|           | 1.2   | Politiek en beleid.....  | 2    |
|           | 1.3   | Doelstelling en benadering.....  | 2    |
|           | 1.4   | Leeswijzer .....   | 3    |
| Hoofdstuk | 2     | FYSISCH/CHEMISCHE SANERINGSTECHNIEKEN VOOR BRONZONES                     | 4    |
|           | 2.1   | Inleiding.....   | 4    |
|           | 2.2   | <i>In-situ</i> oxidatie.....   | 5    |
|           | 2.2.1 | Technisch proces van sanering .....                                      | 5    |
|           | 2.2.2 | Toepassingsvoorwaarden/beperkingen .....                                 | 7    |
|           | 2.2.3 | Resultaatverwachting.....  | 8    |
|           | 2.3   | Co-solvent flushing .....  | 8    |
|           | 2.3.1 | Technisch proces van sanering .....                                      | 8    |
|           | 2.3.2 | Toepassingsvoorwaarden/beperkingen .....                                 | 9    |
|           | 2.3.3 | Resultaatverwachting.....  | 10   |
|           | 2.4   | Stoominjectie .....  | 10   |
|           | 2.4.1 | Technisch proces van sanering .....                                      | 10   |
|           | 2.4.2 | Toepassingsvoorwaarden/beperkingen .....                                 | 11   |
|           | 2.4.3 | Resultaatverwachting.....  | 12   |
|           | 2.5   | Samenvattend overzicht.....  | 12   |
| Hoofdstuk | 3     | METHODIEK KFR: KWANTIFICERING VAN FINANCIËLE RISICO'S .....              | 13   |
|           | 3.1   | Inleiding.....   | 13   |
|           | 3.2   | Opzet van een kwantitatieve risico-analyse .....                         | 14   |
|           | 3.3   | Gebeurtenisboom of invloedsdiagram.....                                  | 15   |
|           | 3.4   | Kosten/kansen curve en tornadodiagram.....                               | 16   |
| Hoofdstuk | 4     | CASE DNAPL – KLEIN .....   | 19   |
|           | 4.1   | Inleiding.....   | 19   |
|           | 4.2   | Referentie-beheersoptie.....   | 19   |
|           | 4.3   | Sanering door middel van <i>in-situ</i> oxidatie (Fenton's reactie)..... | 20   |
|           | 4.3.1 | Uitgangspunten en aannames .....   | 20   |
|           | 4.3.2 | Globaal ontwerp van het saneringssysteem .....                           | 20   |
|           | 4.3.3 | Faalgebeurtenissen en kritische factoren .....                           | 21   |
|           | 4.3.4 | Kosten.....  | 22   |
|           | 4.3.5 | Risico-analyse.....  | 22   |
|           | 4.4   | Sanering door co-solvent flushing .....                                  | 27   |
|           | 4.4.1 | Uitgangspunten en aannames .....   | 27   |
|           | 4.4.2 | Globaal ontwerp van het saneringssysteem .....                           | 28   |
|           | 4.4.3 | Kosten.....  | 29   |
|           | 4.4.4 | Risico-analyse.....  | 29   |
|           | 4.5   | Sanering door stoominjectie.....   | 33   |
|           | 4.5.1 | Uitgangspunten en aannames .....   | 33   |
|           | 4.5.2 | Globaal ontwerp van het saneringssysteem .....                           | 33   |
|           | 4.5.3 | Faalgebeurtenissen en kritische factoren .....                           | 33   |

|           |   |       |   |    |
|-----------|---|-------|---|----|
|           |   | 4.5.4 | Kosten.....   | 34 |
|           |   | 4.5.5 | Risico-analyse.....   | 37 |
| Hoofdstuk | 5 |       | CASE DNAPL – GROOT.....   | 39 |
|           |   | 5.1   | Inleiding.....  | 39 |
|           |   | 5.2   | Referentie-beheersoptie.....  | 39 |
|           |   | 5.3   | Sanering door middel van <i>in-situ</i> oxidatie (Fenton's reagens) ..... | 40 |
|           |   | 5.3.1 | Uitgangspunten en aannames .....  | 40 |
|           |   | 5.3.2 | Globaal ontwerp van het saneringssysteem .....                            | 40 |
|           |   | 5.3.3 | Faalkansen/kritische factoren .....                                       | 41 |
|           |   | 5.3.4 | Kosten.....   | 42 |
|           |   | 5.3.5 | Risico-analyse.....   | 42 |
| Hoofdstuk | 6 |       | CASE LNAPL – GROOT .....  | 46 |
|           |   | 6.1   | Inleiding.....  | 46 |
|           |   | 6.2   | Referentie-saneringsoptie .....   | 46 |
|           |   | 6.3   | Sanering door middel van stoominjectie .....                              | 47 |
|           |   | 6.3.1 | Uitgangspunten en aannames .....  | 47 |
|           |   | 6.3.2 | Globaal ontwerp van het saneringssysteem .....                            | 48 |
|           |   | 6.3.3 | Faalgebeurtenissen en kritische factoren .....                            | 48 |
|           |   | 6.3.4 | Kosten.....   | 48 |
|           |   | 6.3.5 | Risico-analyse.....   | 52 |
|           |   | 6.4   | Sanering door middel van co-solvent flushing.....                         | 53 |
|           |   | 6.4.1 | Uitgangspunten en aannames .....  | 53 |
|           |   | 6.4.2 | Globaal ontwerp van het saneringssysteem .....                            | 54 |
|           |   | 6.4.3 | Faalgebeurtenissen en kritische factoren .....                            | 54 |
|           |   | 6.4.4 | Kosten.....   | 55 |
|           |   | 6.4.5 | Risico-analyse.....   | 55 |
| Hoofdstuk | 7 |       | VERALGEMENISERING.....  | 60 |
|           |   | 7.1   | Vergelijking locaties .....   | 61 |
|           |   | 7.1.1 | Kleine DNAPL .....  | 61 |
|           |   | 7.1.2 | Grote LNAPL.....  | 62 |
|           |   | 7.2   | Vergelijking saneringstechnologieën.....                                  | 62 |
|           |   | 7.2.1 | In-situ oxidatie.....   | 62 |
|           |   | 7.2.2 | Co-solvent flushing .....   | 63 |
|           |   | 7.2.3 | Stoominjectie .....   | 63 |
|           |   | 7.2.4 | Algemene risico's en mogelijkheden .....                                  | 63 |
| Hoofdstuk | 8 |       | CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN .....   | 64 |
|           |   |       | LITERATUUR .....  | 65 |
| Bijlage   | A |       | BESCHRIJVING CASES  |    |

## SAMENVATTING

### Kosteneffectiviteit van drie innovatieve saneringstechnieken voor bronzoneverwijdering

In het buitenland (met name de VS en Duitsland) zijn in de afgelopen jaren technieken getest of ontwikkeld die perspectiefvol zijn voor de verwijdering van puur product in de bodem. Sommige van deze technieken zijn daar inmiddels volledig geaccepteerd, terwijl andere nog in ontwikkeling zijn. Het grote voordeel van verwijdering van puur product is dat de bron van de grondwaterverontreiniging verwijderd wordt: de toevoer van verontreinigende stoffen naar de omgeving wordt een halt toegeroepen, of tenminste wezenlijk verkleind.

De doelstelling van het hier beschreven project is het evalueren van de kosteneffectiviteit van drie *in-situ* saneringstechnieken en de hiermee samenhangende risico's en technische haalbaarheid. De drie beschouwde technieken zijn stoominjectie voor (met name) DNAPL-verwijdering, co-solvent flushing voor verwijdering van (met name) drijfslagen en *in-situ* oxidatie van bronzones (middels Fenton's reagens of waterstofperoxide). De onderstaande tabel 1 geeft een kort overzicht van de kenmerken van de drie beschouwde technieken.

Tabel S1. Overzicht van kenmerken van de drie beschouwde bronverwijderingstechnieken.

|                                   | <b><i>In-situ</i> oxidatie</b>   | <b>Co-solvent flushing</b>                         | <b>Stoominjectie</b>   |
|-----------------------------------|--|--|--|
| Type techniek                     | Chemische oxidatie   | Oplossen en mobiliseren                            | Verhittingstechniek  |
| Belangrijkste verwijderingsproces | Oxidatie   | Opwaartse mobilisatie                              | Uitkoken   |
| Vergelijkbare technieken          | Biologische oxidatie, Chemische oxidatie met O <sub>3</sub> , MnO <sub>4</sub> | Surfactant flushing, Complexing flushing           | Stoomverhitting, Hete-luchtinjectie                          |
| Belangrijkste transportlimitatie  | Diffusie in waterfase  | Diffusie in waterfase, stofoverdracht NAPL-solvent | Diffusie in gasfase  |
| (Civiel-) technische beperkingen  | Corrosie<br>Kalkoplossing  | Extractie vast organisch materiaal                 | Inklinking vast organisch materiaal en klei, Doorbraak stoom |
| Rendement                         | Tot 95%  | 80-90% voor LNAPL,<br>Tot 85% voor DNAPL           | Tot 99%  |

De evaluatie van de kosteneffectiviteit heeft plaatsgevonden volgens de methodiek van "Kwantificering van Financiële Risico's". Deze methodiek is gebaseerd op een kwantitatieve risicoanalyse (*quantitative risk assessment*) en wordt gekenmerkt door de volgende stappen:

- Identificatie van faalgebeurtenissen per variant;
- Ordening van gebeurtenissen tot faalscenario's (opstellen van gebeurtenisboom);
- Toekenning van kansen van faalgebeurtenissen;
- Kwantificering van gevolgen van faalgebeurtenissen;
- Analyse.

Zes gevallen zijn uitgewerkt door de drie technieken te combineren met drie voorbeeldlocaties. De drie locaties zijn:

1. Kleine DNAPL. Een kleine DNAPL-verontreiniging bij een voormalige wasserij in stedelijk gebied met puur product tot 11 m-mv in grindafzettingen op kalksteen.
2. Grote DNAPL. Een grote DNAPL-verontreiniging op een bedrijfsterrein met verontreiniging van het eerste watervoerende pakket tot ca. 32 m-mv en operationele bedrijfsvoering van kostbare chemische installaties.
3. Grote LNAPL. Een grote LNAPL-verontreiniging van hoofdzakelijk styreen bij een voormalige fabriek op een bedrijfsterrein. De verontreiniging komt als puur product voor onder een parkeerterrein in een ophooglaag van enkele meters dik.

In onderstaand overzicht staan de gebruikte technieken en de kosten per locatie gegeven.

| Techniek/locatie    | Kleine DNAPL | Grote DNAPL | Grote LNAPL |
|---------------------|--------------|-------------|-------------|
| In-situ oxidatie    | 1,0          | 4,5         |             |
| Co-solvent flushing | 0,5          |             | 2,4         |
| Stoominjectie       | 2,3          |             | 1,6         |
| Referentievariant   | 0,5          | 17,0        | 2,4         |

Het grootste financiële risico bij in-situ oxidatie wordt gevormd door de aanwezigheid van een fabriek bovenop de verontreiniging en de mogelijke beschadiging hiervan als gevolg van zettingsproblemen, veroorzaakt door mogelijk oplossen van de schelpen in de ondergrond. Indien er geen risico voor beschadiging is bedragen de kosten voor in-situ oxidatie ongeveer 4,5 MEUR. De verwachte kosten voor sanering van de kleine DNAPL locatie bedragen 500 kEUR. De belangrijkste risico's die samenhangen met in-situ oxidatie zijn: (i) de aanwezigheid van kalk in de vorm van kalksteen of schelpen, (ii) een verkeerde inschatting van het verontreinigingsgebied en (iii) de beperking van de invloedssfeer van de injectie. De aanwezigheid van kalksteen onder het grindige pakket vormt het grootste risico voor het slagen van de sanering: door zuurproductie tijdens de oxidatiereactie kan de kalksteen in oplossing gaan. Dit risico kan afgedekt worden door een test uit te voeren. De kosten voor zo'n kalksteentest verdienen zichzelf terug door het verkleinen van de risico's als zo'n test positief uitvalt. De studie geeft aan dat *in-situ* oxidatie met Fenton's reagens financieel concurrerend is ten opzichte van eeuwigdurende beheersing.

Het grote voordeel van co-solvent flushing is een zeer snelle en met name ook veilige verwijdering van DNAPL's.

Belangrijke risico's die samenhangen met stoominjectie zijn: (i) een verkeerde inschatting van het verontreinigingsgebied, waardoor het te saneren terrein vergroot moet worden tijdens de sanering, (ii) een te geringe doorlatendheid van de (zandige) bodem, (iii) een mogelijk zettingsgevaar door inklinking van veen en/of klei en (iv) een verticale migratie van de DNAPL's. Geconcludeerd wordt dat stoominjectie aantrekkelijk is voor locaties met grote verontreinigde bodem-volumes, omdat de kosten per volume-eenheid dan relatief laag zijn. Daarnaast is het uiteraard een groot voordeel als stoom goedkoop verkregen kan worden op de locatie (hetgeen aannemelijk is op industriële complexen). Van de drie intensieve bronverwijderingstechnologieën is stoominjectie het best inzetbaar voor LNAPL's.

De uitwerking van de KFR-systematiek op de zes gevallen maakt duidelijk dat een belangrijk risico gevormd wordt door zettingsschade: bij chemische oxidatie zal kalk in oplossing gaan door zuurproductie tijdens het proces en wordt organisch materiaal (veen) geoxideerd en tijdens stoominjectie zou veen of klei kunnen compacteren. Het laatste is een vermoeden dat niet in de praktijk of het laboratorium getoetst is. De technieken zijn daarmee het meest perspectiefvol in



arme zandgronden en minder in die delen van Nederland met een kalkhoudende deklaag met klei- en veenafzettingen. Stoominjectie en *in-situ* oxidatie zijn qua kosteneffectiviteit vergelijkbaar met algemeen geaccepteerde sanerings- of beheersingstechnieken. Groot voordeel van deze innovatieve technieken is echter dat de bronzone binnen korte tijd verwijderd wordt.

Demonstratieprojecten zijn nodig om ervaring op te bouwen met fysisch-chemische saneringstechnieken. De aandacht dient hierbij niet alleen gericht te zijn op het succesvol saneren van de betreffende locatie. Demonstratieprojecten zijn nodig om ervaring op te bouwen met fysisch-chemische saneringstechnieken, maar ook op het leren beheersen van de technische aspecten van de betreffende saneringstechniek.

## SUMMARY

### Cost-effectiveness of three innovative Remediation techniques for source zone removal

During the past few years, techniques have been tested or developed overseas (particularly in the US and Germany) that may have potential in terms of the removal of pure product in the soil. Some of these techniques have now been completely accepted in these countries, while others are still under development. The great advantage of the removal of pure product is that the source of the groundwater contamination is removed – the supply of contaminants to the surroundings is terminated or at least significantly reduced.

The aim of the project described here was to evaluate the cost-effectiveness of three *on-site* remediation techniques and the associated risks and technical feasibility. The three techniques under consideration were steam injection for (especially) DNAPL-removal, co-solvent flushing for the removal of floating layers (in particular) and *on-site* oxidation of source zones (by means of Fenton's reagents or hydrogen peroxide). The following table 1 provides a brief overview of the characteristics of the three techniques under consideration.

Table S1 Overview of characteristics of the three source removal techniques under consideration.

|                                     | <b><i>On-site</i> oxidation</b>  | <b>Co-solvent flushing</b>                               | <b>Steam injection</b>  |
|-------------------------------------|--|--|---|
| Technique type                      | Chemical oxidation   | Dissolve and mobilise                                    | Heating technique   |
| Most important removal process      | Oxidation  | Upwards mobilisation                                     | Boiling out   |
| Comparable techniques               | Biological oxidation,<br>Chemical oxidation with O <sub>3</sub> , MnO <sub>4</sub> | Surfactant flushing,<br>Complexing flushing              | Steam heating, hot air injection                                      |
| Most important transport limitation | Diffusion in water phase   | Diffusion in water phase, substance-suspect NAPL-solvent | Diffusion in gas phase  |
| (Civil) engineering restrictions    | Corrosion<br>Calcium solution  | Extraction of permanent organic material                 | Subsidence of permanent organic material and clay, steam breakthrough |
| Yield                               | To 95%   | 80-90% for LNAPL,<br>To 85% for DNAPL                    | To 99%  |

The evaluation of the cost-effectiveness took place according to the 'Quantification of Financial Risks' methodology. This methodology is based on quantitative risk assessment and is characterised by the following steps:

- Identification of failure events per variant;
- Sequencing of events to failure scenarios (creation of event tree);
- Designation of chances of failure events;
- Quantification of the consequences of failure events;
- Analysis.

Six cases were detailed by combining the three techniques with three example sites. The three sites are:

1. Minor DNAPL. A minor DNAPL contamination at a former launderette in an urban area with pure product to 11 metres below ground level in gravel deposits on limestone.
2. Major DNAPL. A major DNAPL contamination at an industrial estate, with contamination in the first water discharge package to approximately 32 metres below ground level and ongoing business operations of valuable chemical installations.
3. Major LNAPL. A major LNAPL contamination, consisting mainly of styrene, at a former factory on an industrial estate. The contamination occurs as pure product under a car park in a levelling layer several metres thick.

The following summary provides an overview of the techniques used and the costs per site.

| Technique/site      | Minor DNAPL | Major DNAPL | Major LNAPL |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| On-site oxidation   | 1.0         | 4.5         |             |
| Co-solvent flushing | 0.5         |             | 2.4         |
| Steam injection     | 2.3         |             | 1.6         |
| Reference variant   | 0.5         | 17.0        | 2.4         |

The greatest financial risk related to on-site oxidation is formed by the presence of a factory on top of the contamination and possible damage to these premises caused by subsidence as a consequence of the potential dissolving of shells in the subgrade. If there is no risk of damage, the cost of on-site oxidation will be approximately 4.5 million Euro. The predicted cost of the remediation of the minor DNAPL site is 500 thousand Euro. The most important risks associated with on-site oxidation are: (i) the presence of calcium in the form of limestone or shells, (ii) an incorrect estimation of the contamination area and (iii) the restriction of the sphere of influence of the injection. The presence of limestone under the gravel package is the greatest threat to the success of the remediation – production of acids during the oxidation reaction may dissolve the limestone. This risk can be covered by conducting a test. The costs of this type of limestone test earn themselves back by reducing the risks if the test produces a positive result. The study reveals that *on-site* oxidation with Fenton's reagents is financially competitive in relation to never-ending management.

The great advantage of co-solvent flushing is an extremely rapid and particularly safe removal of DNAPLs.

Important risks associated with steam injection are: (i) an incorrect estimation of the contamination area, which means that the area has to be enlarged during remediation, (ii) insufficient porosity of the (sandy) soil, and (iii) the danger of subsidence caused by the settlement of fen and/or clay, (iv) a vertical migration of the DNAPLs. The conclusion was drawn that steam injection is interesting for sites with large contaminated soil volumes because this will keep the costs per volume unit relatively low. Naturally, it is also highly advantageous if steam can be obtained cheaply at the site (this is probably possible in industrial complexes). Of the three intensive source removal technologies, steam injection is best suited to LNAPLs.

The detailing of the QFR system for the six cases makes it clear that subsidence constitutes an important risk – chemical oxidation will dissolve calcium due to the production of acid during the process, and organic material (fen) is oxidised. Fens or clay may also become compacted during the steam injection process. The latter point is a suspicion that has not been assessed in the laboratory or in practice. This makes the techniques most promising for poor, sandy soils, and less promising for those parts of the Netherlands with a covering layer that contains calcium and clay and fen deposits. Steam injection and *on-site* oxidation are comparable with generally ac-

cepted remediation or management techniques in terms of cost-effectiveness. However, a great advantage of these innovative techniques is that source zones are removed within a short period of time.

Demonstration projects are required to gain experience with physical/chemical remediation techniques. These must involve the devotion of attention not only to successful remediation at the relevant sites, but also to learning to manage the technical aspects of the remediation techniques in question.

## HOOFDSTUK 1

### INLEIDING

#### 1.1 Achtergrond

In de afgelopen jaren hebben *in-situ* saneringstechnieken een enorme vlucht genomen. De technieken die inmiddels gangbaar zijn richten zich sterk op verwijdering van de verontreiniging in het grondwater en hiermee geassocieerd de stoffen die geadsorbeerd zijn aan de bodemmatrix. De saneringen richten zich dus vooral op de pluim. Bij bodemverontreiniging met organische stoffen is echter vaak sprake van een bronzone met puur product: een DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid) van chloorkoolwaterstoffen of een drijfslaag met olie-achtige verbindingen.

Volledige *in-situ* verwijdering van puur product met de gebruikelijke technieken (air-sparging, bioventing en bioslurping) is veelal in principe onmogelijk, of in ieder geval niet haalbaar binnen een termijn van enkele tientallen jaren: een restverzadiging blijft in de bodem achter als fysische technieken gebruikt worden en volledige biodegradatie wordt moeizaam bereikt door de ongunstige omstandigheden die heersen in een bodem met puur product (toxische condities, beperkte aeratie, etc.). Nieuwe technieken dienen geïmplementeerd te worden die min of meer volledige *in-situ* verwijdering mogelijk moeten maken. In het buitenland (met name de VS en Duitsland) zijn in de afgelopen jaren technieken ontwikkeld en getest die perspectiefvol zijn voor de verwijdering van puur product. Sommige van deze technieken zijn daar inmiddels volledig geaccepteerd en andere zijn nog in ontwikkeling.

Technieken die ontwikkeld zijn om puur product te verwijderen zijn onder meer:

1. Thermische technieken, waarbij de verontreiniging als het ware uitgekookt wordt;
2. Co-solvent flushing, waarbij de verontreiniging door middel van oplosmiddelen wordt uitgewassen;
3. *In-situ* oxidatie, waarbij de verontreiniging langs chemische weg geoxideerd wordt;
4. Surfactant flushing, waarbij de verontreiniging uitgespoeld wordt middels micelvorming en mobilisatie.

De laatste techniek zal hier niet verder beschouwd worden. Voor de eerste groep aan technieken zal stoominjectie beschouwd worden. Andere verhittingstechnieken zijn bijvoorbeeld het opleggen van (wissel)stroom, hete-luchtinjectie en heet-waterinjectie (zie bijvoorbeeld [Van Zutphen *et al.*, 2001]). Ook voor *in-situ* oxidatie bestaan verschillende varianten, waarbij het oxidatiemiddel verschillend kan zijn: waterstofperoxide, ozon, Fenton's reagens, permanganaat. De inventarisatie van technieken is beperkt gebleven tot de volgende drie technieken: stoominjectie, co-solvent flushing en *in-situ* oxidatie met Fenton's reagens.

Het grote voordeel van verwijdering van puur product is dat de bron van de grondwaterverontreiniging verwijderd wordt. Met bronzoneverwijdering wordt, in tegenstelling tot vele andere saneringstechnieken, de toevoer van verontreinigende stoffen naar de omgeving een halt toegeroepen, of tenminste wezenlijk verkleind. Bronzoneverwijdering is met name interessant voor DNAPL, want momenteel zijn er geen algemeen geaccepteerde saneringstechnieken voorhanden waarmee DNAPL verwijderd kunnen worden.

In het ideale geval is het enige dat resteert de grondwaterpluim die, afhankelijk van de situering, pluimsanering of -beheersing behoeft. Dit betekent dat de verontreinigingssituatie 'eindig' kan gaan worden. Het beschikbaar komen van saneringstechnieken die de bronzone verwijderen betekent in termen van robuustheid en milieurendement daarom een grote stap vooruit. Onder robuustheid wordt hierbij verstaan een saneringsvariant die gegeven de (altijd voorkomende) onzekerheden in bodemopbouw en verontreinigingssituatie tot de genoodzaakte sanering leidt.

Het kabinetsstandpunt Beleidsvernieuwing Bodemsanering (BEVER; 11 december 2001) spreekt de noodzaak uit tot het minimaliseren van langdurige nazorg en hierin past verwijdering van bronzones.

De acceptatie van deze technieken in Nederland verloopt niet gemakkelijk. In Nederland is de houding ten opzichte van deze nieuwe saneringstechnieken zeer wantrouwend op basis van zowel technisch-inhoudelijke als financiële gronden. Men vraagt zich af of de techniek wel geschikt is om in een 'typisch Nederlandse' setting met klei en veen effectief te zijn. Dit is ten dele een oneigenlijk argument, aangezien de geologische situering van locaties niet altijd hetzelfde is en de opbouw van lang niet elke verontreinigde locatie in Nederland als 'typisch Nederlands' bestempeld kan worden. Daarnaast vermoedt men dat de technieken duur zijn. Het laatste is moeilijk te waarderen: de technieken maken vergaande sanering van bronzones mogelijk. Het vergelijken van *beheersmaatregelen* voor verontreinigingsgevallen met diep gelegen bronzones van chloorkoolwaterstoffen tegenover *saneringsmaatregelen* van deze gevallen is in feite onmogelijk. Binnen BEVER wordt bijvoorbeeld bronzoneverwijdering zeer positief beoordeeld. Dit komt met name door de over het algemeen goede kosteneffectiviteit van vrachtverwijdering. Tenslotte wordt vaak alleen maar naar kosten op de korte termijn gekeken en niet naar het feit dat bijvoorbeeld monitoring of onttrekking over tientallen jaren gecontinueerd dient te worden.

Om de acceptatie van fysisch-chemische bronverwijderingstechnieken te vergemakkelijken dient inzicht verschaft te worden in de financiële aspecten van deze technieken, alsmede in de risico's die ermee samenhangen.

## 1.2 Politiek en beleid

Het doel van het huidige project was om de financiële risico's van verschillende bronaanpaktechnieken te evalueren. Deze procedure kan worden ingezet tijdens het afwegingsproces voor de aanpak van mobiele verontreinigingen, zoals dat in het eindrapport project doorstart A-5 wordt beschreven. In deze fase wordt het saneringsonderzoek opgesteld, vindt er een systematische vergelijking van de varianten plaats en wordt er een gemotiveerde keuze gemaakt voor een variant. Tijdens de voorfase van de afweging kan blijken dat het noodzakelijk is de bron te verwijderen of dat er varianten met en zonder bronaanpak zijn die aan het criterium van de stabiele eindsituatie voldoen. In dat geval kan de uitkomst van het KFR-programma een voorname rol gaan spelen in de uiteindelijke keuze.

Naast een financiële afweging is het vrijwel altijd ook noodzakelijk om enkele gerichte kleinschalige experimenten te doen. Vrijwel iedere vervuilde locatie is uniek in de soort, hoeveelheid en samenstelling van de vervuiling, de hydrogeologie en de aanwezige infrastructuur. Het ontwikkelen van een saneringsstrategie is dus vrijwel altijd maatwerk. Experimenten in bijvoorbeeld kolommen en containers kunnen vroegtijdig specifieke faalscenario's signaleren, zoals de verticale mobilisatie, klinking, etc.

Het doel van de in dit rapport behandelde saneringstechnieken is het verwijderen van de vervuiliingsbron. Bij een zeer succesvolle saneringstoepassing kan de gehele vracht worden verwijderd en wordt de emissie stopgezet. Wanneer het grootste deel van de bron is verwijderd, kunnen in eerste instantie de grondwater-concentraties zelfs stijgen, maar wordt de duur van de emissie vanuit de bronzone sterk verkort. Bij succesvolle toepassing van de bronaanpak dragen deze technieken dus bij tot het bereiken van de stabiele eindsituatie, zoals die op de saneringsladder is aangegeven. In de terminologie van "Van trechter naar zeef" wordt dit als standaard techniek aangeduid.

## 1.3 Doelstelling en benadering

De doelstelling van het project is het evalueren van de kosteneffectiviteit van drie *in-situ* saneringstechnieken en de hiermee samenhangende risico's en technische haalbaarheid. De drie be-

schouwde technieken zijn stoominjectie, co-solvent flushing en *in-situ* oxidatie. De uitwerking heeft plaatsgevonden volgens de systematiek van “Kwantificering van Financiële Risico’s” [NOBIS project 98-1-10; Hetterschijt *et al.*, 2000].

De studie is uitgevoerd aan de hand van een drietal bestaande verontreinigings-situaties variërend in grootte en soort NAPL, te weten:

1. *Grote DNAPL*-karakteristiek voor de grotere chemische industrie, waarbij de locatie ongeschikt is voor afgraven op grond van de aanwezige waardevolle bedrijfsinfrastructuur en de diepte van de DNAPL. Op de beschouwde locatie zijn verhoogde gehalten gechloroerde koolwaterstoffen aangetroffen, die op grond van gehalten en samenstelling wijzen op de aanwezigheid van puur product. Tevens duidt het verspreidingspatroon, loodrecht op de grondwater-stromingsrichting, op de aanwezigheid van mobiel puur product.
2. *Kleine DNAPL*, die betrekkelijk ondiep voorkomt en beperkt is in omvang, representatief voor een chemische wasserij of een industriecomplex in Zuid-Nederland. De geringe diepte en de relatief kleine volumina kunnen de kosteneffectiviteit van intensieve *in-situ* saneringstechnieken, met name stoominjectie, nadelig beïnvloeden.
3. *Grote LNAPL*. Net als bij de grote DNAPL dient een sanering op een industrieel complex zich te schikken naar de al bestaande infrastructuur. Dit kan voor de kosteneffectiviteit van de hier beschreven saneringstechnieken gunstig uitpakken, omdat stoom bijvoorbeeld op de locatie op grote schaal voorhanden is, en afgraven onmogelijk is. Op deze locatie zijn op industriële schaal stoom en ethanol (een co-solvent) aanwezig.

De drie technieken zijn gecombineerd met de drie studielocaties om zes gevallen te geven.

De zes beschouwde gevallen zijn:

1. Kleine DNAPL/*In-situ* oxidatie;
2. Kleine DNAPL/Co-solvent flushing;
3. Kleine DNAPL/Stoominjectie;
4. Grote DNAPL/*In-situ* oxidatie;
5. Grote LNAPL/Stoominjectie;
6. Grote LNAPL/Co-solvent flushing.

Uitwerking van alle negen mogelijke gevallen was niet haalbaar binnen de opgestelde projectomvang. Op grond van een aantal initiële aannames zijn een drietal combinaties niet uitgewerkt. Er is bijvoorbeeld a priori aangenomen dat het toepassen van co-solvent flushing op de grote DNAPL vanwege de hoge kosten van de co-solvents niet haalbaar zou zijn. Tijdens de uitvoering van het project is gebleken dat dit inzicht niet geheel juist was. *In-situ* oxidatie bij de grote LNAPL is afgefallen wegens het te grote risico van explosie- en zettingsgevaar. Tevens werd er voor gekozen om in ieder geval alle drie de saneringstechnieken op één locatie uit te werken. Naast de zes gevallen is per studielocatie een referentievariant beschouwd volgens een routinematig uit te voeren techniek. Meestal betreft het een beheersvariant in plaats van een verwijderingsvariant. Nagenoeg complete verwijdering (> 90%) van puur product met meer traditionele saneringstechnieken is immers niet reëel mogelijk. Voor de goede orde wordt hier vermeld dat alle genoemde bedragen verwijzen naar kosten excl. BTW.

#### 1.4 Leeswijzer

De hoofdstukken 2 en 3 bieden achtergrondinformatie ten aanzien van respectievelijk technische aspecten van de drie saneringstechnieken en de conceptuele achtergronden van de KFR-systematiek. Hierop volgen de hoofdstukken 4 tot en met 6, waarin per saneringslocatie de KFR-systematiek is uitgewerkt voor enkele bronverwijderingstechnieken. Daarnaast is een referentiesanering uitgewerkt volgens een in Nederland gangbare saneringstechniek. De locatiespecifieke bevindingen worden in hoofdstuk 7 veralgemeniseerd. Tenslotte zijn in het afsluitende hoofdstuk de conclusies en aanbevelingen gepresenteerd.

### FYSISCH/CHEMISCHE SANERINGSTECHNIEKEN VOOR BRONZONES

#### 2.1 Inleiding

Bij bodem- en grondwaterverontreiniging met organische verbindingen dient onderscheid gemaakt te worden tussen de bronzone en de pluim. In de bronzone komt de verontreiniging voor als puur product. In geval van olieachtige verontreiniging of verontreiniging met gechloreerde koolwaterstoffen, zoals tri en per, is veelal sprake van verbindingen in vloeibare toestand. Dergelijke vloeistoffen zijn relatief slecht oplosbaar in water (hydrofoob) en vormen een aparte fase. Ze worden veelal aangeduid met de term NAPL, Non-Aqueous Phase Liquids, ofwel niet-waterige vloeistoffen. Het is belangrijk om te beseffen dat niet elk puur product als NAPL voorkomt. PAK's kunnen bijvoorbeeld voorkomen in de vaste fase als kristallen, en ook opgelost in een NAPL.

NAPL kunnen zich als vloeistoffen door de ondergrond verspreiden. Daarnaast vindt overdracht van organische verbindingen vanuit de NAPL naar de lucht (vervluchtiging) of het poriewater (oplossing) plaats. Voor NAPL wordt onderscheid gemaakt tussen LNAPL en DNAPL. LNAPL zijn Light Non-Aqueous Phase Liquids, ofwel vloeistoffen die een lagere dichtheid hebben dan water en diens gevolg op de waterfase blijven drijven. De meeste olieachtige vloeistoffen vallen hieronder, zoals gascondensaat, benzine en diesel. DNAPL hebben een grotere dichtheid dan water en in een verontreinigingssituatie zakt de DNAPL-fase tot op ondoordringbare lagen (zoals kleipakketten) in de ondergrond. Een DNAPL-verontreiniging wordt daarom veelal aangeduid met de term 'zinklaag'. Het gaat hier in de eerste plaats om gechloreerde koolwaterstoffen, zoals tri en per, maar ook om de zwaardere olieachtige stoffen, zoals creosoot.

De bronfunctie van NAPL naar de omgeving kan tientallen tot honderden jaren aanhouden. Sanering van NAPL is daarom zeer wenselijk: verwijdering van de bron leidt ertoe dat er een einde komt aan de verdere verontreiniging van het grondwater. In het licht van de wenselijkheid om eindigheid te bereiken van de grondwaterverontreiniging is binnen BEVER het concept 'stabiele eindsituatie' uitgewerkt. Er is sprake van een stabiele eindsituatie als (i) er geen verdere verspreiding optreedt (van de grondwaterpluim) en (ii) de levering uit de bron en natuurlijke afbraak (NA) elkaar in balans houden. Gelet op het feit dat de bronfunctie van NAPL voor tientallen tot honderden jaren aanhoudt dient er dan ook sprake te zijn van het optreden van NA over dezelfde tijdsspanne. Het is niet zondermeer vanzelfsprekend dat het optreden van NA tientallen jaren aanhoudt als het op het moment van waarneming optreedt: biologische afbraakprocessen zijn reacties tussen meerdere verbindingen, terwijl deze processen vaak beschouwd worden als eerste-orde vervalprocessen. In het geval dat NA niet (noemenswaardig) optreedt, kan geen sprake zijn van het bereiken van een stabiele eindsituatie. In een dergelijk geval kan alleen sprake zijn van beheersing van de verontreiniging en/of continue sanering van de verontreiniging.

Het verwijderen van bronzones betekent dat een einde bewerkstelligd wordt van de verontreinigingssituatie. Het draagt op deze manier sterk bij aan het vergroten van het milieurendement van een saneringsoperatie. De huidige Nederlandse systematieken voor evaluatie van milieurendement voorzien niet expliciet in het waarderen van de sanering van een bronzone ten opzichte van beheersing en gaan niet verder dan het waarderen van vrachtverwijdering. Momenteel is wel sprake van een kentering in het overheidsbeleid, waarin meer gepleit wordt voor sanering met minimale of geen nazorg. Bronzoneverwijdering verdient op basis hiervan ruimere aandacht dan tot op heden het geval is geweest.

In Nederland is de afgelopen jaren weinig aandacht geweest voor bronverwijderingstechnieken, mede omdat het beleid daar niet om vroeg. In het buitenland, met name in de VS en Duitsland, is



de afgelopen jaren wel veel onderzoek gedaan naar *in-situ* saneringstechnieken, waarmee NAPL gesaneerd kunnen worden. De kennisontwikkeling van de verschillende fysisch/chemische saneringstechnieken voor bronzoneverwijdering is in het stadium van veldemonstratie tot commerciële uitvoering. De technieken die hier verder beschouwd zullen gaan worden zijn het stadium van de eerste laboratoriumtests dus ontstegen en hebben zich in geval van stoominjectie en *in-situ* oxidatie al op praktijkschaal bewezen.

## 2.2 *In-situ* oxidatie

### 2.2.1 *Technisch proces van sanering*

#### *Algemeen*

Zoals de naam al zegt gaat het bij deze techniek om oxidatieve afbraakprocessen. In principe wordt bij deze techniek een sterk chemisch oxidatiemiddel in de verontreinigde bodemzone gebracht, waarna de aanwezige organische verontreiniging door een oxidatieve reactie wordt afgebroken. Hierbij ontstaan bij volledige omzetting CO<sub>2</sub>, water en (in het geval van chloorhoudende stoffen) chloriden. De oxidatiemiddelen dienen te worden omgezet tot van nature in de bodem aanwezige stoffen.

Er zijn algemeen erkende *in-situ* technieken (bijvoorbeeld biosparging) die gebruik maken van oxidatie van verontreinigingen door gestimuleerde *biologische* afbraak. Echter, het grote voordeel bij het gebruik van chemische oxidatiemiddelen is de snelheid van de reacties, waardoor in een tijdsbestek van enkele maanden grote hoeveelheden verontreiniging kunnen worden afgebroken. Een tweede voordeel is dat verbindingen, zoals meervoudig gechloreerde oplosmiddelen (per, tri, etc.), direct kunnen worden afgebroken, terwijl deze biologisch niet of nauwelijks kunnen worden geoxideerd.

Een belangrijk nadeel van oxidatieve technieken is dat naast de organische verontreinigingen ook het natuurlijke organisch materiaal geoxideerd wordt. Dit komt de bodemeigenschappen in termen van vruchtbaarheid en bufferend vermogen niet ten goede.

#### *Oxidatiemiddelen*

In de afgelopen jaren is vooral in de Verenigde Staten ervaring opgedaan met *in-situ* oxidatie. Hierbij zijn vooral drie oxidatiemiddelen ingezet: ozon (O<sub>3</sub>), permanganaat (MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>) en waterstofperoxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Ozon wordt hierbij vooral in de onverzadigde zone ingezet; ozon dissocieert betrekkelijk snel in het grondwater na injectie in de bronzone, hetgeen de effectiviteit van oxidatie nadelig beïnvloedt. Oxidatie middels ozon wordt hier niet verder uitgewerkt.

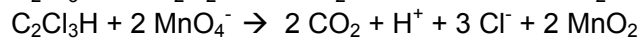
Permanganaat kan bij een grotere pH-bandbreedte worden ingezet en is stabiel dan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Omdat de oxidatiereactie met H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> als oxidatiemiddel Fe(II) als katalysator nodig heeft, de zogenaamde Fenton's reactie, is een pH van 2-4 optimaal, omdat Fe(II) bij deze pH-condities goed oplosbaar is en traag naar Fe(III) geoxideerd wordt. Een zure pH van 2-4 is in een bodem moeilijk te realiseren door de bufferende werking van de bodem en praktijkervaring geeft aan dat bij lichtzure pH (5-6) de reactie ook afdoende goed werkzaam is (H. Mulder, Oosterhof Holman Milieutechniek, mondelinge mededeling). Bij permanganaat als oxidatiemiddel worden mangaanoxiden geproduceerd die kunnen neerslaan. Hierdoor kan de porositeit in de watervoerende laag minder worden. Naar aanleiding van ervaringen in de Verenigde Staten wordt verwacht dat dit effect en de paarse kleur van het oxidatiemiddel voor een mindere acceptatie zouden kunnen zorgen. Indien immers een overmaat aan permanganaat wordt toegediend, blijft paars grondwater achter na de uitvoering van de sanering.

De grotere ervaring met en acceptatie van H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> boven permanganaat en het ontbreken van nadelige afbraakproducten waren de belangrijkste redenen om in de uitwerking van de sanerings-

variant *in-situ* oxidatie in deze studie uit te gaan van H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Dit in tegenstelling tot wat in het projectvoorstel is aangegeven.

#### Afbraak van chloorkoolwaterstoffen

In de volgende uitwerkingen van de saneringsvarianten per case wordt *in-situ* oxidatie vooral voor DNAPL beschouwd en de chemische reacties zullen voor deze typen verbindingen hier beschouwd worden. DNAPL bestaan bijna altijd uit chloorhoudende koolwaterstoffen, voornamelijk meervoudig gechloreerde chloorethenen. De dubbele binding in de chloorethenen kan door sterke oxidatiemiddelen zeer goed worden gesplitst. Hierdoor is de reactie zeer snel en verloopt zij onder productie van veel energie die in de vorm van hitte vrijkomt. De volgende eenvoudige reactievergelijkingen (hier met tri als voorbeeld) kunnen als beschrijving van de reactie dienen:



#### Injectie- en onttrekkingssystemen

Voor het injecteren van de chemicaliën kan gebruik gemaakt worden van vaste injectiefilters of van wegdrukbare tijdelijke injectiesystemen. Dit laatste heeft een aantal voordelen. Ten eerste is de injectie zeer flexibel voor wat de locaties betreft waar wordt geïnjecteerd; er kan precies in de hot spots worden geïnjecteerd. Dit is vooral voor kleine verontreinigingsbronnen voordelig en in gevallen waar bovengrondse installaties een hinder vormen voor de aanleg van een vast systeem. Verder is dit injectiesysteem voordelig voor H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, omdat de mindere stabiliteit geen rol speelt en door de injectiedruk een goede doormenging van het grondwater kan worden bereikt.

Voor beide systemen geldt dat in principe geen onttrekking met aansluitende zuivering van het onttrokken grondwater nodig is, waardoor de kosten geringer worden en geen lozingsprobleem ontstaat. Indien grote volumina bodem dienen te worden behandeld is een vast systeem van infiltratie en onttrekking voordeliger, omdat hierbij een geohydrologische beheersing van de grondwaterstromen wordt bereikt. Bij grote hoeveelheden DNAPL dienen ook grote hoeveelheden oxidatiemiddel te worden geïnjecteerd. De hierbij verwachte menging kan ertoe leiden dat zich verontreiniging ongecontroleerd kan verspreiden, indien geen hydrologische beheersing is geïnstalleerd. Bij kleine hoeveelheden verontreiniging is dit probleem niet aan de orde. Door het vaste systeem wordt de bodem doorspoeld door middel van permanente injectie- en onttrekkingsfilters (figuur 1).

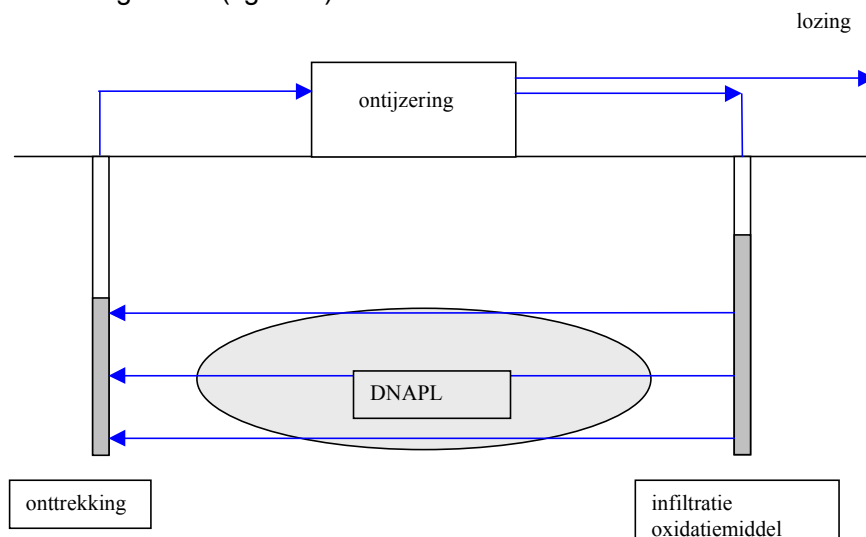


Fig. 1. Schematische opzet van injectie/onttrekkingssysteem bij *in-situ* oxidatie.

Op basis van ervaring wordt een inschatting van de effectiviteit van de oxidatie gemaakt, waarna de benodigde hoeveelheid oxidatiemiddel wordt berekend. De oxidatie door sterke oxidatiemid-

delen is niet beperkt tot de verontreiniging en zal ook andere verbindingen in het grondwater oxideren. Hierbij moet gedacht worden aan gereduceerde ijzerspecies, opgelost en geadsorbeerd organisch materiaal (al dan niet in de vorm van micro-organismen), sulfiden, etc. Hierdoor zijn de benodigde hoeveelheden groter dan de hoeveelheden die via stoichiometrische berekeningen worden bepaald. Uit de ervaring blijkt dat voor de oxidatie van 1 kg chloorhoudende koolwaterstof ca. 4 kg 100%  $H_2O_2$  nodig is. Voor olie en aromatische koolwaterstoffen geldt een verhouding van 7 kg 100%  $H_2O_2$  per kg verontreiniging (Pelgrum & Plaisier, in Situ Technieken bv, mondelinge mededeling).

## 2.2.2 Toepassingsvoorwaarden/beperkingen

### *Algemeen*

Aangezien  $H_2O_2$  als oplossing wordt geïnfilteerd zijn aan deze techniek bepaalde voorwaarden verbonden. De doorlatendheid van de bodem moet een bepaalde minimumwaarde van 8-10 cm/dag hebben. Bij hitte- en gasontwikkeling door de reactie kan het een vereiste zijn dat de grondwaterspiegel lager is dan 1.5 m–mv. Dit omdat het mogelijk moet zijn, in de onverzadigde zone een voorziening te installeren voor het afvangen van de geproduceerde gassen. De minimumdiepte mag kleiner zijn als er een gesloten verharding (betonvloer) aan de oppervlakte aanwezig is. Hittevorming houdt ook het gevaar in van ongewenste neerwaartse mobilisatie van DNAPL. Hitteontwikkeling is te beperken door optimale dosering van het reactiemiddel. Als LNAPL door  $H_2O_2$  worden gesaneerd, is de maximale dikte van de drijfslag 15 cm in de poriën. De aangegeven waarden zijn gebaseerd op de ervaring die de firma Geo-Cleanse International, Inc., in de Verenigde Staten in het kader van talrijke projecten heeft opgedaan. Naar hun ervaring kunnen invloedsstralen van 3 tot 20 m worden bereikt.

### *Aantasting bodem en infrastructuur*

De aanwezigheid van veenlagen in de te behandelen zone vormt een risico, omdat het veen kan worden afgebroken wat het gevaar van zettingen inhoudt. Dit is een aandachtspunt in het geval dat gebouwen op de locatie aanwezig zijn. Verder kunnen de agressieve oxidatiemiddelen ook kabels en leidingen aantasten, hoewel deze vaak ondiep (< 1 m) liggen. Door de potentiële productie van zuur en de agressiviteit van het oxidatiemiddel moet rekening worden gehouden met gevoelige ondergrondse infrastructuur (fundamenten, leidingen, betonnen funderingspalen, ondergrondse tanks, etc.) in de verontreinigde zone. In de praktijk hoeft niet altijd verzuring op te treden, omdat de oxidatie van de NAPL weliswaar verzurend werkt, maar nevenreacties met de bodemmatrix juist tot pH-verhoging aanleiding geven.

### *pH*

Een belangrijke voorwaarde voor de toepassing van  $H_2O_2$  is de mogelijkheid om de juiste pH-omstandigheden te creëren. Dit betekent dat bij een pH > 8 en/of een carbonaatgehalte > 400 mg/l in het grondwater de techniek naar verwachting niet goed zal werken, omdat de buffercapaciteit te groot is om een (licht)zure pH te creëren. Verder zal de toepassing van de techniek in een kalksteenformatie niet succesvol zijn. Dit is in Nederland alleen in de provincie Limburg het geval. Zoals later in de beschrijving van de cases is te zien, ligt de kleine DNAPL in Limburg op of in een kalksteenformatie. Een ontwerp van een saneringssysteem gebaseerd op oxidatie door  $H_2O_2$  is wel uitgewerkt, omdat in de rest van Nederland geen kalksteen in de ondergrond aanwezig is. Dit is voor de veralgemenisering belangrijk.

Bij de oxidatie van chloorhoudende koolwaterstoffen komen grote hoeveelheden zuur vrij, waardoor de kalksteen kan worden opgelost. Dit houdt het gevaar van zettingen in, waarmee rekening dient te worden gehouden.

### *Effect op biodegradatie*

De combinatie van verzuring en oxidatie tast ook het biologisch leven in de ondergrond aan. Dit kan beperkingen opleggen aan de mogelijkheid van natuurlijke afbraak als operationele saneringstechniek voor de nazorgfase. Door infiltratie van de sterke oxidatiemiddelen in het grondwater worden de redoxomstandigheden en het natuurlijk leefmilieu in het grondwater sterk beïnvloed.

Twee effecten kunnen optreden ten aanzien van de biologische activiteit:

- Stimulatie kan plaatsvinden door opwarming als gevolg van de chemische reacties;
- Remming kan plaatsvinden doordat de leefomstandigheden ten aanzien van de zuurgraad (pH < 6) suboptimaal zijn.

Het zal tijd vergen voordat de 'normale' biologische activiteit weer hersteld is, maar omdat chemische oxidatie geen maatregel is die voor meerdere jaren wordt toegepast en microbiële populaties in de ondergrond een grote dynamiek kennen, is herstel wel waarschijnlijk.

### **2.2.3 Resultaatverwachtingen**

Indien aan de boven beschreven voorwaarden wordt voldaan is de enige beperking van de effectiviteit van *in-situ* oxidatie de doormenging van de verontreiniging met het oxidatiemiddel. Door injectie met een wegdrukbaar systeem kan in het algemeen een betere doormenging van de verontreinigde zone worden bereikt dan door een vast geïnstalleerd systeem. Verder is de doormenging sterk afhankelijk van de bodemopbouw. In het algemeen zal de doormenging slechter werken naarmate de textuur van de bodem fijner wordt. In het algemeen wordt aangenomen dat in een zandige bodem 90% van de NAPL kan worden verwijderd, indien met een vast systeem wordt geïnjecteerd. Deze effectiviteit kan door een wegdrukbaar systeem tot 95% worden verhoogd.

## **2.3 Co-solvent flushing**

### *2.3.1 Technisch proces van sanering*

#### *Algemeen*

Bij co-solvent flushing wordt de co-solvent (of een mengsel van co-solvents) geïnjecteerd en wordt het mengsel vervolgens (aangerijkt met opgeloste of puur product NAPL) onttrokken.

De primaire verwijderingsmechanismen bij toepassing van co-solvent flushing zijn:

1. Verplaatsing van de NAPL door een lopend co-solvent front;
2. Vergroting van de oplosbaarheid van de verontreiniging;
3. Verlaging van de grensvlakspanning tussen water (met daarin de co-solvent) en de NAPL.

Als co-solvent wordt in het algemeen ethanol of isopropanol of een mengsel van alcoholen toegepast. Toepassing van alcoholen heeft als voordeel dat deze, indien kleine hoeveelheden na afronding van de sanering in de bodem achterblijven, snel worden afgebroken door aanwezige micro-organismen.

Twee typen alcoholen moeten onderscheiden worden bij co-solvent flushing: non-swelling en swelling. Non-swelling alcoholen zijn de lagere alcoholen (ethanol, propanol). Het verwijderingsmechanisme voor dit type berust op de drie hierboven genoemde principes. De dichtheid van de alcoholen verandert niet wezenlijk en dit type is met name geschikt voor LNAPL, omdat hiervoor geen gevaar bestaat dat ze naar beneden uitzakken. Swelling alcoholen (zoals hexanol) ondergaan een verlaging in dichtheid als de NAPL oplost in de co-solvent. Dit type is daarmee ook geschikt voor DNAPL-verwijdering, want het gevaar van neerwaartse mobilisatie ten gevolge van verlaging van de grensvlakspanning wordt ondervangen door de lagere dichtheid van het DNAPL/co-solvent mengsel ten opzichte van de DNAPL zelf. Naast de drie hierboven genoemde

verwijderings-mechanismen is dus voor dit type sprake van een extra fenomeen, namelijk de verandering van bulkeigenschappen (de dichtheid) van de verschillende vloeistoffen.

Uit testen op veldschaal in de Verenigde Staten is o.a. gebleken dat met co-solvent flushing een efficiency van 15 l LNAPL op 1,000 l geïnjecteerde alcohol gehaald kan worden [Falta *et al.*, 1999]. Het betrof hier het gedeeltelijk oplossen van een extreem viscos en slecht oplosbaar vervuilmengsel. Vaak wordt co-solvent flushing ook ingezet om de organische vervuiling opwaarts te mobiliseren. Omdat in dat geval puur product kan worden onttrokken is deze methode veel efficiënter. Co-solvent flushing kan voor zowel 1-component als vervuiling die uit meerdere componenten bestaat worden toegepast. De efficiency en haalbare totale recovery kunnen per situatie sterk verschillen en zijn afhankelijk van de aard van de verontreiniging, de mobiliteitsratio (de verhouding van de viscositeit van de waterfase en de NAPL-fase) en de lokale omstandigheden (bijvoorbeeld de mate waarin de NAPL is "opgesloten" in poriën, hetgeen maatgevend is voor het contactoppervlak) [Grubb & Sitar, 1994]. Met name belangrijk is ook de verhouding tussen het zeer snelle mobiliseren en het relatief veel langzamere oplossen.

#### *Infiltratie- en onttrekkingssysteem*

Via een aantal injectieputten wordt een mengsel van alcohol(en) en een geringe hoeveelheid water in de verontreinigde zone geïnjecteerd. De verspreiding van de alcoholstroom wordt hydraulisch gestuurd door het plaatsen van onttrekkingputten met voldoende pompcapaciteit. Het mengsel van water, alcohol(en) en de verontreiniging wordt via een onttrekkingssput naar de oppervlakte gehaald.

Bij de co-solvent methode is een verticale stroming vaak onontbeerlijk. Hiervoor kunnen zowel horizontaal boringen als "groundwater circulation wells" worden ingezet. Het onttrokken mengsel kan worden opgeslagen en afgevoerd of, bij voorkeur, worden behandeld, waarbij bijvoorbeeld de alcohol geregenereerd (bijvoorbeeld met behulp van geactiveerde kool of door middel van destillatie) en opnieuw geïnjecteerd wordt. Regeneratie van alcohol heeft een aanzienlijke reductie van de kosten van het saneringsproject tot gevolg.

Co-solvent flushing is door de mogelijke dichtheidsreductie met name geschikt voor de verwijdering van DNAPL, maar extra aandacht voor het spoelsysteem is daarbij noodzakelijk. Vanwege de hoge dichtheid (waardoor zinklagen zich meestal op ondoorlatende pakketten bevinden) en de door de co-solvent flushing toegenomen wateroplosbaarheid en vooral door afname van de hydrofobiciteit (waterafstotende eigenschappen) en verlaging van de grensvlakspanning, zou mobilisatie richting diepere lagen kunnen worden geïnitieerd. Dit is een zeer ongewenste situatie. Een spoelsysteem met opwaartsgerichte stroming biedt de mogelijkheid om de risico's te onderkennen en succesvolle sanering mogelijk te maken.

#### *2.3.2 Toepassingsvoorwaarden/beperkingen*

De beperkingen, die inherent aan de techniek zijn, liggen vooral op het vlak van de menging van de diverse vloeistoffen en het in oplossing gaan van de ene vloeistof in de andere: de co-solvent, de NAPL en het poriewater. Stofoverdracht middels diffusie is een belangrijk proces dat ten grondslag ligt aan de techniek. Diffusie in vloeistoffen is een traag proces dat niet wezenlijk versneld kan worden.

Bij de injectie van co-solvents kan sprake zijn van een instabiel grensvlak, omdat de co-solvent een geringere viscositeit heeft dan de NAPL. De co-solvent heeft dan de neiging om middels kanaalvorming versneld door te breken. Door met verticaal opwaarts gerichte stroming met voldoende snelheid te werken kan dit probleem worden ondervangen. In het algemeen is bij de co-solvent flushing veel aandacht vereist voor de wijze van injecteren en extractie van de meerfasen en meercomponenten mengsels.

De techniek heeft wel extra perspectieven voor heterogene media, omdat de efficiency van de techniek in geval van een heterogene ondergrond groot is ten opzichte van een homogene ondergrond. Dit hangt vermoedelijk samen met de wijze waarop NAPL-druppels gevangen zijn in de bodemmatrix. In homogene media zijn de druppels kleine druppels binnen één porieholte, terwijl in heterogene media de druppels over verschillende porieholtes doorlopen. Druppels die over meerdere holtes voorkomen zijn gemakkelijker te mobiliseren dan druppels die in één holte gevangen zijn [Padgett & Hayden, 1999]. De oppervlaktespanning en de capillaire krachten worden op een gunstigere manier veranderd als een NAPL-druppel binnen één holte zit dan dat de NAPL-druppel door verschillende porieholtes loopt.

### 2.3.3 Resultaatverwachting

Praktijktesten (bijvoorbeeld [Lowe *et al.*, 1999; Jafvert, 1996]) hebben laten zien dat de effectiviteit van de methode (verwijderingsgraad) ligt tussen 80 en 90 procent voor LNAPL en rond 90 procent voor DNAPL. Uit de gegevens blijkt dat sanering van een niet al te grote verontreiniging uitgevoerd kan worden in enkele (tientallen) dagen. Hierbij moet de tijdsduur van de voorbereidingsfase (locatiekarakterisering en localiseren van de bronzone) en controlefase nog worden opgeteld.

## 2.4 Stoominjectie

### 2.4.1 Technisch proces van sanering

#### Algemeen

Eén van de meest veelbelovende technieken voor de sanering van NAPL-bronzones is stoomgestimuleerde extractie, ook bekend onder de naam stoominjectie. Stoominjectie is tot op grote diepte goed toepasbaar en heeft een goed rendement in zowel de verzadigde als onverzadigde zone. De techniek is toepasbaar op een zeer groot aantal verontreinigingen: relatief vluchtige componenten als tri en per, minerale olie, creosoot en teerfracties [Davis, 1997].

Stoominjectie richt zich op het mobiliseren en het snel naar het oppervlak brengen van NAPL. Door het gelijktijdig injecteren van stoom en het in eerste instantie onttrekken van grondwater en later stoom, wordt het grondwater op de gewenste diepte verplaatst door de geïnjecteerde stoom (figuur 2). In de initiële fase verhit de stoom de ondergrond en treedt warmteverlies naar de omgeving op. Na verloop van tijd ontwikkelt zich een stoomdeken tussen de injectieputten en de onttrekkingsputten. De aanvoer van stoom is na enige tijd in evenwicht met de onttrokken hoeveelheid plus het verlies door condensatie aan de randen van de stoomdeken.

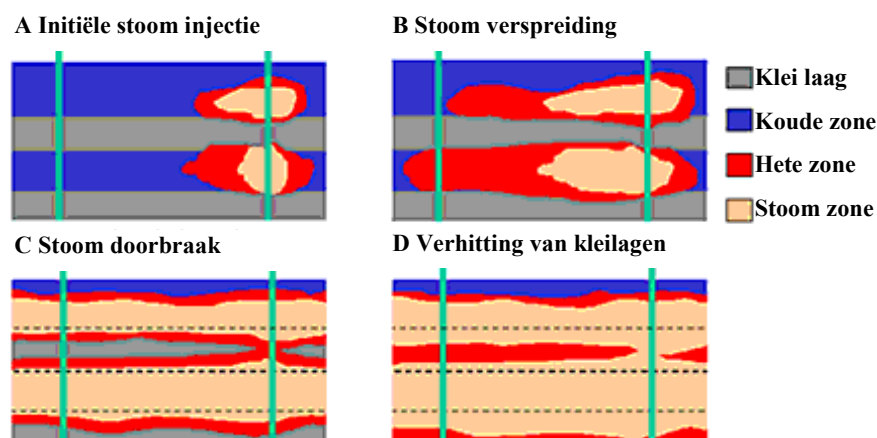


Fig. 2. Vorming van een stoomdeken in de ondergrond door stoomgestimuleerde extractie (vrij naar [SteamTech website]).

### *Vervluchtiging en verdamping*

De verontreiniging zal met het onttrokken water en later de onttrokken stoom uit de bodem worden verwijderd. Mobilisatie van de verontreiniging in de bronzone vindt plaats, doordat bij de hoge temperatuur de dampspanning van veel componenten aanzienlijk hoger is dan bij normale bodemtemperaturen en verschillende processen, waaronder vervluchtiging en desorptie, sneller verlopen. Daarnaast spelen de verlaagde viscositeit en de verlaagde grensvlakspanning een rol in de versnelde mobilisatie.

Sterke verhitting van de bodem leidt er toe dat het NAPL-watmengsel gaat koken en met de stoom wordt afgevoerd. Voor sommige componenten is het kookpunt in de omgeving van water zelfs lager dan het kookpunt van de verbinding en van water, zodat de verontreiniging al bij een temperatuur van minder dan 100°C verdampt (bijvoorbeeld per). Hierdoor ontstaat een groot verwijderingsrendement, dat met klassieke saneringstechnieken niet gehaald kan worden. De overgang van grondwatertransport naar gastransport leidt ook tot een grotere mobiliteit van de organische verontreinigingen, omdat diffusiecoëfficiënten in de gasfase ruim duizend keer groter zijn dan die in de waterfase. Ook hierdoor is het verwijderingsrendement van stoominjectie groter dan bij de klassieke saneringstechnieken.

### *Slechtdoorlatende lagen*

Door de verhitting van de bodem worden naast de goed doorlatende sedimenten ook de dunnere slechtdoorlatende klei- en leemlagen gereinigd. Zo wordt ook de verontreiniging in de slecht doorlatende zone gesaneerd en wordt nalevering vanuit deze lagen geminimaliseerd of voorkomen. Een mogelijk bijkomend voordeel van stoominjectie is dat de microbiële activiteit in de verwarmde bodem verhoogd wordt ten opzichte van de natuurlijke situatie. Mogelijke restverontreinigingen kunnen hierdoor gemakkelijker afgebroken worden. Daar staat tegenover dat er ook sterilisatie van de bodem kan plaatsvinden en de microbiële activiteit pas na verloop van tijd weer zal terugkeren als de bodem weer afkoelt.

## **2.4.2 Toepassingsvoorwaarden/beperkingen**

### *Algemeen*

De geschiktheid van stoominjectie hangt af van elementen, zoals doorlatendheid, stofeigenschappen van de NAPL, saneringsdoelstelling, diepte, etc. De belangrijkste toepassingsvoorwaarde is de minimum injectiedruk die nodig is. Bij toepassing van stoominjectie op DNAPL moet ernstig rekening gehouden worden met de vorming van een condensatiefront, met als gevolg ongewenste neerwaartse mobilisatie. Bij voorkeur is er sprake van een verontreiniging onder een slechtdoorlatende, niet-verontreinigde deklaag of een verhard oppervlak (nodig om de druk te weerstaan en de stoom vast te houden in de bodem). De deklaag draagt bij aan een hoofdzakelijk horizontale stroming en beperkt de ongewenste verticale migratie van stoom.

### *Stoom*

Afhankelijk van de samenstelling van de NAPL (een mengsel van organische verbindingen of een vloeistof met één hoofdbestanddeel) is een bepaalde temperatuur nodig om stoffen uit te dampen. Voor per geldt bijvoorbeeld een hoger kookpunt dan voor tri. De temperatuur dient daarom hoger te zijn en daarmee samenhangend de injectiedruk. De injectiedruk en de hele opzet van het systeem worden dus bepaald door het type verontreiniging dat gesaneerd moet worden.

### *Zettingen*

Het effect van stoom op veen- en kleilagen is onbekend. De mogelijkheid is dat verhitting van veen door stoominjectie tot compactie van het veen zou kunnen leiden. Hierdoor zou zettingschade kunnen ontstaan. Er is echter geen bruikbare informatie bekend omtrent dit aspect.

### 2.4.3 Resultaatverwachting

De effectiviteit van stoominjectie in termen van verwijderingsgraad is zeer hoog: meer dan 95% verwijdering is zonder meer haalbaar voor de meer vluchtige organische stoffen. De hoeveelheid NAPL in de bronzone en het kookpunt van de organische verbindingen zijn sterk bepalend voor de saneringsduur. Door de fase-overgang van watertransport naar gastransport, is diffusie in water veel minder het snelheidsbepalende proces. Hierdoor kan de saneringsduur sterk beperkt blijven en treedt ook verwijdering uit slecht doorlatende zones op. Het fenomeen nalevering speelt daarom veel minder een rol bij sanering middels stoominjectie dan bij andere saneringstechnieken die op vloeistoffen gebaseerd zijn.

### 2.5 Samenvattend overzicht

De beschouwde fysisch-chemische technieken zijn in hun saneringswijze gebaseerd op verschillende typen van fysisch-chemische processen. Het rendement is hierdoor ook wezenlijk verschillend. De mogelijkheden en beperkingen zijn hierdoor ook verschillend. In tabel 1 wordt een kort samenvattend vergelijk gegeven van de drie technieken.

Tabel 1. Samenvattend vergelijk van in-situ oxidatie met Fenton's reagens, co-solvent flushing en stoominjectie.

|                                   | <b><i>In-situ oxidatie</i></b>   | <b>Co-solvent flushing</b>                         | <b>Stoominjectie</b>   |
|-----------------------------------|--|--|--|
| Type techniek                     | Chemische oxidatie   | Oplossen en mobiliseren                            | Verhittingstechniek  |
| Belangrijkste verwijderingsproces | Oxidatie   | Opwaartse mobilisatie                              | Uitkoken   |
| Vergelijkbare technieken          | Biologische oxidatie, Chemische oxidatie met O <sub>3</sub> , MnO <sub>4</sub> | Surfactant flushing, Complexing flushing           | Stoomverhitting, Hete-luchtinjectie                          |
| Belangrijkste transportlimitatie  | Diffusie in waterfase  | Diffusie in waterfase, stofoverdracht NAPL-solvent | Diffusie in gasfase  |
| (Civiel-) technische beperkingen  | Corrosie<br>Kalkoplossing  | Extractie vast organisch materiaal                 | Inklinking vast organisch materiaal en klei, Doorbraak stoom |
| Rendement                         | Tot 95%  | 80-90% voor LNAPL,<br>Tot 85% voor DNAPL           | Tot 99%  |



### METHODIEK KFR: KWANTIFICERING VAN FINANCIËLE RISICO'S

#### 3.1 Inleiding

Bij de afweging van saneringsvarianten spelen kosten een belangrijke rol. Het verloop van een sanering is echter aan onzekerheden onderhevig, waardoor een juiste schatting van de saneringskosten vaak niet mogelijk is. Onvoorziene gebeurtenissen kunnen grote kostenoverschrijdingen tot gevolg hebben. De risico's zijn op voorhand vaak moeilijk in te schatten en de consequenties van falen moeilijk te doorgronden.

Ten aanzien van de risico's is behoefte aan de volgende informatie [Hetterschijt *et al.*, 2000]:

- Inzicht in financiële risico's, bandbreedte saneringskosten;
- Identificatie van kritische factoren en de mate waarin onvoorziene gebeurtenissen tot kostenoverschrijdingen kunnen leiden;
- Welke onzekere factoren liggen ten grondslag aan die kostenoverschrijdingen.

Er is daarom behoefte om de risico's op inzichtelijke en kwantitatieve wijze te beschouwen. De systematiek van "Kwantificering van Financiële Risico's" (KFR) is gebaseerd op een kwantitatieve risico-analyse (quantitative risk assessment, QRA). KFR geeft gedetailleerde informatie over kostenaspecten bij planning en uitvoering van een sanering en is op die manier een instrument om een afweging te maken tussen verschillende saneringsvarianten (complementair aan al reeds bestaande en op andere aspecten gerichte afwegingsmethodieken).

KFR wordt gekenmerkt door de volgende stappen:

- Identificatie van faalgebeurtenissen per variant;
- Ordening van gebeurtenissen tot faalscenario's (opstellen van gebeurtenisboom);
- Toekenning van kansen van faalgebeurtenissen;
- Kwantificering van gevolgen van faalgebeurtenissen;
- Analyse.

Foutieve inschatting van de omvang van de verontreiniging of foutieve voorspelling van het invloedsgebied van een saneringsoperatie zijn bijvoorbeeld in het oog springende faalgebeurtenissen. Alle mogelijke faalgebeurtenissen dienen in kaart gebracht en geordend te worden tot faalscenario's: de ene faalgebeurtenis kan een volgende faalgebeurtenis oproepen. Er is dan sprake van een faalscenario. Verder moeten de kansen op falen afgeleid worden en de geassocieerde (financiële) consequenties van het falen bepaald worden.

Met al deze informatie kan een meer gefundeerde keuze tussen saneringsvarianten worden gemaakt, waarbij het risico van een keuze inzichtelijk wordt gemaakt. Daarnaast kan, alvorens tot het maken van een keuze overgegaan wordt, op basis van deze informatie gericht onderzoek plaatsvinden naar onzekere factoren en onvoorziene gebeurtenissen om de bandbreedte van de kostenraming te beperken. Met de systematiek wordt men ook gedwongen om allerlei mogelijke processen, gebeurtenissen en factoren, die van belang zijn voor de sanering, gestructureerd te identificeren en te ordenen.

Het KFR-proces stuurt het keuzeproces door keuzes die vaak impliciet worden gemaakt nu te expliciteren bij de totstandkoming van een invloedsveld of gebeurtenisboom. Het KFR-proces wordt toegepast voor verschillende sanerings-opties per verontreinigingsgeval.

Vergelijking van de verschillende KFR-scenario's kan, in combinatie met de resultaten van andere afwegingsmethodieken, een solide basis vormen voor een saneringsbesluit.

### 3.2 Opzet van een kwantitatieve risico-analyse

Zoals eerder gesteld zijn vijf stappen te onderscheiden bij het opzetten van een kwantitatieve risicoanalyse:

1. Het identificeren van faalgebeurtenissen per variant;
2. Ordening van gebeurtenissen tot faalscenario's;
3. Toekenning van kansen van faalgebeurtenissen;
4. Kwantificering van gevolgen van faalgebeurtenissen;
5. Analyse van de afweging van de varianten.

Deze vijf stappen worden hieronder toegelicht.

#### *Stap 1.*

Het identificeren van faalgebeurtenissen wordt vaak gedaan in een brainstormachtige sessie. Deze eerste stap moet leiden tot de situatie, waarin de alternatieven helder en tot op eenzelfde niveau zijn uitgewerkt, gerelateerd aan de op dat moment geldende saneringsfase en aard van de afweging. Vóóridentificatie van gebeurtenissen heeft bij voorkeur reeds plaatsgevonden, zodat tijdens de brainstormsessie actief kan worden geselecteerd welke van belang zijn en welke niet. Alle onderkende gebeurtenissen dienen getoetst te worden en nieuwe gebeurtenissen worden geïdentificeerd.

#### *Stap 2.*

Vervolgens worden de gebeurtenissen geordend tot faalscenario's en middels een kwalitatieve beschouwing geanalyseerd welke gebeurtenissen mogelijk kritisch zijn en hoe deze de risico's van de varianten kunnen bepalen. Bij deze stap wordt een gebeurtenisboom opgesteld, waarin alle inschattingen opgenomen worden en zijn de consequenties van een gebeurtenis in het verloop van de boom in kaart gebracht.

#### *Stappen 3 en 4.*

Kwantificering van kansen en gevolgen vindt plaats. Afhankelijk van de saneringsfase kan het een waardevolle aanvulling zijn de getallen op een meer gedetailleerde manier uit te rekenen in plaats van hiervoor een eerste indicatieve schatting te nemen. Zo kan de kans op en het gevolg van verspreiding van verontreiniging bij natuurlijke afbraak als variant worden gesimuleerd met een computermodel. Hiervoor wordt de bandbreedte in de mogelijke verspreiding berekend uit een bandbreedte van afbraak gerelateerde parameters. Ook kunnen de kosten van een mogelijke kritieke zuiveringsstap nader worden gespecificeerd met de aannemer/leverancier. Of en in welk stadium van de afweging een meer gedetailleerde invulling van kansen en kosten plaatsvindt hangt af van de beschikbare kennis van de locatie, de technieken, etc.

#### *Stap 5.*

In deze laatste stap worden een kosten/kansencurve en een tornadodiagram vervaardigd. De kosten/kansencurve geeft niet alleen inzicht in de meest waarschijnlijke kostprijs, maar ook in de kansen op (en de mate van) overschrijding. Het tornadodiagram verschaft inzicht in de belangrijkste kosten- en risicobepalende factoren van een saneringsvariant. Deze twee diagrammen vormen de feitelijke uitkomst van een KFR-analyse en zijn de leidraad bij de afweging van de saneringsvariant.

Het zichtbaar maken van de kosten/kansencurve en de belangrijkste factoren die hierin een rol spelen kan onder andere worden ondersteund door het commercieel verkrijgbare programma DATA (TreeAge Software Inc., 1999) dat gebruikt wordt bij de uitwerking van de analyse. Bij de toetsing van de faalscenario's is het belangrijk dat duidelijk wordt gemaakt 'waar de schoen wringt'.

*De relatie met de 'plan-do-check cyclus bodemsanering'.*

De KFR-methodiek kan in principe in verschillende fases van de saneringsoperatie worden ingezet, die veelal een cyclisch karakter kent. Hetterschijt *et al.*, [2000] hebben dit de 'plan-do-check' cyclus genoemd: inventarisatie van varianten, variantkeuze, saneren, evalueren, bijstellen. De KFR-methodiek biedt hierbij continu inzicht in kritieke factoren. Deze kunnen vaak door middel van gericht onderzoek worden weggenomen of gereduceerd. Een KFR-analyse is een hulpmiddel om het proces van sanering te sturen. Door de analyse desnoods één of meerdere keren te herhalen komt men tot een kosteneffectievere sanering.

### 3.3 Gebeurtenisboom of invloedsdiagram

Een vorm om een faalgebeurtenis weer te geven is met behulp van een gebeurtenisboom. Een gebeurtenis met twee verschillende uitkomsten wordt dan weergegeven door een 'takje' met twee vertakkingen. In figuur 3 is als voorbeeld voor een fictieve case de faalgebeurtenis 'damwand lek' voor een isolatievariant van een vuilstort weergegeven. De vuilstort wordt geïsoleerd door grondwater onder de stort te onttrekken en de huidige infiltratiesituatie in een kwelsituatie te veranderen. Een damwand om de stort tot op een kleilaag moet een al te grote toestroom van water voorkomen.

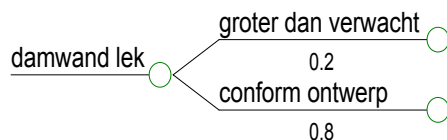


Fig. 3. Faalgebeurtenis damwand lek.

De uitkomst van deze gebeurtenis kan zijn dat de lekkage significant groter is dan waarmee is rekening gehouden bij het ontwerpdebiet van onttrekkingen die een kwelsituatie moeten handhaven (groter dan verwacht), een andere uitkomst is dat de lekkage niet groter is dan men had verwacht (conform ontwerp). Bij de uitkomsten staan ook de verwachte kansen dat de gebeurtenis optreedt. Het open rondje geeft weer dat het een gebeurtenis betreft met een bepaalde kans.

Wat is nu het gevolg van een grotere lekkage van de damwand dan verwacht? Een grotere lekkage van de damwand kan een verhoogde waterflux de stort in tot gevolg hebben. Dit hoeft geen probleem te zijn zolang de totale flux de stort in, het volume dat onttrokken wordt niet overschrijdt (de onttrekking kan namelijk overgedimensioneerd zijn). Voordat lekkage van de damwand de kwelsituatie kan veranderen, moet de waterflux de stort in groter zijn dan de onttrekkingen kunnen behappen. Dit is weergegeven in figuur 4 door een extra takje toe te voegen voor deze gebeurtenis (waterflux in groter).

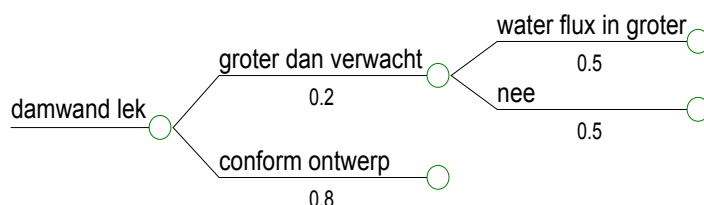


Fig. 4. Extra faalgebeurtenis flux in groter dan onttrekkingen.

Nu hoeft een toename van de waterflux de stort in als gevolg van een lekke damwand niet direct een omslag van de kwelsituatie in een infiltratiesituatie te betekenen. Stel dat de stijghoogte in de stort wordt bewaakt door een regelsysteem. Pas als dit systeem faalt slaat de kwelsituatie om in een infiltratiesituatie (bewaking faalt). Dit is weergegeven in figuur 5. Drie takjes eindigen op 0. Hiermee wordt aangegeven dat de concentratie, die in het grondwater dat opkwelt in het gebied rondom de stort, 0 is. Eén scenario leidt wel tot opkwellen van verontreinigd grondwater. De concentratie van het water is als voorbeeld op 100  $\mu\text{g/l}$  gesteld. De kans dat dit scenario optreedt kan worden berekend door de kansen van de gebeurtenissen te vermenigvuldigen.

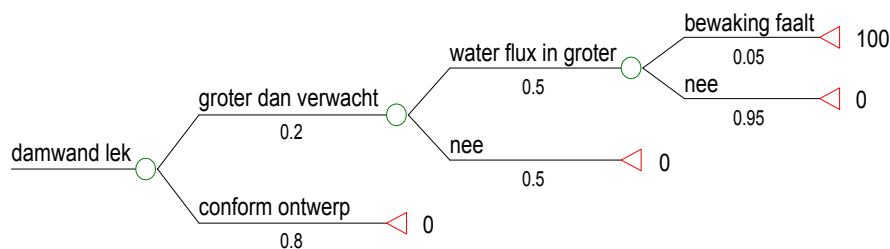


Fig. 5. Extra faalgebeurtenis bewakingssysteem.

### 3.4 Kosten/kansen curve en tornadodiagram

Zoals eerder al is opgemerkt speelt bij de keuze tussen saneringsvarianten niet alleen de haalbaarheid van een variant, maar ook de kans dat deze haalbaarheid gerealiseerd wordt. Meestal worden bij de keuze voor een saneringsvariant bovenal de kosten van de sanering beschouwd. Dit selectiecriteria is echter nogal beperkt, aangezien elke saneringsvariant faalrisico's kent en het bijstellen van sanerings-varianten na faalgebeurtenissen tot zeer forse vervolgcosten kan leiden. Naast de informatie dat variant A naar alle waarschijnlijkheid MEUR 2 zou kosten en variant B MEUR 7, wil men voor de afweging ook graag weten wat de onzekerheid van deze schatting is. De kosten/kansencurve is dan ook een éérste (hoofd)product van de risico-analyse. Figuur 6 laat zien, dat hoewel variant A ogenschijnlijk MEUR 5 goedkoper is dan variant B, er bij variant A nog een niet te negeren kans bestaat dat de saneringskosten veel duurder uitvallen (ook wel aangeduid met de term 'down-side financial risks'). Bij een afweging tussen varianten kan men nu het risico nemen op deze overschrijding en gokken op de grote kans dat de variant goedkoper uitvalt. Men kan ook voor zekerheid kiezen en de duurdere variant B uitvoeren.

Naast het ondersteunen van een op risico's gebaseerde afweging, biedt de analyse waarvan figuur 6 het eindproduct is ook nog veel andere voordelen. De kans op overschrijding van de verwachte saneringskosten komt voort uit het falen van installaties, maatregelen en afspraken die gezamenlijk de saneringsaanpak vormen. Dit betekent dat de saneringsaanpak is beschreven in faalgebeurtenissen van deze installaties, maatregelen en afspraken en dat de onderlinge afhankelijkheid is vastgelegd in de vorm van een zogenaamde gebeurtenisboom.

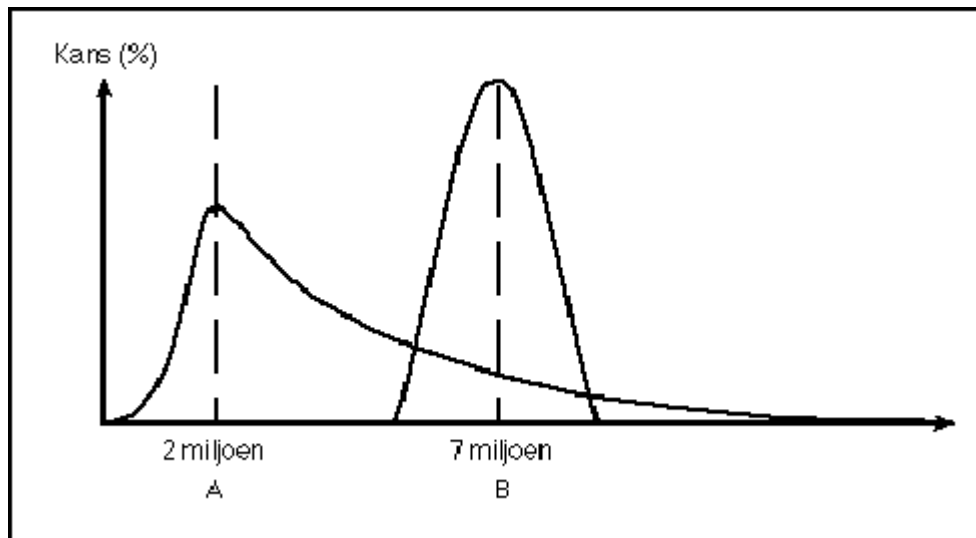


Fig. 6. Kosten/kansencurven van hypothetische saneringsvarianten A en B.

Omdat ook het belang van de installaties, maatregelen e.d. verkend is, doordat de kans op deze gebeurtenissen is bepaald en de gevolgen, kunnen de meest kritische 'onderdelen' van de saneringsaanpak worden geïdentificeerd op een objectieve wijze. Identificatie van kritische onderdelen biedt de mogelijkheid het risico van falen van kritische onderdelen te reduceren door gericht onderzoek. Identificatie van kritische factoren (een belangrijk product van de risico-analyse) vindt plaats door het effect van de bandbreedte (van kosten en kansen) per factor afzonderlijk te visualiseren of van alle (belangrijke) factoren gezamenlijk weer te geven in een zogenaamd 'tornadodiagram'.

Figuur 7 geeft een tornadodiagram als resultaat van een gevoeligheidsanalyse weer. De kans op het optreden van gebeurtenissen en de bijbehorende kosten zijn hier gevarieerd binnen een aannemelijke range. Rechts van de figuur staat een lijstje met de factoren en de bijbehorende range van de factoren. In het tornadodiagram zijn de variabelen van boven naar onder met afnemend belang gerangschikt. Zo kan het belang van het optreden van gebeurtenissen voor de saneringskosten inzichtelijk worden gemaakt. De bovenste variabelen 'Pfe', 'NCW1' en 'Kmppep' hebben de grootste invloed op de saneringskosten die op de x-as staan. Het gaat hier om een sanering, waarbij men een verontreiniging wil beheersen door grondwater te onttrekken. Dit water moet na zuivering weer geïnfiltrerd worden. Pfe staat dan ook voor de kans dat de infiltratieputten verstopten door neerslag van ijzer en NCW1 en Kmppep hebben te maken met de te maken kosten indien verstopping optreedt.

Wellicht had men al verwacht dat verstopping een kritische gebeurtenis zou zijn. De toegevoegde waarde van een kwantitatieve risico-analyse is nu dat de mate ervan wordt gekwantificeerd en dat andere gebeurtenissen, die voor de analyse als even kritisch werden ingeschat, nu als minder relevant worden ervaren.

Indien kritieke paden duidelijk zijn, is het van belang na te gaan wat er gedaan kan worden om een bepaald risico af te dekken. Vóóronderzoek kan het mogelijk maken om de kans op bepaalde faalgebeurtenissen te verkleinen. De kosten van een vóóronderzoek kunnen dus terugverdiend worden door de faalrisico's te verkleinen. Er ontstaat als het ware een optimum tussen enerzijds de uitvoering van vóóronderzoek en verkleining van risico's en anderzijds beperking van financiële besteding en het optreden van meevallers. Wat mag ik besteden aan onderzoek of het verkrijgen van additionele informatie? Deze vraag kan in de KFR-systematiek beantwoord worden door de zogenaamde 'expected value of perfect information' te bepalen. Hoofdstuk 4 zal hier een eenvoudig voorbeeld van laten zien.

### Tornado Diagram for pump and treat

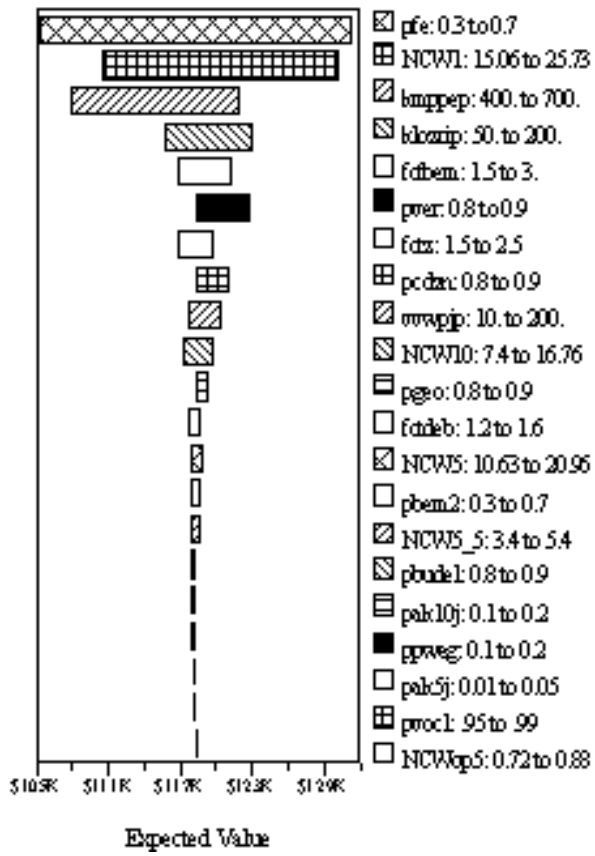


Fig. 7. Gevoeligheidsanalyse in de vorm van een tornadodiagram.

## HOOFDSTUK 4

### CASE DNAPL – KLEIN

#### 4.1 Inleiding

Als geval voor een kleine DNAPL is gekozen voor een verontreinigde locatie in Maastricht (zie bijlage A). Op de studielocatie is van 1953 tot 1965 een chemische wasserij actief geweest en in die periode zijn aanzienlijke hoeveelheden per en tri op dumpplaatsen van filterkoek, via afvoerputjes en de bedrijfsriolering in de ondergrond terechtgekomen.

Er is sprake van twee watervoerende pakketten. Het eerste freatische watervoerende pakket wordt gevormd door de Maasgrinden (horizontale doorlatendheid ca. 70 m/dag). In het algemeen kan gesteld worden dat de grondwaterspiegel onderin de deklaag zit, die drie tot vijf m dik is. Het tweede watervoerende pakket wordt vanaf een diepte van 11 m-mv gevormd door de Formatie van Maastricht (zachte, fijn tot grofkorrelige kalksteen). Er wordt vanuitgegaan dat een zinklaag op de basis van het eerste watervoerende pakket is gelegen. De grondwaterstroming is WNW tot NW gericht. De snelheid van het grondwater in het eerste pakket is 100-110 m/jaar; in het tweede watervoerende pakket is dit 15-25 m/jaar.

In de deklaag zal de bulk van de verontreiniging aanwezig zijn. Verder zijn relatief hoge concentraties aan CKW in het eerste watervoerende pakket aanwezig: per (tetrachlooretheen), tri (trichlooretheen), cis (1,2-dichlooretheen) en VC (vinylchloride). De verontreinigingsgraad van het tweede watervoerende pakket, de kalksteen, is niet bekend.

In het kader van dit project moet een idee gevormd worden van de bronzone en het is op basis van de beschikbare gegevens niet goed mogelijk om de bronzone verticaal en horizontaal af te perken. Vermoed wordt dat de bronzone op de kalklaag ongeveer 45 bij 25 m is. De locatie is gelegen in stedelijk gebied. De omgeving van de locatie is redelijk vol bebouwd met huizen, kleine tot middelgrote bedrijfspanden en een benzinstation.

#### 4.2 Referentie-beheersoptie

Allereerst dient te worden opgemerkt dat ook voor de referentievariant onzekerheden (bijvoorbeeld met betrekking tot de omvang van de verontreiniging) gelden en dat met deze variant alleen een *beheersing* van de DNAPL wordt bereikt. Een standaardaanpak volgens conventionele technieken is toch uitgewerkt ter vergelijking van de kosten en onzekerheden van de innovatieve technieken. Traditioneel zal dit voor deze verontreinigingssituatie afgraven van de deklaag en pump & treat voor het grondwater zijn. Uitgegaan wordt van een debiet van 600 m<sup>3</sup>/dag.

De kostenraming van deze variant is gerelateerd aan het saneringsonderzoek in opdracht van de Provincie Limburg ter plaatse van de voormalige chemische wasserij aan de Abdissenweg 1 te Maastricht, waar de problematiek qua omvang (behalve afwezigheid van DNAPL) en geohydrologische situatie vergelijkbaar is met het onderhavige geval. Enig significant verschil is dat er in dit geval aangenomen wordt dat de zuivering over de hele periode van saneren/beheersen nodig is. De aanwezige DNAPL zal langdurig hoge gehalten aan verontreiniging veroorzaken.

Zoals gebruikelijk bij eeuwigdurende saneringsmaatregelen is van een saneringsduur van 30 jaar uitgegaan. Hierbij zijn de lopende jaarlijkse kosten gekapitaliseerd met een factor 19.2, gebaseerd op een rentevoet van 3.5% (deze rentevoet is gebruikelijk voor de overheid als probleem-eigenaar; vergelijk hoofdstuk 5). Ten behoeve van de ontgraving van de verontreiniging in de slecht doorlatende deklaag zal de bestaande bebouwing gesloopt moeten worden. De kosten

voor aanleg van het onttrekkings- en zuiveringssysteem en voorbereiding bedragen kEUR 110. De jaarlijkse kosten (instandhouden, lozingskosten, milieukundige begeleiding, monitoring, etc.) bedragen kEUR 140. Hierbij dient te worden opgemerkt, dat een groot deel van de jaarlijkse kosten de lozingskosten betreft, omdat per kubieke meter geloosd water EUR 0.55 verschuldigd is aan de gemeente en het zuiveringsschap. Deze kosten kunnen in andere delen van Nederland veel lager zijn, want de lozingskosten bedragen elders niet meer dan EUR 0.03 tot 0.11/m<sup>3</sup>.

De kosten voor de traditionele aanpak zijn als volgt:

|   |            |
|---|------------|
| Ontgraving en slopen gebouwen t.b.v. sanering deklaag | kEUR 522   |
| Aanleg onttrekkingsstelsel                            | kEUR 110   |
| Grondwaterbeheersing (gekapitaliseerd) :              | kEUR 2,610 |
|   |            |
| Totaal  | kEUR 3,242 |

Aangezien de drie fysisch-chemische methoden naar verwachting de verontreiniging in de deklaag niet kunnen verwijderen, is voor alle drie technieken eveneens een ontgraving van de deklaag nodig. In de volgende ontwerpen voor de drie innovatieve technieken wordt dan ook niet meer ingegaan op de ontgraving van de verontreiniging. De in het volgende hoofdstuk geraamde kosten voor de drie *in-situ* technieken dienen derhalve te worden vergeleken met de kosten van de grondwaterbeheersing van MEUR 2,61.

#### 4.3 Sanering door middel van *in-situ* oxidatie (Fenton's reactie)

##### 4.3.1 *Uitgangspunten en aannames*

Voor het ontwerp worden de volgende uitgangspunten en aannames aangehouden:

- Het horizontaal oppervlak van de zinklaag is 400 m<sup>2</sup>, de dikte van de DNAPL (met mengsel tri-per 50:50) bedraagt 10 cm in poriën. Dit betekent bij een aangenomen porositeit van 33%, een volume van 13 kubieke meter of een gewicht van 20 ton met een dichtheid van het mengsel tri-per van 1.54 ton/m<sup>3</sup>.
- 4 kg 100% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> is nodig voor het oxideren van 1 kg mengsel tri-per (informatie van [in-Situ Technieken bv] stoichiometrisch is 0.57 kg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> per kg mengsel tri-per nodig). Er is dus 80 ton H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> of 800 kubieke meter H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-oplossing (10%) nodig voor de oxidatie van de zinklaag. De nodige hoeveelheid oxidatiemiddel wordt in drie injectieperiodes geïnjecteerd.
- Voor de 10%-oplossing H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (incl. pH-buffer en Fe(II)-katalysator) wordt een prijs van EUR 110/m<sup>3</sup> aangenomen.
- Met het mobiele injectiesysteem wordt een invloedstraal van 5 m gecreëerd, oftewel 80 m<sup>2</sup> behandeld gebied, daarom zijn 5 injectiepunten nodig.
- De totale kosten voor het mobiele injectiesysteem (bijvoorbeeld van de firma Geoprobe) zijn EUR 1,400/dag. De kosten voor de tankopstelling zijn EUR 4,500. Er wordt van uitgegaan dat 20 dagen milieukundige begeleiding (EUR 590/dag) en 20 dagen toezicht (EUR 770/dag) nodig zijn.
- De warmte-ontwikkeling bij de reactie is voor het totale systeem geen probleem, omdat de grote hoeveelheden water met hoge warmtecapaciteit als buffer zullen dienen. Wel is vorming van gasbubbel te verwachten door productie van CO<sub>2</sub> en verdamping van CKW als gevolg van lokale hitte-ontwikkeling. Hierdoor is een luchtafzuiging en een actief-koolfilter nodig.
- Voor de dimensionering van het actief-koolfilter wordt ervan uitgegaan, dat 1% van de verontreiniging via de gasfase uit de actieve zone verdwijnt. De capaciteit van het koolfilter is 5% (kg/kg) en er wordt met een prijs van EUR 4.5/kg gerekend.

##### 4.3.2 *Globaal ontwerp van het saneringssysteem*

Er wordt via een wegdrukbaar injectiesysteem een 10 % oplossing H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> op vijf locaties in de DNAPL-zone geïnjecteerd. De benodigde hoeveelheid H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wordt in drie periodes geïnjecteerd.



Per periode wordt tweeëneenhalve dag geïnjecteerd. Het injectiedebiet is 1 m<sup>3</sup>/uur per injectiepunt. De totale injectieperiode is inclusief mobilisatie 40 dagen.

Voor het afvangen van de geproduceerde gasbellen worden tien afzuigfilters tot 1 m onder de deklaag geplaatst. De lucht in deze filters wordt continu afgezogen.

Nadat in elke injectielocatie een periode van tweeëneenhalve dag is geïnjecteerd wordt het grondwater in tien peilbuizen gemonitord. Hierbij dienen nog vijf peilbuizen voor start van de injectie te worden geplaatst.

#### 4.3.3 *Faalgebeurtenissen en kritische factoren*

De potentiële faalgebeurtenissen voor *in-situ* oxidatie bij de locatie zijn in kaart gebracht. Hierbij zijn alleen de hoofdgebeurtenissen beschouwd die verwijzen naar het saneringsproces zelf. Gebeurtenissen die niet samenhangen met de sanering (zoals criminele activiteiten, aardbevingen of overstromingen, etc.) zijn niet meegenomen. De gebeurtenissen zijn opgesteld alsof het saneringsplan nog opgesteld moet worden vanachter het bureau; mogelijk kunnen faalgebeurtenissen weggestreept worden bij het opstellen van het saneringsplan door het vooraf maken van een veldbezoek of het uitvoeren van laboratoriumtests. Deze vertrekpunten gelden niet alleen voor dit geval, maar ook voor de overige vijf uitgewerkte gevallen. Het onderdeel 'Toegankelijkheid' is als eerste onderdeel opgenomen, omdat de toegankelijkheid van een bodemverontreiniging verschillend ervaren wordt voor verschillende saneringstechnieken. De noodzaak tot injectieputten in of rondom de verontreiniging verschilt bijvoorbeeld tussen saneringstechnieken.

##### 1. *Toegankelijkheid*

Omdat gebouwen op de locatie aanwezig zijn, is het mogelijk dat de optimale locaties voor de injectie via het wegdrukbaar systeem niet toegankelijk zijn. Deze kans wordt echter zeer klein geschat, omdat het wegdrukbaar systeem niet veel ruimte nodig heeft en de injectielocaties enigszins flexibel kunnen worden gekozen.

##### 2-3. *Inschatting omvang verontreiniging*

Op basis van de beperkte informatie is het mogelijk dat de omvang van de DNAPL niet goed is ingeschat. Verder zijn ook de aannames met betrekking tot verzadiging en dikte van de DNAPL mogelijk onjuist. Dit heeft directe gevolgen voor de kosten van de sanering.

##### 4. *Aanwezigheid oxideerbare stoffen*

Door aanwezigheid van organisch materiaal en andere stoffen die kunnen worden geoxideerd wordt oxidatiemiddel verbruikt. In de aangenomen hoeveelheden oxidatiemiddel is hiervoor een inschatting gemaakt door het inzetten van een achtvoudige overmaat H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Het is echter toch mogelijk dat meer oxidatiemiddel nodig is dan werd aangenomen.

##### 5. *Zettingen*

Omdat de zinklaag in een kalksteenformatie ligt is de kans groot dat de oxidatiereactie met H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> als oxidatiemiddel niet voldoende werkt. Tevens bestaat de mogelijkheid dat door de productie van zuur de kalksteen wordt opgelost, wat zettingen tot gevolg kan hebben. Het alternatief permanganaat werkt beter onder neutrale omstandigheden, maar hier zijn behoorlijke meerkosten aan verbonden. Omdat ook bij de oxidatie middels permanganaat zuur vrijkomt bestaat ook bij dit oxidatiemiddel het gevaar van zettingen. Naar verwachting zijn hiervan alleen delen van de gebouwen op de locatie betrokken. De schade bij optredende zettingen wordt geschat op KEUR 500.

#### 6. Neerwaartse mobilisatie

Als gevolg van de temperatuurverhoging die optreedt tijdens de oxidatiereactie is het mogelijk dat onverhoopt neerwaartse mobilisatie optreedt. Wordt dit opgemerkt, dan zal de beheersvariant in werking gesteld moeten worden.

#### 7. Inschatting invloedsstraal

De aannames met betrekking tot de invloedsstraal van het wegdrukbaar systeem zijn mogelijk onjuist. Hierdoor zijn mogelijk meer injectiepunten nodig.

#### 8. Ondergrondse infrastructuur

Agressieve oxidatiemiddelen kunnen schade aan kabels, leidingen en funderingspalen veroorzaken. De kans wordt echter klein geschat, omdat de kabels en leidingen naar verwachting in de deklaag aanwezig zijn waar geen oxidatiemiddelen worden geïnjecteerd.

In de risico-analyse (paragraaf 4.3.5) wordt op de faalkansen en de daarmee verbonden financiële onzekerheden ingegaan.

#### 4.3.4 Kosten

Er wordt vanuit gegaan dat de volgende kosten voor de verwijdering van de zinklaag worden gemaakt:

|  |      |     |
|--|------|-----|
| Mobiel injectiesysteem, leidingen, tankopstelling  | kEUR | 59  |
| Bodempluchtafzuiging (installatie, stroom, filter) | kEUR | 32  |
| Chemicaliën  | kEUR | 91  |
| MKB + directievoering                              | kEUR | 27  |
| Monitoring (plaatsen 5 pb's en analyses 10 pb's)   | kEUR | 7   |
|  |      |     |
| Totaal   | kEUR | 216 |

Sommige van deze kosten kunnen als vaste kosten beschouwd worden, terwijl andere afhankelijk zijn van de saneringsduur. Het zal duidelijk zijn dat dit verschil zeer belangrijk is voor de risico-analyse, omdat de tijdsduurafhankelijke kosten behoorlijk kunnen oplopen als de saneringsduur door omstandigheden toeneemt. Dit wordt verder uitgewerkt in paragraaf 4.3.5.

Vanwege de grote onzekerheden die met de techniek *in-situ* oxidatie zijn verbonden op deze specifieke locatie is een experiment nodig dat de haalbaarheid van de saneringsaanpak test. Wij gaan uit van een test in duplo in een glaskolom, waarin de bodemopbouw conform de natuurlijke ligging in het veld wordt nagebootst. Verder wordt een hoeveelheid tri-per mengsel toegevoegd, zodat een zinklaag van 10 cm wordt gecreëerd. Daarna wordt een hoeveelheid H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> toegevoegd met dezelfde overmaat als in het saneringsontwerp voorzien. Vervolgens wordt de pH continu geregistreerd en tri en per boven de kalksteenlaag gemeten. De geraamde kosten voor het experiment bedragen ca. kEUR 17.

#### 4.3.5 Risico-analyse

Nu het saneringsontwerp klaar is en de faalgebeurtenissen geïdentificeerd zijn, kan een tabel worden opgesteld, waarin alle kosten en kansen, alsmede de spreiding in deze waarden, staan weergegeven (tabel 2). Aangegeven in tabel 2 is of de genoemde kosten vast zijn of afhankelijk van de saneringsduur. In sommige gevallen is een arbitraire spreiding van de kosten aangenomen van +/- 10%.

Uitgaande van de in paragraaf 4.3.3 geïdentificeerde faalgebeurtenissen is een invloedsdiagram opgesteld voor dit geval (figuur 8). Gekozen is voor een aanpak, waarbij aan elke faalgebeurtenis

de gebeurtenissen 'opgemerkt' en 'acceptabel' zijn toegevoegd. Het is voorstelbaar dat een bepaalde faalgebeurtenis wel optreedt, maar niet opgemerkt wordt. De kans dat een dergelijke gebeurtenis wordt opgemerkt kan natuurlijk wijzigen door bijvoorbeeld te monitoren. Door de kans dat een bepaalde faalgebeurtenis wordt opgemerkt te variëren, kan bekeken worden welk effect dit heeft op de verwachte saneringskosten. Hieruit kan weer geconcludeerd worden welk bedrag door de probleemeigenaar aan monitoring besteed mag worden, waarbij de monitoringskosten zich als het ware terugverdienen door verkleining van de risico's bij implementatie van de sanering. De acceptatie voor een opgemerkte faalgebeurtenis is nu in de meeste gevallen gesteld op 10%. Als er geen acceptatie is, kunnen deze waarden natuurlijk allemaal op 0% gesteld worden.

Voor dit geval zijn twee scenario's uitgewerkt, namelijk (i) zonder het uitvoeren van een kalksteentest vooraf en (ii) inclusief het uitvoeren van een kalksteentest. Aangenomen wordt dat, na een positief testresultaat, de kans dat *in-situ* oxidatie niet werkt als gevolg van de aanwezigheid van de kalksteen slechts 5% is. Aangezien de straf op het falen van de techniek het alsnog uitvoeren van de beheersvariant (kosten MEUR 2.61) is, heeft het verbeteren van de slaagkans van *in-situ* oxidatie een grote impact op de verwachte saneringskosten.

Voor beide scenario's is het invloedsdiagram omgezet naar een gebeurtenisboom. Aangezien deze door de vele gebeurtenissen zeer omvangrijk is (> 8,000 takjes), is het niet mogelijk deze weer te geven. Wat wel is weergegeven zijn de kosten/kanscurves voor beide scenario's. Figuur 9 geeft de kosten/kanscurve voor het scenario, waarin geen test vooraf wordt uitgevoerd. Er zijn twee intervallen waarneembaar die een relatief grote mate van waarschijnlijkheid hebben, één van MEUR 0.6-0.8, en één van MEUR 3.2-3.4. De hoge kosten van het laatste interval is het gevolg van de noodzaak om alsnog de (dure) beheersvariant in uitvoering te nemen. Dit is niet geheel onverwacht, omdat de kans dat de techniek niet werkt (zonder deze vooraf te testen) is geschat op 80%. Daarnaast moet de beheersvariant ook uitgevoerd worden als neerwaartse mobilisatie van de DNAPL optreedt als gevolg van hittevorming. De gemiddelde verwachte saneringskosten voor dit scenario zijn MEUR 2.1 ± 1.4. Als wél vooraf een test wordt uitgevoerd ziet de kosten/kanscurve er veel aantrekkelijker uit (figuur 10). De kans dat de saneringskosten < MEUR 1.0 zijn is nu ca. 75%.

Bedenk wel dat dit alleen de saneringskosten zijn als de techniek in uitvoering wordt genomen, dus als de kalksteentest positief uitvalt. Bij negatief uitvallen van de test zal sowieso de beheersvariant geïmplementeerd worden. De gemiddelde verwachte saneringskosten voor dit scenario zijn MEUR 1.0 ± 1.1.

Tabel 2. Kosten/kansen tabel voor *in-situ* oxidatie bij locatie kleine DNAPL.

| <i>Fertoni's reagens</i> | <i>omschrijving</i>   | <i>kosten/kansen</i> | <i>low value</i> | <i>high value</i> | <i>opmerkingen</i>  |
|--------------------------|---|----------------------|------------------|-------------------|---|
| 1. p. toeg               | kans dat de site toegankelijk is                              | 90%                  | 85%              | 95%               | mobiel injectiesysteem is flexibel mbt de exacte plaats waar het ingezet wordt  |
| aantal_huizen            | aantal huizen op het brongebied                               | 2                    | 1                | 5                 |   |
| k_slop                   | sloopkosten en kosten wederopbouw per huis                    | 300,000              | -                | -                 | - op de variatie in deze kosten kan überhaupt geen invloed worden uitgeoefend   |
| 2. p. targ_area          | kans dat de target area goed geschat is                       | 40%                  | 10%              | 60%               |   |
| k_chem                   | kosten van chemicaliën  | 200,000              | 180,000          | 220,000           | spreading arbitrair gesteld op +/- 10%  |
| k_moni                   | kosten van monitoring   | 15,000               | 13,500           | 16,500            | spreading arbitrair gesteld op +/- 10%  |
| k_bove_infr_koop         | vaste kosten van bovengrondse infrastructuur                  | 80,000               | 72,000           | 88,000            | spreading arbitrair gesteld op +/- 10%  |
| saneringsduur            | saneringsduur in dagen  | 40                   | -                | -                 |   |
| k_bove_infr_huur         | huur van bovengrondse infrastructuur (per dag)                | 3,000                | 2,700            | 3,300             |   |
| k_toez                   | kosten van toezicht (per dag)                                 | 3,000                | -                | -                 | - geen spreading want direct afhankelijk van uurloon                            |
| p_opge_1                 | kans dat een grotere target area niet wordt opgemerkt         | 70%                  | -                | -                 |   |
| p_acce_1                 | kans dat het acceptabel is dat de target area groter is       | 10%                  | -                | -                 |   |
| 3. p. verz               | factor  | 2                    | 1.01             | 3                 |   |
| p_opge_2                 | kans dat de verzadiging goed geschat is                       | 70%                  | 50%              | 80%               |   |
| p_acce_2                 | kans dat een grotere verzadiging niet wordt opgemerkt         | 70%                  | -                | -                 |   |
| vergroting_verzadiging   | kans dat het acceptabel is dat de verzadiging groter is       | 10%                  | -                | -                 |   |
| 4. p. aanw_elec          | factor  | 1.2                  | 1.01             | 1.5               |   |
| p_opge_3                 | kans dat extra natuurlijke electrondonoren aanwezig zijn      | 5%                   | 0%               | 10%               | kans klein want 8-voudige overmaat peroxide                                     |
| p_acce_3                 | kans dat extra electrondonoren niet worden opgemerkt          | 80%                  | -                | -                 |   |
| meer_electrondonoren     | kans dat extra electrondonoren acceptabel zijn                | 10%                  | -                | -                 |   |
| 5. p. prob_kalk          | factor  | 1.2                  | 1.01             | 1.3               |   |
| k_zett                   | kans dat kalksteen geen probleem is voor chemische oxidatie   | 20%                  | 0%               | 30%               | kans is klein als niet eerst een test wordt uitgevoerd (wel test: 95%)          |
| k_test                   | kosten van zettingsschade                                     | 1,000,000            | 900,000          | 1,100,000         | spreading arbitrair gesteld op +/- 10%  |
| p_opge_4                 | kosten van kalksteentest                                      | 0                    | -                | -                 | - als wel getest wordt zijn de kosten kfi 37                                    |
| andere_sanering          | kans dat problemen met kalksteen niet worden opgemerkt        | 50%                  | -                | -                 |   |
| 6. p. invl               | kosten andere saneringstechniek bij problemen met kalk        | 5,750,000            | 5,175,000        | 6,325,000         | dit is een beheersvariant; spreading arbitrair gesteld op +/- 10%               |
| p_opge_5                 | kans dat invloedsfeer goed geschat is                         | 70%                  | 60%              | 90%               |   |
| p_acce_5                 | kans dat een kleinere invloedsfeer niet wordt opgemerkt       | 50%                  | -                | -                 |   |
| verkleining_invloedsfeer | kans dat een kleinere invloedsfeer acceptabel is              | 10%                  | -                | -                 |   |
| 7. p. toxi_tuss          | factor  | 0.8                  | 0.6              | 0.99              |   |
| p_opge_6                 | kans dat geen toxische tussenproducten ontstaan               | 95%                  | 90%              | 100%              | kans groot want bodemluchtinzuging actief                                       |
| p_acce_6                 | kans dat toxische tussenproducten niet worden opgemerkt       | 30%                  | -                | -                 |   |
| percentage_van_zinklaag  | kans dat toxische tussenproducten acceptabel zijn             | 5%                   | -                | -                 |   |
| 8. p. scha_nde_infr      | ratio toxische tussenproducten tov oorspronkelijke zinklaag   | 0.1                  | -                | -                 |   |
| k_scha_nde_infr          | kans dat geen schade aan ondergrondse infrastructuur optreedt | 90%                  | 85%              | 100%              | kans groot want injectie vindt plaats op diepte waar ws geen infrastructuur zit |
|                          | kosten van schade aan ondergrondse infrastructuur             | 100,000              | 50,000           | 150,000           |   |

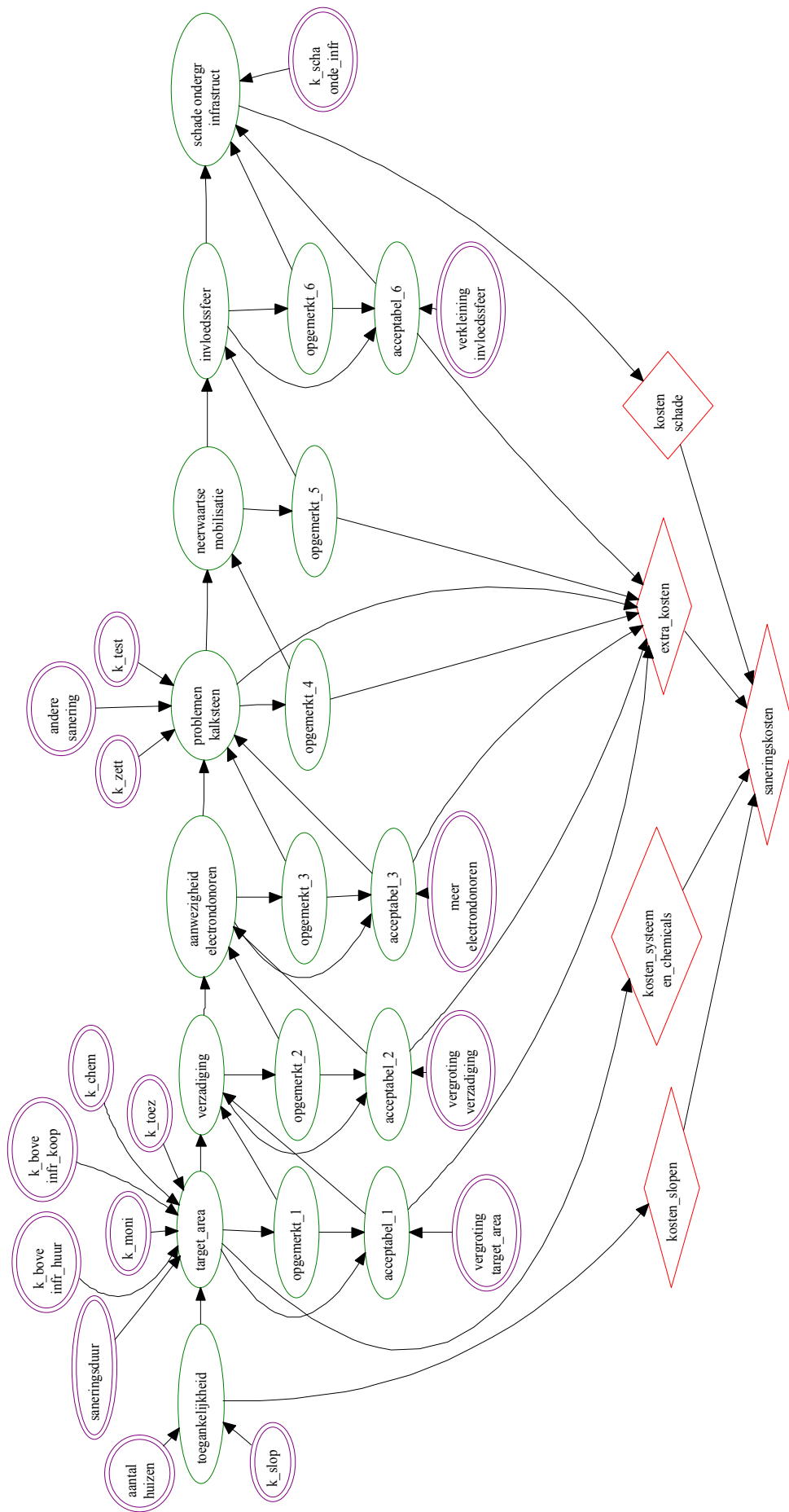


Fig. 8. Invloedsdiagram volgens KFR-systematiek voor in-situ oxidatie bij locatie kleine DNAPL.

### DNAPL klein/Fenton's reagens

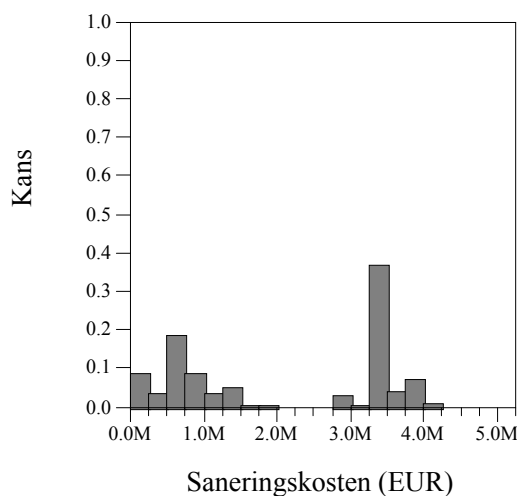


Fig. 9. Kosten/kansen curve voor *in-situ* oxidatie bij kleine DNAPL zonder voorafgaande kalksteentest.

### DNAPL klein/Fenton's reagens

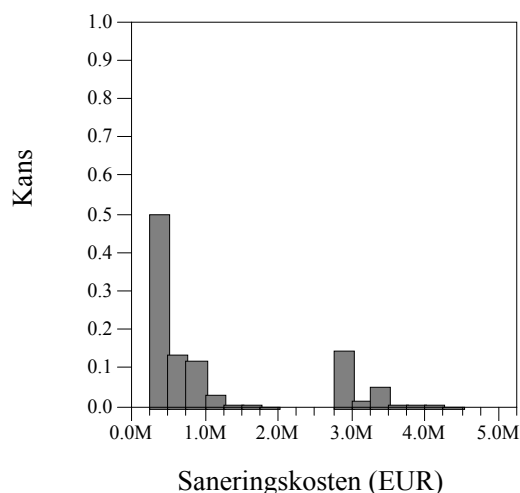


Fig. 10. Kosten/kansen curve voor *in-situ* oxidatie bij kleine DNAPL met voorafgaande kalksteentest.

Voor dit laatste scenario is een tornadodiagram opgesteld (figuur 11). Hieruit volgt dat de onzekerheid in het aantal malen dat de target area groter is dan aanvankelijk gedacht werd de grootste invloed uitoefent op de verwachte saneringskosten. Deze onzekerheid zou bijvoorbeeld gereduceerd kunnen worden door voorafgaand aan de sanering buiten het geschatte brongebied te monitoren om zodoende vast te stellen of het brongebied wellicht groter is dan aanvankelijk werd gedacht. Opvallend is dat een aantal andere factoren een veel minder kritische invloed heeft. Zo blijkt bijvoorbeeld uit het tornadodiagram dat een anderhalf keer zo hoge verzadiging nauwelijks invloed heeft op de verwachte saneringskosten.

## DNAPL klein/Fenton's reagens

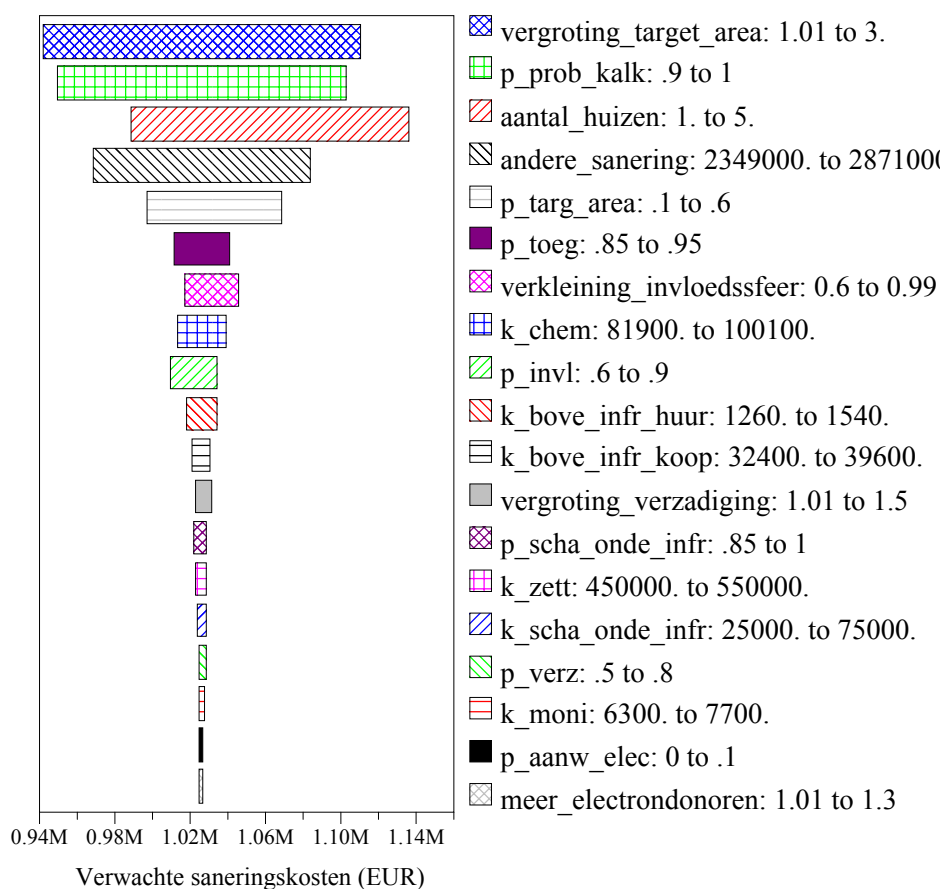


Fig. 11. Tornadodiagram voor *in-situ* oxidatie bij locatie kleine DNAPL. Voor een toelichting op de variabelen wordt verwezen naar tabel 1.

Tenslotte kan nog opgemerkt worden dat beide scenario's qua saneringskosten gunstiger uitvallen dan de referentie-saneringsoptie. Vergelijking van beide scenario's leert dat de spreiding in kosten van de sanering geringer is als een kalksteentest wordt uitgevoerd. De onzekerheid in de kosten is veel geringer voor het scenario met kalksteentest. Het is daarom zeker aan te bevelen van tevoren een kalksteentest uit te voeren.

## 4.4 Sanering door co-solvent flushing

### 4.4.1 Uitgangspunten en aannames

Voor het ontwerp worden de volgende uitgangspunten en aannames aangehouden:

Het horizontaal oppervlak van de zinklaag is 400 m<sup>2</sup>, de dikte van de DNAPL (met mengsel tri-per 50:50) bedraagt 10 cm in poriën. Dit betekent bij een aangenomen porositeit van 33%, een volume van 13 kubieke meter of een gewicht van 20 ton met een dichtheid van het mengsel tri-per van 1.54 ton/m<sup>3</sup>.

- Geïnjecteerd wordt een co-solvent bestaande uit 54% isopropanol, 23% hexanol en 23% water [Hofstee *et al.*, 2003]. De kosten van dit mengsel zijn ca. EUR 2.40/l, gebaseerd op de basiskosten van isopropanol (EUR 1.20/l) en hexanol (EUR 5.20/l).

- We nemen aan dat 80% van de DNAPL met 3 poriën volumes verwijderd kan worden. Dit houdt in dat 18 ton DNAPL met behulp van 8000 l co-solvent (doorstroomdiepte 2 m) bestaande uit het alcoholmengsel kan worden gesaneerd. Wij zullen een efficiency van 2.375 hanteren.
- De isopropanol wordt door destillatie gerecycled, waarbij uitgegaan wordt van een verlies per flushing van 20%. De hexanol kan niet worden teruggewonnen en gaat verloren. Dit betekent dat bij herinjecteren een deel isopropanol en de volledige hoeveelheid hexanol moet worden bijgemengd.

#### 4.4.2 Globaal ontwerp van het saneringssysteem

In principe kan het technisch ontwerp voor het injectiesysteem van de co-solvent flushing variant er hetzelfde uitzien als bij een *in-situ* oxidatie. Dit betekent voor deze site 5 circulatieputten (gecombineerde injectie- en onttrekkingsputten). Door onderin de put te injecteren en bovenin te onttrekken wordt een opwaartse stroming gecreëerd die de kans op neerwaartse mobilisatie van de verontreiniging minimaliseert. Het gehele onttrekkingsstelsel dient met bovengrondse buizen op elkaar aangesloten te worden: uitgaande van een invloedsstraal van ongeveer 5 meter per injectiepunt (zie ook paragraaf 4.3) en de bebouwing van het terrein in beschouwing nemend bedraagt de lengte van het benodigde leidingenstelsel naar schatting 100 meter. Voor het injectiesysteem is 50 meter leidingen nodig.

In verschillende in de literatuur beschreven praktijktesten voor co-solvent flushing worden relatief lage injectiedebieten gehanteerd van 1-5 l/min per injectiepunt. De reden hiervoor is waarschijnlijk de lange 'reactietijd' van het primaire proces (oplossen van de DNAPL aan het grensvlak tussen DNAPL en co-solvent). Uitgaande van een injectiedebiet van 5 l/min per injectiepunt, kan het porievolume van 8000 liter in 320 minuten (ruim 5 uur) worden doorspoeld. Om de vereiste minimale verticale stromingssnelheid te bereiken en de totale saneringsduur beperkt te houden zal moeten worden gekozen voor een relatief hoog injectiedebiet.

Faalgebeurtenissen en kritische factoren:

##### 1. Toegankelijkheid

Omdat gebouwen op de locatie aanwezig zijn, is het mogelijk dat de optimale locaties voor de injectie- en onttrekkingsputten niet toegankelijk zijn. In dat geval zouden gebouwen gesloopt moeten worden.

##### 2-3. Inschatting omvang verontreiniging

Op basis van de beperkte informatie is het mogelijk dat de omvang van de DNAPL niet goed is ingeschat. Verder zijn ook de aannames met betrekking tot de verzadiging en dikte van de DNAPL mogelijk onjuist. Dit heeft directe gevolgen voor de kosten van de sanering.

##### 4. Doorlatendheid

Het is van belang dat de ondergrond voldoende doorlatend is om een co-solvent spoelsysteem te kunnen installeren. Gezien de aanwezigheid van de Maasgronden lijkt dit geen groot probleem.

##### 5. Recyclen alcohol

Door destillatie zal de isopropanol uit het co-solvent/contaminantmengsel uit het effluent teruggewonnen worden. Als het destillatiesysteem de vracht niet aankan zullen de debieten verlaagd moeten worden of voor tijdelijke opslag moeten worden gezorgd, aangezien de installatie van extra of grotere destillatiekolommen een zeer grote kostenpost met zich meebrengt.

##### 6. Mobilisatie

Het mobiliseren van de verontreiniging is een zeer ongewenste situatie. Monitoren van het grondwater buiten het brongebied moet hier zicht op geven.



#### 4.4.3 Kosten

Er wordt van uitgegaan dat de volgende kosten voor de verwijdering van de zinklaag worden gemaakt:

|                                 |          |
|---------------------------------|----------|
| Injectie- en onttrekkingsputten | kEUR 52  |
| Destillatiekolommen             | kEUR 80  |
| Huur leidingen en pompen        | kEUR 3   |
| Chemicaliën                     | kEUR 13  |
| MKB + directievoering           | kEUR 27  |
| Monitoring                      | kEUR 7   |
|                                 |          |
| Totaal                          | kEUR 182 |

Sommige van deze kosten kunnen als vaste kosten beschouwd worden, terwijl andere afhankelijk zijn van de saneringsduur. De saneringsduur zelf is ook weer afhankelijk van het injectie-debiet en de efficiëntie. Het zal duidelijk zijn dat dit zeer belangrijk is voor de risico-analyse, omdat de tijdsduurafhankelijke kosten behoorlijk kunnen oplopen als de saneringsduur door omstandigheden toeneemt. De kosten voor chemicaliën zijn ook sterk afhankelijk van de efficiency en van de hoeveelheid alcohol die per flushing verloren gaat. Bij de hierboven vermelde kosten is uitgegaan van een verwijderingsefficiëntie van 2.375 en een verliespercentage van 20. De interactie tussen al deze onzekerheden is onderwerp van de KFR-analyse en wordt verder uitgewerkt in paragraaf 4.4.5.

#### 4.4.4 Risico-analyse

De kosten en kansen voor dit geval zijn weergegeven in tabel 3. Uitgaande van de in paragraaf 4.4.3 vermelde faalgebeurtenissen is een invloedsdiagram opgesteld voor dit geval (figuur 12). Hierbij is opnieuw gekozen voor de aanpak, beschreven in paragraaf 4.3.5, d.w.z. met gebeurtenissen 'opgemerkt' en 'acceptabel'. Merk op dat er minder faalgebeurtenissen geïdentificeerd zijn dan voor het geval DNAPL klein/Fenton's reagens, waardoor het invloedsdiagram minder omvangrijk is.

Figuur 13 toont de kosten/kansencurve die volgt uit het invloedsdiagram. Hieruit blijkt dat met een waarschijnlijkheid van ca. 63% de saneringskosten zullen vallen in het interval MEUR 0.0–0.5. Er is echter ook een cluster met een waarschijnlijkheid van ongeveer 2%, waarbij de saneringskosten de MEUR 1.5 overstijgen. Dit cluster vertegenwoordigt waarschijnlijk de relatief hoog ingeschatte faalkans met betrekking tot de foutieve inschatting van de target area (die ook grote financiële gevolgen heeft). De gemiddelde verwachte saneringskosten zijn MEUR  $0.5 \pm 0.4$ .

Uit het tornadodiagram (figuur 14) blijkt dat met name de onzekerheid in het aantal mogelijk te slopen huizen en de onzekerheid in de inschatting van de grootte van de target area, een grote invloed hebben op de te verwachten saneringskosten.

Tabel 3. Kosten/kansen tabel voor co-solvent flushing bij locatie kleine DNAPL.

| Co-solvents                    | omschrijving   | kosten/kansen | low value | high value | opmerkingen                                   |
|--------------------------------|--|---------------|-----------|------------|---|
| 1. p_toeg                      | kans dat de site toegankelijk is                                       | 75%           | -         | -          | -   |
| aantal_huizen                  | aantal huizen op het brongebied  | 2             | 1         | 5          | -   |
| k_slop                         | sloopkosten en kosten wederopbouw per huis                             | 300,000       | -         | -          | -   |
| 2. p_targ_area                 | kans dat de target area goed geschat is                                | 40%           | 10%       | 60%        | -   |
| k_ond_infr_vast                | kosten ondergrondse infrastructuur                                     | 52,500        | 47,250    | 57,750     | 57,750 spreiding arbitrair gesteld op +/- 10% |
| k_bove_infr_huur               | huur van bovengrondse infrastructuur (per dag)                         | 300           | 330       | 270        | 270 spreiding arbitrair gesteld op +/- 10%    |
| k_moni                         | kosten van monitoring (per dag)  | 140           | 126       | 154        | 154 spreiding arbitrair gesteld op +/- 10%    |
| k_toez                         | kosten van toezicht en MKB (per dag)                                   | 3,000         | -         | -          | -   |
| k_dest                         | kosten voor destillatie van de alcohol                                 | 80,000        | 72,000    | 88,000     | 88,000 spreiding arbitrair gesteld op +/- 10% |
| k_hex                          | kosten van hexanol (l)   | 5.2           | 4.68      | 5.72       | 5.72 spreiding arbitrair gesteld op +/- 10%   |
| k_iso                          | kosten van isopropanol (l)   | 1.2           | 1.08      | 1.32       | 1.32 spreiding arbitrair gesteld op +/- 10%   |
| porievolume                    | volume DNAPL (l)   | 13,000        | -         | -          | -   |
| percentage_verlies_hexanol     | percentage hexanol dat per porievolume spoelen verloren gaat           | 100%          | 98%       | 100%       | 100%  |
| percentage_verlies_isopropanol | percentage isopropanol dat per porievolume spoelen verloren gaat       | 20%           | 10%       | 30%        | 30%   |
| efficiency                     | ratio van volume DNAPL dat per 1,000 l co-solvent wordt verwijderd     | 2,375         | 2.0       | 3.0        | 3.0   |
| injectiegebied                 | aantal l/d (vijf injectieputten)                                       | 36,000        | 28,800    | 43,200     | 43,200  |
| p_opge_1                       | kans dat een grotere target area niet wordt opgemerkt                  | 70%           | -         | -          | -   |
| p_acce_1                       | kans dat het acceptabel is dat de target area groter is                | 10%           | -         | -          | -   |
| vergroting_target_area         | factor   | 2             | 1.01      | 3          | 3   |
| 3. p_verz                      | kans dat de verzadiging goed geschat is                                | 70%           | 50%       | 80%        | 80%   |
| p_opge_2                       | kans dat een grotere verzadiging niet wordt opgemerkt                  | 30%           | 10%       | 50%        | 50%   |
| p_acce_2                       | kans dat het acceptabel is dat de verzadiging groter is                | 40%           | 20%       | 60%        | 60%   |
| vergroting_verzadiging         | factor   | 1.2           | 1.01      | 1.5        | 1.5   |
| 4. p_door_toer                 | kans dat de doorlatendheid toereikend is                               | 100%          | -         | -          | -   |
| andere_sanering                | kosten andere saneringstechniek als doorlatendheid niet toereikend is  | 5,750,000     | 5,175,000 | 6,325,000  | 6,325,000                                     |
| 5. p_sche_zuiv                 | kans dat scheiding en zuivering goed werken                            | 80%           | -         | -          | -   |
| p_acce_3                       | kans dat het acceptabel is dat scheiding en zuivering niet goed werken | 5%            | -         | -          | -   |
| verlaging_debiet               | factor   | 0.8           | 0.7       | 0.99       | 0.99  |
| 6. p_mobi                      | kans dat geen mobilisatie optreedt                                     | 80%           | -         | -          | -   |
| p_opge_4                       | kans dat mobilisatie niet wordt opgemerkt                              | 50%           | -         | -          | -   |
| p_acce_4                       | kans dat mobilisatie acceptabel is                                     | 5%            | -         | -          | -   |
| k_hydro                        | Kans dat hydraulische controle bewerkstelligd kan worden               | 80%           | -         | -          | -   |
| k_nazo                         | kosten van nazorg in geval van mobilisatie                             | 250,000       | -         | -          | -   |

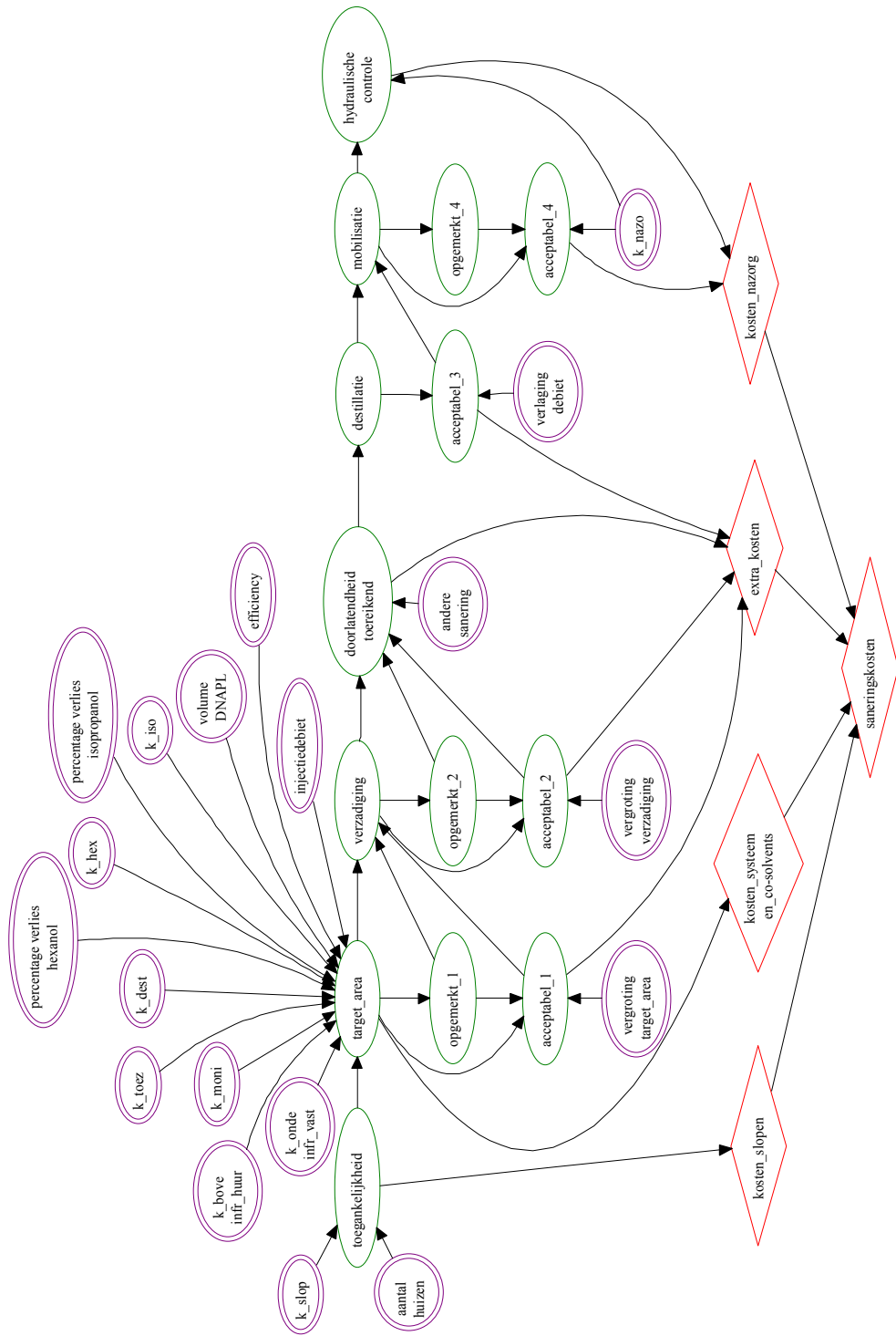


Fig. 12. Invoedsdiagram volgens KFR-systematiek voor co-solvent flushing bij locatie kleine DANPL

### DNAPL klein/Co-solvents

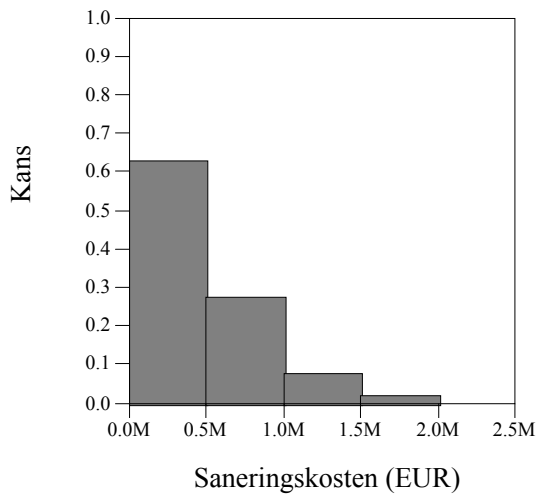


Fig. 13. Kosten/kansen curve voor co-solvent flushing bij locatie kleine DNAPL.

### DNAPL klein/Co-solvent flushing

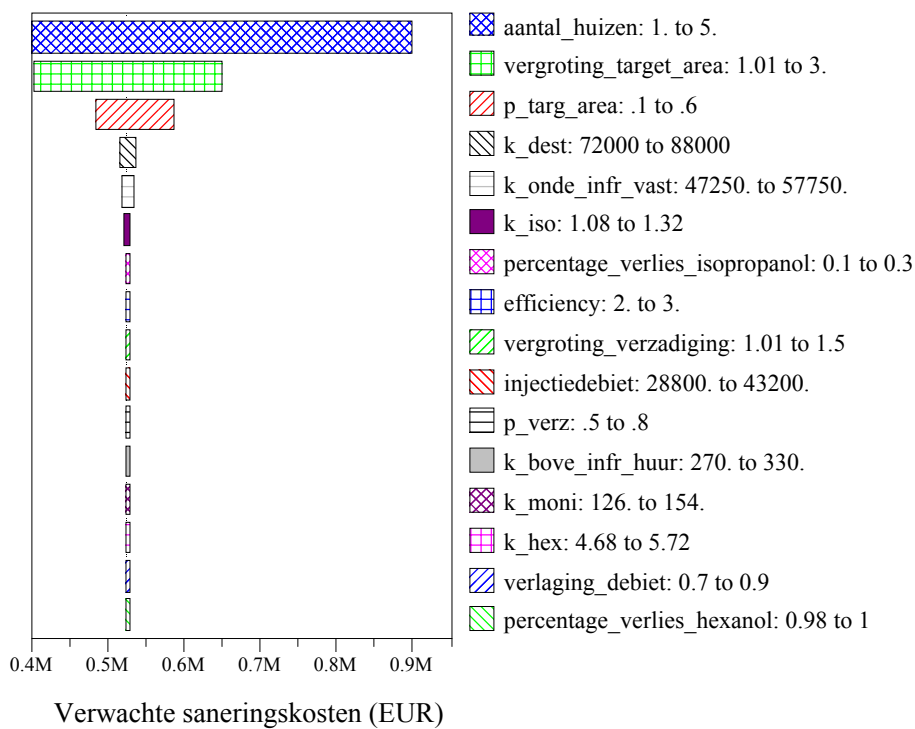


Fig. 14. Tornadodiagram voor co-solvent flushing bij locatie kleine DNAPL. Voor een toelichting op de variabelen wordt verwezen naar tabel 3.

## 4.5 Sanering door stoominjectie

### 4.5.1 *Uitgangspunten en aannames*

Voor het ontwerp worden de volgende uitgangspunten en aannames aangehouden:

- Bij een oppervlak van 400 m<sup>2</sup>, een zinklaag van 10 cm, een porositeit van 0.33 en een verzadiging van 10% is er sprake van 13 kubieke meter puur product.
- De deklaag is 4 m, de dikte van het maasgrindenpakket is 7 m, het te stomen volume is daarmee 2,800 kubieke meter.
- De doorlatendheid is bepalend voor de snelheid, waarmee een stoomdeken kan worden gevormd en is daarmee ook bepalend voor de saneringsduur. Met een doorlatendheid van 70 m/d zal een stoomdeken zich zeer snel ontwikkelen, hetgeen wordt gemonitord met thermokoppels. Aangenomen wordt dat na 15 dagen zich een stoomdeken ontwikkeld heeft.
- De hexagonstructuur, waarop het injectie- en onttrekkingsstelsel is gebaseerd, bestaat uit twee eenheden met een diameter van 20 m. De invloedstraal van één injectieput is 5 m; aangenomen wordt dat de combinatie van zes injectieputten de gehele hexagon met stoom zal vullen. In totaal is sprake van tien injectie- en twee onttrekkingsputten.
- Tijdens verhitten en onttrekken worden beide onttrekkingsputten elke 5 dagen bemonsterd en geanalyseerd op concentraties verontreiniging.
- Nadat een stoomdeken is ontwikkeld en de gehele verontreiniging is opgehit tot 100°C zijn er 15 dagen nodig om de verontreiniging met het grondwater op te pompen.

### 4.5.2 *Globaal ontwerp van het saneringssysteem*

Het injectiesysteem is opgebouwd uit twee aansluitende zeshoeken, waarbij de onttrekking in het midden van elke zeshoek geplaatst is. Een bovengronds leidingnet levert stoom aan die in een stoomgenerator wordt geproduceerd. De ontwikkeling van een stoomdeken wordt gemonitord met thermokoppels (20 per hexagon). Wanneer eenmaal een stoomdeken is geproduceerd wordt 15 dagen water en stoom onttrokken.

Vanwege de zeer grote doorlatendheid is het gevaar van ongewenste verspreiding van contaminanten reëel. In feite zou, om dit gevaar te neutraliseren, een geohydrologisch beheerssysteem opgezet moeten worden om te zorgen dat een stoomdeken zich ongestoord kan ontwikkelen. Met een dergelijk beheerssysteem is in dit ontwerp geen rekening gehouden. In plaats daarvan wordt gerekend met een grote kans op verspreiding.

### 4.5.3 *Faalgebeurtenissen en kritische factoren*

#### 1. *Toegankelijkheid*

Omdat gebouwen op de locatie aanwezig zijn, is het mogelijk dat de optimale locaties voor de injectie- en onttrekkingsputten niet toegankelijk zijn. In dat geval zullen gebouwen gesloopt moeten worden.

#### 2-3. *Inschatting omvang verontreiniging*

Op basis van de beschikbare informatie is het mogelijk dat de omvang van de LNAPL niet goed is ingeschat. Verder is ook de aanname met betrekking tot de verzadiging van de DNAPL mogelijk onjuist. Dit heeft directe gevolgen voor de kosten van de sanering.

#### 4. *Scheiding en zuivering*

Het kan zijn dat de scheidings- en zuiveringsinstallatie de onttrokken vracht niet aankan. In dat geval zal het onttrekkingsdebiet verlaagd moeten worden.

### 5. Neerwaartse mobilisatie

De neerwaartse verspreiding van de DNAPL is een groot gevaar, gezien de hittetoevoer aan het systeem en de grote grondwaterstroomsnelheid ter plaatse. Dit zal worden tegengegaan door een extra groot onttrekkingsdebiet aan te leggen en de injectiedruk van stoom op een minimum te houden. Als niettemin neerwaartse mobilisatie wordt waargenomen, dan zal alsnog de beheersvariant ten uitvoer worden genomen.

### 6. Letselschade

Als gevolg van het in aanraking komen met hete objecten of een lokale uitbraak van stoom kan mogelijk letselschade optreden.

#### 4.5.4 Kosten

De kosten voor dit geval zijn geschat op basis van het meer gedetailleerd uitgewerkte voorbeeld van stoominjectie bij de grote LNAPL (paragraaf 6.3).

|   |          |
|---|----------|
| Leidingen, injectie- en onttrekkingsputten, pompen, thermokoppels, etc. | kEUR 100 |
| Stoomgenerator (incl. energiekosten)                                    | kEUR 140 |
| Scheiding en zuivering  | kEUR 50  |
| Monitoring  | kEUR 32  |
| Toezicht  | kEUR 41  |
| Afwerken van onttrokken product   | kEUR 1   |
|   |          |
| Totaal  | kEUR 364 |

Sommige van deze kosten kunnen als vaste kosten beschouwd worden, terwijl andere afhankelijk zijn van de saneringsduur. Het zal duidelijk zijn dat dit zeer belangrijk is voor de risicoanalyse, omdat de tijdsafhankelijke kosten behoorlijk kunnen oplopen als de saneringsduur door faalgebeurtenissen toeneemt. Bij de hierboven vermelde tijdsafhankelijke kosten is uitgegaan van de nominale saneringsduur van 30 dagen.

Tabel 4. Kosten/kansen tabel voor stoominjectie bij locatie kleine DNAPL.

| Stoominjectie          | omschrijving   | kosten/kansen | low value | high value | opmerkingen                             |
|------------------------|--|---------------|-----------|------------|---|
| 1. p_toeg              | kans dat de site toegankelijk is                                       | 60%           | 40%       | 80%        |   |
| aantal_huizen          | aantal huizen op het brongebied  | 2             | 1         | 5          |   |
| k_slop                 | sloopkosten en kosten wederopbouw per huis                             | 300.000       | -         | -          |   |
| 2. p_targ_area         | kans dat de target area goed geschat is                                | 40%           | 10%       | 60%        |   |
| k_infr_vast            | vaste kosten infrastructuur  | 215.000       | 193.500   | 236.500    | spreadings arbitrair gesteld op +/- 10% |
| k_stoo_gene            | kosten van stoomgenerator  | 175.000       | 157.500   | 192.500    | spreadings arbitrair gesteld op +/- 10% |
| k_sche_zuiv            | kosten van scheiding en zuivering                                      | 100.000       | 90.000    | 110.000    | spreadings arbitrair gesteld op +/- 10% |
| k_afwe_prod            | kosten van afwerken puur product (per m3)                              | 1.22          | 1.10      | 1.34       | spreadings arbitrair gesteld op +/- 10% |
| k_ener                 | energiekosten (per dag)  | 4.200         | 3.780     | 4.620      | spreadings arbitrair gesteld op +/- 10% |
| k_toez                 | kosten van toezicht (per dag)  | 3.000         | -         | -          |   |
| k_moni                 | kosten van monitoring (per dag)  | 2.300         | 2.070     | 2.530      | spreadings arbitrair gesteld op +/- 10% |
| stoomduur              | stoomduur in dagen   | 15            | 5         | 20         |   |
| onttrekkingsduur       | onttrekkingsduur in dagen  | 15            | 10        | 20         |   |
| debiet                 | onttrekkingsdebiet (m3 per dag)  | 100           | 20        | 100        |   |
| p_opge_1               | kans dat een grotere target area niet wordt opgemerkt                  | 70%           | -         | -          |   |
| p_acce_1               | kans dat het acceptabel is dat de target area groter is                | 10%           | -         | -          |   |
| vergroting_target_area | factor   | 2             | 1.01      | 3          |   |
| 3. p_verz              | kans dat de verzadiging goed geschat is                                | 70%           | 50%       | 80%        |   |
| p_opge_2               | kans dat een grotere verzadiging niet wordt opgemerkt                  | 30%           | 10%       | 50%        |   |
| p_acce_2               | kans dat een grotere verzadiging acceptabel is                         | 40%           | 20%       | 60%        |   |
| vergroting_verzadiging | factor   | 1.2           | 1.01      | 1.5        |   |
| 4. p_sche_zuiv         | kans dat scheiding en zuivering goed werken                            | 80%           | -         | -          |   |
| p_acce_3               | kans dat het acceptabel is dat scheiding en zuivering niet goed werken | 5%            | -         | -          |   |
| verlaging_debiet       | factor   | 0.8           | 0.5       | 0.99       |   |
| 5. p_mobi              | kans dat geen mobilisatie optreedt                                     | 25%           | 10%       | 50%        |   |
| p_opge_4               | kans dat mobilisatie niet wordt opgemerkt                              | 10%           | -         | -          |   |
| p_acce_4               | kans dat mobilisatie acceptabel is                                     | 5%            | -         | -          |   |
| k_nazo                 | kosten van nazorg in geval van mobilisatie                             | 500.000       | -         | -          |   |
| 6. p_lets              | kans dat geen letselschade optreedt                                    | 99%           | -         | -          |   |
| k_lets                 | kosten van letselschade  | 500.000       | 100.000   | 1.000.000  |   |

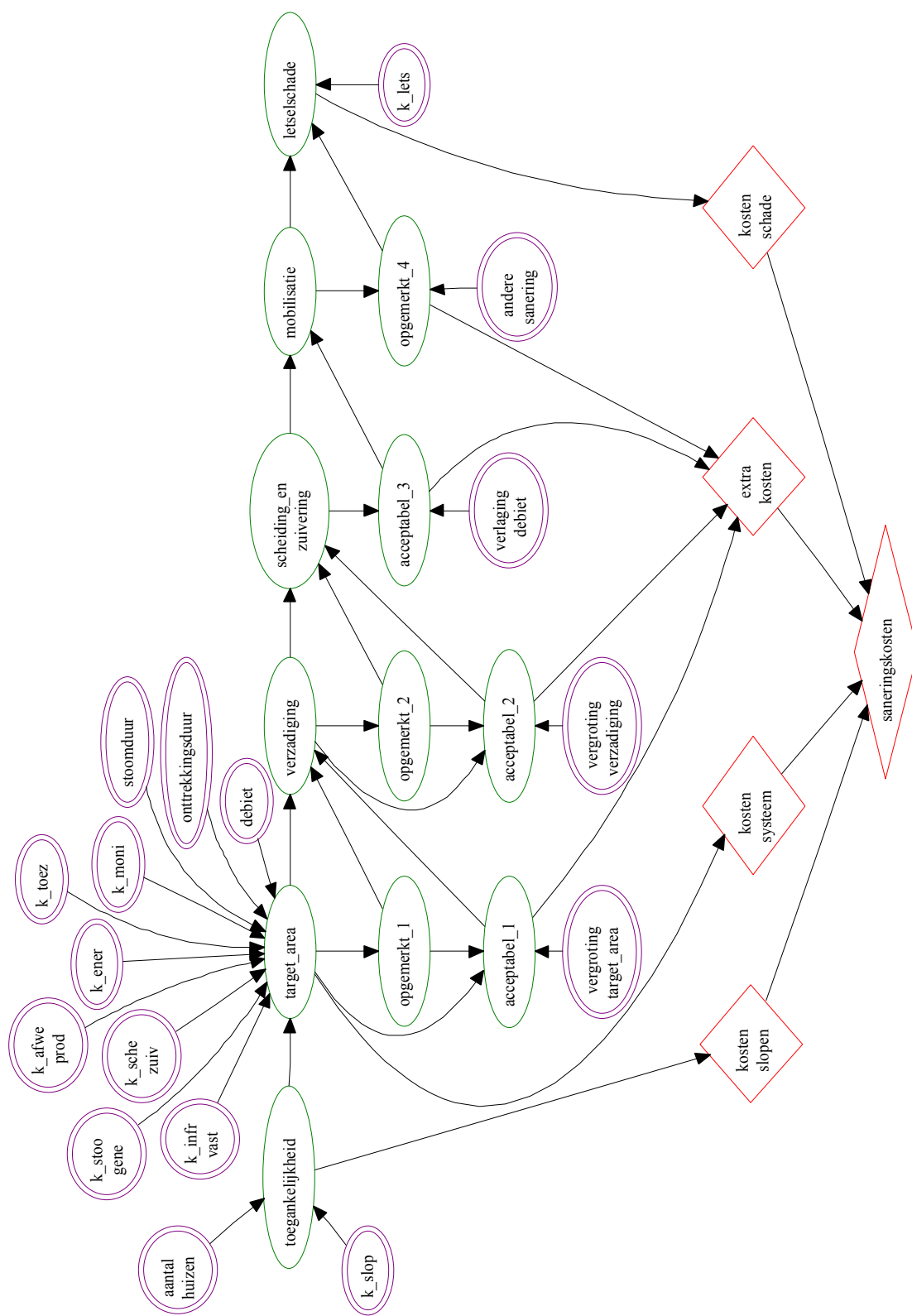


Fig. 15. Invoedsdiagram volgens KFR-systematiek voor stoominjectie bij locatie kleine DNAPL



#### 4.5.5 Risico-analyse

De kosten en kansen zijn weergegeven in tabel 4. Het invloedsdiagram dat is opgesteld naar aanleiding van de faalgebeurtenissen die staan vermeld in paragraaf 4.5.3 en de kosten en kansen in tabel 4, is weergegeven in figuur 15. De kosten/kansencurve is weergegeven in figuur 16. Hieruit volgt dat er een aanzienlijke spreiding is in de saneringskosten (gemiddelde kosten zijn MEUR  $2.3 \pm 1.2$ ). Dit komt omdat een aantal faalgebeurtenissen (met name de neerwaartse mobilisatie van de DNAPL) een vrij grote faalkans heeft. De gemiddelde verwachte saneringskosten per kubieke meter bodemvolume zijn met EUR 814 zeer hoog. Vergeleken met de stoomsanering bij de grote LNAPL (zie paragraaf 6.3) zijn deze zelfs 15 keer zo hoog. Dit is het gevolg van de grote kans op neerwaartse mobilisatie en het vervolgens in uitvoering nemen van de (dure) beheersvariant. Daarnaast speelt de omvang van de kleine DNAPL, vergeleken met de grote LNAPL, waarschijnlijk ook een rol, hoewel het feit dat een aantal belangrijke kostenposten (zoals kosten voor stoomproductie) bij de grote LNAPL niet gemaakt hoeven te worden natuurlijk ook belangrijk is.

Uit het tornadodiagram (figuur 17) blijkt dat de onzekerheid in de kans op neerwaartse mobilisatie van de DNAPL een grote invloed heeft op de spreiding van de te verwachten saneringskosten. Daarnaast blijkt dat de toegankelijkheid een belangrijke kostenbepalende factor is, meer nog dan voor Fenton's reagens en co-solvent flushing op deze locatie. Dit komt omdat ingeschat is dat stoominjectie het meest van de drie bronverwijderingstechnologieën beslag legt op de ruimte, zodat problemen hiermee zwaar doorwegen. Opvallend is dat de verwachte saneringskosten tamelijk ongevoelig zijn voor een eventueel grotere verzadiging en de grootte van het onttrekkingsdebiet.

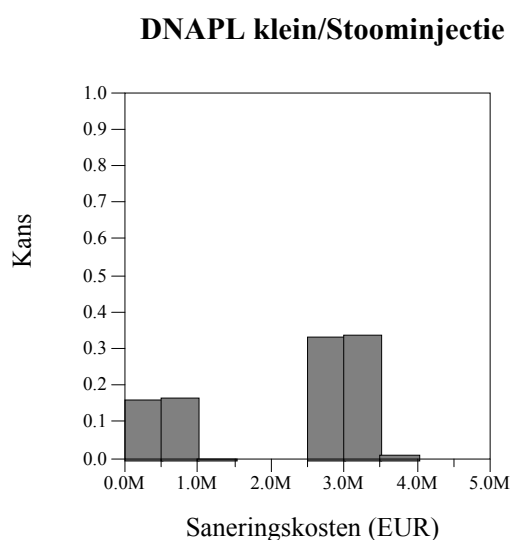


Fig. 16. Kosten/kansen curve voor stoominjectie bij locatie kleine DNAPL.

## DNAPL klein/Stoominjectie

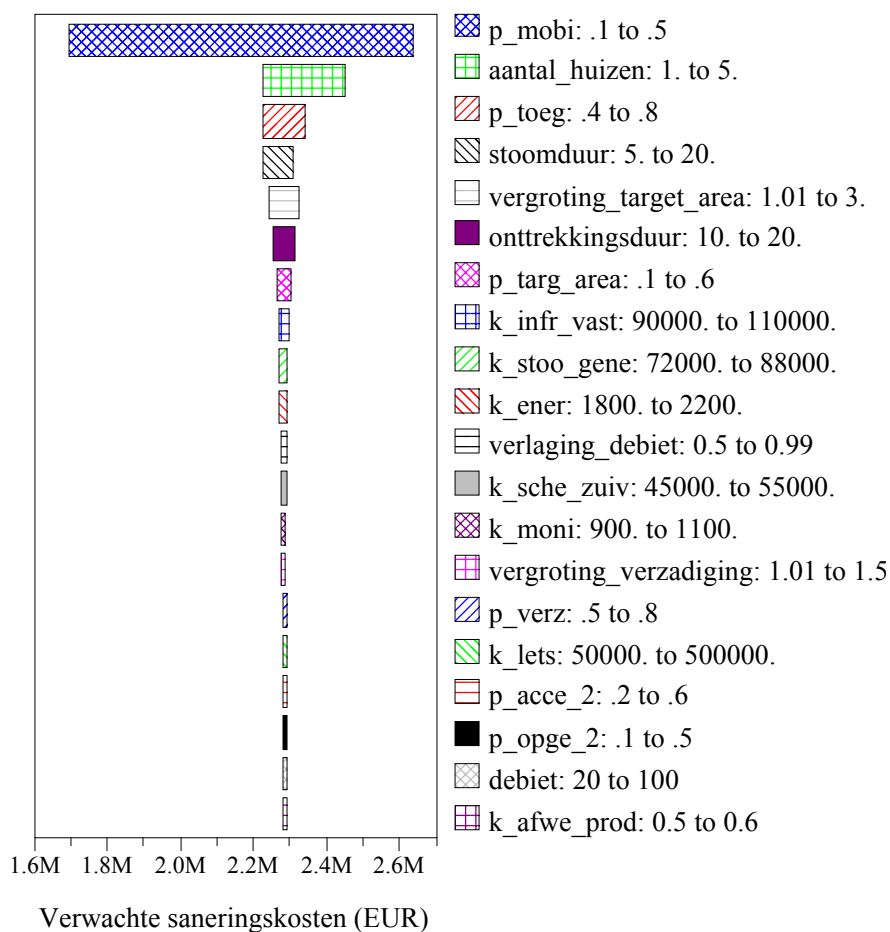


Fig. 17. Tornado diagram voor stoominjectie bij locatie kleine DNAPL. Voor een toelichting op de variabelen wordt verwezen naar tabel 4.

Hoofdstuk 7 zal ingaan op het onderling vergelijken van de drie saneringstechnieken voor de locatie kleine DNAPL, tezamen met een vergelijk tussen de verschillende locaties.

## HOOFDSTUK 5

### CASE DNAPL – GROOT

#### 5.1 Inleiding

De case met de grote DNAPL is gesitueerd op het terrein van een chemisch bedrijf, waar in het verleden onder een fabriek met bijbehorend tankdepot een zinklaag met 1,1-dichloorethaan (DCA) is ontstaan. Vanaf maaiveld tot ca. 6 m-mv komen afwisselend lagen zand, klei en siltlagen voor, beneden welke diepte tot ca. 23 m-mv een zandpakket aanwezig is. Het grondwater dieper dan 20-25 m-mv is brak tot zout en de zinklaag bevindt zich in het zoute gedeelte van het aquifer bovenop de daaronder liggende kleilaag. Deze kleilaag helt in O-NO richting tot op een diepte van ca. 32 m-mv. De zinklaag stroomt op de kleilaag van het bedrijfsterrein af. Tegelijkertijd stroomt het grondwater met een snelheid van ca. 5 m/j in N-NO richting waardoor een verontreinigingspluim is ontstaan. Er wordt verwacht dat ter plaatse van het tankdepot het bodempakket vrijwel over de gehele diepte tot aan de kleilaag verontreinigd is met hoge concentraties en/of puur product DCA. Het verontreinigde gebied is grotendeels goed toegankelijk, afgezien van de aanwezigheid van de fabriek en het tankdepot. In de ondiepere bodemlagen zijn kabels en leidingen aanwezig. De betonfunderingen gaan tot een diepte van 12 tot 15 m-mv.

#### 5.2 Referentie-beheersoptie

Ter vergelijking is ook voor de grote DNAPL een referentievariant uitgewerkt. Er is in het verleden een saneringsonderzoek ter plaatse van de grote DNAPL naar mogelijke saneringsvarianten uitgevoerd. Hierbij is ook een beheersvariant uitgewerkt.

De referentievariant voorziet in een grondwateronttrekking door middel van zeven *deep wells*. Het debiet is berekend op 100 m<sup>3</sup>/dag per deep well. Het opgepompte grondwater dient te worden gezuiverd. Voordat het grondwater op de bedrijfsriolering kan worden geloosd, dient een nieuwe tussenstap in de bedrijfsafvalwaterzuivering ter verwijdering van de chloorhoudende verontreinigingen te worden geïnstalleerd.

Er dient te worden opgemerkt dat deze beheersvariant alleen de verspreiding van de verontreiniging met de grondwaterstroming beheerst. De verspreiding van de zinklaag op de kleilaag kan niet worden tegengegaan. Hierdoor is geen echte vergelijking mogelijk en het wordt duidelijk, dat er op dit moment geen bewezen techniek bestaat om een mobiele zinklaag op grote diepte te beheersen, laat staan te saneren.

Door onttrekking en zuivering van het onttrokken grondwater wordt de verspreiding via de grondwaterstroming beheerst. Hiervoor zijn in het saneringsonderzoek de onderstaande kosten geraamd. De jaarlijkse kosten van EUR 55 voor onttrekking, zuivering en monitoring zijn gekapitaliseerd over een periode van 30 jaar met een kapitalisatiefactor van 10.8 bij een rentevoet van 8.5%, hetgeen een gebruikelijke waarde is voor het bedrijfsleven.

|   |          |
|---|----------|
| Installatie onttrekkings- en monitoringssysteem | kEUR 82  |
| Installatie zuivering                           | kEUR 86  |
| Totaal jaarlijkse outillagekosten               | kEUR 600 |
|   |          |
| Totaal  | kEUR 768 |

Het kostenverschil met de locatie kleine DNAPL komt (naast de omvang van de verontreiniging) door de volgende factoren:

- lagere lozingskosten per kubieke meter water;
- lagere kapitalisatiefactor ten gevolge van een hogere rentevoet voor het bedrijfsleven;
- geringer onttrekkingsdebiet als gevolg van geringere grondwatersnelheid.

### 5.3 Sanering door middel van *in-situ* oxidatie (Fenton's reagens)

#### 5.3.1 *Uitgangspunten en aannames*

Voor het ontwerp worden de volgende uitgangspunten en aannames gehanteerd:

- De hoeveelheid DNAPL die op de kleilaag op ca. 25-30 m -NAP aanwezig is wordt gecalculeerd op basis van een horizontale omvang van de zinklaag van 8,000 m<sup>2</sup> en een dikte van 10 cm in poriën. Voor de porositeit wordt 33% aangenomen, waardoor 270 kubieke meter DCA als zinklaag aanwezig is. Dit betekent dat de massa van de DNAPL, bij een dichtheid van DCA van 1.3 ton/m<sup>3</sup>, ca. 350 ton bedraagt.
- 4 kg 100% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> is nodig voor het oxideren van 1 kg DCA (informatie van [*in-Situ Technieken bv*] stoichiometrisch is 1.7 kg 100% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> per kg DCA nodig). Dit betekent dat 1,400 ton H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> of 14,000 m<sup>3</sup> 10 %-oplossing H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> wordt ingezet. Deze totale hoeveelheid wordt geïnjecteerd in drie injectieperiodes.
- Voor de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-oplossing wordt een prijs van EUR 110/m<sup>3</sup> aangenomen (incl. pH-buffer en Fe(II)-katalysator).
- De hitteontwikkeling bij de reactie is voor het totale systeem geen probleem, omdat de grote hoeveelheden water met hoge warmtecapaciteit als temperatuurbuffer zullen dienen. Wel is vorming van gasbubbel te verwachten door productie van CO<sub>2</sub> en verdamping van CKW als gevolg van lokale hitteontwikkeling. Hierbij wordt hetzelfde systeem geïnstalleerd als beschreven bij de kleine DNAPL (zie § 4.3.2).
- De capaciteit van het koolfilter is 5% (kg/kg) en er wordt met een prijs van EUR 4.5/kg gerekend. Voor de dimensionering van het actief koolfilter wordt er vanuit gegaan dat 1% van de verontreiniging via de gasfase uit de actieve zone verdwijnt.

#### 5.3.2 *Globaal ontwerp van het saneringssysteem*

Het saneringssysteem voor de verwijdering van de zinklaag boven de kleilaag bestaat uit een vast geïnstalleerd systeem van injectie- en onttrekkingsbronnen. De afstand infiltratie-onttrekking bedraagt 8 m, waarbij de infiltratiefilters in een zeshoek om het onttrekkingsfilter zijn geïnstalleerd. Er zijn 50 van deze zeshoeken nodig.

Per injectieperiode en zeshoek wordt 96 kubieke meter geïnjecteerd (96 m<sup>3</sup> x 3 periodes x 50 zeshoeken = 14,400 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-oplossing). Het onttrekkingsdebiet is 2 m<sup>3</sup>/h, zodat het injectiedebiet per zeshoek ook 2 m<sup>3</sup>/h, oftewel 1 m<sup>3</sup>/h per injectiefilter bedraagt.

Het gehele saneringsgebied wordt onderverdeeld in 4 deelgebieden, waarbij in een deelgebied 2 dagen wordt geïnjecteerd, daarna in het volgende deelgebied. Na 2 weken wordt in het eerste gebied opnieuw een injectieperiode gestart. Het onttrokken water wordt gezuiverd, ontijzerd en samen met de juiste hoeveelheid H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> opnieuw geïnfilteerd.

Voor de monitoring worden 10 nieuwe diepe monitoringsfilters geïnstalleerd. Nadat een injectieperiode in het gehele saneringsgebied is uitgevoerd, worden 15 peilbuizen (5 bestaande en de 10 nieuwe) bemonsterd en geanalyseerd.

Er wordt van uitgegaan dat in totaal 60 dagen milieukundige begeleiding (EUR 590/dag) en 60 dagen toezicht (EUR 770/dag) tijdens installatie en injectie nodig zijn.

### 5.3.3 *Faalkansen/kritische factoren*

#### *1. Toegankelijkheid*

Een knelpunt is mogelijk de toegankelijkheid van het terrein voor de installatie van een vast systeem.

#### *2-3. Inschatting omvang verontreiniging*

Op basis van de beschikbare gegevens is het mogelijk dat de omvang van de bronzone en ook de verzadiging in de poriën met puur product niet juist zijn ingeschat.

#### *4. Aanwezigheid oxideerbare stoffen*

Door aanwezigheid van organisch materiaal en andere stoffen die potentieel kunnen worden geoxideerd wordt oxidatiemiddel verbruikt. Er is een inschatting gemaakt van het verlies van oxidatiemiddel naar de bodemmatrix. Het is mogelijk dat meer oxidatiemiddel nodig is dan is aangenomen.

#### *5. Zettingen*

De aanwezigheid van kalk, o.a. in de vorm van schelpen in de 4 meter dikke laag boven de af dichtende laag op 25-30 m –NAP, houdt bij het creëren van een lage pH in het grondwater een mogelijk gevaar van zetting in. Het is onbekend hoe groot het aandeel van de kalk aan het volume van de bodem is. De mogelijk maximale zetting is ca. 1.5 centimeter op basis van de aanname dat het geproduceerde zuur geheel voor de oplossing van de kalk wordt verbruikt. Als het volumeaandeel van de schelpen 0.4% is, kan deze maximale zetting worden bereikt. Dit volumeaandeel is naar onze inschatting mogelijk.

Verder dient rekening te worden gehouden met de funderingspalen in het watervoerend pakket ,die door het geproduceerde zuur kunnen worden aangetast. Hierdoor is een laboratoriumexperiment, zoals bij de kleine DNAPL, nodig.

#### *6. Inschatting invloedsstraal*

De aannames met betrekking tot de invloedsstraal van het vaste injectiesysteem zijn mogelijk onjuist. Hierdoor zijn mogelijk meer injectiepunten nodig.

#### *7. Toxische tussenproducten*

Het is mogelijk dat de oxidatie van de verontreiniging niet volledig is en dat daardoor toxische tussen- en afbraakproducten ontstaan. De kans dat deze toxische producten een probleem vormen wordt klein geschat, omdat een luchtafzuiging is geïnstalleerd.

#### *8. Schade aan de ondergrondse infrastructuur*

Er worden geen problemen met ondergrondse leidingen verwacht, omdat deze niet dieper liggen dan 4 m –mv. De funderingen reiken tot 15 m-mv.

#### *9. Zout water*

Het zoute water heeft naar verwachting geen invloed op de sanering.

In de risico-analyse (paragraaf 5.3.5) wordt op de faalkansen en de daarmee verbonden financiële onzekerheden ingegaan.

#### 5.3.4 Kosten

Verwijdering van de zinklaag op 25-30 m -NAP:

|  |            |
|--|------------|
| Bovengrondse installatie                           | kEUR 330   |
| Ondergrondse installatie                           | kEUR 1,300 |
| Chemicaliën  | kEUR 1,600 |
| MKB + directievoering                              | kEUR 82    |
| Monitoring (plaatsen 10 diepe pb's en analyses)    | kEUR 68    |
| Bodemluchtafzuiging (luchtfILTER, leidingen, pomp) | kEUR 23    |
| Actief kool  | kEUR 440   |
| Zuivering en ontijzering van het grondwater        | kEUR 110   |
|  |            |
| Totaal   | kEUR 3,623 |

Het lijkt reëel om er vanuit te gaan dat niet alle verontreiniging wordt verwijderd. Nazorg van de verspreiding van de eventuele restverontreiniging in de vorm van monitoring is dan nodig. De kosten, die samenhangen met nazorg zijn niet nader beschouwd, omdat de omvang van de restverontreiniging niet op voorhand is te schatten en de vereiste monitoring ook niet op voorhand gedefinieerd is.

#### 5.3.5 Risico-analyse

Nu het saneringsontwerp klaar is en de faalgebeurtenissen geïdentificeerd zijn, kan een tabel worden opgesteld, waarin alle kosten en kansen, alsmede de spreiding in deze waarden, staan weergegeven (tabel 5). De enige kosten in tabel 5 die afhankelijk zijn van de saneringsduur zijn de kosten van toezicht, dit omdat voor dit geval een vast systeem wordt geïnstalleerd. Voor sommige kostenposten is een arbitraire spreiding van de kosten aangenomen van +/- 10%.

Uitgaande van de in paragraaf 5.3.3 geïdentificeerde faalgebeurtenissen is een invloedsdiagram opgesteld voor dit geval (figuur 18). Het invloedsdiagram is omgezet naar een gebeurtenisboom. Aangezien deze door de vele gebeurtenissen zeer omvangrijk is (> 12,000 takjes), is het niet mogelijk deze weer te geven. Wat wel is weergegeven is de kosten/kansencurve (figuur 19). Er zijn twee intervallen waarneembaar, één van MEUR 0-8 en één van MEUR 28-34, met een kansverdeling van ca. 40: 60. Het tweede interval wordt veroorzaakt door de hoge kosten die gemaakt moeten worden als de fabriek gesloopt en herbouwd moet worden als gevolg van zettingsschade, ontstaan door problemen met het oplossen van kalk.

Het is hiermee eigenlijk meteen duidelijk dat Fenton's reagens voor deze locatie geen gelukkige keuze is. Het doorslaggevende belang van de kosten van zettingsschade volgt ook uit het bijbehorende tornadodiagram (figuur 20). De onzekerheid in de kosten van zettingsschade overschaduwde alle andere onzekerheden. Indien de zettingsschade en de toegankelijkheid van het terrein niet als locatiespecifieke faalgebeurtenis worden beschouwd, zijn de mate van verzadiging en de vergroting van het te saneren gebied de belangrijkste financiële risico's.

Een vergelijking van de saneringskosten (gemiddeld MEUR 19) met die van de referentie-beheersoptie (MEUR 0.8), geeft aan dat de kosten van verwijdering hoger zijn dan die van beheersing

Tabel 5. Kosten/kansen tabel voor in-situ oxidatie bij locatie grote DNAPL.

| <i>Fentor's reagens</i>  | <i>omschrijving</i>   | <i>kosten/kansen</i> | <i>low value</i> | <i>high value</i> | <i>opmerkingen</i>  |
|--------------------------|---|----------------------|------------------|-------------------|---|
| 1. p_toeg                | kans dat de site toegankelijk is  | 90%                  | 85%              | 95%               | terrein niet toegankelijk is "show stopper"; de beheersvariant treedt dan in werking    |
| k_behe                   | kosten van de beheersvariant  | 1,890,000            | 1,701,000        | 2,079,000         | spreading arbitrair gesteld op +/- 10%  |
| 2. p_targ_area           | kans dat de target area goed geschat is   | 40%                  | 10%              | 60%               |   |
| k_chem                   | kosten van chemicaliën  | 3,500,000            | 3,150,000        | 3,850,000         | spreading arbitrair gesteld op +/- 10%  |
| k_onde_infr              | kosten ondergrondse infrastructuur  | 3,810,000            | 3,429,000        | 4,191,000         | spreading arbitrair gesteld op +/- 10%  |
| k_bove_infr              | kosten bovengrondse infrastructuur  | 720,000              | 648,000          | 792,000           |   |
| k_moni                   | kosten van monitoring   | 150,000              | 135,000          | 165,000           | spreading arbitrair gesteld op +/- 10%  |
| k_nazo_moni              | kosten van nazorg monitoring  | 80,000               | 72,000           | 88,000            | spreading arbitrair gesteld op +/- 10%; kosten kfl 7/a gekapitaliseerd over 30 a (8.5%) |
| k_loez                   | kosten van toezicht per dag   | 3,000                | -                | -                 | - geen spreading want direct afhankelijk van uurloon                                    |
| k_zuiv                   | kosten van zuivering en ontijzering   | 250,000              | 225,000          | 275,000           | spreading arbitrair gesteld op +/- 10%  |
| saneringsduur            | saneringsduur in dagen  | 60                   | -                | -                 |   |
| p_opge_1                 | kans dat een grotere target area niet wordt opgemerkt                           | 70%                  | -                | -                 |   |
| p_acce_1                 | kans dat het acceptabel is dat de target area groter is                         | 10%                  | -                | -                 |   |
| vergroting_target_area   | factor  | 1.3                  | 1.01             | 1.7               |   |
| 3. p_verz                | kans dat de verzadiging goed geschat is   | 50%                  | 30%              | 70%               |   |
| p_opge_2                 | kans dat een grotere verzadiging niet wordt opgemerkt                           | 30%                  | -                | -                 |   |
| p_acce_2                 | kans dat het acceptabel is dat de verzadiging groter is                         | 10%                  | -                | -                 |   |
| vergroting_verzadiging   | factor  | 1.5                  | 1.01             | 2                 |   |
| 4. p_aanw_elec           | kans dat extra natuurlijke electrondonoren aanwezig zijn                        | 20%                  | 10%              | 30%               | kans op problemen relatief klein want 2-3-voudige overmaat peroxide                     |
| p_opge_3                 | kans dat extra electrondonoren niet worden opgemerkt                            | 80%                  | -                | -                 |   |
| p_acce_3                 | kans dat extra electrondonoren acceptabel zijn                                  | 10%                  | -                | -                 |   |
| meer_electrondonoren     | factor  | 2                    | 1.01             | 3                 |   |
| 5. p_prob_kalk           | kans dat kalk in schelpen geen probleem is voor chemische oxidatie              | 20%                  | 10%              | 40%               |   |
| p_zett                   | kans dat geen zettingsschade optreedt aan de fabriek                            | 20%                  | -                | -                 |   |
| k_zett                   | kosten van zettingsschade aan de fabriek  | 50,000,000           | 40,000,000       | 100,000,000       |   |
| 6. p_invl                | kans dat invloedsfeer goed geschat is   | 80%                  | 70%              | 95%               |   |
| p_opge_5                 | kans dat een kleinere invloedsfeer niet wordt opgemerkt                         | 50%                  | -                | -                 |   |
| p_acce_5                 | kans dat een kleinere invloedsfeer acceptabel is                                | 10%                  | -                | -                 |   |
| verkleining_invloedsfeer | percentage van verwachte invloedsfeer   | 0.85                 | 0.75             | 0.99              |   |
| 7. p_toxi_tuss           | kans dat geen toxische tussenproducten ontstaan                                 | 95%                  | 90%              | 100%              |   |
| p_opge_6                 | kans dat toxische tussenproducten niet worden opgemerkt                         | 30%                  | -                | -                 |   |
| p_acce_6                 | kans dat toxische tussenproducten acceptabel zijn                               | 20%                  | -                | -                 | - want geen bewoning in de nabijheid  |
| percentage_van_zinklaag  | ratio toxische tussenproducten tov oorspronkelijke zinklaag                     | 0.1                  | 0.001            | 0.2               |   |
| 8. p_scha_onde_infr      | kans dat geen schade aan ondergr. infrastr. (behalfve funderingspalen) optreedt | 99%                  | 95%              | 100%              |   |
| k_scha_onde_infr         | kosten van schade aan ondergrondse infrastructuur                               | 250,000              | 200,000          | 300,000           |   |

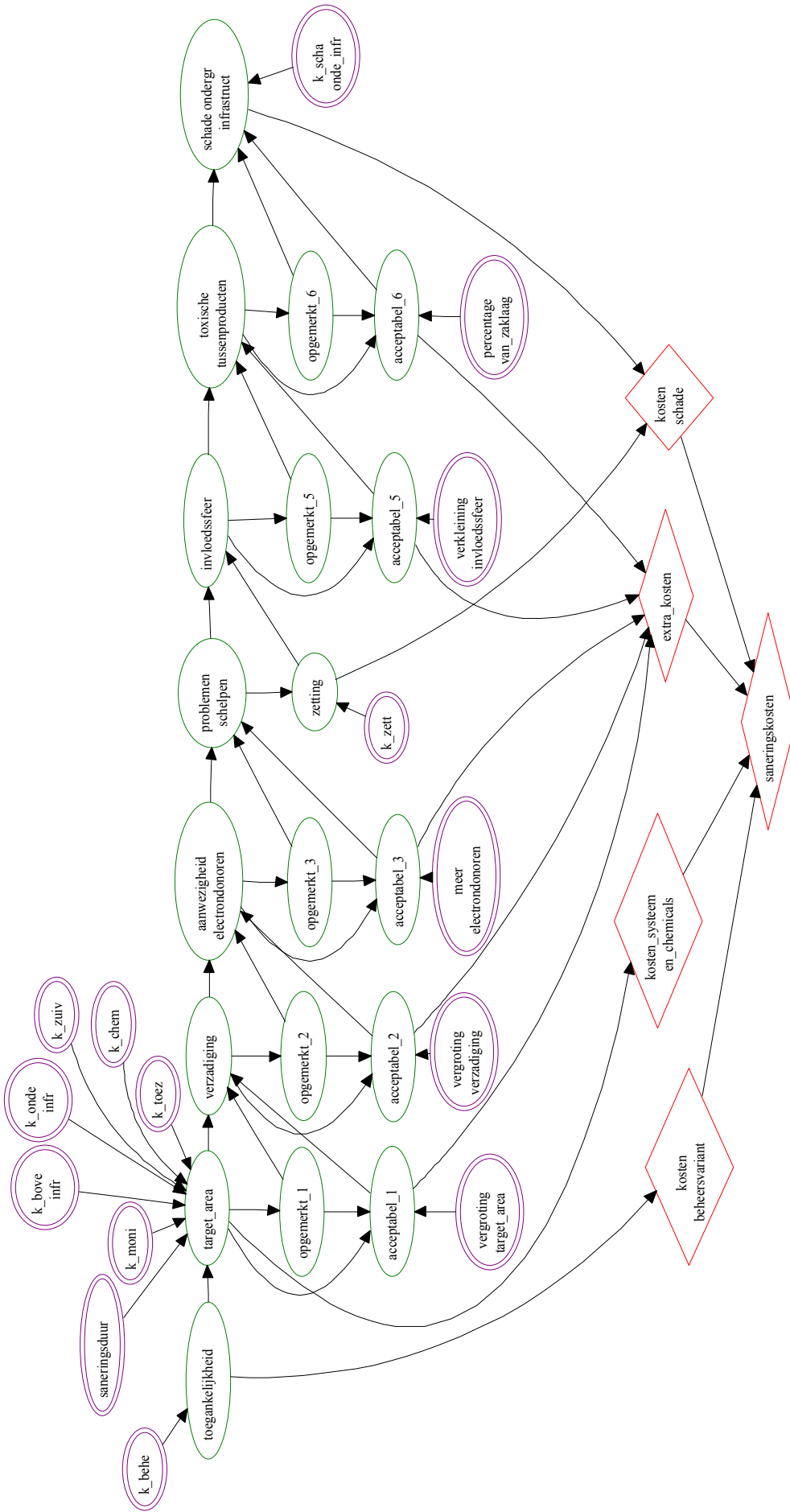


Fig. 18. Invloedsdiagram volgens KFR-systematiek voor in-situ oxidatie bij locatie grote DNAPL



### DNAPL groot/Fenton's reagens

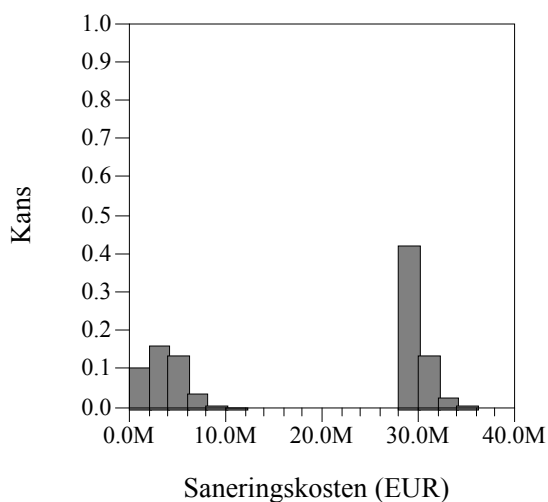


Fig. 19. Kosten/kansen curve voor in-situ oxidatie bij locatie grote DNAPL.

### DNAPL groot/Fenton's reagens

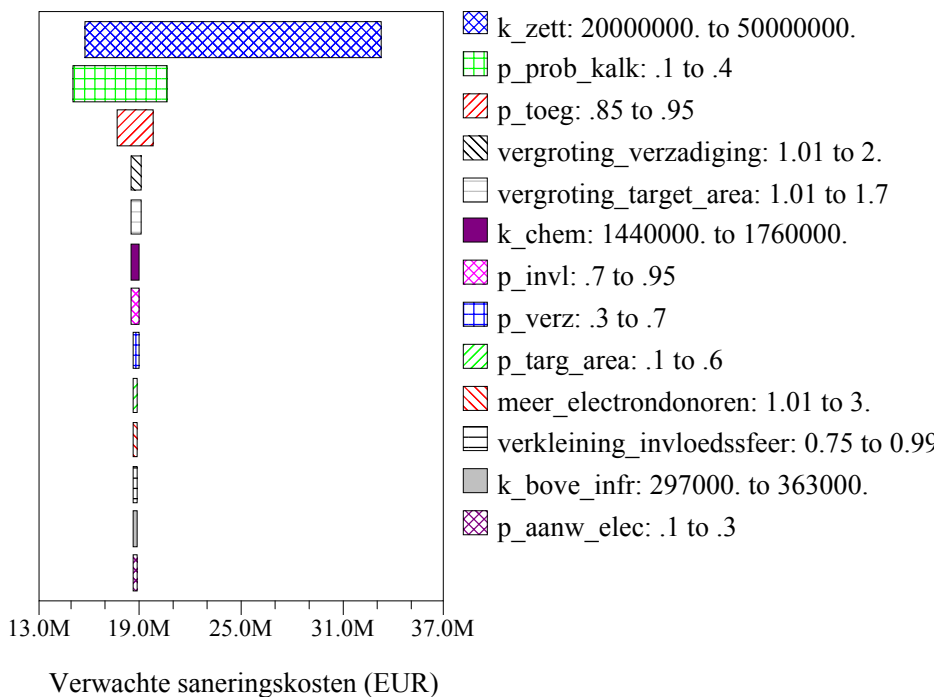


Fig. 20. Tornadodiagram voor in-situ oxidatie bij locatie grote DNAPL. Voor een toelichting op de variabelen wordt verwezen naar tabel 5.

## HOOFDSTUK 6

### CASE LNAPL – GROOT

#### 6.1 Inleiding

Op een bedrijfsterrein heeft een styreenfabriek gestaan. Waarschijnlijk werd hier ook ethylbenzeen geproduceerd. De productie van styreen is in 1975 stopgezet en de fabriek is daarna gesloopt, waarbij de fundering deels is achtergebleven. De bodem en het grondwater zijn verontreinigd met vluchtige aromatische koolwaterstoffen. Met name benzeen, toluen, ethylbenzeen en styreen worden als puur product aangetroffen. Bovenop de verontreiniging is een afsluitende asfaltverharding aangebracht die nu in gebruik is als parkeerplaats (ca. 90 x 75 m). Maaiveld is op 3 m +NAP. Van ca. 3 m +NAP tot ca. 1 m -NAP bevindt zich een ophooglaag, waarvan maximaal de bovenste 2.5 m zandig is. Van ca. 1 m -NAP tot ca. 20 m -NAP is een deklaag (polderklei, veen slibhoudende zanden). Van ca. 20 m -NAP tot ca. 30 m -NAP bevindt zich het watervoerend pakket, bestaande uit fijne en grove zanden. De grondwaterstromingsrichting in het freatisch grondwater is niet algemeen te bepalen, in het watervoerend pakket is de stroming in NO richting. De horizontale doorlatendheid is 1 m/dag. Ter hoogte van de parkeerplaats is de grondwaterstand 0.6 m-mv.

#### 6.2 Referentie-saneringsoptie

Ter vergelijking is voor de grote LNAPL een referentievariant uitgewerkt. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de grond tot de onderkant van de smeerzone wordt ontgraven, afgevoerd, gereinigd en vervangen door schoon zand. De volgende uitgangspunten zijn gekozen voor deze aanpak.

Ter plaatse van de saneringslocatie is alleen een parkeerplaats met als verharding asfalt aanwezig. Er wordt geen rekening gehouden met eventueel te verwijderen of om te leggen kabels en leidingen. Na de ontgraving worden klinkers aan het maaiveld aangebracht.

De gemiddelde grondwaterstand is 0.6 m-mv. Door schommelingen in de grondwaterstand is een smeerzone vanaf maaiveld tot 2.5 m-mv ontstaan. De grondwaterspiegel dient voor de ontgraving met 2 m te worden verlaagd.

Het verontreinigde gebied heeft een oppervlakte van 90 x 75 m. Het te ontgraven gebied heeft een oppervlakte van 95 m x 80 m, omdat onder een talud van 1:1 wordt ontgraven. De grond uit het talud komt na de ontgraving weer in de ontgravingsput terecht. In totaal wordt ca. 18,000 kubieke meter grond ontgraven. De verontreinigde grond wordt door schoon zand vervangen. Het maximaal te ontgraven volume per dag is 300 kubieke meter. Dit maximum volume geldt ook voor de aanvulling met schoon zand. Hierdoor is een saneringsduur van 26 weken aangehouden. De ontgraving wordt in zes ontgravingsvakken van 50 x 30 m (inclusief talud) uitgevoerd om de benodigde debieten van de bemaling zo gering mogelijk te houden.

De grondwaterspiegel wordt door strengenbemaling (hart-op-hart 4 m) met 2 m verlaagd. De doorlatendheid van de bodem is 1.5 m/dag, het verhang is 0.6. Er wordt vanuitgegaan dat het grondwater alleen horizontaal stroomt. Het debiet per ontgravingsvak bedraagt 288 m<sup>3</sup>/dag, in totaal 37,440 kubieke meter. Het bemalingswater wordt via een olieafscheider op de riolering en vervolgens op een AWZI geloosd. De riolering ligt op maximaal 200 m van de ontgravingsvakken.

De ontgraven grond wordt per partij van 100 kubieke meter bemonsterd en geanalyseerd binnen 24 uur op BTEX, naphthaleen en styreen. Ter controle voor de ontvanger van de grond worden 10 partijen grond geanalyseerd op het NEN-grondpakket. Per ontgravingsvak worden totaal 10 eindmonsters genomen van de putbodem en de putwanden.

De kosten voor deze aanpak worden hierna geraamd:

|  |            |
|--|------------|
| Ontgravingswerkzaamheden (inclusief (her)inrichting) | kEUR 930   |
| Grondverwerking                                      | kEUR 1,200 |
| Bemaling   | kEUR 27    |
| Directievoering en begeleiding                       | kEUR 140   |
|  |            |
| Totaal   | kEUR 2,297 |

### 6.3 Sanering door middel van stoominjectie

#### 6.3.1 *Uitgangspunten en aannames*

Voor het ontwerp worden de volgende uitgangspunten en aannames gehanteerd:

- Bij een oppervlak van 75 x 90 m, een diepte van 4.5 m, een porositeit van 0.33 en een verzadiging van 10% is er sprake van 1,000 m<sup>3</sup> puur product.
- De parkeerplaats (die is aangelegd bovenop de verontreiniging) wordt ontruimd. Al het leidingwerk kan bovengronds worden aangelegd.
- Stoom wordt betrokken van de locatie en vormt geen kostenpost in het ontwerp.
- De doorlatendheid is bepalend voor de snelheid, waarmee een stoomdeken kan worden gevormd en is daarmee ook bepalend voor de saneringsduur. We gaan uit van een doorlatendheid van 1.5 m/d, hetgeen resulteert in een periode van 48 dagen benodigd om een stoomdeken te ontwikkelen. De minimale doorlatendheid, die vereist is, is 0.4 m/d. Zou de doorlatendheid lager zijn, dan duurt het zo lang om een stoomdeken te ontwikkelen (> 6 maanden), dat stoominjectie als saneringstechniek financieel onaantrekkelijk wordt. De ontwikkeling van een stoomdeken wordt gemonitord met thermokoppels.
- De hexagonstructuur, waarop het injectie- en onttrekkingsstelsel is gebaseerd, bestaat uit 36 eenheden met een diameter van 20 m. De invloedsstraal van één injectiepunt is 5 m; aangenomen wordt dat de combinatie van zes injectiepunten de gehele hexagon met stoom zal vullen.
- Tijdens verhitten en onttrekken wordt elke onttrekkingsput elke 10 dagen bemonsterd en geanalyseerd op concentraties verontreiniging.
- Nadat een stoomdeken is ontwikkeld en de gehele verontreiniging is opgewarmd tot 100°C zijn er 15 dagen nodig om de verontreiniging met het grondwater op te pompen.
- De verontreiniging kan zonder extra kosten worden geloosd op het oliehoudend riool.
- Toezicht wordt gehouden door lokaal personeel, hier zijn derhalve voor de sanering geen kosten aan verbonden.

### 6.3.2 Globaal ontwerp van het saneringssysteem

Het injectiesysteem is opgebouwd uit 36 aansluitende zeshoeken, waarbij de onttrekking in het midden van elke zeshoek geplaatst is. Een bovengronds leidingnet levert stoom aan die binnen het bedrijf wordt geproduceerd. Stoom wordt geïnjecteerd in zowel de verzadigde als de onverzadigde zone. De ontwikkeling van een stoomdeken wordt gemonitord met thermokoppels (20 per hexagon, waarvan 10 in de verzadigde en 10 in de onverzadigde zone). Wanneer eenmaal een stoomdeken is geproduceerd wordt 15 dagen water en stoom onttrokken, waarbij de verontreiniging op het oliehoudend riool op Pernis wordt geloosd.

### 6.3.3 Faalgebeurtenissen en kritische factoren

#### 1. Doorlatendheid

De doorlatendheid is het kritieke punt bij een stoominjectie. Als deze te laag is duurt het zeer lang voordat een continue stoomdeken is aangelegd, waardoor de dagelijkse kosten te zwaar gaan drukken op de saneringskosten. Bovendien is er dan het probleem dat de aangevoerde hitte aan het maaiveld kan 'weglekken'.

#### 2-3 Inschatting omvang verontreiniging

Op basis van de beschikbare informatie is het mogelijk dat de omvang van de LNAPL niet goed is ingeschat. Deze kans is echter niet zeer groot, omdat de verontreiniging op de locatie in het verleden door bodemonderzoek is afgeperkt. Verder is ook de aanname met betrekking tot de verzadiging van de LNAPL mogelijk onjuist. Dit heeft directe gevolgen voor de kosten van de sanering.

#### 4. Scheiding en zuivering

Het kan zijn dat de scheidings- en zuiveringsinstallatie de onttrokken vracht niet aankan. In dat geval zal het onttrekkingsdebiet verlaagd moeten worden.

#### 5. Verspreiding

Door de verhitting zal de verontreiniging mobieler worden. Echter, de horizontale grondwaterstroomsnelheid op de locatie is zeer laag. De kans op verspreiding wordt daarom niet hoog ingeschat.

#### 6. Explosiegevaar

Explosie door verhitting van de vluchtige verbindingen BTE en styreen, of polymerisatie van styreen is wellicht mogelijk. Het is echter de vraag of de temperatuur die door stoominjectie bereikt wordt (100°C) en de concentraties in de bodem voldoende hoog zijn om deze processen te initiëren. De kans op deze schade wordt daarom klein geacht.

#### 7. Letselschade

Als gevolg van het in aanraking komen met hete objecten of een lokale uitbraak van stoom kan mogelijk letselschade optreden.

### 6.3.4 Kosten

Er wordt vanuitgegaan dat de volgende kosten voor de verwijdering van de smeerlaag worden gemaakt:

|                                 |      |       |
|---------------------------------|------|-------|
| Leidingen                       | kEUR | 726   |
| Injectie- en onttrekkingsputten | kEUR | 129   |
| Pompen                          | kEUR | 184   |
| Thermokoppels                   | kEUR | 61    |
| Scheiding en zuivering          | kEUR | 157   |
| Monitoring                      | kEUR | 206   |
| Totaal                          | kEUR | 1,463 |

Sommige van deze kosten kunnen als vaste kosten beschouwd worden, terwijl andere afhankelijk zijn van de saneringsduur. De saneringsduur zelf is ook weer afhankelijk van de doorlatendheid. Het zal duidelijk zijn dat dit zeer belangrijk is voor de risico-analyse, omdat de tijdsduurafhankelijke kosten behoorlijk kunnen oplopen als de saneringsduur door faalgebeurtenissen toeneemt. Bij de hierboven vermelde kosten is uitgegaan van de nominale saneringsduur van 63 dagen. De interactie tussen al deze onzekerheden is onderwerp van de KFR-analyse en wordt verder uitgewerkt in paragraaf 6.3.5.

**Tabel 6. Kosten/kansen tabel voor stoominjectie bij locatie grote LNAPL.**

|                            | omschrijving   | kosten/kansen | low value | high value | opmerkingen                                   |
|----------------------------|--|---------------|-----------|------------|---|
| Stoominjectie              |  |               |           |            |   |
| 1a. p_door_boer            | kans dat de doorlatendheid >/= verwacht is                                   | 60%           | 40%       | 80%        |   |
| 1b. p_door_onto            | kans dat de doorlatendheid te laag is voor stoominjectie                     | 5%            | 1%        | 20%        |   |
| doorlatendheid             | doorlatendheid (m/d)   | 1.5           | -         | -          |   |
| verkleining_doorlatendheid | factor   | 0.6           | 0.3       | 0.99       |   |
| andere_sanering            | kosten van de referentie saneringsoptie                                      | 5,170,000     | 4,653,000 | 5,687,000  | spreadig arbitrair gesteld op +/- 10%         |
| k_moni                     | kosten van monitoring per dag  | 7,200         | 6,480     | 7,920      | spreadig arbitrair gesteld op +/- 10%         |
| k_infr_vast                | vaste kosten infrastructuur  | 2,425,000     | 2,182,500 | 2,667,500  | spreadig arbitrair gesteld op +/- 10%         |
| k_sche_zuiv                | kosten van scheiding en zuivering  | 345,000       | 310,500   | 379,500    | spreadig arbitrair gesteld op +/- 10%         |
| onttrekkingsduur           | aantal dagen water/stoom onttrekken  | 15            | -         | -          |   |
| 2. p_targ_area             | kans dat de target area goed geschat is                                      | 60%           | 10%       | 80%        | kans redelijk hoog dankzij veldmetingen IWACO |
| p_opge_1                   | kans dat een grotere target area niet wordt opgemerkt                        | 70%           | -         | -          |   |
| p_acce_1                   | kans dat het acceptabel is dat de target area groter is                      | 20%           | -         | -          |   |
| vergroting_target_area     | factor   | 1.5           | 1.01      | 2          |   |
| 3. p_verz                  | kans dat de verzadiging goed geschat is                                      | 95%           | 90%       | 99%        | de verzadiging is met 10% al ruim genomen     |
| p_opge_2                   | kans dat een grotere verzadiging niet wordt opgemerkt                        | 30%           | -         | -          |   |
| p_acce_2                   | kans dat het acceptabel is dat de verzadiging groter is                      | 20%           | -         | -          |   |
| vergroting_verzadiging     | factor   | 1.2           | 1.01      | 1.5        |   |
| 4. p_sche_zuiv             | kans dat scheiding en zuivering goed werken                                  | 80%           | -         | -          |   |
| p_acce_3                   | kans dat het acceptabel is dat scheiding en zuivering niet goed werken       | 5%            | -         | -          |   |
| verlaging_debiet           | factor   | 0.8           | 0.5       | 0.99       |   |
| 5. p_mobi                  | kans dat geen mobilisatie optreedt   | 80%           | 40%       | 100%       |   |
| p_opge_4                   | kans dat mobilisatie niet wordt opgemerkt                                    | 20%           | -         | -          |   |
| p_acce_4                   | kans dat mobilisatie acceptabel is   | 75%           | -         | -          |   |
| k_nazo                     | kosten van nazorg in geval van mobilisatie                                   | 500,000       | -         | -          |   |
| 6. p_expl                  | kans dat door verhitting verontreiniging (styreen?) niet tot ontplofing komt | 95%           | -         | -          |   |
| k_expl                     | schade als gevolg van explosie   | 500,000       | 100,000   | 1,000,000  |   |
| 7. p_lets                  | kans dat geen letselschade optreedt  | 99%           | -         | -          |   |
| k_lets                     | kosten van letselschade  | 500,000       | 100,000   | 1,000,000  |   |

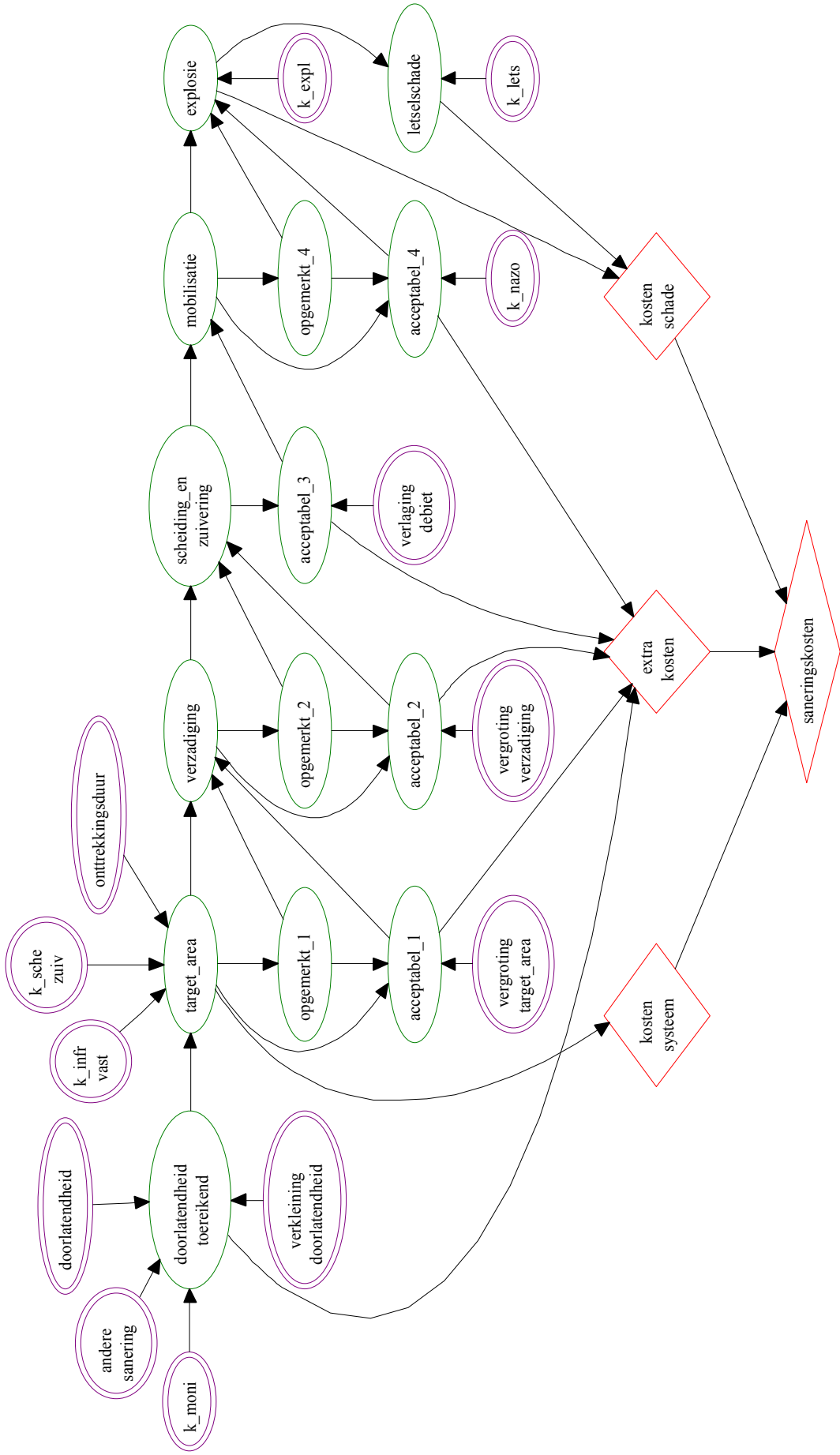


Fig. 21. Invloedsdiagram volgens KFR-systematiek voor stoominjectie bij locatie grote LNAPL.

### 6.3.5 Risico-analyse

Het overzicht met kosten en kansen is weergegeven in tabel 6. Het invloedsdiagram, dat is opgesteld naar aanleiding van de faalgebeurtenissen die staan vermeld in paragraaf 6.3.3 en de kosten en kansen in tabel 6, is weergegeven in figuur 21. Vanwege het feit dat de doorlatendheid zeer kritisch is en we op deze locatie met een zandig pakket te maken hebben (in plaats van met een grindig pakket, zoals bij de kleine DNAPL), is ervoor gekozen om “doorlatendheid toereikend” als eerste faalgebeurtenis op te nemen. Als de doorlatendheid beneden een bepaalde minimumwaarde ligt (hier 0.4 m/d) treedt automatisch de referentie saneringsvariant in werking, zonder dat er nog uitgaven zijn gedaan voor een stoomsanering.

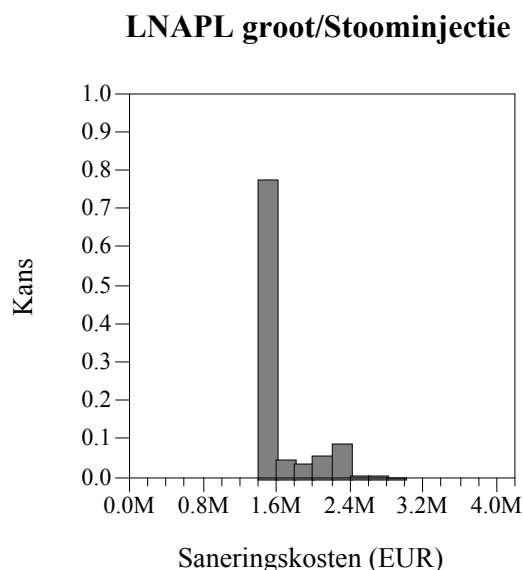


Fig. 22. Kosten/kansen curve voor stoominjectie bij locatie grote LNAPL.

De kosten/kansencurve is weergegeven in figuur 22. Hieruit volgt dat er weinig spreiding is in de saneringskosten (gemiddelde kosten zijn MEUR  $1.6 \pm 0.3$ ). Dit komt waarschijnlijk doordat er weinig faalgebeurtenissen met een aanzienlijke waarschijnlijkheid zijn die grote kostenposten met zich meebrengen. Daarnaast zijn er relatief hoge vaste uitgaven en relatief geringe tijdsafhankelijke uitgaven. Omdat veel faalgebeurtenissen voornamelijk een langere stoom- of onttrekkingsduur tot gevolg hebben zijn de faalkosten dus relatief gering. Uitgaande van de gemiddelde verwachte saneringskosten van MEUR 1.6 bedragen de saneringskosten per m<sup>3</sup> verhitte bodem ca. EUR 53. Dit bedrag is een stuk lager dan wat de firma Steamtech (een Amerikaans bedrijf gespecialiseerd in stoomsaneringen) op haar website aangeeft. Redenen hiervoor zijn waarschijnlijk de relatief grote omvang van de locatie (hetgeen door de *economy of scale* gunstig uitpakt voor de kosten per bodemvolume), het feit dat de smeerlaag op relatief geringe diepte aanwezig is en het feit dat een aantal kosten (zoals kosten voor de productie van stoom, personeelskosten voor toezicht en lozingskosten) niet gemaakt hoeft te worden.



## LNAPL groot/Stoominjectie

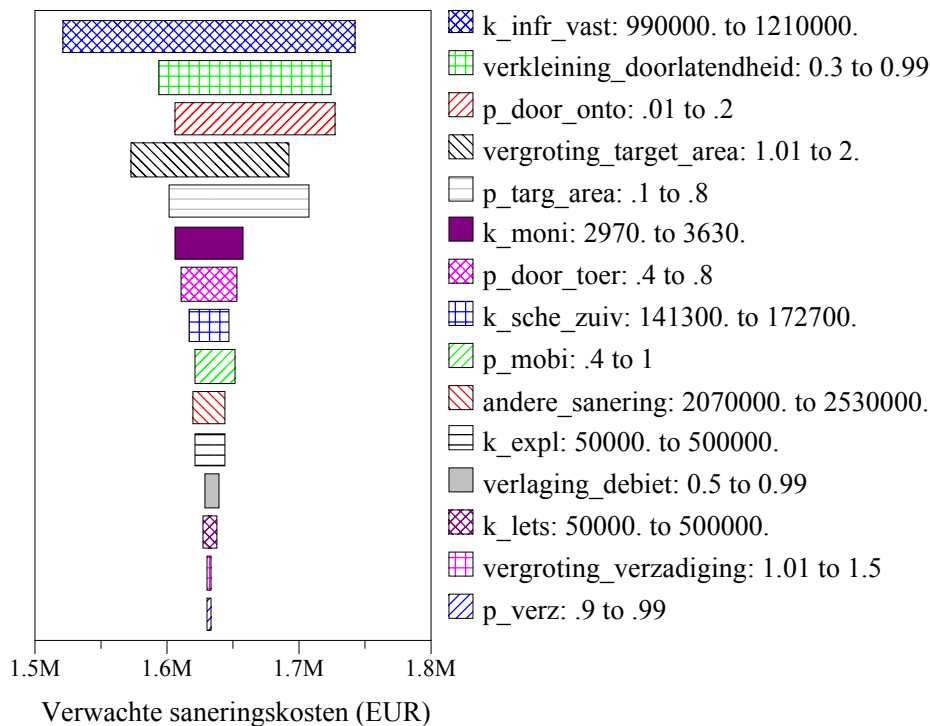


Fig. 23. Tornadodiagram voor stoominjectie bij locatie grote LNAPL. Voor een toelichting op de variabelen wordt verwezen naar tabel 6.

Uit het tornadodiagram (figuur 23) blijkt dat de zelf aangebrachte onzekerheid in de kosten van de vaste infrastructuur (leidingen, injectie- en onttrekkingsputten, pompen, thermokoppels, etc.; zie tabel 6) een grote invloed heeft op de spreiding van de saneringskosten. De kosten van de vaste infrastructuur komen, naast dat zij natuurlijk opgenomen zijn in de normale systeemkosten, terug in het geval dat de target area groter blijkt dan verwacht was. Voor het overige hebben voornamelijk de onzekerheden die te maken hebben met de doorlatendheid en de grootte van de target area een grote invloed op de spreiding van de saneringskosten.

### 6.4 Sanering door middel van co-solvent flushing

#### 6.4.1 Uitgangspunten en aannames

Voor het ontwerp worden de volgende uitgangspunten en aannames gehanteerd:

- Bij een oppervlak van 75 x 90 m, een diepte van 4.5 m, een porositeit van 0.33 en een verzadiging van 10% is er sprake van 1,000 m<sup>3</sup> puur product, voornamelijk bestaande uit een mengsel van BTE en styreen.
- De parkeerplaats (die is aangelegd bovenop de verontreiniging) wordt ontruimd.
- Geïnjecteerd wordt een co-solvent bestaande uit 60% ethanol en 40% water. Basiskosten ethanol zijn EUR 0.54/l (met accijnsvrijstelling).
- De verwijderingsefficiëntie voor LNAPL is ca. 0.01, zo is uit testen op veldschaal in de VS gebleken. Omdat deze LNAPL uit verbindingen bestaat die alle goed oplossen in ethanol, gaan we ervan uit dat de efficiëntie een stuk hoger ligt (0.025).
- Door verplaatsing van de LNAPL door het lopende co-solvent front wordt 25% van de LNAPL onttrokken (en gratis geloosd op het riool voor oliehoudende vloeistoffen, zie hierna) tijdens injectie van het eerste porievolume co-solvent.

- Het effluent kan zonder extra kosten worden geloosd op het oliehoudend riool op Pernis.
- Toezicht wordt gehouden door bedrijfspersoneel, hieraan zijn derhalve geen kosten verbonden.

#### 6.4.2 *Globaal ontwerp van het saneringssysteem*

Het terrein wordt verdeeld in 'rijen' injectie- (160) en onttrekkingsputten (144). De onderlinge putafstand is 5 m. Omdat aangenomen wordt dat de verontreiniging is versmeerd over de totale diepte worden per put twee filters geplaatst. Het injectiedebiet per filter is 1 l/min, het totale injectiedebiet komt daarmee op 460 m<sup>3</sup> per dag. De tijd benodigd om één porievolume te doorspoelen komt daarmee op ca. 22 d. In totaal zijn drie porievolumes nodig, zodat de nominale saneringsduur uitkomt op 66 d.

Door de enorme omvang van de verontreiniging (1,000 m<sup>3</sup> puur product) ontstaan er problemen met het verwerken van de afvalstroom. In principe is het mogelijk om het ongescheiden effluent te lozen op het oliehoudend riool van het bedrijf zonder extra kosten voor de sanering. Echter, dit is onaantrekkelijk, omdat op die manier ook 18,000 m<sup>3</sup> ethanol wordt verbruikt, hetgeen een enorme kostenpost met zich meebrengt. Terugwinnen van ethanol is een optie, maar ook dit is duur en stuit bovendien op technische problemen. Scheiding met behulp van het MPPE-systeem van AkzoNobel lijkt niet haalbaar, omdat dit maximaal 3,000 ppm verontreiniging aankan, terwijl we hier een gemiddelde effluentconcentratie verwachten van 25,000 ppm. Destillatie van het effluent lijkt niet zinvol, omdat de kookpunten van ethanol (78°C) en benzeen (80°C) erg dicht bij elkaar liggen, terwijl benzeen bovendien goed in ethanol oplost. Voorlopig zullen we dus rekenen met de optie het effluent (gratis) te lozen op het riool voor oliehoudende oplossingen.

#### 6.4.3 *Faalgebeurtenissen en kritische factoren*

##### *1. Doorlatendheid toereikend*

Met het relatief lage injectiedebiet dat wordt gehanteerd en de geschatte doorlatendheid van 1.5 m/d worden geen problemen verwacht.

##### *2-3. Inschatting omvang verontreiniging*

Op basis van de beschikbare informatie is het mogelijk dat de omvang van de LNAPL niet goed is ingeschat. Deze kans is echter niet zeer groot, omdat de verontreiniging in het verleden is afgeperkt. Verder is ook de aanname met betrekking tot de verzadiging van de LNAPL mogelijk onjuist. Dit heeft directe gevolgen voor de kosten van de sanering.

##### *4. Invloedssfeer*

Door locale verschillen in doorlatendheid is het mogelijk dat niet het gehele porievolume goed doorspoeld kan worden.

##### *5. Mobilisatie*

Het mobiliseren van de verontreiniging is een ongewenste situatie. Monitoren van het grondwater buiten het brongebied moet hier zicht op geven. Overigens lijkt door de voornamelijk verticaal gerichte grondwaterstroming de kans op mobilisatie gering.

#### 6.4.4 *Kosten*

Er wordt van uitgegaan dat de volgende kosten voor de verwijdering van de smeerlaag worden gemaakt:

|  |          |
|--|----------|
| Leidingen, injectie- en onttrekkingsputten, etc. | kEUR 490 |
| Pompen   | kEUR 898 |
| Chemicaliën                                      | kEUR 950 |
| Monitoring                                       | kEUR 59  |
| Totaal   | MEUR 2,4 |

Sommige van deze kosten kunnen als vaste kosten beschouwd worden, terwijl andere afhankelijk zijn van de saneringsduur. De saneringsduur zelf is weer afhankelijk van het injectiedebiet. Uitgaande van het gehanteerde injectiedebiet is de nominale saneringsduur 66 dagen (hiermee is ook gerekend bij de bovengenoemde kosten). Het zal duidelijk zijn dat dit in principe belangrijk is voor de risico-analyse, omdat de tijdsduurafhankelijke kosten behoorlijk kunnen oplopen als de saneringsduur door faalgebeurtenissen toeneemt. Echter, voor dit geval, waar zeer hoge bedragen verbonden zijn aan het gebruik van ethanol zullen de tijdsafhankelijke kosten minder belangrijk zijn.

#### 6.4.5 *Risico-analyse*

De kosten en kansen voor dit geval zijn weergegeven in tabel 7. Uitgaande van de faalgebeurtenissen, opgesomd in paragraaf 6.4.3, is een invloedsdiagram opgesteld (figuur 24). Vergeleken met het invloedsdiagram van het geval LNAPL groot/stoominjectie is dit invloedsdiagram iets simpeler, omdat met een aantal rampscenario's (explosies, letselschade) geen rekening wordt gehouden.

Tabel 7. Kosten/kansen tabel voor co-solvent flushing bij locatie grote LNAPL.

| Co-solvents             | omschrijving  | kosten/kansen | low value | high value | opmerkingen   |
|-------------------------|---|---------------|-----------|------------|---|
| 1. p_door_toer          | kans dat de doordatendheid toereikend is                              | 95%           | -         | -          | - kans klein want debieten zijn relatief laag                 |
| andere sanering         | kosten andere saneringstechniek als doordatendheid niet toereikend is | 5,170,000     | 4,563,000 | 5,687,000  |   |
| 2. p_targ_area          | kans dat de target area goed geschat is                               | 60%           | 10%       |            | 80% kans redelijk hoog dankzij veldmetingen IWACO             |
| k_infr_vast             | vaste kosten infrastructuur   | 1,080,000     | 972,000   | 1,188,000  | spreadings arbitrair gesteld op +/- 10%                       |
| k_infr_huur             | huur van infrastructuur (per dag)                                     | 30,000        | 27,000    | 33,000     | spreadings arbitrair gesteld op +/- 10%                       |
| k_moni                  | kosten van monitoring (per dag)                                       | 2,000         | 1,800     | 2,200      | spreadings arbitrair gesteld op +/- 10%                       |
| k_chem                  | kosten van chemicaliën (l)  | 1.20          | 1.08      | 1.32       | spreadings arbitrair gesteld op +/- 10%                       |
| percentage_ethanol      | percentage ethanol in co-solvent                                      | 60%           | 50%       | 95%        | 50: co-solvent gaat werken; 95: gebruikt voor DNAPL           |
| volume_LNAPL            | volume LNAPL (l)  | 1,000,000     | -         | -          |   |
| efficiency              | ratio van volume LNAPL dat per 1,000 l co-solvent wordt verwijderd    | 0.80          | 0.70      | 0.90       |   |
| injectiedebiet          | aantal l/d (160 injectieputten)                                       | 460,000       | 368,000   | 552,000    |   |
| percentage_verplaatsing | percentage van LNAPL die verplaatst wordt door co-solvent front       | 25%           | 10%       | 50%        |   |
| p_opge_1                | kans dat een grotere target area niet wordt opgemerkt                 | 70%           | -         | -          |   |
| p_acce_1                | kans dat het acceptabel is dat de target area groter is               | 20%           | -         | -          |   |
| vergroting_target_area  | factor  | 1.5           | 1.01      | 2          |   |
| 3. p_verz               | kans dat de verzadiging goed geschat is                               | 95%           | -         | -          | - de verzadiging is met 10% al ruim genomen                   |
| p_opge_2                | kans dat een grotere verzadiging niet wordt opgemerkt                 | 30%           | -         | -          |   |
| p_acce_2                | kans dat het acceptabel is dat de verzadiging groter is               | 20%           | -         | -          |   |
| vergroting_verzadiging  | factor  | 1.2           | 1.01      | 1.5        |   |
| 4. p_invl_sfee          | kans dat de hele 'box' goed doorspoeld wordt                          | 80%           | 60%       | 100%       |   |
| p_opge_3                | kans dat een residu niet wordt opgemerkt                              | 70%           | -         | -          |   |
| p_acce_3                | kans dat een residu acceptabel is                                     | 30%           | -         | -          |   |
| residu                  | percentage van de LNAPL die 'gemist' wordt                            | 10%           | 0%        |            | 20% aangenomen wordt dat dit gelocaliseerd is (dus: afgraven) |
| 5. p_mobi               | kans dat geen mobilisatie optreedt                                    | 90%           | -         | -          |   |
| p_opge_4                | kans dat mobilisatie niet wordt opgemerkt                             | 20%           | -         | -          |   |
| p_acce_4                | kans dat mobilisatie acceptabel is                                    | 75%           | -         | -          |   |
| k_nazo                  | kosten van nazorg in geval van mobilisatie                            | 500,000       | -         | -          |   |

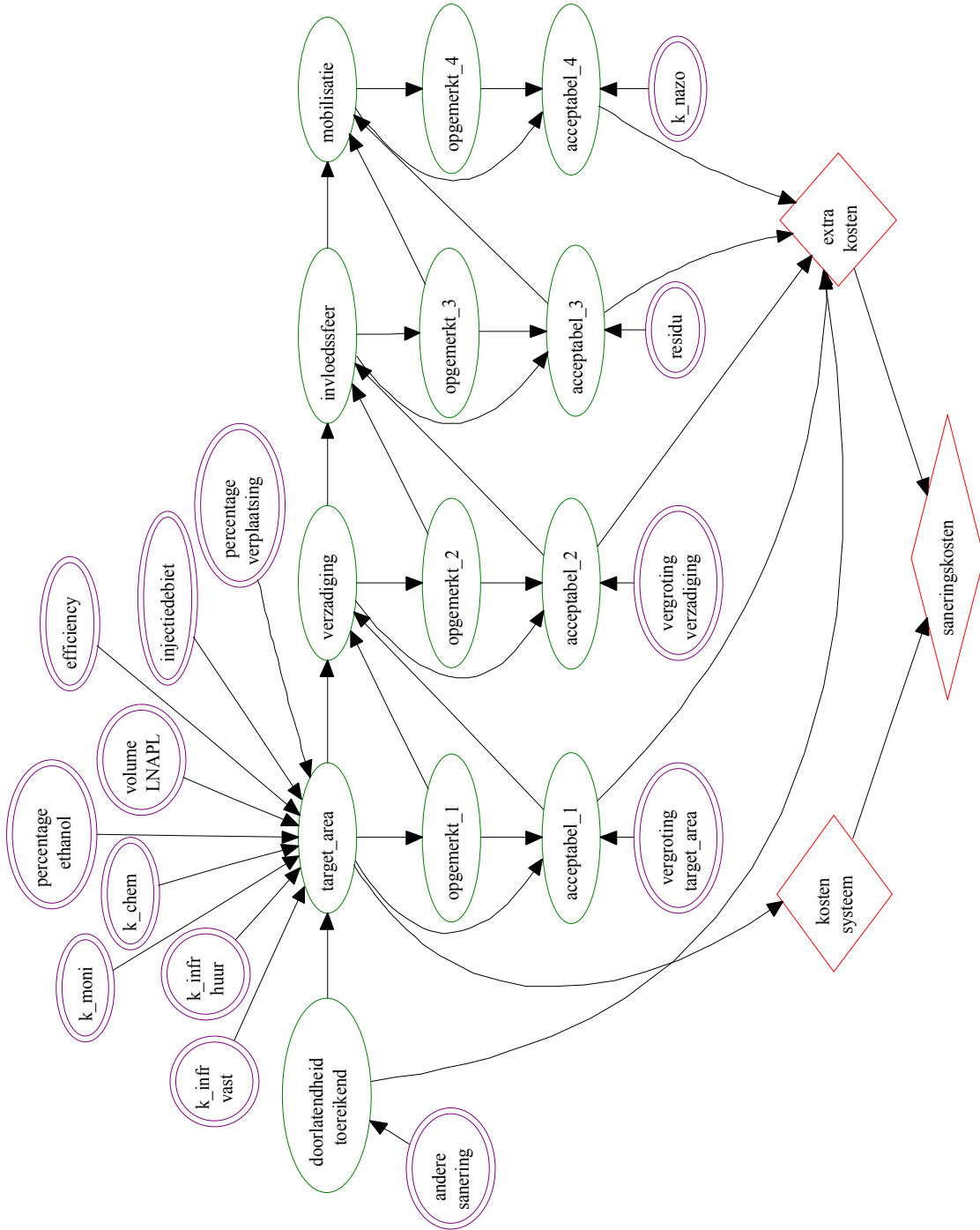


Fig. 24. Invoedsdiagram volgens KFR-systematiek voor co-solvent flushing bij locatie grote LNAPL

### LNAPL groot/Co-solvent flushing

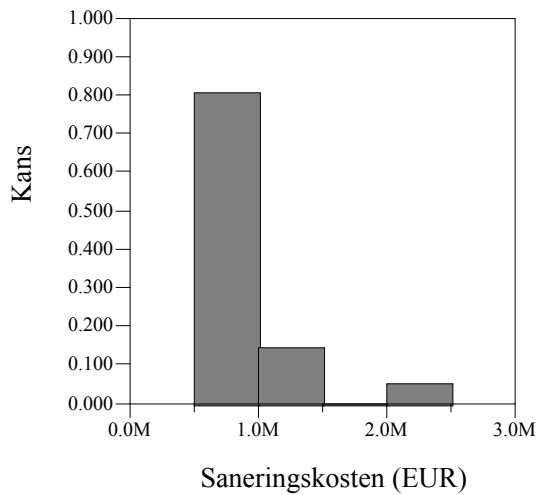


Fig. 25. Kosten/kansen curve voor co-solvent flushing bij locatie grote LNAPL.

### LNAPL groot/Co-solvent flushing

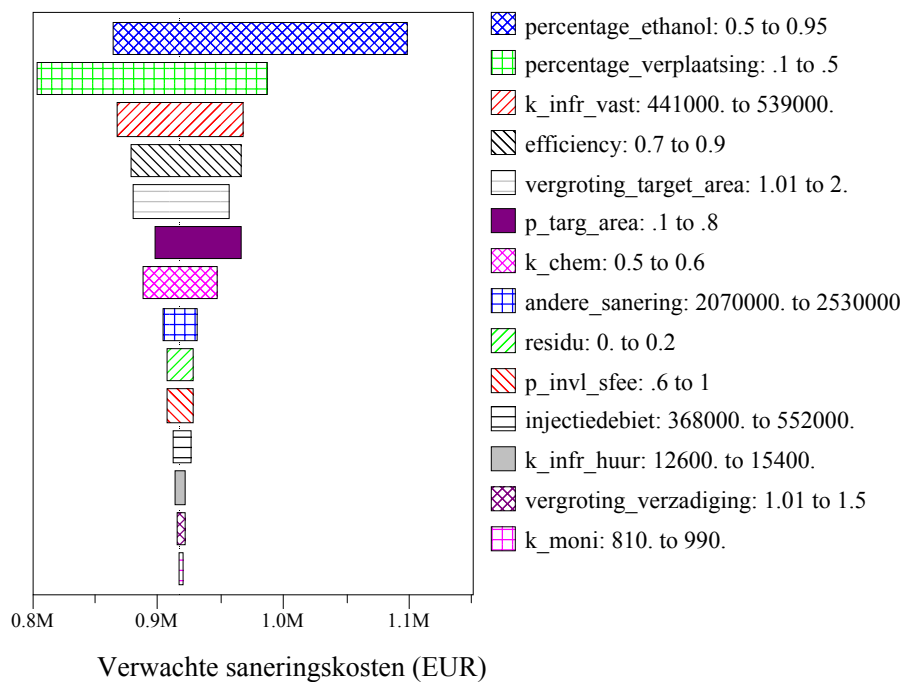


Fig. 26. Tornadodiagram voor co-solvent flushing bij locatie grote LNAPL. Voor een toelichting op de variabelen wordt verwezen naar tabel 7.

In figuur 25 staat de kosten/kansencurve die volgt uit de gebeurtenisboom. Vanwege het geringe aantal faalgebeurtenissen en de geringe faalkosten (relatief ten opzichte van de zeer hoge kosten voor het gebruik van ethanol) is de bandbreedte tamelijk klein. Met 80% valt het overgrote deel van de kosten in het interval MEUR 0.5-1.0. De kosten in het interval MEUR 2.0-2.5 refereren naar het fall-back scenario als door een te lage doorlatendheid co-solvent flushing niet mogelijk is en de referentie-saneringsoptie (afgraven) uitgevoerd wordt.

Uit het tornadodiagram (figuur 26) volgt dat de onzekerheid in met name de variabelen die direct met ethanol te maken hebben kostenbepalend zijn: het percentage ethanol in de co-solvent, het percentage van de LNAPL dat verplaatst wordt door het lopende co-solvent front en de efficiency van verwijdering, maar ook de inschatting van het volume van de verontreiniging. Hoewel de kosten voor de alcohol relatief hoog zijn, kan co-solvent flushing concurreren met stoom-injectie (MEUR 1.4-1.6) op deze locatie. Daarnaast kan voorafgaand aan een sanering uit laboratorium-experimenten de optimale combinatie van het percentage ethanol in de co-solvent en de efficiency worden bepaald. Het ligt voor de hand dat deze variabelen van elkaar afhankelijk zijn.

## HOOFDSTUK 7

### VERALGEMENISERING

In dit rapport werden de 3 technieken op bestaande locaties toegepast. Hieronder gaan we een indicatie geven welke van de drie technieken voor welke organische vervuiling en voor welke bodemsoorten op technologische gronden in aanmerking komen.

Voor de onverzadigde zone is stoominjectie vaak een goede technologische oplossing. Voor DNAPL is ook in deze zone de mobilisatie (met name aan het condensatie front) een probleem. Hiervoor is het injecteren van stoom-/luchtmengsels een goede mogelijkheid gebleken.

Voor het water-verzadigde grondwatersysteem kunnen de volgende algemene uitspraken worden gedaan:

#### *Veen*

Dit is een moeilijke grondsoort wat het aanpakken van bronnen betreft. Chemische oxidatie en waarschijnlijk ook het injecteren van stoom leidt tot aantasting van het veenmateriaal en zijn dus niet geschikt. Hoewel co-solvent flushing in principe zou kunnen, is deze techniek nooit in dit medium getest of toegepast. Hier zijn dus ook risico's aanverbonden.

#### *Klei*

Echte dichte kleipakketten hebben een hoge indringdruk en tenzij er scheuren of andere holtes in zitten kan het puur product dus maar moeilijk als afzonderlijke fase in deze pakketten binnendringen.

#### *Zand*

In dit medium kan voor LNAPL een directe extractie gecombineerd worden met stoominjectie als het kookpunt van de gifstof niet te hoog is, of eventueel met co-solvent flushing.

Voor DNAPL geldt dat, indien zich beneden de bronzone een dikke en dichte kleilaag bevindt, de voor LNAPL gebruikte technieken kunnen worden toegepast. Ook chemische oxidatie is hier een goede mogelijkheid.

Indien een ondoorlatende laag ontbreekt is co-solvent flushing de aangewezen techniek.

In dit hoofdstuk worden de verschillende bronverwijderingstechnologieën vergeleken door eerst de resultaten per locatie te evalueren. Dit zal gedaan worden voor de kleine DNAPL en de grote LNAPL. Dit levert informatie over de meest gewenste bronverwijderingstechnologie voor deze twee specifieke locaties. Daarnaast zullen de resultaten voor de verschillende locaties onderling vergeleken worden door de resultaten per bronverwijderingstechnologie te evalueren. Hoewel deze vergelijking zijn beperkingen zal hebben, omdat elke techniek maar twee keer is ingezet, geeft dit een indicatie van het soort verontreinigingssituatie, waarin een bepaalde bronverwijderingstechnologie (niet) geschikt lijkt te zijn.

De in de voorliggende hoofdstukken gepresenteerde KFR-analyses en de onderliggende saneringsontwerpen zijn gebaseerd op een bureaustudie zonder toetsing aan de praktijk, omdat er immers binnen Nederland weinig (of geen) ervaring is met deze technieken. Zo is de efficiëntie en dus de kostprijs van co-solvent flushing erg afhankelijk van de hoeveelheid alcohol die benodigd is. Dit wordt met name bepaald door het feit of de sanering door opwaartse mobilisatie, danwel solubilisatie plaatsvindt. Mobilisatie is verwijdering van de pure fase en dus is deze me-



thode net zo snel voor een zeer - als voor een minder vervuilde locatie. De kosten per verwijderde ton contaminant liggen in het eerste geval dus lager.

De studie laat wel een min of meer objectieve beoordeling van bronverwijderingstechnieken toe. Dit is van belang, omdat in de praktijk vaak besluiten op grond van *a-priori* ideeën ten aanzien van de kosten worden genomen, die bij nadere bestudering onjuist blijken te zijn.

De resultaten moeten dus met enige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd. Als bij vergelijking van bronverwijderingstechnologieën en locaties blijkt dat de verwachte saneringskosten enigszins bij elkaar liggen, dan is in feite een nadere uitwerking van zowel saneringsontwerpen als KFR-analyses noodzakelijk.

Een grote kostenpost bij de sanering van met name DNAPL is de beheersvariant na neerwaartse mobilisering van het pure product. Het optreden van ongewenste neveneffecten bij saneringen kan voor een groot deel worden ondervangen door voor de feitelijke veldsanering eerst gedegen vooronderzoek door middel van laboratoriumexperimenten te doen. De praktijk leert dat dat soort experimenten in het verleden vaak werden uitgevoerd om waargenomen effecten na een veldsanering te verklaren. Gezien de potentiële risico's en de daarmee verbonden financiële consequenties van bronverwijdering lijkt een goede voorbereiding onontbeerlijk.

## 7.1 **Vergelijking locaties**

### 7.1.1 *Kleine DNAPL*

Dit is de enige locatie waar alledrie de bronverwijderingstechnologieën zijn beschouwd. Afgezien van de atypische locatie (met een DNAPL die zich op een kalksteen bevindt en een zeer grote grondwaterstromingssnelheid) biedt dit een uitstekende mogelijkheid om de verschillende bronverwijderingstechnologieën te vergelijken. Deze vergelijking zal gemaakt worden op basis van saneringskosten en saneringsduur.

De gemiddelde verwachte saneringskosten voor in-situ oxidatie, co-solvent flushing en stoominjectie zijn resp. MEUR 1.0, 0.5 en 2.3 (tabel 8). Op grond hiervan valt te concluderen dat de onderzochte technieken alle als redelijke opties zijn te beschouwen. Voor in-situ oxidatie moet nogmaals de aantekening gemaakt worden dat de genoemde kosten alleen gelden als een vooraf uitgevoerde 'kalksteentest' positief uitvalt. Wordt gekeken naar de kosten/kansencurves van in-situ oxidatie en stoominjectie dan valt op dat de spreiding in de kosten voor stoominjectie lager is, met bovendien minder kans op extreme uitschieters. Als echter op grond van saneringskosten daadwerkelijk een keuze gemaakt moet worden tussen de twee bronverwijderingstechnologieën, dan zijn een meer gedetailleerd ontwerp (inclusief geohydrologisch beheerssysteem) en een uitgebreidere KFR-analyse noodzakelijk. Wat de verwachte saneringsduur betreft ontstaat hetzelfde beeld als voor de saneringskosten. Co-solvent flushing is met een geschatte saneringsduur van 1 maand de meest snelle methode. Stoominjectie en in-situ oxidatie hebben een vergelijkbare saneringsduur.

Tabel 8. Samenvatting van de drie in-situ bronverwijderingstechnieken uitgewerkt op de locatie kleine DNAPL in vergelijking tot de beheersvariant.

| Variant                   | Tijdsduur   | Kosten (MEUR) |
|---------------------------|-------------|---------------|
| Beheersing                | $\infty$    | 2.6           |
| Fenton's reagens oxidatie | < 3 maanden | 1.0 $\pm$ 1.1 |
| Co-solvent flushing       | < 1 maand   | 0.5 $\pm$ 0.4 |
| Stoominjectie             | < 2 maanden | 2.3 $\pm$ 1.2 |

### 7.1.2 Grote LNAPL

Er moet worden opgemerkt dat deze locatie geen typische LNAPL-verontreiniging is: er is sprake van slechts een beperkt aantal laagmoleculaire componenten. Op deze locatie zijn stoominjectie en co-solvent flushing beschouwd. De vraag werpt zich echter op of er 'typische' saneringslocaties zijn waar *in-situ* bronverwijdering de meest geëigende techniek is. *In-situ* bronverwijdering is vooral interessant als de verontreiniging diep is, omvangrijk is en het operationele gebruik van een terrein niet mag verstoren (zoals bij de spoorwegen of op industriecomplexen). Een vergelijking tussen deze bronverwijderingstechnologieën kan gemaakt worden op grond van een aantal criteria, waaronder saneringskosten, saneringsduur en verwijderingspercentage.

Als de gemiddelde verwachte saneringskosten vergeleken worden, valt dit uit in het voordeel van co-solvent flushing (MEUR 1.0 voor co-solvent flushing tegen MEUR 1.6 voor stoominjectie en MEUR 2.3 voor sanering middels afgraven). Opgemerkt moet worden dat bij de kostenraming van de stoomsanering in overleg met de probleemeigenaar er vanuit is gegaan dat er geen kosten zijn verbonden aan de productie van stoom op de locatie en aan toezicht op de site door medewerkers van de probleemeigenaar. De nominale saneringsduur is voor beide bronverwijderingstechnologieën vrijwel gelijk (iets meer dan twee maanden). Als verschillende faalgebeurtenissen optreden kan de saneringsduur echter toenemen. In feite kan de KFR-analyse ook gemaakt worden met tijd als rekeneenheid in plaats van kosten. Dit zou een 'tijd/kansencurve' opleveren, wat een meer uitgebalanceerd idee geeft van de saneringsduur. Als de saneringsduur een belangrijk criterium is (bijvoorbeeld als bepaalde werkzaamheden of vervolgactiviteiten zijn gepland) zou een dergelijke KFR-analyse overwogen kunnen worden. Het verwijderingspercentage is niet beschouwd in de KFR-analyses. Een risico bij afgraving, waaraan in hoofdstuk 5 geen aandacht is besteed, is het gevaar van zetting door het droogpompen van het ontgravingsgebied. Traditionele saneringstechnieken kennen net zo goed als innovatieve technieken risico's en onzekerheden. Hier is in de huidige studie geen aandacht aan besteed.

## 7.2 Vergelijking saneringstechnologieën

### 7.2.1 *In-situ oxidatie*

Toepassing van in-situ oxidatie is uitgewerkt op de kleine en de grote DNAPL-locatie. Een vergelijking van beide is erg moeilijk. De kleine DNAPL is atypisch vanwege het feit dat de zinklaag bovenop een kalksteen ligt. Met name voor chemische oxidatie middels Fenton's reagens is dit een probleem vanwege de vorming van zoutzuur tijdens de oxidatie. Als de voorgestelde kalksteentest echter positief uitvalt dan is chemische oxidatie voor deze locatie een goede en goedkope optie. De KFR-analyse van de grote DNAPL wordt overheerst door de aanwezigheid van een fabriek bovenop de verontreiniging en de mogelijke sloop hiervan als gevolg van zettingsproblemen, veroorzaakt door mogelijk oplossen van de schelpen in de ondergrond.

Er kunnen aan de hand van deze studie niet echt algemene uitspraken worden gedaan over de bruikbaarheid van Fenton's reagens voor het saneren van kleine versus grote DNAPL. Wel is aangetoond dat *in-situ* oxidatie met Fenton's reagens competitief is ten opzichte van eeuwigdurende beheersing.

#### 7.2.2 *Co-solvent flushing*

Co-solvent flushing is beschouwd voor de kleine DNAPL en de grote LNAPL. Vergelijking tussen beide is lastig, alleen al vanwege de verschillen in type verontreiniging, die in feite een geheel ander saneringsontwerp vereisen. Daarnaast is ook de hoeveelheid aanwezige verontreiniging van grote invloed op de efficiëntie en dus de kosten per ton bodem. Een interessante uitkomst van de KFR-analyse is dat de kosten van de alcoholmengsels slechts marginaal bijdragen aan de totale saneringskosten. Dit maakt co-solvent flushing een kostengunstige methode in vergelijking met de andere twee saneringstechnieken.

#### 7.2.3 *Stoominjectie*

Stoominjectie is beschouwd voor de kleine DNAPL en de grote LNAPL. In beide gevallen scoort stoominjectie goed als bronverwijderingstechnologie. Algemeen kan gesteld worden dat stoominjectie aantrekkelijk is voor locaties met grote verontreinigde bodemvolumes, omdat de kosten per kubieke meter dan relatief laag zijn. Daarbij is uitgegaan van het kostenloos beschikbaar zijn van stoom op de locatie (hetgeen aannemelijk is bij grote industriële complexen).

#### 7.2.4 *Algemene risico's en mogelijkheden*

De uitwerking van de KFR-systematiek op de zes gevallen maakt duidelijk dat een belangrijk risico gevormd wordt door zettingsschade: kalk zal in oplossing gaan bij chemische oxidatie door de zuurproductie tijdens het proces en veen of klei zou kunnen compacteren tijdens stoominjectie. Het laatste is een vermoeden dat niet in de praktijk of het laboratorium getest is. De technieken zijn daarmee het meest perspectiefvol in arme zandgronden en minder in Zuid-Nederland met een kalkhoudende deklaag met klei- en veenafzettingen.

Het brute karakter van *in-situ* oxidatie, stoominjectie en co-solvent flushing leidt tot een verwijdering van natuurlijk reactieve bestanddelen en/of beperking van het microbiële leven. De bodem na afloop van sanering heeft dan een doods karakter. Na verwijdering van de oxidanten, hoge concentraties alcohol of afkoeling van de bodem, is de bacteriepopulatie snel terug te brengen door niet-verontreinigd grondwater te injecteren. Deze methode is reeds getest in Duitsland. De drie beschouwde technieken verschillen ook wezenlijk in hun agressieve karakter: co-solvent flushing is een mildere vorm van bronverwijdering dan *in-situ* oxidatie of stoominjectie.

## HOOFDSTUK 8

### CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De doelstelling van het onderzoek was om te achterhalen of *in-situ* bronverwijderingstechnieken kosteneffectief zijn. De uitwerking van zes gevallen door combinatie van drie bronverwijderingstechnieken met drie locaties geeft aan dat alle drie de technieken zeker kosteneffectief kunnen zijn. Deze conclusie is tamelijk ondubbelzinnig, alhoewel gerealiseerd mag worden dat praktijkervaring met de technieken maar beperkt beschikbaar is voor de uitvoerenden. Een belangrijk milieuhygiënisch voordeel van bronverwijdering is dat sanering van de bron plaatsvindt, waardoor verdere verontreiniging van het grondwater een halt wordt toegeroepen. Dit laatste is sterk afhankelijk van het rendement.

Een studie, zoals in deze rapportage beschreven, laat een min of meer objectieve beoordeling van bronverwijderingstechnieken toe. Dit is van belang omdat in de praktijk vaak besluiten op grond van *a priori* ideeën ten aanzien van de kosten worden genomen, die bij nadere bestudering onjuist blijken te zijn.

*The proof of the pudding lies in the eating.* Praktijkervaring is nodig om nieuwe technieken op hun merites te beoordelen. Demonstratieprojecten zijn nodig om ervaring op te bouwen met fysisch-chemische saneringstechnieken. De aandacht dient hierbij niet alleen gericht te zijn op het succesvol saneren zelf van de betreffende locatie, maar ook op het leren van de technische aspecten die samengaan met de betreffende saneringstechniek.

## LITERATUUR

Davis, E.L. (1997) How heat can accelerate in-situ soil and aquifer remediation: Important chemical properties and guidance on choosing the appropriate technique. US EPA Issue paper EPA/540/S-97/502.

Falta, R.W., Lee C.M., Brame S.E., Roeder E., Coates J.T., Wright C., Wood A.L. and Enfield C.G. (1999) Field test of high molecular weight alcohol flushing for subsurface nonaqueous phase liquid remediation. *Water Resour. Res.* 35, 2095-2108.

Grubb, D.G. & N. Sitar; Evaluation of technologies for in-situ cleanup of DNAPL contaminated sites, United States Environmental Protection Agency; report nr. EPA/600/R-94/120, 1994.

Hetterschijt, R.A.A., Te Stroet, C.B.M., Van Zutphen, M., Schlebaum, W., Nijboer, M.H., De Sain, H. & Hartog, J.G. (2000). Financiële risico's van saneringsvarianten. Kwantitatieve risicoanalyse (QRA) ter ondersteuning bij variantkeuze. NOBIS, rapportno. 98-1-10.

Hofstee, C., Gutiérrez Ziegler C., Trötschler O. and Braun J. (2003) Removal of DNAPL contamination from the saturated zone by the combined effect of vertical upward flushing and density reduction. *J. Contam. Hydrol.* Submitted.

Jafvert, C.T.; Surfactants/Cosolvents; Ground-Water Remediation Center Technology Analysis Center, Technology Evaluation Report TE-96-02, 1996).

Lowe, D.F., C.L. Oubre, C.H. Ward, editors; T. Simpkin, T. Sale, B. Kueper, M. Pitts, K. Wyatt, authors; Surfactants and Cosolvents for NAPL remediation, A technology Practices Manual; Lewis Publishers, Boca Raton, London, New York, Washinton D.C., 1999.

Padgett, P.K. & Hayden, N.J. (1999). Mobilization of residual tetrachloroethylene during alcohol flushing of clay-containing porous media. *J. Cont. Hydrol.* (40), 285-296.

Van Zutphen, M., Hetterschijt, R. & Bakker, L. (2001). Overzicht van thermische technieken voor in-situ DNAPL-bronverwijdering. *Bodem* (3/juni), 107-109.

Verder kan algemene informatie gevonden worden op de volgende websites:

EPA [www.clu-in.org](http://www.clu-in.org)

Geo-Cleanse International, Inc. [www.geocleanse.com](http://www.geocleanse.com)

in-Situ Technieken bv [www.insitu.nl](http://www.insitu.nl)

Steamtech Environmental Sciences [www.steamtech.com](http://www.steamtech.com)

## BIJLAGE A

### BESCHRIJVING CASES

#### Case DNAPL - klein

##### Inleiding

Als geval voor een kleine DNAPL is gekozen voor een verontreinigde locatie in Maastricht-Oost, Zuid-Limburg. Hoewel de bronzone bij deze locatie niet echt klein is, is de locatie wel representatief voor saneren van een DNAPL-verontreiniging in stedelijk gebied.

TAUW heeft voor deze locatie recentelijk een Bijzonder Inventariserend Onderzoek (BIO) naar de verontreinigingssituatie uitgevoerd. De locatie is gelegen bij de Heerderweg 154. Op deze locatie is van 1953 tot 1965 een chemische wasserij actief geweest en in die periode zijn aanzienlijke hoeveelheden Per en Tri op dumpplaatsen van filterkoek, via afvoerputjes en de bedrijfsriolering in de ondergrond terechtgekomen. Als gevolg daarvan zijn thans relatief hoge concentraties aan chloorhoudende koolwaterstoffen (CKW's) in het diepere grondwater aanwezig: Per (tetrachlooretheen), Tri (trichlooretheen), Cis (1,2-dichlooretheen), Vc (vinylchloride).

##### Geologie

De geologische opbouw bij de locatie wordt als volgt gekarakteriseerd:

|                           |   |
|---------------------------|---|
| 0 – 3 à 5 m –mv:          | deklaag bestaande uit alluviale afzetting (rivierklei vermengd met löss) in de nabijheid van de Maas en elders uit löss |
| 3 à 5 tot circa 15 m –mv: | maasgrinden   |
| > 15 m –mv:               | kalksteen   |

##### Geohydrologie

In het algemeen kan gesteld worden dat de grondwaterspiegel onderin de deklaag zit, die drie tot vijf meter dik is. Er is sprake van twee watervoerende pakketten. Het eerste freatische watervoerend pakket wordt gevormd door de Maasgrinden (horizontale doorlatendheid  $\approx 70$  m per dag). Het tweede watervoerend pakket wordt gevormd door de formatie van Maastricht (zachte, fijn tot grofkorrelig kalksteen). De doorlatendheid is hier veel lager dan in het eerste pakket:  $\approx 3$  m per dag. Voor de effectieve porositeit van het eerste pakket kan de waarde 0.33 worden aangenomen; van het tweede pakket 0.23.

De grondwaterstroming is noord-west-west tot noord-west gericht. De snelheid van het grondwater in het eerste pakket is 100 tot 110 meter per jaar; in het tweede watervoerende pakket is dit 15 tot 25 m per jaar (berekend met geohydrologisch model).

##### Verontreinigingssituatie

In het betreffende gebied is de grondwaterstromingssnelheid hoog; deze ligt in orde van honderd meter per jaar. Op basis van dit gegeven, het feit dat de grondwaterconcentraties Per en Tri in de diverse filters dichtbij de voormalige wasserij nog altijd in de orde van enkele duizenden  $\mu\text{g}$ -per liter liggen en het feit dat de verontreinigingen door het hele grindpakket verspreid liggen, mag worden verondersteld dat er een bronzone aanwezig is.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> In het algemeen wordt verondersteld dat er sprake is van aanwezigheid van puur product indien de concentratie 10 of meer % van de oplosbaarheid bedraagt. In geval van Per (oplosbaarheid  $2 \times 10^5 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ) betekent dit dat de concentratie minimaal  $20 \times 10^3 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  zou moeten bedragen. Om in de tekst genoemde redenen is het aannemelijk dat deze vuistregel hier niet geldt.

In 1996 is overigens wel  $24 \times 10^3 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$  Per aangetroffen in peilbuis 8741 (diepte 3.9 – 4.9 m).

Voor alle bovenbeschreven putten geldt dat de concentraties benzeen, ethylbenzeen en Somxylenen onder de streefwaarden (of detectielimieten) liggen. Voor CKW is dit geheel anders (alle waarden in  $\mu\text{g}\cdot\text{per liter}$ ).

Voor de andere CKW's (dichloormethaan, trichloormethaan, tetrachloormethaan, 1,2-dichloorethaan, 1,1,1-trichloorethaan, 1,1,2-trichloorethaan), liggen alle meetwaarden onder de streefwaarde. Meetwaarden voor 1,1-dichloorethaan liggen met uitzondering van putten 600 en 601, onder de streefwaarde. Voor trans-1,2-dichlooretheen is voor vrijwel alle putten een licht verontreinigde situatie gevonden.

| nummer | filterdiepte /m | Per  | Per | Tri      | Tri | Cis  | Cis | VC  | VC      |
|--------|-----------------|------|-----|----------|-----|------|-----|-----|---------|
| 8511   | 5.2-6.2         | 4600 | +++ | 120<br>0 | +++ | 3200 | +++ | 3.6 | ++      |
| 8513   | 4.5-5.8         | 7300 | +++ | 790      | +++ | 2100 | +++ | <2  | -       |
| 8741   | 3.9-4.9         | 4200 | +++ | 110<br>0 | +++ | 830  | +++ | 57  | ++<br>+ |
| 82312  | 10.80-11.80     | 680  | +++ | 700      | +++ | 1800 | +++ | 18  | ++<br>+ |
| 82313  | 12.0-13.0       | 1.8  | +   | 0.6      | +   | 2.2  | +   | <2  | -       |
| 82314  | 5.0-6.0         | 270  | +++ | 47       | +   | 160  | +++ | <2  | -       |
| 600    | 6.0-7.0         | 7.3  | +   | 1.3      | +   | 2.6  | +   | <2  | -       |
|        | 13.0-14.0       | 550  | +++ | 40       | +   | 73   | +++ | <2  | -       |
| 601    | 4.5-5.5         | 130  | +++ | 13       | +   | 15   | ++  | <2  | -       |
|        | 11.8-12.8       | 320  | +++ | 17       | +   | 61   | +++ | <2  | -       |
| 602    | 6.0-7.0         | 560  | +++ | 43       | +   | 78   | +++ | <2  | -       |
|        | 12.0-13.0       | 140  | +++ | 8.2      | +   | 24   | +++ | <2  | -       |

+++ = ernstige bodemverontreiniging; meetwaarde > interventiewaarde

++ = nader onderzoek nodig; tussenwaarde < meetwaarde < interventiewaarde

+ = licht verontreinigd; meetwaarde > streefwaarde en < tussenwaarde

- = niet verontreinigd; niet verontreinigd; meetwaarde < streefwaarde

De precieze vorm en grootte van de interventiewaardencontour kan op basis van de metingen niet worden vastgesteld, want de verontreiniging is nog niet volledig afgeperkt. De getekende contour is opgesteld op basis van de grondwaterstromingsrichting en de plaats van de voormalige wasserij.

In het kader van dit project moet een idee gevormd worden van de bronzone. De CKW-concentraties zijn veruit het hoogst zijn in het gebied rondom de peilbuizen 8511, 8513, 8741 en 82312 (voor Per respectievelijk: 4600, 7300, 4200 en 680  $\mu\text{g/l}$ ). Zou dit gebied aangenomen worden als bronzone, dan komt dit neer op een gebied van ongeveer 45 bij 25 m. Het is op basis van de beschikbare gegevens echter een tamelijk lastige onderneming om de zone verticaal en horizontaal af te perken.

In de putten 82312 (10.80 – 11.80 m –mv) en 600 (13.0 – 14.0 m –mv) zijn, naast de CKW-concentraties, ook in februari 1999 de afbraakparameters in het grondwater gemeten. De gevonden concentraties zijn niet ongewoon voor stedelijk belast gebied.

| nummer | filterdiepte /m | Fe(II)<br>/ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ | NO <sub>3</sub> als N<br>/ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ | SO <sub>4</sub><br>/ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ | DOC<br>/ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ | T<br>/ °C | O <sub>2</sub><br>/ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ |
|--------|-----------------|---|--|--|--|-----------|---|
| 82312  | 10.80-11.80     | 1.2                                       | 0.63   | 53   | 3.9                                    | 11.3      | 0.28  |
| 600    | 13.0-14.0       | <0.1                                      | 3.7  | 60   | 2.2                                    | 12.1      | 0.30  |

De gemiddelde chloride-index (gedefinieerd als  $(\sum N_{Cl} \cdot \text{tussenproducten}) / (\sum \text{totaal CKW's})$ ) is 3,59. Bij een ouderdom van de pluim van meer dan 3 jaar (zoals hier het geval is) duidt dit op een geringe kans op natuurlijke afbraak. De suboxische toestand van het grondwater brengt ook naar voren dat de kans op afbraak van CKW's door reductieve dechlorering klein is.

### **Infrastructuur**

De locatie is gelegen in een stedelijk gebied. De omgeving van de locatie is redelijk vol bebouwd met huizen, kleine tot middelgrote bedrijfspanden en een benzinstation. Er zijn in de naaste omgeving ook enkele braakliggende terreinen en er is een bosperceel.



## Case DNAPL - Groot

De case DNAPL - groot is gesitueerd op het terrein van een chemisch bedrijf, waar een zinklaag met 1,1-dichloorethaan is ontstaan.

### Geologie

Vanaf het maaiveld (1,6 m +NAP) komt na een ca. 1-2 m dikke toplaag een ca. 0,5-1 m dikke silt/kleiige siltlaag voor. Onder de siltlaag volgt tot ca. 4 m -NAP een zandpakket. Dit zandpakket is inhomogeen doordat op diverse niveaus het pakket wordt doorsneden met silt- en/of dunne kleilagen.

Onder het zandpakket is op ca. 5 m -NAP een ca. 0,25-0,5 m dikke siltlaag aanwezig. Onder deze laag volgt tot de afdichtende kleilaag, welke zich op 21 m -NAP bevindt, een zandpakket. In de richting oost-noordoost daalt de kleilaag tot op een diepte van ca. 30 m -NAP. De onderste laag van het zandpakket, boven de kleilaag van ca. 4 m dikte, bevat schelpen die uit kalk bestaan.

De bovenste bodemlagen tot ca. 2,5 m -mv bevatten ca. 2 % organisch stof. In de lagen daaronder worden gehalten aan organisch stof van gemiddeld 0,3% tot op de kleilaag aangetroffen.

### Geohydrologie

Ter plaatse van de locatie van de grote DNAPL komen globaal twee hoofdwaterlagen voor:

1. Freatische deklaag;
2. Watervoerend pakket.

Het grondwater stroomt met een snelheid van ca. 5 m/jaar in noord-noordoostelijke richting, richting het zoute oppervlaktewater. De freatische deklaag bestaat uit fijn siltig zand met een doorlaatbaarheid van 1 tot 2 m/dag. De scheidende laag tussen het freatische en watervoerende pakket heeft een weerstand van 50 dagen per meter dikte. Het watervoerende pakket bestaat uit fijn zand met plaatselijk siltlaagjes. De doorlaatbaarheid van het pakket varieert van 1 tot 5 m/dag boven de siltlaag op 5 m -NAP en van 5 tot 10 m/dag onder de siltlaag. De kleine siltlaagjes in het pakket kunnen een weerstand hebben van 5 tot 10 dagen per meter dikte.

Onder het terrein bevindt zich een zoet- en zoutgrondwatergrensvlak, dat richting het oppervlaktewater ondieper komt te liggen. De CKW-verontreinigingen op diepte bij de kleilaag bevinden zich in het zoute water.

### Verontreinigingssituatie

Ter plaatse van de onderzoekslocatie zijn in het verleden vluchtige chloorkoolwaterstoffen (VOC's) geproduceerd, opgeslagen en verhandeld. Hierdoor zijn veel VOCI's in de bodem terechtgekomen. Dit heeft ertoe geleid dat de grond en het grondwater ter plaatse van de fabriek en het tankopslagterrein sterk verontreinigd zijn met VOCI's. Binnen deze locatie worden op 3, 7, 15 en 30 meter onder het oppervlak significante hoeveelheden 1,2-dichloorethaan (1,2-DCA) aangetroffen, zodat de aanwezigheid van puur product wordt verwacht. Tevens wordt in een peilbuis buiten het terrein, op een diepte van ca. 30 m ook een grote concentratie 1,2-DCA aangetroffen. De betreffende peilbuis staat net boven de afdichtende kleilaag. Hierdoor wordt verwacht dat ter plaatse een zinklaag van puur product van 1,2-DCA aanwezig is.

De zinklaag wordt ten oosten van de VOCI-fabriek op een diepte van 20-30 m -NAP verwacht. De met DNAPL verontreinigde zone omvat een vlakte van ca. 8000 m<sup>2</sup>. De zinklaag heeft een dikte van 10 cm in de poriën. De zinklaag verplaatst zich onder invloed van de zwaartekracht in de richting van de dalende kleilaag (oost-noordoost). Tegelijkertijd wordt over de gehele breedte van de DNAPL verontreiniging in het grondwater opgelost en in de richting van de grondwaterstroming (noord-noordoost) verspreid. Beide manieren van verspreiding van de verontreiniging lopen in de richting van het oppervlaktewater. Een beperkte grondverontreiniging met olie en

aromaten concentreert zich in de toplaag. Vanaf een diepte van 3 m –mv zijn geen grondmonsters meer geanalyseerd.

### **Infrastructuur**

De verontreiniging bevindt zich deels onder het industrieterrein (ca. 10 %) en deels onder braakliggend terrein (ca. 90 %). De infrastructuur op het industrieterrein bestaat uit bovengrondse tanks, leidingbruggen, e.d. Ondergronds zijn er funderingen, rioleringen, kabels (electra, telecommunicatie) en leidingen (water) aanwezig. De diepteligging van de kabels en leidingen bedraagt maximaal 3 m –mv. De betonnen funderingen kunnen tot een diepte van 12 tot 15 m –mv aanwezig zijn. Een deel van de verontreinigingen bevindt zich onder een dijk van Rijkswaterstaat, die niet doorboord mag worden voor de aanleg van filters en leidingen.

## Case LNAPL - groot

### Algemeen

Op een bedrijfsterrein heeft tot 1975 een styreenfabriek gestaan. Waarschijnlijk werd hier ook ethylbenzeen geproduceerd. De productie van styreen is in 1975 stopgezet en de fabriek is daarna gesloopt, waarbij de fundering deels is achtergebleven. De bodem en het grondwater zijn ernstig verontreinigd met vluchtige aromatische koolwaterstoffen. Bovenop de verontreiniging is een afsluitende asfaltverharding aangebracht, die nu in gebruik is als parkeerplaats (ca. 70 x 95 m).

In het verleden (vóór 1997) zijn twee pogingen gedaan de verontreiniging te verwijderen of te beheersen. In 1983 is een aantal drains ingegraven in combinatie met de aanleg van een beregeningsinstallatie, teneinde te proberen de verontreiniging uit te spoelen. Hiermee is na verloop van tijd gestopt. Tussen 1989 en 1995 is via drie onttrekkingsputten met behulp van een vacuümwagen vier maal per jaar grondwater onttrokken, teneinde verspreiding tegen te gaan. Om de onttrekkingen te volgen zijn in een grote straal rond de site negen monitoringspeilbuizen geplaatst. In 1995 is hiermee gestopt, omdat de methode nauwelijks effect had op het concentratieverloop van de verontreinigingen.

### (Hydro)geologische opbouw

Het maaiveld ligt op 3 m +NAP. Van ca. 3 m +NAP tot ca. 1 m -NAP bevindt zich een ophooglaag, waarvan maximaal de bovenste 2.5 m zandig is. Van ca. 1 m -NAP tot ca. 20 m -NAP is een deklaag aanwezig (polderklei, veen, slibhoudende zanden). Van ca. 20 m -NAP tot ca. 30 m -NAP bevindt zich het watervoerend pakket, bestaande uit fijne en grove zanden. De grondwaterstromingsrichting in het freatisch grondwater is niet algemeen te bepalen. In het watervoerend pakket is de stroming in NO richting. De horizontale doorlatendheid van de ophooglaag is ca. 1 m/dag. Ter hoogte van de drie onttrekkingsputten is de grondwaterstand 0.6 m-mv. In de directe omgeving van de locatie bevinden zich geen geohydrologische beheerssystemen die kunnen interfereren met een grondwateronttrekking ter hoogte van de parkeerplaats.

### Verontreinigingssituatie

Benzeen, toluen, ethylbenzeen en styreen worden in verscheidene peilbuizen als puur product (*i.e.* concentratie in grondwater > 1% van de wateroplosbaarheid) aangetroffen. Er zijn geen aanwijzingen voor andere dan bovengenoemde verontreinigingen ter plaatse.

### Infrastructuur

Op de locatie is een parkeerterrein aangelegd. Afgezien van de aanwezigheid van het parkeerterrein is de locatie goed toegankelijk. Aangenomen wordt dat de achtergebleven ondergrondse infrastructuur geen belemmering vormt voor de saneringsontwerpen.