

Titel:	ABIS: Adaptief Bodembeheer in Steden		
Auteur:	Ir. H.T. Sman	Instituut:	GeoDelft
Auteur:	J.M.A. Streng	Instituut:	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Auteur:	Dr.Ir. C. Hofstee	Instituut:	TNO NITG
Juni 2003			
Aantal pagina's	:	75 + 8 bijlagen	
Trefwoorden (3-5)	:	stedelijk bodembeheer, ondergrond, grondwater, verontreiniging	
DC-Publicatie-nummer	:	DC1-521-1	
Instituut Publicatie-nummer (optioneel)	:	750201/51	GeoDelft
Rapport Type	:	<input type="checkbox"/>	Tussenrapport
	:	<input checked="" type="checkbox"/>	Eindrapport
DUP-publicatie Type	:	<input checked="" type="checkbox"/>	DUP Standard
	:	<input type="checkbox"/>	DUP-Science

Dankbetuiging

Dit onderzoek is mogelijk gemaakt door bijdragen van Gemeentewerken Rotterdam en subsidie vanuit het ICES-2 programma. Het onderzoek maakt deel uit van het onderzoeksprogramma van Delft Cluster.

Voorwaarden voor het gebruik van deze publicatie

De volledige tekst van dit rapport mag worden (her)gebruikt onder de voorwaarde dat een juiste verwijzing naar deze publicatie wordt opgenomen.

Samenvatting

ABIS (ADAPTIEF BODEMBEHEER IN STEDEN) behelst de ontwikkeling van een methodiek voor bodembeheer met betrekking tot de verspreiding van mobiele verontreinigingen via het grondwater in stedelijk gebied. Een demonstratie van de bruikbaarheid van de methodiek aan de hand van het pilotgebied Rotterdam-Feijenoord maakt deel uit van het project.

Bij Adaptief bodembeheer wordt zowel bij de inrichting als bij het beheer van een gebied rekening gehouden met de omstandigheden zoals die in de bodem aanwezig zijn. Er vindt interactie plaats tussen enerzijds de (beoogde) functies in een bepaald gebied en anderzijds de mogelijkheden en beperkingen die de ondergrond biedt.

In de praktijk blijkt dat de beschikbare bodeminformatie (kennis en data) nog onvoldoende is ontsloten, waardoor de bodeminformatie geen rol speelt bij de besluitvorming op het gebied van de ruimtelijke (her)inrichting van onze leefomgeving.

ABIS is ontwikkeld als een werkwijze om op efficiënte en samenhangende wijze beleidsondersteunende informatie aan te leveren op basis van actuele stand van de aanwezige informatie en kennis. Centraal staat het produceren van 'thematisch kaartmateriaal', dat functioneert als communicatiemiddel en afwegingsinstrument.

PROJECT NAAM:	ABIS: Adaptief Bodembeheer in Steden	PROJECT CODE:	05.02.01
BASISPROJECT:	Actief Bodembeheer	BASISPROJECTCODE:	05.02
THEMA NAAM:	Bodembeheer	THEMA CODE:	05

Uitgebreide samenvatting

ABIS (ADAPTIEF BODEMBEHEER IN STEDEN) behelst de ontwikkeling van een methodiek voor bodembeheer met betrekking tot de verspreiding van mobiele verontreinigingen via het grondwater in stedelijk gebied. Een demonstratie van de bruikbaarheid van de methodiek aan de hand van het pilotgebied Rotterdam maakt deel uit van het project.

Bij de uitwerking van ABIS is onderscheid gemaakt in een twee onderzoeklijnen. De eerste betreft het ontsluiten van de beschikbare bodeminformatie en het ontwikkelen van modellen om de ontwikkeling van de grondwaterkwaliteit te voorspellen. Het ontwikkelen van dit instrumentarium staat centraal in het Delft Cluster project 05.02.01, waarbij de volgende deelprojecten worden onderscheiden:

- I: Branche-Specifieke Brondefinitie;
- II: Systeemanalyse verspreidingspad;
- III: Procesanalyse Reactorvat;
- IV: Generieke Beheer(s)strategie;
- V: Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer.

De tweede onderzoeklijn betreft de inventarisatie van gebruikerswensen vanuit het veld van de Ruimtelijke Ontwikkeling met betrekking tot bodemeigenschappen (en bodemverontreiniging). Dit is uitgewerkt in een afzonderlijk Delft Cluster project "Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer" (DC 05.02.08).

De aanpak binnen ABIS wordt gekenmerkt door de inbreng van verschillende disciplines, die elk hun eigen taal spreken. Dit is ook terug te vinden in de rapportage, waarbij in de hoofdtekst de resultaten van de deelprojecten in afzonderlijke hoofdstukken zijn beschreven. Een belangrijke uitdaging in de uitvoering van dit project is geweest het realiseren van synergie tussen de deelprojecten, hetgeen van invloed is geweest op de voortgang van de deelprojecten. Dit heeft ertoe geleid dat de gewenste kaartbeelden pas in de laatste fase van het project beschikbaar kwamen. Het is nog niet mogelijk gebleken deze resultaten terug te koppelen naar de "potentiële gebruikers", zijnde de geïnterviewde medewerkers in het RO-veld. Een aanbeveling van het project is deze terugkoppeling, mogelijk in de vorm van een workshop later alsnog te doen plaats vinden.

Branche specifiek brondefinitie - DP I

Op basis van de beschikbare bedrijfsinventarisaties is een overzicht samengesteld van locaties, waar uit de aard van de bedrijfsactiviteiten, mogelijk een bodemverontreiniging zou kunnen zijn ontstaan. Op basis van de UBI-systematiek en de NSX-score van de activiteit is onderscheid gemaakt naar potentiële bronlocaties met een bepaalde verwachtingswaarde ten aanzien van het ontstaan van een verontreiniging.

Door gebruik te maken van rapportages van uitgevoerde bodemonderzoeken is voor de twee beschouwde stofgroepen (BTEXN en VOCL) een bronkarakterisatie uitgevoerd. Wanneer van een bronlocatie geen nadere gegevens bekend zijn, dan kunnen op basis van deze karakterisatie voor het Rotterdamse gebied toch een gemiddeld oppervlak en een diepte van voorkomen van de verontreiniging worden toegekend. Hiermee zijn de minimaal benodigde gegevens beschikbaar om een modellering van het verspreidingsrisico te kunnen uitvoeren. Een belangrijk aandachtspunt bij de uitwerking van de methodiek van de brondefinitie betreft het ontstaan van drijf- of zinklagen. Vooral voor de stofgroep VOCL werd verwacht dat door de aanwezigheid van zandpalen een meer dan evenredige verspreiding in de verticaal zou zijn opgetreden. Het blijkt echter dat dit fenomeen bijna "automatisch" wordt meegenomen in het vaststellen van de kentallen voor de gemiddelde bron. In de uitgevoerde pilot kwam echter wel naar voren dat er onvoldoende bedrijfsactiviteit gerelateerde gegevens beschikbaar zijn met betrekking tot bodemverontreiniging om te komen tot een statistisch onderbouwde karakterisatie.

Systeemanalyse verspreidingspad – DP II

Op basis van de systeemanalyse is een grondwatermodel opgesteld voor het pilotgebied Rotterdam-

Feijenoord. Met dit model is de stroming van het grondwater gesimuleerd. Uit deze berekeningen zijn kaartbeelden samengesteld die een duidelijk beeld geven van de mogelijke verspreiding van verontreinigingen opgelost in het grondwater. Het eerste kaartbeeld heeft betrekking op *afstroming* waarbij gekeken wordt naar de uiteindelijke bestemming van het grondwater. Het tweede kaartbeeld betreft *kwel en infiltratie*. Dit kaartbeeld geeft een beeld van de gebieden waar rekening gehouden moet worden met een verspreiding (door infiltratie) van in het grondwater opgeloste verontreiniging en gebieden waar door de lokale omstandigheden (kwel) een eventuele grondwaterverontreiniging beperkt blijft tot een plaatselijk probleem.

Processen en transport in de ondergrond – DP III

De bandbreedte van de in de literatuur aangetroffen afbraaksnelheden is te groot om op basis van de beschikbare milieuomstandigheden nauwkeurige voorspelling te doen voor de actueel in het pilotgebied aan te treffen parameterwaarden.

Op basis van de gemiddelde eigenschappen van de onderscheiden bodemprofieltypen is de snelheid van verspreiding van verontreinigingen via de deklaag naar het eerste watervoerende pakket berekend. Op basis van deze berekeningen is een zonering aangebracht in het pilotgebied voor de drie als karakteristiek beschouwde verontreinigingen.

Op basis van de geïnventariseerde afbraakconstanten en geschematiseerde milieuomstandigheden in de beschouwde bodemprofieltypen is de afbraak van de karakteristieke verontreinigingen in de deklaag berekend. Het blijkt dat onder de heersende omstandigheden PER goed wordt afgebroken, maar dat zowel Benzeen als Vinylchloride slechts in beperkte mate worden omgezet. Op basis van deze berekeningen zijn “grondwaterbelastbaarheidskaarten” samengesteld, die kunnen worden gebruikt voor een zonering van het gebied en een prioritering van de potentieel verontreinigde locaties.

Generieke beheer(s)strategie – DP IV

Het concept van de generieke beheer(s)strategie is nader omschreven en uitgewerkt in de separate rapportage van de deelprojecten IV en V: DC 05.02.08 “Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer”. Als basis voor de strategie-ontwikkeling zijn vanuit de deelprojecten diverse thematische kaartbeelden samengesteld om de autonome ontwikkeling binnen het pilotgebied in beeld te kunnen brengen. Dit betreft onder andere:

- *kaart met afstroming*
- *kaart met herkomst van grondwater in plangebieden*
- *kaart met locaties potentiële brongebieden*

Uit een eerste analyse van de herkomst van mogelijk verontreinigd grondwater in de plangebieden kwam naar voren dat dit water hoofdzakelijk afkomstig is van infiltratie binnen het plangebied zelf. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat de autonome ontwikkeling voor wat betreft de verspreiding van mobiele verontreinigingen via het grondwater voor de plangebieden geen actueel probleem is.

In het licht van bovenstaande conclusie zijn er in het kader van deelproject IV geen aanvullende berekeningen uitgevoerd of kaartbeelden samengesteld van eventuele maatregelenscenario's, daar dit een volledig technische oefening zou worden.

Op basis van de in de deelprojecten II en III samengestelde kaartbeelden voor de reistijd van verontreinigd water door de deklaag, kan al een redelijke schatting worden verkregen van de urgentie van eventuele maatregelen. Daarnaast biedt de spreiding in reistijden de mogelijkheid prioriteiten te stellen binnen de maatregelenscenario's.

Tenslotte geven de kaartbeelden met de “grondwaterbelastbaarheid” een beeld van het zelfreinigend vermogen (Natural Attenuation) van de deklaag. Zoals opgemerkt geeft de kaart voor de afbraak van PER een te positief beeld, daar het gevormde afbraakproduct Vinylchloride (VC) minder goed wordt afgebroken onder de in het pilotgebied aangetroffen milieuomstandigheden. De verspreiding en afbraak van PER resulteert daardoor waarschijnlijk in een verhoogd verspreidingsrisico voor VC.

Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer – DP V

De bodemkwaliteit wordt aangepast aan het gewenste bodemgebruik. In de huidige praktijk wordt uitgegaan van de *maakbare bodem*. Eigenschappen worden aangepast aan de gewenste stedelijke functies en daarmee samenhangende eisen.

De bodem kan mede richtinggevend worden voor de ruimtelijke planvorming, wanneer deze in een breder perspectief wordt benaderd. De bodem moet worden gezien als onderdeel van een lagenbenadering, waarin naast de verkeers- en vervoersnetwerken en de occupatielaag (wonen, werken en recreëren) ook de ondergrond als essentiële laag wordt beschouwd (bodem, water, landschap).

PROJECT NAAM:	ABIS: Adaptief Bodembeheer in Steden	PROJECT CODE:	05.02.01
BASISPROJECT NAAM:	Actief Bodembeheer	BASISPROJECT CODE:	05.02
THEMA NAAM:	Bodembeheer	THEMA CODE:	05

General Appendix: Delft Cluster Research Programme Information

This publication is a result of the Delft Cluster research-program 1999-2002 (ICES-KIS-II), that consists of 7 research themes:

- ▶ Soil and structures, ▶ Risks due to flooding, ▶ Coast and river , ▶ Urban infrastructure,
- ▶ Subsurface management, ▶ Integrated water resources management, ▶ Knowledge management.

This publication is part of:

Research Theme	:	Bodembeheer		
Baseproject name	:	Adaptief Bodembeheer		
Project name	:	ABIS: Adaptief Bodembeheer in Steden		
Projectleader/Institute		Ir. H.T. Sman	GeoDelft	
Project number	:	05.02.01		
Projectduration	:	01-03-2000	-	30-06-2003
Financial sponsor(s)	:	Delft Cluster		
		GeoDelft		
		TNO-NITG		
		Gemeentewerken Rotterdam		
Projectparticipants	:	GeoDelft		
		TNO-NITG		
		Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam		
Total Project-budget	:	€283.000		
Number of involved PhD-students	:	0		
Number of involved PostDocs	:	0		

Delft Cluster is an open knowledge network of five Delft-based institutes for long-term fundamental strategic research focussed on the sustainable development of densely populated delta areas.



Keverling Buismanweg 4
Postbus 69
2600 AB Delft
The Netherlands

Tel: +31-15-269 37 93
Fax: +31-15-269 37 99
info@delftcluster.nl
www.delftcluster.nl

Thema Managementteam: Bodembeheer

Naam	Organisatie
Prof.Dr. E.F.J. de Mulder	TNO NITG
Dr. R.J. Schotting	TU Delft
ir. H.T. Sman	GeoDelft

Projectgroep

Het onderzoeksteam heeft bestaan uit:

Naam	Organisatie
Chris Anbeek	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Jo Janssen	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Petra vd Lugt	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Eric van Nieuwkerk	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Jos Streng	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Jos Verheul	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Guido Ypenburg	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Gerard van Meurs	GeoDelft
Bert Sman	GeoDelft
Cor Hofstee	TNO NITG
Frans Roelofsen	TNO NITG
Johan Valstar	TNO NITG

Overige projectmedewerkers

De realisatie van dit project is mede mogelijk geworden door bijdragen van::

Naam	Organisatie
Joep van Leeuwen	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Anton Roeloffzen	Gemeentewerken Rotterdam; Milieubeleid
Leo van der Walle	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Derk van Ree	GeoDelft

Title:	ABIS: Adaptive Soil Management in Urban Areas		
Author:	Ir. H.T. Sman	Institute:	GeoDelft
Author:	J.M.A. Streng	Institute:	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Author:	Dr.Ir. C. Hofstee	Institute:	TNO NITG
June 2003			
Number of pages	:	75 + 8 appendices	
Keywords (3-5)	:	Urban soil management, subsurface, contaminants, groundwater, chemistry	
DC-Publication-number	:	DC1-521-1	
Institute Publication-number (optional)	:	750201/51c	GeoDelft
Report Type	:	<input type="checkbox"/>	Intermediary report or study
	:	<input checked="" type="checkbox"/>	Final projectreport
DUP-publication Type	:	<input checked="" type="checkbox"/>	DUP Standard
	:	<input type="checkbox"/>	DUP-Science

Acknowledgement

This research has been sponsored by the Municipality of Rotterdam, the Netherlands and the ICES-2 programme. The research is part of the Research programme of Delft Cluster.

Conditions of (re-)use of this publication

The full-text of this report may be re-used under the condition of an acknowledgement and a correct reference to this publication.

Other Research project sponsor(s):



Abstract

ABIS (Adaptive Soil Management in Urban Areas) is developed as a methodology for soil management in Urban Areas. The focus in ABIS is on pollutants that can spread through the groundwater (mobile contaminants). A demonstration of the use of the methodology for the pilot area Rotterdam-Feijenoord is part of the project.

In the methodology of Adaptive Soil Management aspects of both Urban Planning and Soil Management the conditions of the subsoil are incorporated in the process of planning and maintenance. The interaction between the use (function) of a certain area and the conditions of the subsoil are a major issue in the developed methodology.

In practise the enclosure of available subsoil information (knowledge and data) is too limited. As a result information about the subsoil is hardly used in the process of urban planning.

ABIS is developed as a methodology to efficiently generate maps for a decision support facility based on the available information on the subsoil (knowledge and interpreted data). The main focus in the current project was on generating thematic maps, functioning as a means of communication as well as a decision tool.

Within ABIS there are two separate lines of investigation. The first line has a focus on disclosure of the available information on the subsoil and the production of tools to predict the quality of the groundwater. The development of these tools is part of the present Delft Cluster project 05.02.01. Within this project 4 subprojects are defined based on an approach of "Source – Path – Receptor":

- I: Activity related source definition;
- II: System analyses spreading through the groundwater;
- III: Process analyses Natural Attenuation;
- IV: General Maintenance Approach.

The second line of investigation concerns an inventarisation of the needs of endusers in the field of Urban Planning related to the (polluted) subsoil.. This line is developed in a separate Delft Cluster project DC 05.02.08 "Urban Planning and Soil Management".

PROJECT NAME:	ABIS: Adaptive Soil Management	PROJECT CODE:	05.02.01
BASEPROJECT NAME:	Integrated Regional Soil Management	BASEPROJECT CODE:	05.02
THEME NAME:	Subsurface Management	THEME CODE:	05

Executive Summary

ABIS (Adaptive Soil Management in Urban Areas) is developed as a methodology for soil management in Urban Areas. The focus in ABIS is on pollutants that can spread through the groundwater (mobile contaminants). A demonstration of the use of the methodology for the pilot area Rotterdam-Feijenoord is part of the project.

In the methodology of Adaptive Soil Management aspects of both Urban Planning and Soil Management the conditions of the subsoil are incorporated in the process of planning and maintenance. The interaction between the use (function) of a certain area and the conditions of the subsoil are a major issue in the developed methodology.

In practise the enclosure of available subsoil information (knowledge and data) is too limited. As a result information about the subsoil is hardly used in the process of urban planning.

ABIS is developed as a methodology to efficiently generate maps for a decision support facility based on the available information on the subsoil (knowledge and interpreted data). The main focus in the current project was on generating thematic maps, functioning as a means of communication as well as a decision tool.

Within ABIS there are two separate lines of investigation. The first line has a focus on disclosure of the available information (knowledge and data) on the subsoil and the production of tools to predict the quality of the groundwater. The development of these tools is part of the present Delft Cluster project 05.02.01. Within this project 4 subprojects are defined based on an approach of "Source – Path – Receptor":

- I: Activity related source definition;
- II: System analyses spreading through the groundwater;
- III: Process analyses Natural Attenuation;
- IV: General Maintenance Approach.
- V. Urban Planning and Soil Management

The second line of investigation concerns an inventarisation of the needs of endusers in the field of Urban Planning related to the (polluted) subsoil.. This line is developed in a separate Delft Cluster project DC 05.02.08 "Urban Planning and Soil Management".

In ABIS a great number of specialists and generalists have been working together to realise the final product. Every specialist is familiar with his own field of investigations and has his own technical language. This is still recognisable in the report. Every subproject has its own subreport (as appendix) and every subproject is covered in a separate chapter in the main text. One of the main problems in the project was the interaction between the subprojects, which have had adverse effects on the progress of the project as a whole. As a result the required thematic maps were only available at the end of the project, with no opportunity left to verify these results with the potential users of the product. One of the suggestions of this project is to organise a workshop to present the results for the persons interviewed as part of the stakeholder analysis.

Activity related source definition - DP I

Based on the available inventories of commercial activities an overall picture has been created of locations where due to the nature of activities a soil contamination could have taken place. Based on the UBI-and NSX-score of activities a differential in potential locations with a higher risk of contamination has been made.

Using available reports of sites already investigated for a soil and groundwater contamination for the contaminants (BTEXN en VOCL) a characterization of an average source of contamination has been defined. If there is no data available for a potential contaminated location, these average source parameters can be used in the risk analysis. A major question in the definition of an average source was the influence of DNAPL and the presence of nondissolved contaminants. Looking at the defined average source parameters, the influence of DNAPL has more or less automatically been taken into account. This due to the results of the investigated sites. One of the results from the pilot is that there is insufficient data to produce a statistically solid characterization.

System analysis spreading through the groundwater – DP II

Based on the system analysis a groundwater model has been created for the pilot area Rotterdam-Feijenoord. This model has been used to simulate the flow of groundwater in Feijenoord. The model results have been used to create thematic maps, giving a clear view of the potential spreading of contaminants through the groundwater. The first map shows the *destination* of the infiltrating water. The second map shows *seepage and infiltration*. This map shows the areas where there is a potential risk of spreading due to infiltration.

Process analysis Natural Attenuation – DP III

The range in parameters produced by a literature search is actually too wide to be able to give an accurate prediction of decay constants for the pilot area.

Using average soil parameters, differentiated for the actual soil profiles, the velocity of the spread of potential contaminants has been modelled. Based on these results thematic maps of “travel time” for the covering layer has been produced.

Using average constants for the decay of the studied contaminants and environmental conditions calculated for the soil profiles, the decay of contaminants during the transport in the covering layer has been modelled. Based on these results “soil immersion maps” have been created. From these maps it can be seen that under the actual environmental conditions the decay of Tetrachloroethylene is sufficient to prevent this contaminant from reaching the first water-bearing layer. Under the same conditions the decay of Benzene and Vinylchloride is very limited. In certain areas more than 80% of the initial concentration will infiltrate into the first water bearing layer.

General Maintenance Approach – DP IV

The concept for this approach is reported as part of Delft Cluster project DC 05.02.08. To facilitate the development of a general approach several thematic maps of the pilot area have been produced, including:

- *map with the destination of the infiltrating water*
- *map with the origin of the water in the areas of urban development*
- *maps with locations of potentially contaminated locations.*

from a first analysis of the origin of the water in the urban (re)development areas it is concluded that this water infiltrates only locally.

As a consequence of the mentioned conclusion no additional calculations have been performed for the urban development areas.

Based on the maps produced in the subprojects II and III for travel times in the covering layer, a reasonable estimate of the need of intervention can be produced. The differential in travel times will also allow setting priorities in intervention measures.

Finally the maps of “soil immersion” gives an indicative picture of the Natural Attenuation of the covering layer. As mentioned before the map for Tetrachloroethylene is too positive, as it does not take into account the production of Vinylchloride as a decay product. Vinylchloride (VC) is much more persistent under the actual environmental conditions in the pilot area.

Urban Planning and Soil Management – DP V

From the stakeholder analysis it's clear that the soil quality is modified to meet the characteristics necessary for the required urban functionality. The required soil is actually made.

In future plans the sub soil can be one of the directing issues for urban planning if it's considered at the same level as part of a layered approach. In this approach infrastructural networks, the occupation layer (commercial activities, housing, recreation) and also the sub soil (soil, groundwater, and nature) have there own impact. This future opportunity can only be realised if the information (knowledge and data) about the subsoil is easily available in visual appealing format.

PROJECT NAME:	ABIS: Adaptive Soil Management	PROJECT CODE:	05.02.01
BASISPROJECT NAME:	Integrated Regional Soil Management	BASISPROJECT CODE:	05.02
THEME NAME:	Subsurface Management	THEME CODE:	05

General Appendix: Delft Cluster Research Programme Information

This publication is a result of the Delft Cluster research-program 1999-2002 (ICES-KIS-II), that consists of 7 research themes:

- ▶ Soil and structures, ▶ Risks due to flooding, ▶ Coast and river , ▶ Urban infrastructure,
- ▶ Subsurface management, ▶ Integrated water resources management, ▶ Knowledge management.

This publication is part of:

Research Theme	:	Subsurface Management		
Baseproject name	:	Integrated Regional Soil Management		
Project name	:	ABIS: Adaptive Soil Management in Urban Areas		
Projectleader/Institute		Ir. H.T. Sman	GeoDelft	
Project number	:	05.02.01		
Projectduration	:	01-03-2000	-	30-06-2003
Financial sponsor(s)	:	Delft Cluster		
		GeoDelft		
		TNO-NITG		
		Gemeentewerken Rotterdam		
Projectparticipants	:	GeoDelft		
		TNO-NITG		
		Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam		
Total Project-budget	:	€283.000		
Number of involved PhD-students	:	0		
Number of involved PostDocs	:	0		

Delft Cluster is an open knowledge network of five Delft-based institutes for long-term fundamental strategic research focussed on the sustainable development of densely populated delta areas.



Keverling Buismanweg 4
Postbus 69
2600 AB Delft
The Netherlands

Tel: +31-15-269 37 93
Fax: +31-15-269 37 99
info@delftcluster.nl
www.delftcluster.nl

Theme Managementteam: Subsurface Management

Name	Organisation
Prof.Dr. E.F.J. de Mulder	TNO NITG
Dr. R.J. Schotting	TU Delft
ir. H.T. Sman	GeoDelft

Projectgroup

During the execution of the project the researchteam included:

Name	Organisation
Chris Anbeek	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Jo Janssen	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Petra vd Lugt	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Eric van Nieuwkerk	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Jos Streng	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Jos Verheul	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Guido Ypenburg	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Gerard van Meurs	GeoDelft
Bert Sman	GeoDelft
Cor Hofstee	TNO NITG
Frans Roelofsen	TNO NITG
Johan Valstar	TNO NITG

Other Involved personnel

The realisation of this report involved:

Name	Organisation
Joep van Leeuwen	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Anton Roeloffzen	Gemeentewerken Rotterdam; Milieubeleid
Leo van der Walle	Gemeentewerken Rotterdam; Ingenieursbureau
Derk van Ree	GeoDelft

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Algemeen	1
1.2	Projectstructuur	1
1.3	Interactie met andere projecten	2
2	Conceptueel model	5
2.1	Aanleiding	5
2.2	Bron – Pad - Receptor	5
2.3	Studiegebied en Pilotgebied Feijenoord	5
3	Branche specifieke brondefinitie DP - I	7
3.1	Inleiding	7
3.2	Werkwijze	7
3.3	Kaartbeelden brondefinitie	9
3.4	Evaluatie deelproject I	10
4	Systeemanalyse verspreidingspad DP - II	13
4.1	Inleiding	13
4.2	Regionale grondwaterstroming	13
4.2.1	Hydrogeologie	14
4.2.2	Zoet / zout grensvlak	14
4.3	Grondwaterstroming Pilotgebied	14
4.3.1	Modelgebied en netwerk	15
4.3.2	Geohydrologische lagen en randvoorwaarden	15
4.3.3	Kalibratie en gevoeligheidsanalyse	17
4.4	Kaartbeelden grondwaterstroming	18
4.4.1	Afstroming (bijlage II; figuur 4.1)	18
4.4.2	Kwel en infiltratie (bijlage II; figuur 4.2)	19
4.4.3	Invloed grootschalige bemaling (bijlage II; figuur 4.1)	19
4.5	Evaluatie deelproject II	19
4.5.1	Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	20
5	Processen en Transport in de ondergrond - DP III	21
5.1	Inleiding	21
5.2	Hypothese redoxcondities	21
5.3	NA-potentie	23
5.4	Samenvatting modelparameters	25
5.5	Transportmodellering	26
5.6	Evaluatie deelproject III	28
6	Generieke Beheer(s)strategie – DP IV	29
7	Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer DP V	31
8	Conclusies en Aanbevelingen	33
8.1	Evaluatie	33
8.2	Conclusies	33
8.3	Aanbevelingen	35
9	Referenties	37
10	Verklarende woordenlijst	39

Bijlagen

- Bijlage 1 Topografische kaart regio Rotterdam
- Bijlage 2 Topografische kaart Feijenoord en Pilotgebied
- Bijlage I: ·Rapportage deelproject I
- Bijlage I.1: ·Samenvatting geïnventariseerde dossiers
- Bijlage I.2: ·Kaartbeelden overzicht brongebieden
- Bijlage II: ·Rapportage deelproject II
- Bijlage II.1: ·Pilotgebied deelgemeente Feijenoord
- Bijlage II.2: ·Zoet/zout grensvlak
- Bijlage II.3: ·Overzicht grondwatermodel Feijenoord
- Bijlage II.4: ·Bodemprofieltypes ingedeeld als geohydrologische eenheden
- Bijlage II.5: ·Beschrijving stromingssituatie bij de havens
- Bijlage II.6: ·Kalibratieresultaten grondwatermodel
- Bijlage II.7: ·Maaiveldhoogtes pilotgebied
- Bijlage II.8: ·Theorie stroombaananalyse
- Bijlage III: ·Rapportage deelproject III
- Bijlage III.1: ·Bodemkarakterisatie
- Bijlage III.2: ·Chemische en biologische afbraakreacties
- Bijlage III.3: ·Modellering biologische afbraak
- Bijlage III.4: ·Gebruikte parameters in stoftransportmodel
- Bijlage III.5: ·Lokaties gemeten peilbuizen BDO

1 Inleiding

1.1 Algemeen

ABIS is een acroniem voor **Adaptief Bodembeheer In Steden**. Het is een project in het kader van het Delft Cluster Onderzoeksprogramma, thema Bodembeheer. Het wordt uitgevoerd door een consortium bestaande uit het Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam, GeoDelft en TNO-NITG. GeoDelft treedt op als penvoerder.

Doelstelling

Het ontwikkelen van hulpmiddelen om de doelmatigheid van ingrepen in de ondergrond (scenario's) te toetsen ten opzichte van de autonome ontwikkeling van verspreiding van mobiele verontreiniging via het grondwater. De te beschouwen scenario's betreffen zowel die in het kader van bodembeheer als die in het kader van ruimtelijke inrichtingsplannen. De toepassing vindt plaats op het niveau van een beheersgebied: een wijk, een stadsdeel, of zelfs de gehele stad. ABIS moet gezien worden als een gereedschapskist gevuld met technieken, modellen en strategieën voornamelijk gericht op het beheer van de kwaliteit van het stedelijke grondwater.

Probleemstelling

Adaptief bodembeheer wil houdt in dat bij het beheer van bodem en grondwater rekening wordt gehouden met de dynamiek in:

- Maatschappelijke randvoorwaarden gesteld aan bodembeheer (beschikbaar budget, gestelde milieunormen);
- Het gebruik van het te beheren object (activiteiten in verleden, heden en toekomst die van invloed zijn op de kwaliteit van bodem en grondwater in het beschouwde gebied);
- Kennis van het object (informatie van de bodem en grondwater en de processen die in de bodem plaatsvinden)
- De wijze waarop deze factoren elkaar beïnvloeden.

In de praktijk blijkt dat de beschikbare bodeminformatie (kennis en data) veelal niet goed is ontsloten, waardoor hier onvoldoende gebruik gemaakt kan worden ten behoeve van de besluitvorming op het gebied van de ruimtelijke inrichting van onze leefomgeving.

ABIS wordt ontwikkeld als een werkwijze om op efficiënte en samenhangende wijze beleids-ondersteunende informatie aan te leveren op basis van actuele stand van de aanwezige informatie en kennis. Centraal in het ambitieniveau staat het realiseren van 'kaartmateriaal', dat bij uitstek kan functioneren als communicatiemiddel en afwegingsinstrument. Essentieel hierbij is dat niet alleen de noodzakelijke informatie en kennis wordt geïdentificeerd, maar ook de gebruiks- dan wel besliscriteria die aangeven bij welke functie bodeminformatie prioriterend dan wel limiterend is.

1.2 Projectstructuur

Bij de uitwerking van ABIS is onderscheid gemaakt in een tweetal onderzoekslijnen. De eerste lijn heeft betrekking op het ontsluiten van de beschikbare bodeminformatie en het ontwikkelen van modellen om de ontwikkeling van de grondwaterkwaliteit in de (diepere) bodem te voorspellen. Het ontwikkelen van dit instrumentarium staat centraal in onderhavig Delft Cluster project 05.02.01. Binnen dit project worden 4 deelprojecten onderscheiden, min of meer conform de systematiek van "Bron – Pad – Receptor". Het betreft de deelprojecten:

- I. Branche-Specifieke Brondefinitie;
- II. Systeemanalyse verspreidingspad;
- III. Procesanalyse Reactorvat;
- IV. Generieke Beheer(s)strategie.

De tweede onderzoekslijn betreft de inventarisatie van gebruikerswensen vanuit het veld van de Ruimtelijke Ontwikkeling met betrekking tot kennis van en informatie over bodemeigenschappen (en bodemverontreiniging). Deze lijn is nader uitgewerkt in een afzonderlijk Delft Cluster project DC 05.02.08 "Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer". Hierbij wordt opgemerkt dat er in de uitvoering van beide projecten een samengaan is ontstaan tussen het RO – project en deelproject IV met betrekking tot de Beheer(s)strategie.

1.3 Interactie met andere projecten

DC 05.02.08 Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer

In dit Delft Cluster project is een inventarisatie uitgevoerd van gebruikerswensen vanuit het veld van de Ruimtelijke Ontwikkeling met betrekking tot het ontsluiten van gegevens over bodemeigenschappen (en bodemverontreiniging). De bevindingen uit dit project zijn richtinggevend geweest voor de in ABIS te ontwikkelen kaartbeelden.

DC 05.02.03 Semi automatische interpretatie van sonderingen

In dit Delft Cluster project is gewerkt aan de ontwikkeling van een semi-automatische methode voor de interpretatie van sonderingen. In het kader van het ABIS project kan een dergelijke methode een bijdrage leveren aan het beter en sneller genereren van een schematisatie van de ondergrond. Momenteel wordt voor de schematisatie van de ondergrond gebruik gemaakt van een beperkte hoeveelheid boringen. Wanneer deze schematisatie kan worden aangevuld met het veel grotere aantal sonderingen, dan kan een beter en gedetailleerder ondergrondmodel worden verkregen. De inmiddels ontwikkelde techniek is vooralsnog niet gebruikt in ABIS.

DC 05.02.05 Demonstratie Innovatieve Bodemonderzoekstechnieken

In dit gecombineerde Delft Cluster / SKB project zijn innovatieve bodemonderzoekstechnieken gedemonstreerd op een tweetal pilotlocaties. In de pilots is veel aandacht besteed aan in situ of on site meettechnieken, al of niet gecombineerd met wegdrubbare technieken. Op basis van de resultaten van deze pilots is besloten om in het kader van het project "Beeld Diepe Ondergrond" (BDO) bij een aantal bepalingen van de kwaliteit van het Rotterdamse grondwater gebruik te maken van innovatieve technieken. De resultaten van deze metingen zijn in ABIS gebruikt om de hypothesen met betrekking tot de redoxomstandigheden te toetsen.

DC 05.02.04 Macrosense

In dit gecombineerde Delft Cluster / SKB project is een methodiek ontwikkeld om met behulp van sensoren on site de macrochemie van het grondwater te bepalen. Dit project kan gezien worden als een specifieke ontwikkeling van een innovatieve bodemonderzoekstechniek. De inzet van deze techniek ten behoeve van ABIS is eveneens beschouwd in het project BDO.

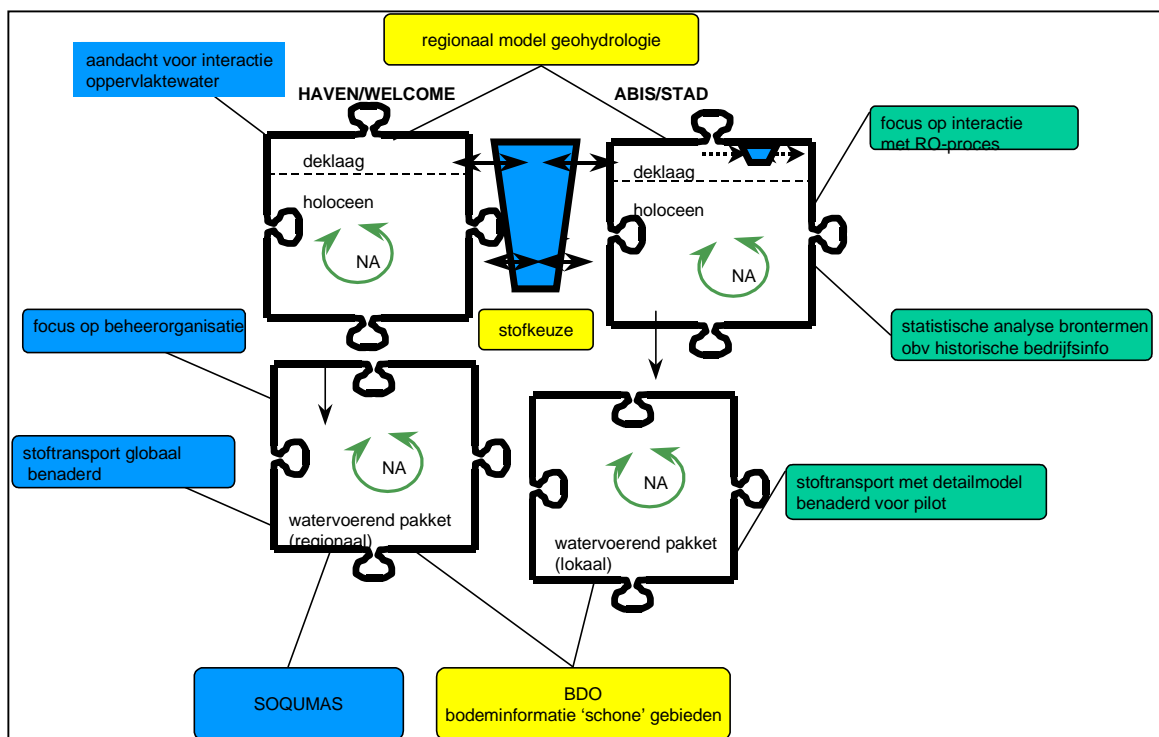
Beeld Diepe Ondergrond (BDO)

Het project BDO is door Gemeentewerken Rotterdam uitgevoerd ten behoeve van de verificatie van de in de projecten ABIS en Welcome gehanteerde hypothesen over de (bio)geochemische omstandigheden in de diepere ondergrond van de regio Rotterdam (1^e Watervoerende pakket).

De doelstelling van BDO is het uitvoeren van een meetcampagne gericht op het verkrijgen van een regionaal beeld van de natuurlijke grondwaterkwaliteit in de regio Rotterdam. De nadruk ligt daarbij op het nemen van grondwatermonsters van onverdachte locaties, hoofdzakelijk afkomstig uit het eerste watervoerende pakket. Voor het onderzoek is hoofdzakelijk gebruik gemaakt van bestaande peilfilters. Voor enkele locaties is gebruik gemaakt van innovatieve (wegdrukbaar) bodemonderzoekstechnieken en macrosense. De resultaten zijn gebruikt ter verificatie van de in ABIS gehanteerde hypothesen met betrekking tot de redoxcondities in de bodem en de daaraan gerelateerde potentie voor afbraak van verontreinigingen.

Welcome / SV600

Het mede door SKB ondersteunde project Welcome / SV600 betreft een project uit het uitgevoerd in het kader van het Europese 5e kaderprogramma. Doelstelling van het project is het ontwikkelen van een managementstrategie voor (verontreinigde) megasites. De Nederlandse bijdrage aan dit Europese project bestaat uit het ontwikkelen van een managementstrategie voor de Rotterdamse Haven. Wat betreft methodiekontwikkeling en instrumentarium sluiten de projecten ABIS en Welcome goed op elkaar aan. Als basis is voor beide projecten gebruik gemaakt van het voor groot Rotterdam ontwikkelde regionale grondwaterstromingsmodel. Daarnaast zijn de hypothesen met betrekking tot de redoxcondities in de beide projecten geverifieerd op basis van de resultaten van het parallel uitgevoerde BDO-project. Voor overleg en afstemming tussen genoemde projecten is een gezamenlijke stuurgroep in het leven geroepen, waarin alle partijen en eindgebruikers van genoemde projecten vertegenwoordigd waren.



Figuur 1.1: schematische weergave interactie ABIS – Welcome met andere projecten

2 Conceptueel model

2.1 Aanleiding

Het verleden van Rotterdam wordt gekenmerkt door een hoge mate van bedrijvigheid. Er zijn vele bedrijfjes gestart, er hebben diverse bedrijfsverhuizingen plaatsgehad en een niet onaanzienlijk deel van deze bedrijven heeft na verloop van tijd de poorten gesloten. Vanuit de aard van de bedrijfsactiviteiten is voor een relatief groot aantal locaties aan te geven dat er sprake geweest zou kunnen zijn van incidenten met een bodemverontreiniging als gevolg. In een eerder uitgevoerd bijzonder inventariserend onderzoek zijn 50.000 potentieel verontreinigde locaties geïdentificeerd.

2.2 Bron – Pad - Receptor

Om een uitspraak te kunnen doen over de ernst, de urgentie of de prioriteit van de vele potentieel verontreinigde locaties is in ABIS gewerkt volgens de systematiek van “Bron – Pad Receptor”. Onderdelen van deze systematiek zijn uitgewerkt in de diverse deelprojecten. De brondefinitie is uitgewerkt in deelproject I. Het pad, is geanalyseerd in de deelprojecten II en III. Vervolgens zijn in deelproject IV mogelijke maatregelenscenario's beschouwd indien er sprake zou zijn van een risico voor de beschouwde receptoren. De systematiek van “Bron – Pad Receptor” vormt een essentieel onderdeel van de “cyclus” van adaptief bodembeheer, zoals schematisch weergegeven in figuur 2.1.

2.3 Studiegebied en Pilotgebied Feijenoord

De doelstelling van het project ABIS is het ontwikkelen van een methodiek voor Adaptief Bodembeheer in Steden. Rotterdam was uitgekozen als het studiegebied voor de ontwikkeling van deze methodiek. In de beginfase van het project is onderkend dat voor de ontwikkeling van het numerieke instrumentarium dit een te groot gebied zou zijn. Met het oog hierop is een pilotgebied gekozen voor de instrumentontwikkeling, waarbij echter wel de meeste karakteristieken van het stedelijke gebied aanwezig zouden zijn. Uiteindelijk is de keuze gevallen op de deelgemeente Feijenoord.

Pilotgebied Feijenoord

RO Kenmerken

De stadsuitbreidingslokatie Feijenoord en het complex Binnenhaven-Spoorweghaven is eind negentiende eeuw aangelegd in het toenmalige poldergebied.

In de periode van de sociale stadsvernieuwing (1975-1992) veranderde Feijenoord van een havengerelateerde volksbuurt in een multiculturele stadswijk. Veel voormalige bedrijfsterreinen en havenkades hebben een woonbestemming gekregen.

In de jaren negentig komen nog meer bedrijfsterreinen en havenkades beschikbaar, die in het kader van de stedelijke vernieuwing met publiek-private middelen worden ontwikkeld. Het sleutelproject Kop van Zuid wordt een mengeling van wonen, werken en cultuur, met relatief veel aandacht voor ruimtelijke kwaliteit en milieukwaliteit. De nu in ontwikkeling zijnde plannen voor Parkstad en een derde stadsbrug borduren daar op voort. Een uitgebreider omschrijving van de ontwikkeling in het plangebied is opgenomen in de rapportage “Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer” [DC1-528-1].

Bodemkenmerken.

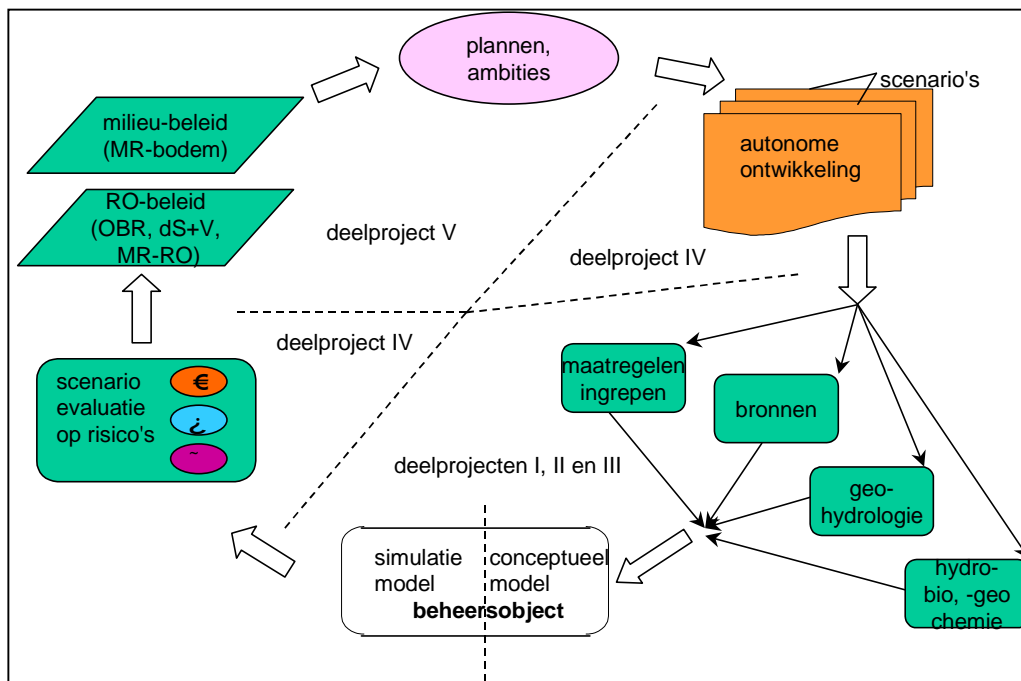
Er is sprake van een antropogeen beïnvloede laag, met name grootschalige ophogingen en dempingen komen voor. Daaronder holoceen deklaag (15 à 20 m) bestaande uit klei- en veenlagen, met tussenzandlagen in verband met de aanwezigheid van de rivier. Vanaf circa 15-20 m-mv worden Pleistocene zanden aangetroffen (eerste watervoerende pakket).

Geohydrologische kenmerken.

Er is relatief veel open water in de vorm van insteekhavens vanuit de Nieuwe Maas. De oeverzones langs de Nieuwe Maas zijn in het verleden opgehoogd ten behoeve van de aanleg van havengerelateerde bedrijventerreinen. Deze zone fungeert als infiltratiezone. De woonwijken ten zuiden daarvan bevinden zich in het kwelgebied.

Bodemverontreiniging.

Er is grootschalige bedrijvigheid langs de Nieuwe Maas (scheepswerven en metaalbedrijven, een gasfabriek), die forse verontreinigingen hebben veroorzaakt. Op enkele plaatsen is de verontreinigingen ook aangetroffen in het eerste watervoerend pakket.



Figuur 2.1: plaats van de deelprojecten in het concept “Adaptief Bodembeheer In Steden”

3 Branche specifieke brondefinitie DP - I

3.1 Inleiding

Veel bedrijfsactiviteiten hebben een risico in zich dat de bodem verontreinigd raakt. Het daadwerkelijk optreden van een verontreiniging is mede afhankelijk van de aard van de bedrijfsactiviteiten, de periode dat productie heeft plaatsgevonden en de omvang van deze productie. Zo zal enerzijds het toegenomen milieubewustzijn, vastgelegd in stringenter wet- en regelgeving, hebben geresulteerd in een verkleining van de kans. Anderzijds zal schaalvergroting hebben geresulteerd in een toename van het risico.

Deelproject I heeft tot doel informatie over potentiële bronnen van mobiele verontreinigingen te ontsluiten, analyseren en te schematiseren. De rapportage van deelproject I is integraal opgenomen in bijlage I. Het eindresultaat van deelproject I is een kaart met potentiële bronlocaties en een index die een maat is voor het verspreidingsrisico.

3.2 Werkwijze

Uitgangspunt voor de methodiek is de beschikbaarheid van een overzicht van bedrijfsactiviteiten die tot op heden in het pilotgebied Feijenoord hebben plaatsgevonden. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van de resultaten van in het verleden uitgevoerde bodemonderzoeken om de relatie tussen de kans op bodemverontreiniging vanuit de bedrijfsactiviteit te toetsen aan de actuele bodemkwaliteit op basis van uitgevoerd onderzoek. Deze verificatie heeft plaats gevonden op basis van de beschikbare rapportages voor de gehele regio Rotterdam, en niet alleen het pilotgebied Feijenoord.

In figuur 3.1 is schematisch de werkwijze weergegeven waarmee in deelproject I wordt gekomen tot een brondefinitie. In de huidige pilot is de methodiek ontwikkeld voor het beheren van risico's die samenhangen met verontreinigingen die zich kunnen verspreiden met het grondwater (mobiele verontreinigingen). Als maatgevende stofgroepen zijn de aromatische (BTEXN¹) en de vluchtige gechlloreerde koolwaterstoffen (VOCI²) beschouwd.

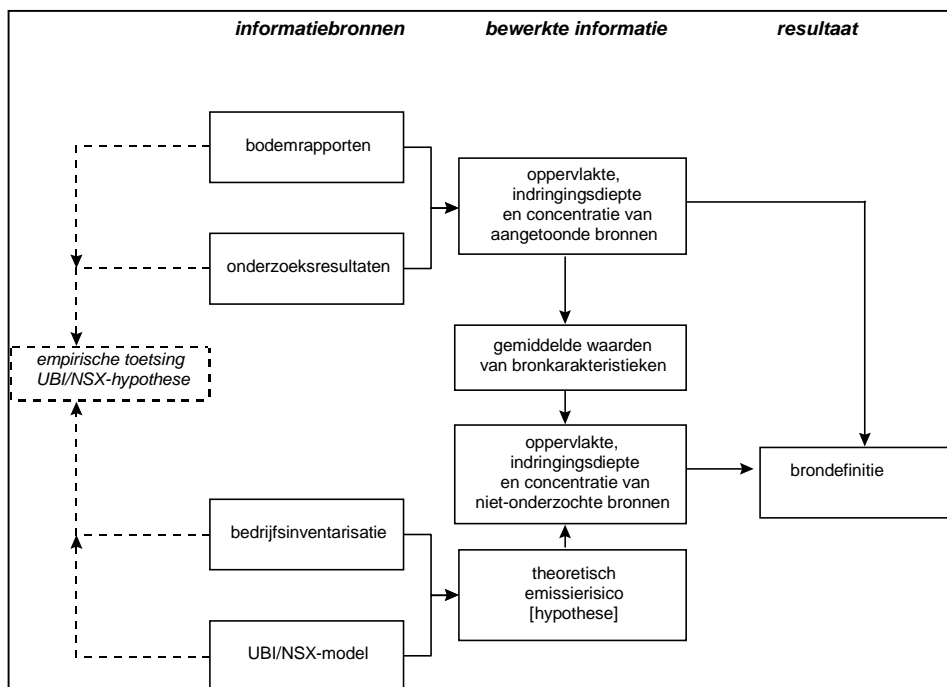
Analyse beschikbare bodemonderzoeksgegevens

Zowel ten behoeve van het bouwrijp maken van locaties als in het kader van de wet bodembescherming (Wbb) zijn een groot aantal bodemonderzoeken en een aantal saneringen uitgevoerd. Voor het studiegebied zijn de resultaten van deze bodemonderzoeken grotendeels opgenomen in het **Rotterdams BodemInformatieSysteem (ROBIS)**.

Met behulp van het bodeminformatiesysteem is een selectie gemaakt van monsters die zijn geanalyseerd op stoffen uit de beschouwde stofgroepen BTEXN en VOCI. Dit betreft zowel grond- als grondwateranalyses. De resultaten van deze selectie zijn per stofgroep samengevat waarbij per dossier is aangegeven of er sprake is van een normoverschrijding. Hierbij is onderscheid gemaakt in grond, grondwater en grond en grondwater. Met betrekking tot de normoverschrijding is een indeling gemaakt naar groter dan streefwaarde (>S), groter dan tussenwaarde (>T) en groter dan interventiewaarde (>I).

¹ Dit betreft Benzeen, Tolueen, Ethylbenzeen, Xyleen en de polycyclische aromatische koolwaterstof Naftaleen.

² Dit betreft Tetrachlooretheen (per), Trichlooretheen (tri), Dichlooretheen (cis en trans) en Vinylchloride (vc).



Figuur 3.1 : werkwijze brondefinitie DP I

Op basis van de onderverdeling van de dossiers komt naar voren dat in een relatief beperkt aantal dossiers (5 à 10%) in de bodem een concentratie is gemeten die de interventiewaarde overschrijdt. Voor alleen grondwater wordt in 3 à 5% van de dossiers een overschrijding van de interventiewaarde aangetroffen.

Analyse geïnventariseerde bedrijfsactiviteiten

Ten behoeve van de ontwikkeling van beheerstrategieën zijn selecties gemaakt uit de geïnventariseerde bedrijfsactiviteiten. De eerste selectie betreft alle (voormalige) bedrijven waar op basis van de gegevens in de UBI systematiek gebruik is gemaakt van een of meer van de stoffen uit de beschouwde stofgroep. Deze selectie is zowel voor BTEXN als voor VOCl gemaakt. Vervolgens is binnen deze selecties onderscheid gemaakt naar activiteiten die een verhoogde kans hebben op het ontstaan van een bodemverontreiniging (criterium: $G > 750$ uit UBI model).

Definitie representatieve bronomvang

Uit de bestudeerde onderzoeksrapporten voor de gehele regio Rotterdam zijn per beschouwde stofgroep karakteristieken voor de brondefinitie bepaald. Hierbij is per te onderscheiden activiteit gekeken naar de maximale diepte en het volume verontreinigde bodem dat is gerapporteerd.

Op grond van deze gegevens is gekozen om voor de regio Rotterdam de als representatieve BTEXN-bron te definiëren: een volume van 2000 m^3 , een oppervlakte van 400 m^2 en een gemiddelde diepte van 5 m.

Voor VOCl is de karakteristieke bron te definiëren als: een volume van 1000 m^3 , een oppervlakte van 100 m^2 en een gemiddelde diepte van 10 m.

Betrouwbaarheid en beperkingen

De hier geschetste methode kan worden gebruikt om in het kader van bodembeheer te komen tot een zonering en prioritering van (potentiële) bronlocaties ten behoeve van het faseren van bodemonderzoek of het prioriteren van maatregelen. De betrouwbaarheid van het kaartmateriaal kan worden vergroot naarmate er meer gegevens over de actuele verontreinigings-situatie beschikbaar zijn. Enerzijds doordat deze gegevens direct worden verwerkt bij de samenstelling van de kaarten, anderzijds kunnen deze gegevens worden gebruikt voor een betere kwantificering van de NSX-score.

In de momenteel gevolgde werkwijze is geen rekening gehouden met de periode waarin een bepaalde activiteit heeft plaatsgevonden. Aan de potentiële bronlocaties is dan ook geen ouderdom als kental toegekend.

Een belangrijk aandachtspunt bij de uitwerking van de methodiek van de brondefinitie betreft het ontstaan van drijf- of zinklagen. Dit zijn lagen van puur product, die mede als gevolg van het voorkomen van verstoringen in de bodem aanleiding kunnen zijn voor een sneller dan verwachte verspreiding van verontreinigingen. Vooral voor de stofgroep VOCL werd verwacht dat door de aanwezigheid van zandpalen en zandgeulen een meer dan evenredige verspreiding in de verticaal zou optreden. Dit vermoeden wordt bevestigd op basis van de uit de bodemonderzoekrapportages afgeleide bronkarakteristieken. Zo wordt voor de diepte van BTEXN een waarde bepaald van 5 m-mv, terwijl dit voor VOCL 10 m-mv is. Daarnaast kent de onbekende BTEXN verontreiniging een oppervlak van 400 m², terwijl dit voor VOCL juist beperkt is tot 100 m². Hieruit valt af te leiden dat de vorming van lagen van puur product mede van invloed is geweest op de bepaling van de kentallen. Opgemerkt moet worden dat vanuit het risico van verspreiding naar het diepere grondwater, de aanwezigheid van VOCL als puur product in combinatie met een eventuele verstoring van de slecht doorlatende lagen in de deklaag dit type verontreiniging in de hoogste risicoklasse doet belanden.

3.3 Kaartbeelden brondefinitie

Met betrekking tot verdachte locaties [potentiële bronnen] zijn ten behoeve van de te ontwikkelen managementstrategie per stofgroep drie kaartbeelden samengesteld:

1. Bekende brongebieden [= door onderzoek aangetoond]
2. Bekende + *alle* potentiële brongebieden (worst case);
3. Bekende + *selectie* van potentiële brongebieden. Selectie gebaseerd op een grotere kans van een emissie naar bodem en grondwater ($G > 750$ uit UBI-model)

BTEXN

In figuur I-3.1 zijn de in het pilotgebied Feijenoord bekende bronlocaties voor de stofgroep BTEXN weergegeven. Wat opvalt, is dat voor een aantal bekende bronnen de diepte waarop de verontreiniging wordt aangetroffen significant groter is dan de gemiddelde waarde die wordt gebruikt voor niet onderzochte locaties (5 m-mv). In het noordoostelijk deel van Feijenoord wordt de verontreiniging zelfs gemeten op een diepte van 40 m-mv. Daarnaast wordt op enkele (grotere) locaties de verontreiniging aangetroffen op 10 m-mv. In figuur I-3.2 zijn naast de bekende bronlocaties ook de potentiële bronlocaties met een grotere kans van het ontstaan van een bodemverontreiniging weergegeven. Voor deze laatste locaties zijn de gegevens voor de karakteristieke bron gebruikt (diepte 5 m-mv, oppervlak 400 m²).

In figuur I-3.3 tenslotte zijn naast alle bekende locaties ook alle locaties weergegeven waarbij op basis van de UBI systematiek verwacht mag worden dat er BTEXN is gebruikt. Alle potentiële bronnen zijn wederom weergegeven op basis van de gegevens van de karakteristieke bron.

VOCI

In figuur I-3.4 zijn de bekende bronlocaties in het pilotgebied Feijenoord voor de stofgroep VOCI weergegeven. Wat opvalt, is dat de twee bekende VOCI-locaties ook bekend zijn als brongebieden voor de stofgroep BTEXN. Bij de bron in het noordoostelijk deel van Feijenoord wordt de verontreiniging op zeer grote diepte gemeten (40 m-mv).

In figuur I-3.5 zijn naast de bekende bronlocaties ook de locaties met een grotere kans op bodemverontreiniging weergegeven. Voor deze laatste locaties zijn de gegevens voor de karakteristieke bron gebruikt (diepte 10 m-mv, oppervlak 100 m²).

In figuur I-3.6 tenslotte zijn naast alle bekende locaties ook alle locaties weergegeven waarbij op basis van de UBI systematiek verwacht mag worden dat er VOCI is gebruikt. Alle potentiële bronnen zijn wederom weergegeven op basis van de gegevens van de karakteristieke bron.

3.4 Evaluatie deelproject I

Conclusies

1. Op basis van de beschikbare bedrijfsinventarisaties is een overzicht samengesteld van locaties, waar uit de aard van de bedrijfsactiviteiten, mogelijk een bodemverontreiniging zou kunnen zijn ontstaan. Wanneer bij de bedrijfsinventarisatie gebruik is gemaakt van de UBI-systematiek en aan de activiteit een NSX-score is toegekend, dan is het mogelijk onderscheid te maken naar potentiële bronlocaties met een bepaalde verwachtingswaarde ten aanzien van het ontstaan van een verontreiniging.
2. Door gebruik te maken van rapportages van uitgevoerde bodemonderzoeken is voor de twee beschouwde stofgroepen een bronkarakterisatie uitgevoerd. Wanneer van een bronlocatie geen nadere gegevens bekend zijn, dan kunnen op basis van deze karakterisatie voor het Rotterdamse gebied toch een gemiddeld oppervlak en een diepte van voorkomen van de verontreiniging worden toegekend. Hiermee zijn de minimaal benodigde gegevens beschikbaar om een modellering van het verspreidingsrisico te kunnen uitvoeren.
3. Een belangrijk aandachtspunt bij de uitwerking van de methodiek van de brondefinitie betreft het ontstaan van drijf- of zinklagen. Vooral voor de stofgroep VOCI werd verwacht dat door de aanwezigheid van zandpalen dan wel gaten in het bodemprofiel door verwijdering van funderingspalen, een meer dan evenredige verspreiding in de verticaal zou zijn opgetreden. Dit stemt overeen met de afgeleide bronkarakteristieken. Zo wordt voor de diepte van BTEXN een waarde bepaald van 5 m-mv, terwijl dit voor VOCI 10 m-mv is. Daarnaast kent de gemiddelde BTEXN verontreiniging een oppervlak van 400 m², terwijl dit voor VOCI beperkt is tot 100 m². Hieruit valt af te leiden dat de vorming van lagen van puur product mede van invloed is geweest op de bepaling van de kentallen. Locaties waar puur product (VOCI) aanwezig is en de slechtdoorlatende deklaag is verstoord (bijvoorbeeld door zandpalen), vallen direct in de hoogste risicoklasse.
4. De kwaliteit van de kaart met potentiële bronlocaties wordt in hoge mate bepaald door de betrouwbaarheid van de uitgevoerde bedrijfsinventarisatie. De mogelijkheid om aan deze locaties een specifieke bronkarakterisatie toe te kennen is mede afhankelijk van de beschikbaarheid van bodemonderzoeksgegevens voor die activiteit. In de uitgevoerde pilot kwam naar voren dat er onvoldoende bedrijfsactiviteit gerelateerde gegevens beschikbaar waren met betrekking tot bodemverontreiniging om te komen tot een statistisch onderbouwde karakterisatie.

Aanbevelingen

1. Wanneer geredeneerd vanuit het eindresultaat van ABIS de noodzaak bestaat de betrouwbaarheid van de bronkarakterisatie te vergroten, dan is het noodzakelijk meer dossiers te beschouwen. Waarschijnlijk dienen dan ook andere dossiers te worden beschouwd dan die van Rotterdam. Bij deze verbreding dient dan wel rekening gehouden te worden met de verschillen in lokale bodemgesteldheid.
2. Voor een nadere uitwerking van de beschrijvende statistiek is het wenselijk dat niet alleen de dossiers met een *aangetoonde verontreiniging*, maar ook de dossiers van *bekend schone locaties* worden verwerkt.
3. In de momenteel gevolgde werkwijze is geen rekening gehouden met de periode waarin een bepaalde activiteit heeft plaatsgevonden. Aan de potentiële bronlocaties is dan ook geen ouderdom als kental toegekend. Wanneer er meer dossiers worden beschouwd zou het aspect van de ouderdom mede in beschouwing genomen kunnen worden.
4. Het UBI model geeft een goede indicatie van de risico's voor emissie naar grond en grondwater gebaseerd op (voormalige) bedrijfsactiviteit. Deze indicatie is gebaseerd op stofeigenschappen gerelateerd aan het productieproces. Om tot een meer accurate schatting van de risico's te komen is een vertaling gemaakt naar emissies naar grond en grondwater. Om deze vertaling meer generiek te maken dient per branche bepaald te worden of er een correlatie is tussen vlek grootte en bijvoorbeeld bedrijfsgrootte, periode van bedrijvigheid of aantal werknemers.

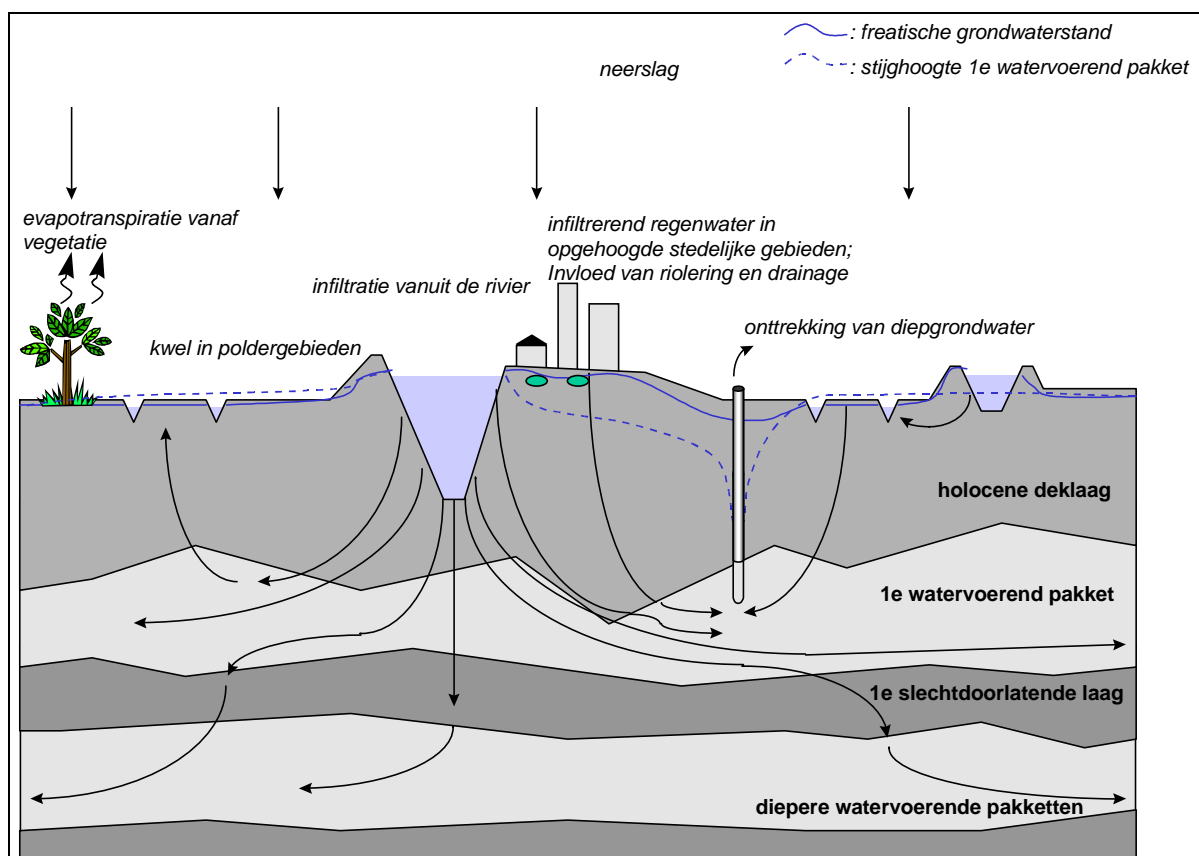
4 Steemanalyse verspreidingspad DP - II

4.1 Inleiding

Voor het in kaart brengen van het regionale stromingsgedrag van het grondwater is door Gemeentewerken Rotterdam een regionaal model¹ opgesteld. Het modelgebied strekt zich uit vanaf de Noordzee in het westen tot aan Lekkerkerk in het oosten en vanaf de rivier de Waal in het zuiden tot aan de stad Delft in het noorden. Voor het pilotgebied Feijenoord is op basis van dit regionale model een gedetailleerder lokaal model ontwikkeld. Beide modellen zijn gebruikt voor het analyseren van de mogelijke verspreiding van verontreinigingen.

4.2 Regionale grondwaterstroming

Karakteristiek voor de omgeving van Rotterdam zijn de infiltrerende rivieren die de lagergelegen *binnendijkse poldergebieden* doorkruisen (figuur 4.1). Het rivierwater infiltreert met name in het eerste watervoerend pakket. Uiteindelijk kwelt een deel van het infiltrerende rivierwater op in de lagergelegen poldergebieden. Het overige deel van het infiltrerende rivierwater stroomt af naar de diepere watervoerende pakketten of wordt afgevangen door onttrekkingen. Daarnaast draagt de neerslag bij aan de grondwateraanvulling.



Figuur 4.1: profiel van regionale grondwaterstromingssituatie

¹ Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam, 2003, *Bijzonder Inventariserend Onderzoek Diepgrondwater*, dossiernr.:2000-0640

4.2.1 Hydrogeologie

In het studiegebied zijn voor de modelberekeningen 5 geohydrologische eenheden onderscheiden, deze en de overige eenheden zijn in detail beschreven in bijlage II:

1. *Freatisch pakket.* De dikte varieert van enkele decimeters tot meer dan 30 m. In stedelijke gebieden is deze bovenste bodemlaag veelal beïnvloed door menselijk ingrijpen, zoals ophoging en bodemverbetering. Deze zogenaamde antropogene laag is daardoor sterk wisselend van samenstelling, maar bestaat in veel gevallen uit zand.
2. *Deklaag (Holoceen).* Deze laag bestaat voornamelijk uit klei en veen en heeft in het algemeen een slechte doorlatendheid.
De dikte van de deklaag varieert tussen 5 en 25 m. Plaatselijk is de deklaag meer zandig ontwikkeld (geulopvullingen of oude rivierduinen).
3. *Eerste watervoerend pakket (Pleistocene).* De top van het eerste watervoerend pakket ligt op NAP -15 à -20 m en de dikte varieert van 10 tot 20 m. Deze zeer goed doorlatende laag bestaat voornamelijk uit middelfijne tot middelgrove zanden en grinden.
4. *Eerste slechtdoorlatende laag.* De top ligt op NAP-25 à -35 m; de dikte van varieert 5 tot 40 m. Onder Rotterdam is deze laag tamelijk dun (minder dan 5 m).
5. *Tweede watervoerend pakket.* Deze goed doorlatende laag met een dikte van variërend van 30 tot 100 m bestaat uit fijne tot middelfijne zanden. De top van dit pakket ligt op NAP -25 à -70 m.

4.2.2 Zoet / zout grensvlak

Als het grondwater in het tweede watervoerend pakket veel zouter is dan in het eerste watervoerend pakket, is aangenomen dat er geen verticale stroming vanuit het eerste watervoerend pakket naar het tweede optreedt. De ligging van het *zoet / zout grensvlak* (grens die samenvalt met een chlorideconcentratie van 1.000 mg/l) is weergegeven in bijlage II.2

In het westen van het gebied tot aan de lijn Delft - Nesseland - Schiedam Centrum - Waalhaven - Rhooen is het diepe grondwater zowel in het eerste als in de diepere watervoerende pakketten brak tot zout. Oostelijk van deze lijn is onder invloed van de infiltrerende rivieren verzoeting opgetreden.

Aangezien het zoet / zout grensvlak zich ter hoogte van het pilotgebied dieper dan het tweede watervoerende pakket bevindt, is het mogelijk dat stroming optreedt vanuit het eerste watervoerend pakket naar het tweede watervoerend pakket.

4.3 Grondwaterstroming Pilotgebied

Ten behoeve van onderhavig onderzoek is een lokaal grondwaterstromingsmodel opgesteld¹. Het locale model is grotendeels afgeleid van het regionale grondwatermodel.

¹ *Het model is vervaardigd in de grondwatermodelcode Modflow, waarbij gebruik is gemaakt van het pakket GMS versie 3.1 voor de bewerking van in- en uitvoer*

4.3.1 Modelgebied en netwerk

Interessegebied en modelgebied

Het interessegebied in het model valt samen met het pilotgebied Feyenoord. Het totale modelgebied is groter (bijlage II.3), waardoor effecten van ingrepen van buiten het interessegebied die invloed hebben op het grondwater in het interessegebied wel kunnen worden verdisconteerd. Het totale modelgebied heeft een oppervlak van circa 4,5 bij 4,5 km².

Modelnetwerk en locale verfijning

Bij het ontwerp van het modelnetwerk is rekening gehouden met de aanwezigheid van sterke gradiënten in het stijghoogtepatroon, de ligging van het interessegebied en het creëren van geleidelijke overgangen in het netwerk. In het interessegebied hebben de cellen een afmeting van 25x25 m², aan de randen van het modelgebied 400x400 m². Dit heeft geresulteerd in model met circa 17.000 knooppunten per modellaag (bijlage II.3).

4.3.2 Geohydrologische lagen en randvoorwaarden

In het model zijn 7 modellagen geïntroduceerd. In het bijzonder de holocene deklaag is verfijnd in het model opgenomen. De diktes en hydraulische parameters zijn grotendeels overgenomen uit het regionale model. De indeling is opgenomen in tabel 4.1.

Tabel 4.1: indeling van de geohydrologische lagen

Modellaag	Geohydrologische laag	Geologische laag	Randvoorwaarden
1	freatisch pakket	antropogene zandlaag	Topsysteem
2 t/m 5	deklaag	holocene klei, veen en tussenzandlagen	Topsysteem waar laag 1 ontbreekt
6	eerste watervoerend pakket	pleistocene zanden	Noord en zuidrand deels vaste stijghoogte
7	eerste slechtdoorlatende laag en diepere watervoerende pakketten	Kedichem, Tegelen en diepere formaties	Noord en zuidrand deels vaste stijghoogte

Antropogene zandlaag

De antropogene zandlaag (*modellaag 1*) is niet overal aanwezig. Met name in de dieper gelegen poldergebieden ontbreekt deze laag.

Holocene deklaag

Binnen de holocene deklaag (*modellaag 2/5*) is onderscheid gemaakt tussen slechtdoorlatende klei- en veen lagen en de goeddoorlatende tussenzandlagen. De tussenzandlagen doorsnijden plaatselijk de klei- en veenlagen. Vooral daar waar de tussenzandlagen zich in de buurt van oppervlaktewater bevinden, speelt horizontale afstroming een belangrijke rol. Aangenomen wordt dat bepaalde clusters van *bodemprofiel*types een kenmerkende horizontale en verticale doorlatendheid hebben. Het bodemprofiel wordt opgedeeld in 5 karakteristieke geohydrologische bodemprofieltypes. Deze zijn weergegeven in tabel 4.2. De ruimtelijke verbreiding van de bodemprofieltypes in het pilotgebied is weergegeven in bijlage II.4

Eerste watervoerend pakket

De diktes en doorlatendheden van het eerste watervoerend pakket zijn overgenomen uit het regionale model. De k-waardes variëren tussen circa 20 tot 100 m/dag.

Eerste slechtdoorlatende laag en dieper

De eerste slechtdoorlatende laag en de diepere watervoerend pakketten zijn samen als één modellaag (laag 7) ingevoerd. De gemiddelde horizontale doorlatendheid van het tweede en derde watervoerend pakket is als horizontale doorlatendheid voor deze modellaag gehanteerd. De verticale doorlatendheid komt overeen met de k-waarde van de eerste slechtdoorlatende laag (Kedichem).

Tabel 4.2: Geohydrologische bodemprofieltypes

Bodemprofieltype:						
Modellaag:	1	[m/dag]	2	[m/dag]	3	[m/dag]
freatisch pakket*	1	$kv^{**}=kh^{***}=1$		$kv=kh=1$		$kv=kh=1$
deklaag	2	$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$
	3	$kv=0,08 / kh=0,8$		$kv=0,1 / kh=1$		$kv=kh=0,003$
	4	$kv=kh=0,003$		$kv=0,1 / kh=1$		$kv=0,5 / kh=5$
	5	$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$
1e wvp	6					
diepere lagen	7					

Bodemprofieltype:						
Modellaag:	4	[m/dag]	5	[m/dag]		
freatisch pakket*	1	$kv=kh=1$		$kv=kh=1$		
deklaag	2	$kv=kh=0,003$		$kv=0,1 / kh=1$		
	3	$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$		
	4	$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$		
	5	$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$		
1e wvp	6					
diepere lagen	7					

Legenda:
**niet overal aanwezig*
***kv: verticale doorlatendheid*
****kh: horizontale doorlatendheid*

Neerslagoverschot

Het neerslagoverschot (deel van de neerslag dat het grondwater aanvult) is in het model verdisconteerd op basis van landgebruiktypes. Daarbij is een indeling gemaakt in maatgevende landgebruiktypes op basis van hun invloed op het neerslagoverschot. In tabel 4.3 zijn de gehanteerde waarden weergegeven. De ruimtelijke verbreiding van de landgebruiktypes is opgenomen in bijlage II.1.

Tabel 4.3: neerslagoverschot in het model

Landgebruik	Neerslagoverschot [mm/dag]
Landbouw (grasland); buiten pilotgebied	1,10
Groenstroken, parken, recreatie gebieden en braakliggend terrein	1,15
Intensief verhard oppervlak (container terminals); industrieterrein	0,70
Verhard oppervlak (industriegebieden, wegen, overige bebouwing)	0,80

Rivieren, plassen/meren

De rivieren, kanalen, plassen en meren van meer dan 50 m breed, zijn verdisconteerd met een oppervlaktewaterpeil, een infiltratie/uittreweerstand en een bodemniveau. Voor de meeste van deze oppervlaktewaterlichamen is een weerstand van 100 dagen aangehouden. Voor de weerstand van civiel technische constructies (damwanden, kadenwanden etc.) tussen het oppervlaktewater en het grondwater wordt eveneens een waarde van 100 dagen aangehouden. De situatie bij de rivier en in havens is in meer detail beschouwd in bijlage II.5.

Polders/peilbeheersingsgebieden

Gebieden waarin een peil beheerst wordt, zijn ingevoerd met zowel een drainage- als een infiltratieweerstand. Aangenomen is dat een peilbeheerst gebied makkelijker gedraineerd kan worden dan dat infiltratie optreedt. De drainageweerstand is circa 2 x kleiner dan die voor infiltratie.

Bij de kalibratie is gebleken dat diverse poldergebieden verschillend reageren. In diepere polders is de afwatering 'intensiever' dan in ondiepere polders; om de sterke kweldruk af te vangen is in diepe polders in de loop van de tijd een fijnmaziger netwerk aan sloten aangelegd. Dit zorgt ervoor dat de drainageweerstand in deze gebieden op regionale schaal geringer is dan in minder diepe polders. In tabel 4.4 zijn de gehanteerde waardes weergegeven.

Tabel 4.4: deelgebieden polderweerstand

Deelgebied	Infiltratie-weerstand [dag]	Drainage-weerstand [dag]
Delfland	600	300
Schieland	100	50
IJsselmonde	880	440

Stedelijke gebieden en havens zonder peilbeheersing

In stedelijke gebieden is in de oudere wijken sprake van verouderde lekkende riolering ('meterse' buizen). Voorts wordt in Rotterdam een ontwateringspeil van de bebouwing en straten gehandhaafd van 1 m-mv onder wegen, straten en parkeerterreinen. Het gecombineerde effect van lekkende riolen en handhaving van een ontwateringspeil van 1 m-mv is verdisconteerd in het model door middel van een drainageweerstand. Het grondwater wordt in feite 'afgetopt' op 1 m-mv in deze gebieden.

Grondwateronttrekkingen

In de voor de grondwatermodellering beschouwde periode, bevonden zich aan de noordoever van de Nieuwe Maas op relatief korte afstand van het pilotgebied twee grote tijdelijke onttrekkingen:

- Sanering Gasfabriek Kralingen (830.000 m³/jaar);
- Weena Towerhotel (650.000 m³/jaar).

Voorts heeft de onttrekking bij DSM Gist Brocades (circa 13 Mm³/jaar) veel invloed op de diepe grondwaterstroming in de gehele regio.

4.3.3 Kalibratie en gevoeligheidsanalyse

Het grondwatermodel is een afspiegeling van de werkelijkheid. Om deze afspiegeling zo betrouwbaar mogelijk te krijgen dient het model gekalibreerd te worden. Modelkalibratie van een stromingsmodel verwijst naar het proces waarbij de parameters, randvoorwaardes en schematisaties van het model zodanig worden aangepast dat het model gemeten stijghoogtes en fluxen binnen een vooraf gestelde fout kan simuleren. Het aanpassen van parameterwaardes wordt *optimalisatie* van de modelparameters genoemd. Met het gekalibreerde model zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Hiermee wordt bepaald welk effect een verandering in een specifieke (model)parameter heeft op de met het model berekende resultaten. Hiermee wordt inzicht verkregen in de meest kritische parameters en kunnen aanbevelingen voor eventueel aanvullend onderzoek worden gemotiveerd. Een uitgebreidere analyse is opgenomen in bijlage II.

Kalibratieperiode

Voor onderhavig grondwatermodel is de periode 1 oktober 1997 t/m 1 oktober 1998 gehanteerd als kalibratieperiode. Deze keuze is gebaseerd op tijdreeksen van de neerslag, de rivierpeilfluctuaties en stijghoogtefluctuaties, waarbij geselecteerd is op:

- gemiddelde (geo)hydrologische omstandigheden;
- beschikbaarheid van (geo)hydrologische gegevens;
- minimale bergingsverandering gedurende de periode: evenveel in als uitstroom voor het totale grondwatersysteem.

Gevoeligheidsanalyse modelparameters

Middels een gevoeligheidsanalyse van de modelparameters is vastgesteld dat de berekende stijghoogten voornamelijk gevoelig zijn voor variaties in de weerstand van het topsysteem (polders, rivieren en havens) en de (on)doorlatendheid van de Holocene deklaag. De parameters van de dieper gelegen lagen hebben minder invloed op het stromingsgedrag. Op basis van de resultaten van de kalibratie en gevoeligheidsanalyse (zie bijlage II.6) wordt geconcludeerd dat het grondwatermodel betrouwbaar genoeg is om op de schaal van het pilotgebied uitspraken te doen over de grondwaterstroming. Op locatieschaal is het model plaatselijk niet betrouwbaar genoeg. Bijvoorbeeld op de locatie "Gasfabriek Feyenoord" (zowel te hoge als te lage freatische grondwaterstanden). Hier liggen locatiespecifieke omstandigheden aan ten grondslag.

4.4 Kaartbeelden grondwaterstroming

De stroming van het grondwater kan fungeren als basis voor de te ontwikkelen regionale afwegingsstrategie voor mobiele grondwaterverontreinigingen. Met behulp van het grondwatermodel zijn kaartbeelden samengesteld die daarbij kunnen ondersteunen.

4.4.1 Afstroming (bijlage II; figuur 4.1)

Horizontale afstroming naar het oppervlaktewater

Bronnen binnen de zone van horizontale afstroming richting de havens zullen in relatief korte tijd afstromen naar oppervlaktewater. De zone is veelal niet groter dan 50 m. De reistijden vanaf de freatische grondspiegel tot afstroming naar het oppervlaktewater zijn kort (< 50 jaar).

Afstroming naar de noordoever

Binnen deze zone zal al het infiltrerende water via het eerste watervoerend pakket richting de noordoever stromen. Het grondwater zal aan de noordoever met name afstromen naar de diepe polders ten noordoosten van Rotterdam. De reistijden zijn relatief lang (>500 jaar).

Waterscheiding (in het eerste watervoerende pakket)

De "waterscheiding" markeert de grens waarvan ten noorden het grondwater in noordelijke richting zal afstromen. Ten zuiden van de lijn zal het grondwater richting de diepere watervoerende pakketten of in zuidelijk richting afstromen.

Afstroming naar de diepte binnen het pilotgebied

In deze zone stroomt het infiltrerende water binnen het pilotgebied af naar diepere water-voerende pakketten. Het duurt *vele duizenden jaren voordat het water in deze zone op natuurlijke wijze weer aan de oppervlakte komt.* Regionale afstroming

In deze zone stroomt het infiltrerende water buiten het pilotgebied af naar diepere water-voerende pakketten of naar polders dan wel onttrekkingen gelegen op grote afstand van het pilotgebied. De reistijden bedragen vele duizenden jaren.

Afstroming naar poldergebieden direct ten zuiden van het pilotgebied

Deze zones markeren de gebieden waarin het infiltrerende grondwater uiteindelijk zal opkwellen in de direct zuidelijk van het pilotgebied gelegen polders. Het grondwater kwelt op in sloten, singels en vijvers. Onder meer het Afrikanerpark ontvangt kwelwater direct uit het pilotgebied. Infiltrerend water zal in circa 100 tot 250 jaar opkwellen in de sloten van de direct zuidelijk van het pilotgebied gelegen polders.

4.4.2 Kwel en infiltratie (bijlage II; figuur 4.2)

De kwel en infiltratie kaart is vervaardigd op basis van de verticale flux tussen het eerste water-voerend pakket en de onderkant van de holocene deklaag.

Infiltratiezone

In het grootste deel van het pilotgebied treedt infiltratie op. Het grondwater en daarin opgeloste verontreinigingen stromen daarbij ten dele af naar het eerste watervoerend pakket. De intensiteit van de infiltratie varieert in het ruimtelijke beeld. De bodemopbouw van de holocene deklaag (voorkomen van tussenzandlagen) en het landgebruik, beïnvloeden in sterke mate de infiltratie intensiteit.

Kwelzone

In de kwelzone zal geen water infiltreren naar het eerste watervoerend pakket. Neerslag water en opkwellend diep grondwater komt terecht in sloten, singels en vijvers in dit gebied.

4.4.3 Invloed grootschalige bemaling (bijlage II; figuur 4.1)

Grootschalige bemalingen, zoals in de kalibratieperiode aanwezig op de noordoever zijn van invloed op de (locale) grondwaterstroming. Om dit te visualiseren is er een berekening uitgevoerd waarbij een winning direct aan de noordoever van circa 1 miljoen m³/jaar is stopgezet. In het kaartbeeld is met de groene lijn aangegeven waar de verandering in infiltratie plaatsvindt bij het stopzetten van deze winning. Verder blijkt dat er door die winning vooral meer water uit de rivier wordt aangetrokken en dat de invloed op de kwel- en infiltratiezones beperkt is.

4.5 Evaluatie deelproject II

Op basis van de systeemanalyse is een grondwatermodel opgesteld voor het pilotgebied Rotterdam-Feijenoord. Met dit model is de stroming van het grondwater gesimuleerd. Uit deze berekeningen zijn kaartbeelden samengesteld die een duidelijk beeld geven van de mogelijke verspreiding van verontreinigingen opgelost in het grondwater. Het eerste kaartbeeld heeft betrekking op *afstroming* waarbij gekeken wordt naar de uiteindelijke bestemming van het grondwater. Het tweede kaartbeeld betreft *kwel en infiltratie*. Dit kaartbeeld brengt de gebieden in beeld waar rekening gehouden moet worden met een verspreiding (door infiltratie) van in het grondwater opgeloste verontreiniging. Tevens worden gebieden inzichtelijk waar door de lokale omstandigheden (kwel) een eventuele grondwaterverontreiniging beperkt blijft tot een plaatselijk probleem.

4.5.1 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

1. Uit de kalibratie en gevoeligheidsanalyse is naar voren gekomen dat de (diepte)ligging van het oppervlaktewater mede bepalend is voor de lokale afstroming naar dit oppervlaktewater. Daar afstroming naar het oppervlaktewater als een van de hoogste risicoklassen is beschouwd, verdient het aanbeveling de lodingen van de rivieren nauwkeurig(er) te verdisconteren in ondergrond- en grondwatermodel.
2. Uit de modelberekeningen volgt dat in het bijzonder het voorkomen van zandbanen (tussenzandlagen) in de deklaag bepalend is voor het risico van verspreiding. Het verdient aanbeveling ter verhoging van de betrouwbaarheid van de modelresultaten het ondergrondmodel verder te detailleren op basis van extra sonderingen. Daarmee kan de laterale verbreiding en diktes van de diverse holocene lagen beter in beeld worden gebracht.

5 Processen en Transport in de ondergrond - DP III

5.1 Inleiding

De mate waarin Natuurlijke Afbraak (NA) in de bodem optreedt, is afhankelijk van de lokale milieuumstandigheden in de bodem. Deze omstandigheden worden gekarakteriseerd door verschillende parameters, zoals zuurgraad, temperatuur en concentraties van macroparameters, zoals nader omschreven in bijlage III. Deze milieumstandigheden hangen nauw samen met de bodemopbouw. Aan de hand van de lokale bodemopbouw is een voorspelling gedaan ten aanzien van de ruimtelijke verdeling van de redoxcondities in het pilotgebied. De voorspelde redoxcondities zijn getoetst aan de resultaten van de gelijktijdig met onderhavig project uitgevoerde meetcampagne in het kader van het project Beeld Diepe Ondergrond (BDO).

Op basis van de voorspelde ruimtelijke verdeling van de redoxcondities zijn parameterwaarden voor de NA-potentie bepaald, die in ABIS zijn gebruikt als invoer voor de modellering van het verspreidingsrisico.

5.2 Hypothese redoxcondities

Bodemprofieltypen

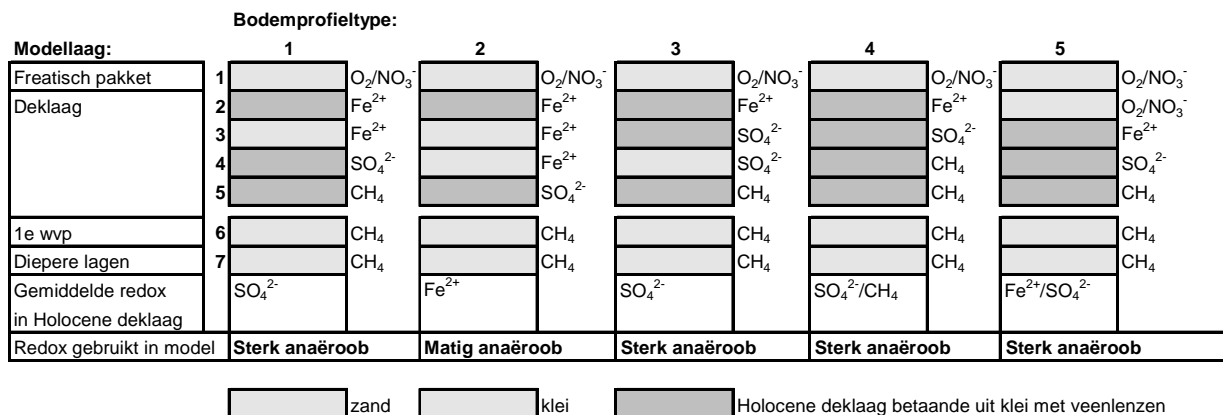
De ondergrond in het pilotgebied Feijenoord is geschematiseerd tot vijf karakteristieke bodemprofieltypen (§ 4.3.2). De bodemprofieltypen verschillen vooral van elkaar door het al of niet voorkomen van tussenzandlagen op verschillende diepten in het Holocene pakket. De verdeling van de verschillende bodemprofieltypen binnen het pilotgebied is op kaart aangegeven in bijlage II.4 Vanaf de rivier gaande in zuidelijke richting worden achtereenvolgens de bodemprofieltypen 1, 2 en 3 aangetroffen. Bodemprofieltype 5 betreft gedempte havens, waarbij de zandige afzettingen voornamelijk bovenin het profiel worden aangetroffen. Bodemtype 4 vertegenwoordigt de bodems zonder tussenzandlagen in het Holocene pakket.

Hypothese en schematisatie redoxcondities

In de antropogene zandlaag (bovenste laag) wordt aangenomen dat het milieu aëroob tot licht anaëroob is, afhankelijk van de verblijftijd van het grondwater. De redoxcondities in de Holocene deklaag worden voornamelijk bepaald door het al of niet voorkomen van tussenzandlagen, omdat deze een directe invloed hebben op de verblijftijd van het grondwater. Als hypothese is aangenomen dat zandlagen niet van invloed zijn op veranderingen in de redoxpotentiaal. Als tweede hypothese wordt aangenomen dat de klei/veenlagen die het grondwater passeert de redoxcondities dusdanig beïnvloeden dat een opvolgende oxidator uit de sequentie gebruikt gaat worden. In het watervoerende pakket worden sterk anaërobe redoxcondities aangenomen (methanogene omstandigheden).

De onderverdeling in redoxcondities is voor de modelberekeningen teruggebracht tot uniforme condities voor de gehele Holocene laag, waarbij 3 categorieën worden onderscheiden: aëroob (O_2/NO_3^-), matig anaëroob (Fe^{2+}) en sterk anaëroob (SO_4^{2-}/CH_4). Dit is schematisch weergegeven in figuur 5.1.

In bodemprofieltype 1 en 3 zijn de representatieve redoxcondities van het totale pakket (top Holocene tot top Pleistoceen) sulfaatreducerend, ofwel sterk anaëroob. In profiel 2 is dit ijzerreducerend, ofwel matig anaëroob. In profieltype 4 is het milieu sterk anaëroob. Profiel 5 geeft een overgangssituatie weer, welke als sterk anaëroob is geschematiseerd.



Figuur 5.1. Bodemprofieltypen en geschematiseerde redoxcondities

Toetsing hypothese aan resultaten metingen Beeld Diepe Ondergrond

De hypothesen met betrekking tot de redoxcondities zijn (in beperkte mate) getoetst met behulp van metingen in het veld. Hiervoor zijn de momenteel beschikbare bevindingen van het project Beeld Diepe Ondergrond gebruikt.

In het meetprogramma Beeld Diepe Ondergrond (BDO) wordt aan de hand van metingen een beeld verkregen van de chemie van het diepe grondwater onder Rotterdam. Door middel van metingen op locaties die representatief zijn voor de diverse Rotterdamse bodemprofielen, wordt een bodemkarakterisatie uitgevoerd voor het gehele Rotterdamse gebied. BDO richt zich in het bijzonder op het bepalen van de afbraakpotentie onder natuurlijke omstandigheden, er wordt vooral op onbelaste (=niet-verontreinigde) locaties gemeten. Voor het pilot-gebied Feijenoord is het grondwater op twee locaties onderzocht. Deze locaties zijn op kaart aangegeven in bijlage III.5.

Peilbuis 131565-99

Het grondwater in het watervoerende pakket op de Rosestraat ter plaatse van de Steven Hoogendijkstraat, kan gekarakteriseerd worden als **matig anaëroob**. De zuurstofconcentratie is lager dan 1 mg/l, de nitraatconcentratie hoger dan 1 mg/l en er zijn geen methaan en sulfide aangetroffen. Dit wijst op matig gereduceerde omstandigheden.

Peilbuis 131566-99

Het grondwater in het watervoerende pakket op de hoek van Steven Hoogendijkstraat en Oranjeboomstraat, kan gekarakteriseerd worden als **sterk anaëroob**. De zuurstofconcentratie en nitraatconcentratie zijn laag. De lage sulfaatconcentratie en de hoge methaanconcentratie leiden tot de aanname dat het **sterk anaëroobe** omstandigheden betreft.

De metingen verricht in het kader van BDO lijken hiermee de gehanteerde redoxclassificatie op basis van bodemprofieltypen te bevestigen (figuur 5.1). De redoxcondities zijn echter niet alleen afhankelijk van bodemprofieltype maar meer nog van grondwaterstroomsnelheden en – richting. Beide peilbuizen bevinden zich in infiltratiegebied, echter peilbuis 131566-99 bevindt zich in een zone met een hogere verticale grondwaterstroomsnelheid dan peilbuis 131565-99 (Bijlage III.5 en figuur 4.2 in Bijlage II). Bij hogere snelheden dus kortere reistijden lijkt de grens tussen sterk gereduceerd en matig gereduceerd verder stroomafwaarts te liggen.

5.3 NA-potentie

De heersende redoxcondities zijn een maat voor de potentie van de bodem om verontreinigingen af te breken. Naast de redoxcondities wordt de NA-potentie in belangrijke mate bepaald door het gehalte organische stof. Met deze gegevens samen kan kwalitatief en/of kwantitatief een uitspraak gedaan worden over de NA-potentie van de bodem. Afbraak vindt alleen plaats als ook andere locatiespecifieke kenmerken, zoals de bacteriepopulatie, de concentratie van organisch stof en de concentratie elektronendonoren en -acceptoren, voldoen aan de benodigde condities. Met behulp van de redoxcondities en het organische stofgehalte wordt alleen bepaald of voldaan wordt aan bepaalde minimale randvoorwaarden. Dit is geen garantie voor daadwerkelijke afbraak.

Aromatische koolwaterstoffen (BTEXN)

De afbraak van aromatische koolwaterstoffen (BTEXN¹) kan vooral goed plaatsvinden onder aërobe omstandigheden. Hierbij wordt zuurstof verbruikt, waarbij de zuurstof als oxidator of electron-acceptor optreedt. Een aantal aromaten breekt ook onder nitraatreducerende omstandigheden af. De reactiesnelheid ligt echter lager dan wanneer zuurstof beschikbaar is; zolang er nog zuurstof aanwezig is, zal de reactie niet verlopen met nitraat. Dit is meer gedetailleerd beschreven in de bijlage III.3.

De in de literatuurstudie aangetroffen afbraaksnelheden zijn samengevat in tabel 5.1. Deze waardes lijken bovenstaande theorie tegen te spreken. De waardes zijn echter afkomstig uit veel verschillende studies met sterk variërende locatiespecifieke omstandigheden. Vooral nog is het niet mogelijk een eenduidige relatie tussen afbraaksnelheid en heersende redoxcondities te leggen.

Tabel 5.1. Afbraaksnelheidsconstanten BTEXN.

Constanten	Aëroob	Anaëroob ¹	Nitraatreducerend	Ijzerreducerend	Sulfaatreducerend	Methanogeen
Benzeen	0,200	0,003	0,002	0,004	0,010	0,003
Tolueen	0,250	0,237	0,360	0,015	0,042	0,025
ethylbenzeen	0,120	0,218	0,150	0,002	0,005	0,025
m-xyleen	0,150	0,031	0,030	0,004	0,074	0,010
o-xyleen	0,080	0,019	0,040	0,005	0,004	0,010
p-xyleen	0,180	0,013	0,030	0,004	0,044	0,009
naftaleen	0,308	0				

¹ Bron: Suarez, P., 1999

Overigen: Aronson, D., 1999; ; Middeldorp, P., 1999; Aronson, D., 1997.

Vluchtige koolwaterstoffen (VOCI)

Bij de natuurlijke afbraak van VOCI is de verontreiniging de elektron-acceptor. Deze reactie levert micro-organismen geen energie op. Het mechanisme is cometabolisch, dat betekent dat een organische koolstofbron wordt omgezet. Hierdoor verandert de redoxconditie van de bodem en neemt de concentratie van de organische koolstofbron af.

De vluchtige koolwaterstoffen geven bij afbraak een reeks tussen- en afbraakproducten. Perchloorethyleen (PER) breekt af tot trichloorethyleen (TRI). Deze breekt af tot cis-dichloorethyleen (CIS), vervolgens wordt vinylchloride (VC) gevormd en uiteindelijk kan dit afgebroken worden tot etheen en ethaan.

De reacties van PER naar TRI en van TRI naar CIS, waarbij PER en TRI als primair substraat fungeren, vinden alleen plaats in een sterk reducerend milieu, d.w.z. in methanogene

¹ BTEXN = Benzeen, Tolueen, Ethylbenzeen, Xylenen en Naftaleen

omstandigheden. Cometafisch kunnen deze stoffen eveneens onder matig gereduceerde omstandigheden afbreken. De andere reacties kunnen plaatsvinden bij een minder sterk reducerend milieu, en de laatste reacties (omzetting van VC naar etheen en ethaan) vinden vooral goed plaats in een aëroob milieu. In tabel 5.2 is per milieu per component aangegeven of de minimale omstandigheden gunstig (+), matig (+/-) of slecht (-) zijn voor natuurlijke afbraak.

Tabel 5.2. NA-omstandigheden voor afbraak VOCl-reeks onder diverse redox-omstandigheden.

Redoxcondities	Aëroob	Nitraat	IJzer	Sulfaat	Methanogeen
PER	-	+/-	+/-	+	+
TRI	-	+/-	+/-	+	+
CIS	+	+/-	+/-	+	+
VC	+	+/-	+/-	+	+
Etheen	+	+	+	+	+

Bron: o.a. PAO cursus Grondwatersanering door natuurlijke afbraak.

De redoxomstandigheden zijn mede bepalend voor de afbraaksnelheid. In een sterk gereduceerd milieu breken de hoger gechlorideerde koolwaterstoffen, zoals PER en TRI, sneller af dan CIS en VC. Onder nitraatreducerende condities breken juist de minder gechlorideerde koolwaterstoffen sneller af, waarbij deze ook via oxidatie afgebroken kunnen worden. Dit is meer gedetailleerd beschreven in de bijlage III.3. De in de literatuurstudie aangetroffen afbraaksnelheden zijn samengevat in tabel 5.3. Ook voor deze waarden geldt dat ze afkomstig zijn uit veel verschillende studies met sterk variërende locatiespecifieke omstandigheden.

Tabel 5.3. Afbraaksnelheidsconstanten VOCl

Constanten	Aëroob ¹	Nitraatreducerend	IJzerreducerend	Sulfaatreducerend	Methanogeen
PER	0,000	0,001	0,004	0,002	0,040
TRI	0,005	0,002	0,003	0,006	0,003
CIS	x	x	0,002	0,007	(0,016) ²
VC	0,087	0,001	0,005	0,008	(0,010) ²
etheen	x	x	x	x	x
ethaan	x	x	x	x	x

x geen data bekend

¹ Suarez, P., 1999

² Deze constanten zijn afkomstig van een summierende hoeveelheid gegevens.
Overigen: Aronson, D., 1999; ; Middeldorp, P., 1999; Aronson, D., 1997.

5.4 Samenvatting modelparameters

Bodem eigenschappen per bodemprofieltype

Voor de bepaling van de NA-potentie is uitgegaan van de lokale bodemopbouw. De bodem is geschematiseerd tot 5 bodemprofieltypen op basis van het voorkomen van klei, zand en veenlagen in de Holocene deklaag. Per bodemprofieltype zijn gemiddelde karakteristieke waarden bepaald, zoals samengevat in tabel 5.4a t/m c. Een compleet overzicht is opgenomen in bijlage III.4, welke in gedetailleerd is beschreven in bijlage III.

Tabel 5.4a. Gemiddelde eigenschappen per bodemprofieltype

Profiel	zand fractie	klei fractie	veen fractie	org. stof fractie	bulk dichtheid kg/dm ³
1	0,25	0,62	0,13	0,12	1,52
2	0,39	0,59	0,02	0,05	1,61
3	0,35	0,57	0,08	0,08	1,57
4	0,03	0,60	0,38	0,26	1,36
5	0,45	0,37	0,18	0,14	1,56

Tabel 5.4b: retardatieparameters verontreinigingen

Stof	marge log(K _{oc})	gehanteerde waarde log(K _{oc})
benzeen	1,42 tot 2,95	1,42
PER	2,25 tot 2,94	2,25
VC	0,34 tot 1,66	0,34

Tabel 5.4c: resulterende retardatiefactoren (R_{stof}) per bodemprofieltype

Bodemprofieltype	Benzeen (-)	PER (-)	VC (-)
1	8,73	53,27	1,64
2	4,59	25,26	1,30
3	6,64	39,11	1,47
4	16,12	103,21	2,26
5	10,23	63,39	1,77

Afbraakconstanten meest mobiele en meest voorkomende componenten

Voor de bepaling van de afbraaksnelheden van Benzeen, Per en VC is verondersteld dat:

- De verontreiniging niet toxisch is voor de bacteriën;
- De microbiële populatie constant is;
- De degradatiereacties alleen plaatsvinden in de waterfase.

Uit bodemkarakterisatie blijkt dat zich in het pilotgebied Feyenoord vooral sterk anaërobe omstandigheden voordoen in de bodem.

Voor BTEXN moet rekening gehouden worden met een lage afbraaksnelheid. Benzeen is binnen deze stofgroep de meest mobiele component en onder sterk gereduceerde omstandigheden slecht afbreekbaar. Als waarde voor de afbraakconstante in de modellering, wordt 0,003 voorgesteld.

Onder de sterk anaërobe omstandigheden in het pilotgebied kan voor de afbraak van PER worden uitgegaan van een hoge afbraaksnelheid. Als modelparameter voor PER is een waarde

van 0,04 voor de afbraaksnelheid gehanteerd. Naast PER zijn er ook modelberekeningen uitgevoerd voor VC, omdat deze stof de meest mobiele component is binnen de stofgroep. Voor VC is als modelparameter de afbraakconstante onder ijzerreducerende omstandigheden, 0,005 gehanteerd. Dit omdat de betrouwbaarheid van de methanogene constante niet duidelijk is (zie bijlage III).

Tabel 5.5. Geselecteerde afbraaksnelheidsconstanten

Profiel	Benzeen	Perchloorethyleen PER	Vinylchloride VC
1/5	0,003	0,04	0,005
milieu	methanogeen	methanogeen	nitraat-reducerend

De geselecteerde afbraakconstanten, zoals vermeld in tabel 5.5, zijn het resultaat van een vergelijking van verschillende studies waarin de afbraakconstanten zijn berekend aan de hand van laboratorium studies, veldstudies en in situ microkosmos studies. De variatie in deze getallen is zeer groot. Dit is te wijten aan de variatie in bodemsoorten in de verschillende studies. De modelberekeningen op basis van deze literatuurwaarden hebben nadrukkelijk een indicatief karakter, in bijlage III wordt nader ingegaan op de variatie in parameterwaarden.

5.5 Transportmodellering

Bij transportmodellering wordt onderzocht op welke wijze stoffen opgelost in het grondwater door de bodem kunnen worden getransporteerd. Daarmee wordt onderzocht hoe snel grondwaterverontreinigingen zich verspreiden.

Processen

Opgeloste stoffen verplaatsen zich met het grondwater. Gedurende het transport kunnen diverse geohydrochemische processen optreden, die de snelheid van transport en de concentratie beïnvloeden:

- **Advectie:** wanneer stoffen met dezelfde snelheid en richting met het grondwater meestromen, waarin ze zijn opgelost
- **Retardatie:** wanneer opgeloste stoffen worden geadsorbeerd aan bodemdeeltjes zal dit leiden tot een afname van de transportsnelheid van de stoffen. De opgeloste stoffen zullen vertraagd afstromen in dezelfde richting waarin het grondwater stroomt.
- **Natuurlijke afbraak (NA):** onder invloed van micro-organismen zullen onder bepaalde omstandigheden in de bodem (onder meer redoxcondities) bepaalde stoffen worden afgebroken.
- **Dispersie:** dit is het proces dat er voor zorgt dat het front van een stofpluim (bijvoorbeeld een verontreinigingspluim) wordt uitgesmeerd. De stof zal al eerder doorbreken dan het front van de pluim. Hieraan ten grondslag liggen locale verschillen in verplaatsingssnelheid van moleculen onder invloed van de grondwaterstroming. Er wordt onderscheid gemaakt tussen dispersie in de stromingsrichting (longitudinale dispersie) en de dispersie in de richting loodrecht daarop (transversale dispersie).

Modellering

Advectief transport

Met het grondwaterstromingsmodel is de reistijd berekend vanaf de freatische grondwaterstand tot aan het bereiken van de top van het watervoerende pakket. Deze reistijd is bepaald aan de hand van het advectieftransport en de porositeit van de doorstroomde lagen. Hieruit volgt de gemiddelde minimale verblijftijd voor verontreinigingen in de Holocene deklaag. In figuur II 4.4 a zijn de berekende reistijden voor het pilotgebied Feijenoord op kaart gezet. Uit het kaartbeeld volgt dat er drie gebieden zijn te onderscheiden waarbij een verblijftijd van minder dan 20 jaar

wordt berekend. Deze gebieden zijn gelegen in het noordoosten, het zuidwesten en het zuidoosten van het pilotgebied.

Stoftransport met retardatie

Op basis van de onderscheiden bodemprofieltypen is een gemiddelde retardatie bepaald voor de beschouwde stoffen. Uit het product van retardatiefactor en verblijftijd op basis van advectief transport zijn de reistijden voor reactief transport bepaald vanaf de grondwaterspiegel tot aan de top van het eerste watervoerende pakket. Deze berekeningen zijn achtereenvolgens uitgevoerd voor Benzeen, Tetrachlooretheen (PER) en Vinylchloride (VC). De op basis van deze berekeningen vervaardigde kaarten zijn opgenomen in de figuren II 4.4b t/m d. Wanneer het kaartbeeld voor Benzeen (figuur 4.4b) wordt vergeleken met die van het advectief transport (figuur 4.4a), dan blijkt alleen in het noordoostelijk deel van het pilotgebied nog een zone te onderscheiden met relatief lage verblijftijden. Voor dit gebied gelden verblijftijden voor Benzeen van minder dan 80 jaar. Voor de eerder onderscheiden zones in het zuidoosten en zuidwesten worden nu minimale verblijftijden berekend van 160 tot 320 jaar. Uit deze berekening volgt duidelijk dat de samenstelling van de bodem een significante invloed heeft op de verspreiding van specifieke verontreinigingen.

Natuurlijke Afbraak

Het effect van natuurlijke afbraak op de verspreiding van de beschouwde stoffen is bepaald aan de hand van de reistijden van de geretardeerde stof. Voor de afbraak is gebruik gemaakt voor de in paragraaf 5.4 vermelde halfwaardetijden, waarbij de afbraak in model is gebracht als een eerste orde logaritmische afbraakrelatie.

De resultaten van deze berekeningen zijn verwerkt tot de in deelrapport II opgenomen kaartbeelden van de "grondwaterbelastbaarheid" voor de componenten Benzeen (figuur II 4.4e), Tetrachlooretheen (PER in figuur II 4.4f) en Vinylchloride (VC in figuur II 4.4g).

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven als een relatieve afname ten opzichte van de beginconcentratie. Uit de figuur voor Benzeen (II 4.4e) volgt duidelijk dat Benzeen slechts in beperkte mate wordt afgebroken onder de in de deklaag aanwezige milieuomstandigheden. In de gebieden waar de reistijd relatief kort is, blijkt tot 80% van de initiële concentratie aanwezig te kunnen zijn in het water dat het eerste watervoerende pakket bereikt.

Uit de figuur voor PER (4.4f) volgt een geheel ander beeld. PER blijkt onder de heersende milieuomstandigheden in de deklaag in relatie tot de reistijd goed afgebroken te worden. De afbraak is voor het grootste deel van het gebied toereikend om PER geheel af te breken. In enkele deelgebieden bedraagt de concentratie die het watervoerende pakket kan bereiken minder dan 1% van de concentratie in het brongebied. Opgemerkt dient te worden dat hier het de afbraak van in grondwater opgeloste PER in beeld wordt gebracht; PER-zaklagen van puur product blijven buiten beschouwing.

Uit de figuur voor VC (4.4g) volgt beeld gelijkend op dat van Benzeen. Ook VC breekt moeilijk af onder de heersende milieuomstandigheden in de deklaag. De zones waar meer dan 80% van de initiële concentratie uiteindelijk het watervoerende pakket bereikt zijn substantieel groter dan die voor Benzeen.

De geringe afbraak van VC heeft ook direct gevolgen voor de beoordeling van het kaartbeeld van PER. VC is onder andere een afbraakproduct bij de natuurlijke afbraak van PER. Dit betekent dat PER in de deklaag wel wordt omgezet, maar dat de omzetting naar etheen en ethaan vervolgens stopt bij VC. Er treedt dan een accumulatie van VC op in de deklaag, met een direct gevolg voor de emissie van VC naar het eerste watervoerende pakket.

5.6 Evaluatie deelproject III

Conclusies

1. De bandbreedte van de in de literatuur aangetroffen afbraaksnelheden is te groot om op basis van de beschikbare milieuomstandigheden nauwkeurige voorspelling te doen voor de actueel in het pilotgebied aan te treffen parameterwaarden.
2. Op basis van de gemiddelde eigenschappen van de onderscheiden bodemprofieltypen is de snelheid van verspreiding van verontreinigingen via de deklaag naar het eerste watervoerende pakket berekend. Op basis van deze berekeningen is een zonering aangebracht in het pilotgebied voor 3 karakteristieke verontreinigingen.
3. Op basis van de geïventariseerde afbraakconstanten en geschematiseerde milieuomstandigheden in de beschouwde bodemprofieltypen is de afbraak van de karakteristieke verontreinigingen in de deklaag berekend. Het blijkt dat onder de heersende omstandigheden PER goed wordt afgebroken, maar dat zowel Benzeen als Vinylchloride slechts in beperkte mate worden omgezet. Op basis van deze berekeningen zijn "grondwaterbelastbaarheidskaarten" samengesteld, die kunnen worden gebruikt voor een zonering van het gebied en een prioritering van de potentieel verontreinigde locaties.

Aanbevelingen

1. Bij de modellering ten behoeve van de berekening van het verspreidingsrisico dient rekening gehouden te worden met alle relevante stoffen in de afbraakketen. In sommige kaarten van de huidige studie wordt de indruk gewekt dat PER goed wordt afgebroken. Voor de beoordeling van het verspreidingsrisico is dit beeld echter onvolledig. Als een van de afbraakproducten wordt Vinylchloride gevormd (VC). Uit de voor deze stof uitgevoerde berekeningen volgt dat deze stof slechts in zeer beperkte mate wordt afgebroken onder de milieuomstandigheden in het pilotgebied.
2. In deze studie zijn drijf- en zaklagen buiten beschouwing gelaten. Met name puur product van PER vormt zaklagen die er voor kunnen zorgen dat de verspreiding van PER veel sneller gaat en groter gebied wordt beïnvloed. Aanbevolen wordt om meer gericht onderzoek te doen naar de dynamiek en de verbreiding van zaklagen.
3. In het studie gebied aan de hand van gerichte monitoring van enkele (goed onderzochte) verontreinigingspluimen voor specifieke (verschillende) milieuomstandigheden de actuele afbraaksnelheden te bepalen om de bandbreedte zoals die is aangetroffen in de literatuurgegevens te verkleinen.
4. De met het grondwatermodel berekende reistijden (onafhankelijk) te valideren aan de hand van ouderdomsbepaling van het grondwater. Hierbij is het raadzaam om ook te kijken naar de locaties waar de reistijden kort zijn.
5. Vaststellen wat de toelaatbare belastbaarheid aan verontreinigingen is in de lokale drainagemiddelen.

6 Generieke Beheer(s)strategie – DP IV

Het concept van de generieke beheer(s)strategie is nader omschreven en uitgewerkt in de separate rapportage van de deelprojecten IV en V: DC 05.02.08 "Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer". Doel van deelproject IV is het opstellen van eco-efficiënte beheersstrategieën

Als basis voor de strategie-ontwikkeling zijn vanuit de deelprojecten diverse thematische kaartbeelden samengesteld om de autonome ontwikkeling binnen het pilotgebied in beeld te kunnen brengen. Dit betreft onder andere:

- *kaart met afstroming (figuur II 4.2)*
De diverse zones geven de bestemming van het infiltrerende grondwater en daarmee het lot van verontreinigingen die erin zijn opgelost aan. Voor grondwaterverontreinigingen is de zone met horizontale afstroming in principe de meest kritische zone, aangezien de reistijden daar het kortste zijn. Locatiegericht veldonderzoek voor locaties binnen 100 m van de havens, dient er op gericht te zijn om te achterhalen hoe groot de zone van afstroming kan zijn. Dit kan gebeuren door insitu doorlatendheidsproeven in de diverse tussenwandlagen en door getijdenproeven om de doorlatendheid van de kadewand te achterhalen. Ook zeer kritisch zijn de zones binnen het pilotgebied waarin het infiltrerende grondwater afstroomt naar de nabij gelegen polders. De reistijden variëren sterk (50 tot 250 jaar). Uit het oogpunt van verspreidingsrisico's binnen het eerste watervoerend pakket zijn de bronnen in deze twee zones het meest kritisch.
- *kaart met herkomst van grondwater in diverse plangebieden (figuur II 4.3)*
De plangebieden omvatten gebieden waarin op korte termijn diverse plannen zullen worden gerealiseerd. Bij de realisatie zal deels gesaneerd gaan worden. Het is zeggend 'mooi meegenomen' dat er bronnen zijn die daarbij worden verwijderd. Verder kan worden aangestuurd op het saneren van bronnen die volgens deze kaart als kritisch kunnen worden beschouwd. De plangebieden bevinden zich grotendeels in infiltratiegebieden. Dat betekent dat het merendeel van het grondwater afkomstig is uit het gebied zelf (hemelwater). In de plangebieden in de kwelzones kan wel toestroming afkomstig van buiten het gebied plaatsvinden.
- *kaart met locaties potentiële brongebieden (bijlage I.2 figuur 3.1/3.6)*
De bronlocaties markeren de locaties waarin het verleden een bedrijf is geweest dat mogelijk een bodem en grondwaterverontreiniging heeft veroorzaakt. Vanuit bronlocaties die zich bevinden in de infiltratiezone kan verspreiding optreden van opgeloste grondwaterverontreinigingen richting het eerste watervoerende pakket. Bronlocaties in de kwelzone zullen geen verspreiding richting het eerste watervoerende pakket veroorzaken door grondwaterstroming. Zaklagen van puur product van mogelijke verontreinigingen zijn buiten beschouwing gelaten.

Uit een eerste analyse van de herkomst van mogelijk verontreinigd grondwater in de plangebieden komt naar voren dat dit water hoofdzakelijk afkomstig is van infiltratie binnen het plangebied zelf. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat de autonome ontwikkeling voor wat betreft de verspreiding van mobiele verontreinigingen via het grondwater voor de meeste plangebieden geen actueel probleem is. Alleen het Afrikanerpark ontvangt grondwater afkomstig van mogelijk verontreinigde locaties.

In het licht van bovenstaande conclusie zijn er in het kader van deelproject IV geen aanvullende berekeningen uitgevoerd of kaartbeelden samengesteld van eventuele maatregelen scenario's, daar dit een volledig technische oefening zou worden.

Op basis van de in de deelprojecten II en III samengestelde kaartbeelden voor de reistijd van verontreinigd water door de deklaag, alvorens dit het eerste watervoerende pakket bereikt, kan al een redelijke schatting worden verkregen van de urgentie van eventuele maatregelen. Dit betreft de figuren II 4.4. Daarnaast biedt de spreiding in reistijden, ook gedifferentieerd naar type verontreiniging, de mogelijkheid prioriteiten te stellen binnen de maatregelenscenario's.

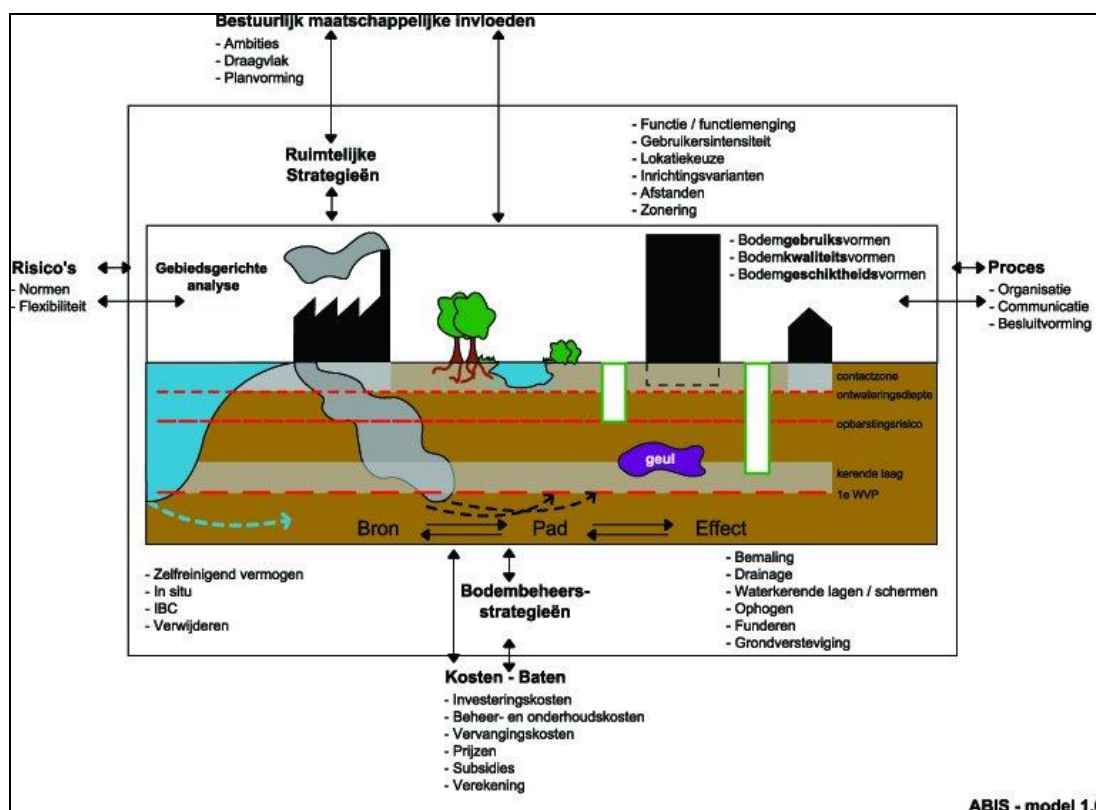
Ten slotte geven de kaartbeelden met de "grondwaterbelastbaarheid" in de figuren 4.4e t/m 4.4g een beeld van het zelfreinigende vermogen (Natural Attenuation) van de deklaag. Zoals eerder opgemerkt geeft de kaart voor de afbraak van PER een te positief beeld, daar het gevormde afbraakproduct Vinylchloride (VC) minder goed wordt afgebroken onder de in het pilotgebied aangetroffen milieuecondities. De verspreiding en afbraak van PER resulteert daardoor waarschijnlijk in een verhoogd verspreidingsrisico voor VC.

7 Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer DP V

Om te komen tot de ontwikkeling van een vraaggestuurde beheer(s)strategie en bijbehorend instrumentarium voor een integrale afweging is gekozen voor een gezamenlijke aanpak vanuit de deelprojecten IV en V, vastgelegd in het separate Delft Cluster rapport DC-528-1. De gezamenlijke aanpak heeft geresulteerd in de volgende deelproducten:

- Een werkproces waarin de relaties tussen bodemaspecten, stedelijke functies en beheersstrategieën breed zijn neergezet.
- Interviews met verschillende stakeholders welke een beeld geven in hoeverre het aspect bodem of ondergrond wordt meegenomen in de ruimtelijke planvorming en op welke wijze informatie daarover beter kan worden benut in het werkproces.
- Bodembeheer(s)strategieën en gewenste kaartbeelden, deels toegespitst op het beheer van de diepere grondwaterkwaliteit.

In figuur 7.1 is het conceptuele model met betrekking tot de interactie van Bodem met RO weergegeven. De kern van het model beschrijft de meest relevante geologische, geomorfologische en geohydrologische eigenschappen van de bodem (bodemgeschiktheidsvormen), de kwaliteit daarvan (bodemkwaliteitsvormen) en het gebruik (bodemgebruiksvormen). De afstemming van stedelijke gebruiksfuncties op de bodemkwaliteit is slechts één aspect van die ondergrond. Er speelt zich nog veel meer af. Denk aan invloeden van ondergronds bouwen of grondwaterwinning op bodemdaling, bodemkwaliteit, veiligheid, cultuurhistorische waarden, grondwaterstromen en ecosystemen.



Figuur 7.1: Interactiemodel Bodem en RO

Rond die bodem, de kern (DP I t/m III), is een schil getekend waarin verschillende actoren (DP IV en V) ingrijpen in die bodem. Vanuit een milieuhygiënische, geotechnische en ruimtelijke invalshoek. Ze hebben daartoe verschillende strategieën en tools tot hun beschikking:

- Het verwijderen, isoleren/beheren/controleren, ter plekke reinigen (in situ) van bodemverontreinigingen, al dan niet met gebruik van het zelfreinigende vermogen van de bodem;
- Het aanbrengen van schermen, drainage- en bemalingssystemen, grondverstevingen, funderingen en ophogingen;
- Het toekennen van functies (bovengronds of ondergronds), locatiekeuzes, inrichtingskeuzes, gebruiksintensiteiten en het scheiden of mengen van functies.

Tenslotte zijn er verschillende externe invloeden vanuit de buitenste ring, die mede bepalend zijn voor de keuze van toe te passen beheer(s)strategieën. Bestuurlijk-maatschappelijke invloeden (ambities, planvorming, draagkracht), de invloed van risico's (normatief, flexibel), procesmatige invloeden (organisatie, werkwijze, besluitvorming, communicatie) en economische invloeden: de afweging tussen kosten en baten (investeringen, beheer en onderhoud, vervanging, prijzen, subsidies, vereveningsmogelijkheden, e.d.).

Met betrekking tot de stakeholder analyse wordt in DC-528-1 geconcludeerd dat:

- 1 De bodemkwaliteit wordt aangepast aan het gewenste bodemgebruik.
- 2 In de huidige praktijk wordt uitgegaan van de *maakbare bodem*. Eigenschappen worden aangepast aan de gewenste stedelijke functies en daarmee samenhangende eisen.
- 3 De bodem kan mede richtinggevend zijn voor de ruimtelijke planvorming, wanneer deze in een breder perspectief wordt benaderd. De bodem moet worden gezien als onderdeel van een lagenbenadering, waarin naast de verkeers- en vervoersnetwerken en de occupatielaag (wonen, werken en recreëren) ook de ondergrond als essentiële laag wordt beschouwd (bodem, water, landschap).
- 4 Om de rol van de ondergrond, als essentieel onderdeel van de lagenbenadering, beter tot zijn recht te laten komen is het aan te bevelen ook informatie aan te leveren over de bodemopbouw, het zettingsgedrag, (geo-)hydrologische kenmerken, archeologische en historische landschappelijke waarden, de ecologische potenties van de bodem en kansen voor ondergronds ruimtegebruik.
- 5 Het is essentieel de beschikbare bodeminformatie in een hanteerbare vorm op een probleem inzichtelijk wijze te presenteren.

8 Conclusies en Aanbevelingen

8.1 Evaluatie

Binnen ABIS is gewerkt in twee onderzoekslijnen en 5 deelprojecten om te komen tot een efficiënte en vraaggestuurde ontwikkeling van een methodologie en instrumentarium voor Adaptief Bodembeheer In Stedelijk gebied. De aanpak wordt gekenmerkt door de inbreng van verschillende disciplines, die elk hun eigen taal spreken. Dit is ook terug te vinden in de rapportage, waar elk deelproject zijn resultaten in een in de bijlagen opgenomen deelrapport heeft vastgelegd. Ook in de hoofdtekst zijn de resultaten van de deelprojecten in afzonderlijke hoofdstukken beschreven. Een belangrijke uitdaging in de uitvoering van dit project is dan ook geweest het realiseren van de synergie tussen de afzonderlijke deelprojecten. Dit is niet altijd even eenvoudig geweest, waarbij het “vastlopen” van een bepaalde deelstudie meermaals van invloed is geweest op de voortgang binnen andere deelprojecten.

Dit laatste heeft nog het meest zijn weerslag gehad op de beperkte mate waarin invulling gegeven is kunnen worden aan de demonstratie van een beheer(s)strategie. De diverse kaartbeelden kwamen pas in de laatste fase van het project beschikbaar en hebben alleen een zekere interactie gehad tussen de deelprojecten. Het is niet mogelijk gebleken dit terug te koppelen naar de “potentiële gebruikers”, zijnde de geïnterviewde medewerkers in het RO-veld. Wanneer later een dergelijk terugkoppeling nog kan worden gerealiseerd, kan waarschijnlijk gelijktijdig ook uitwerking worden gegeven aan het samenstellen van kaartbeelden met risicoklassen, mede afhankelijk van de behoefte van de eindgebruikers.

In navolgende paragrafen zijn de conclusies en aanbevelingen samengevat zoals die eerder en uitgebreider in de afzonderlijke hoofdstukken zijn beschreven.

8.2 Conclusies

Branche specifiek brondefinitie - DP I

- I. 1. Op basis van de beschikbare bedrijfsinventarisaties is een overzicht samengesteld van locaties, waar uit de aard van de bedrijfsactiviteiten, mogelijk een bodemverontreiniging zou kunnen zijn ontstaan. Op basis van de UBI-systematiek en de NSX-score van de activiteit is onderscheid gemaakt naar potentiële bronlocaties met een bepaalde verwachtingswaarde ten aanzien van het ontstaan van een verontreiniging.

- I.2 Door gebruik te maken van rapportages van uitgevoerde bodemonderzoeken is voor de twee beschouwde stofgroepen (BTEXN en VOCL) een bronkarakterisatie uitgevoerd. Wanneer van een bronlocatie geen nadere gegevens bekend zijn, dan kunnen op basis van deze karakterisatie voor het Rotterdamse gebied toch een gemiddeld oppervlak en een diepte van voorkomen van de verontreiniging worden toegekend. Hiermee zijn de minimaal benodigde gegevens beschikbaar om een modellering van de verspreidingsrisico's te kunnen uitvoeren. Een belangrijk aandachtspunt bij de uitwerking van de methodiek van de brondefinitie betreft het ontstaan van drijf- of zinklagen. Vooral voor de stofgroep VOCL werd verwacht dat door de aanwezigheid van zandpalen een meer dan evenredige verspreiding in de verticaal zou zijn opgetreden. Het blijkt echter dat dit fenomeen bijna “automatisch” wordt meegenomen in het vaststellen van de kentallen voor de gemiddelde bron. In de uitgevoerde pilot kwam echter wel naar voren dat er onvoldoende bedrijfsactiviteit gerelateerde gegevens beschikbaar zijn met betrekking tot bodemverontreiniging om te komen tot een statistisch onderbouwde karakterisatie.

Systeemanalyse verspreidingspad – DP II

- II.1 Op basis van de systeemanalyse is een grondwatermodel opgesteld voor het pilotgebied Rotterdam-Feijenoord. Met dit model is de stroming van het grondwater gesimuleerd. Uit deze berekeningen zijn kaartbeelden samengesteld die een duidelijk beeld geven van de mogelijke verspreiding van verontreinigingen opgelost in het grondwater. Het eerste kaartbeeld heeft betrekking op *afstroming* waarbij gekeken wordt naar de uiteindelijke bestemming van het grondwater. Het tweede kaartbeeld betreft *kwel en infiltratie*. Dit kaartbeeld geeft een beeld van de gebieden waar rekening gehouden moet worden met een verspreiding (door infiltratie) van in het grondwater opgeloste verontreiniging en gebieden waar door de lokale omstandigheden (kwel) een eventuele grondwaterverontreiniging beperkt blijft tot een plaatselijk probleem.

Processen en transport in de ondergrond – DP III

- III.1. De bandbreedte van de in de literatuur aangetroffen afbraaksnelheden is te groot om op basis van de beschikbare milieuomstandigheden nauwkeurige voorspelling te doen voor de actueel in het pilotgebied aan te treffen parameterwaarden.
- III.2. Op basis van de gemiddelde eigenschappen van de onderscheiden bodemprofieltypen is de snelheid van verspreiding van verontreinigingen via de deklaag naar het eerste watervoerende pakket berekend. Op basis van deze berekeningen is een zonerings aangebracht in het pilotgebied voor 3 karakteristieke verontreinigingen.
- III.3. Op basis van de geïnventariseerde afbraakconstanten en geschematiseerde milieuomstandigheden in de beschouwde bodemprofieltypen is de afbraak van de karakteristieke verontreinigingen in de deklaag berekend. Het blijkt dat onder de heersende omstandigheden PER goed wordt afgebroken, maar dat zowel Benzene als Vinylchloride slechts in beperkte mate worden omgezet. Op basis van deze berekeningen zijn “grondwaterbelastbaarheidskaarten” samengesteld, die kunnen worden gebruikt voor een zonerings van het gebied en een prioritering van de potentieel verontreinigde locaties.

Generieke beheer(s)strategie – DP IV

- IV.1 Het concept van de generieke beheer(s)strategie is nader omschreven en uitgewerkt in de separate rapportage van de deelprojecten IV en V: DC 05.02.08 “Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer”. Als basis voor de strategie-ontwikkeling zijn vanuit de deelprojecten diverse thematische kaartbeelden samengesteld om de autonome ontwikkeling binnen het pilotgebied in beeld te kunnen brengen. Dit betreft onder andere:

- *kaart met afstroming*
- *kaart met herkomst van grondwater in plangebieden*
- *kaart met locaties potentiële brongebieden*

Uit een eerste analyse van de herkomst van mogelijk verontreinigd grondwater in de plangebieden kwam naar voren dat dit water hoofdzakelijk afkomstig is van infiltratie binnen het plangebied zelf. Op basis hiervan kan geconcludeerd worden dat de autonome ontwikkeling voor wat betreft de verspreiding van mobiele verontreinigingen via het grondwater voor de plangebieden geen actueel probleem is.

In het licht van bovenstaande conclusie zijn er in het kader van deelproject IV geen aanvullende berekeningen uitgevoerd of kaartbeelden samengesteld van eventuele maatregelen scenario's, daar dit een volledig technische oefening zou worden.

- IV.2 Op basis van de in de deelprojecten II en III samengestelde kaartbeelden voor de reistijd van verontreinigd water door de deklaag, kan al een redelijke schatting worden verkregen van de urgentie van eventuele maatregelen. Daarnaast biedt de spreiding in reistijden de mogelijkheid prioriteiten te stellen binnen de maatregelsscenario's.

Ten slotte geven de kaartbeelden met de "grondwaterbelastbaarheid" een beeld van het zelfreinigende vermogen (Natural Attenuation) van de deklaag. Zoals opgemerkt geeft de kaart voor de afbraak van PER een te positief beeld, daar het gevormde afbraakproduct Vinylchloride (VC) minder goed wordt afgebroken onder de in het pilotgebied aangetroffen milieucondities. De verspreiding en afbraak van PER resulteert daardoor waarschijnlijk in een verhoogd verspreidingsrisico voor VC.

Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer – DP V

- V.1. De bodemkwaliteit wordt aangepast aan het gewenste bodemgebruik. In de huidige praktijk wordt uitgegaan van de *maakbare bodem*. Eigenschappen worden aangepast aan de gewenste stedelijke functies en daarmee samenhangende eisen.
- V.2. De bodem kan mede richtinggevend zijn voor de ruimtelijke planvorming, wanneer deze in een breder perspectief wordt benaderd. De bodem moet worden gezien als onderdeel van een lagenbenadering, waarin naast de verkeers- en vervoersnetwerken en de occupatielaag (wonen, werken en recreëren) ook de ondergrond als essentiële laag wordt beschouwd (bodem, water, landschap).

8.3 Aanbevelingen

Branche specifiek brondefinitie - DP I

- I.1. Voor een nadere uitwerking van de beschrijvende statistiek is het wenselijk dat niet alleen de dossiers met een *aangetoonde verontreiniging*, maar ook de dossiers van *schone locaties* worden verwerkt. Waarschijnlijk dienen ook dossiers te worden beschouwd van buiten de regio Rotterdam. Bij deze verbreding dient dan wel rekening gehouden te worden met de verschillen in lokale bodemgesteldheid.
- I.2. Mogelijk kan de systematiek verder worden gegeneraliseerd door te bepalen of er correlaties bestaan tussen vlek grootte en indringingsdiepte en bijvoorbeeld de bedrijfsgrootte, de periode van bedrijvigheid of het aantal werknemers.

Systeemanalyse verspreidingspad – DP II

- II.1. Uit de kalibratie en gevoeligheidsanalyse van het grondwatermodel is naar voren gekomen dat de (diepte)ligging van het oppervlaktewater mede bepalend is voor de lokale afstroming naar dit oppervlaktewater. Daar afstroming naar het oppervlaktewater als een van de hoogste risicoklassen is beschouwd, verdient het aanbeveling de lodingen van de rivieren nauwkeurig(er) te verdisconteren in ondergrond- en grondwatermodel.
- II.2. Uit de modelberekeningen volgt dat in het bijzonder het voorkomen van zandbanen in de deklaag bepalend is voor het risico van verspreiding. Het verdient aanbeveling ter verhoging van de betrouwbaarheid van de modelresultaten het ondergrondmodel verder te detailleren op basis van extra sonderingen.

Processen en transport in de ondergrond – DP III

- III.1. Bij de modellering ten behoeve van de berekening van het verspreidingsrisico dient rekening gehouden te worden met alle relevante stoffen in de afbraakketen. In sommige kaarten van de huidige studie wordt de indruk gewekt dat PER goed wordt afgebroken. Voor de beoordeling van het verspreidingsrisico is dit beeld echter onvolledig. Als een van de afbraakproducten wordt Vinylchloride gevormd (VC). Uit de voor deze stof uitgevoerde berekeningen volgt dat deze stof slechts in zeer beperkte mate wordt afgebroken onder de milieumomstandigheden in het pilotgebied. Het verdient aanbeveling om in het studiegebied aan de hand van gerichte monitoring van enkele (goed onderzochte) verontreinigingspluimen de actuele afbraaksnelheden te bepalen. Wanneer dit wordt gedaan voor verschillende milieumomstandigheden, dan kunnen deze gegevens gebruikt worden om de bandbreedte, zoals die is aangetroffen in de literatuurgegevens, te verkleinen.
- III.2 Het verdient aanbeveling de verificatie van de hypothesen van deelproject III te herhalen wanneer alle analysegegevens van het project BDO beschikbaar zijn.

Generieke beheer(s)strategie – DP IV

- IV.1 Het verdient aanbeveling om de bruikbaarheid van de momenteel beschikbare kaartbeelden te bepalen voor een concreet project. Mogelijk dat een workshop met de geïnterviewde RO-medewerkers daar een goed uitgangspunt voor vormt.

Ruimtelijke Ontwikkeling en Bodembeheer – DP V

- V.1. Om de rol van de ondergrond, als essentieel onderdeel van de lagenbenadering, beter tot zijn recht te laten komen is het aan te bevelen ook informatie aan te leveren over de bodemopbouw, het zettingsgedrag, (geo-)hydrologische kenmerken, archeologische en historische landschappelijke waarden, de ecologische potenties van de bodem en kansen voor ondergronds ruimtegebruik.
- V.2. Het is essentieel de beschikbare bodeminformatie in een hanteerbare vorm op een probleem inzichtelijk wijze te presenteren.

9 Referenties

IGWR 2002

BIO Diep Grondwater; deelrapport 1: modellering, dossiernummer 2000-0640, Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam, concept 2002 Rotterdam.

MR 1998

Milieu op zijn plek; Milieukompas voor plannenmakers en bestuurders, Gemeentewerken Rotterdam, afdeling Milieubeleid, oktober 1998 Rotterdam.

MMG 1998

Draaiboek BOSOM; Organisatie- en financieringsvormen voor bodemsanering, MMG Advies september 1998 's Gravenhage.

MMG 2002

Wegwijzer marktdynamiek bij bodemsanering; Van BOSOM-aanpak naar participatiestelsel, MMG Advies 25 juni 2002 's Gravenhage.

TNO 2002

Welcome Rotterdam; Conceptual model, Boundary conditions and criteria, Principles for assessing management scenario's, september 2002, rapportnummer R2002/585, TNO Environment, Energy and Process Innovation, Apeldoorn.

10 Verklarende woordenlijst

ABIS	: project waarin een werkwijze voor Adaptief Bodembeheer In Steden is uitgewerkt (Delft Clusterproject)
BAGEO	Breed Afwegingskader GE bruik Ondergrond (SKB project)
Bedreigde objecten	: benaming voor gebieden of objecten zoals natuurgebieden, oppervlakte water, woonwijken of het watervoerende pakket, waarvan de kwaliteit bedreigd wordt door verspreiding van verontreinigingen
BDO	project waarbij een Beeld van de Diepe Ondergrond van Rotterdam wordt verkregen doormiddel van bemonstering en analyse van het grondwater. Dit met het oog op de NA -potentie
BEVER	BE leids VER nieuwing bodemsanering
BGW	BodemGE bruiks WA arden
BIO	diverse Bijzonder Inventariserende Onderzoeken (van Gemeentewerken Rotterdam)
BOS	Beslissing Ondersteunend Systeem
BOSOM	BO dem S anering, Ontwikkeling en Marktwerking
BTEXN	aromatische koolwaterstoffen. Een van de in ABIS beschouwde stofgroepen voor mobiele verontreinigingen. Deze groep omvat: Benzeen, Tolueen, Ethylbenzeen, Xylenen en Naftaleen.
DC	Delft Cluster
Deklaag	: bovenste slechtdoorlatende laag in het grondwaterstromingssysteem. Door de afsluitende werking van deze laag is er sprake van spanningswater in de watervoerende pakketten.
(Rivier)donk	: geomorfologische benaming voor een zandlichaam in de ondergrond, die in prehistorische tijden als een duinlichaam is afgezet en daarna is verzonken in klei- en veenafzettingen.
DS+V	Dienst Stadsontwikkeling & Volkshuisvesting
DP	DeelProject
DP-I	Deelproject I: Branche specifieke brondefinitie
DP-II	Deelproject II: Systeemanalyse verspreidingspad
DP-III	Deelproject III: Pocesanalyse – reactorvat

DP-IV	Deelproject IV: Generieke Beheer(s)strategie bodembeheer
DP-V	Deelproject V: Ruimtelijke ontwikkeling en bodembeheer
FEB	Flexibele EmissieBeheersing (NOBIS project)
Freatisch pakket	: doorlatend pakket waarin de grondwaterstand in direct contact met de atmosfeer staat.
Geohydrologie	: studie naar de processen die het grondwaterstromingssysteem bepalen.
Geologie	: studie naar de opbouw en verbreiding van losse afzettingen en gesteentes in de ondergrond.
GHR	Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam
GIS	: Geografisch Informatie Systeem.
Grondwaterstand	: de meest ondiepe grondwaterspiegel.
Hydrogeologie	: studie waarin de opbouw en verbreiding van bodemlagen wordt ingedeeld op basis van hun geohydrologische eigenschappen.
ISV	Investeringsprogramma Stedelijke Vernieuwing
KFR	Kwantificeren Financiële Risico's saneringsvarianten (NOBIS project)
Kwetsbare gebieden	: zie bedreigde objecten
Landgebruik	: inrichting / functie van een bepaald gebied; in onderhavige studie zijn landgebruikstypes ingedeeld op basis van hun hydrologische eigenschappen.
MO	Minerale Olie
NA-potentie	: Natuurlijke Afbraakpotentie van verontreinigingen in de bodem onder invloed van micro-organismen.
Neerslagoverschot	: het deel van de neerslag die uiteindelijk zal infiltreren en het grondwater zal aanvullen.
OBR	OntwikkelingsBedrijf Rotterdam
Oeverwallen	: natuurlijk gevormde verhoging langs de rivier die onder invloed van verschillen in stroomsnelheden bij overstroming van de rivier worden gevormd.
Ontwateringspeil	: niveau onder straten en wegen waarboven het grondwater wordt afgevangen door het stedelijke waterbeheer.
Onverzadigde zone	: zone in de bodem waarin de vaste fase, de gasfase en de

waterfase naast elkaar voorkomen.

- Oppervlaktewater (lichamen)** : sloten, rivieren, meren etc.
- Peilbeheersing** : in peilbeheerste gebieden (polders en droogmakerijen) wordt door middel van een fijnmazig netwerk van sloten en greppels, het oppervlakte waterpeil en de ondiepe grondwaterstand kunstmatig op het gewenste peil gehouden.
- Pilot-gebied** Een gedeelte van de deelgemeente Feijenoord dat als casus is gekozen voor de uitwerking van de ABIS systematiek
- Puntbronnen** : onder puntbronnen worden bronnen van verontreiniging verstaan die vanaf een specifieke plaats of locatie naar de ondergrond emitteren. Een voorbeeld hiervan zijn organische verontreinigingen die bij industriële activiteiten in de bodem terecht kunnen komen. Diffuse bronnen zijn de tegenhanger van puntbronnen; bij deze vorm wordt een verontreiniging over een groot gebied geëmitteerd. Nutriënten uit bemesting in landbouwgebieden zijn een voorbeeld van diffuse bronnen.
- RMK** Resterend risico, Milieurendement en Kosten (NOBIS project)
- ROBIS** Rotterdams BodemInformatieSysteem
- Slechtdoorlatende laag** : bodemlaag waarin slechts zeer geringe stroming kan optreden. Door de grote weerstand zal gezien op regionale schaal alleen verticale stroming plaatsvinden. In de regel reageren pakketten die hoofdzakelijk uit klei- en veen bestaan als slechtdoorlatende laag.
- Stijghoogte** : hoogte waar het grondwater in een watervoerend pakket onder spanning zal stijgen in de peilbuis.
- Stoftransportmodellering** : bij *stoftransportmodellering* wordt onderzocht op welke wijze stoffen door de bodem kunnen worden getransporteerd, die zijn opgelost in het grondwater.
- UBI** Uniforme Bron Indeling
- Verhardoppervlak** : in bebouwde gebieden vormen asfalt en daken van gebouwen een obstakel voor infiltratie van hemelwater naar het grondwater. Het totale oppervlak van asfalt en daken wordt het verharde oppervlak in een bepaald gebied genoemd.
- VOCI** Vluchtige Organische gechloroerde koolwaterstoffen. Een van de in ABIS beschouwde stofgroepen voor mobiele verontreinigingen. Deze groep omvat: Tetrachlooretheen (PER), Trichlooretheen (Tri), Dichlooretheen (CIS) en Vinylchloride (VC)
- Watervoerend pakket** : opeenvolging van goed doorlatende lagen in de bodem. In deze pakketten kan zowel horizontale als verticale stroming optreden.
- Watervoerende laag** : zie watervoerend pakket

Weerstand	: onder weerstand wordt de weerstand voor verticale stroming door een slechtdoorlatende laag verstaan.
Welcome	project waarbij de methodologie voor het beheer van een Megasite wordt uitgewerkt. Voor de Nederlandse casus is gekozen voor het Rotterdamse havengebied (EU/SKB project)
WVP	zie watervoerend pakket

Bijlage 1 Topografische kaart regio Rotterdam



schaal 1:100.000

GeoDelft Postbus 89, 2600 AB Delft
 Telefoon (015) 269 35 00
 Telefax (015) 261 08 21
www.geodelft.nl

ADAPTIEF BODEMBEHEER IN STEDEN


REGIONALE TOPOGRAFIE

datum	2003-07-11	get.	Ros.	Flenaam:	b-si-001	.dwg
CO-750201	gez.	Sman.	datum rev.	2003-07-10		
BIJL. 1	form.	A3	Afdeling:	900		

Bijlage 2 Topografische kaart Feijenoord en Pilotgebied



Copyright Topografische Dienst Emmen
 schaal 1:10.000

 Postbus 69, 2600 AB Delft Telefoon (015) 269 35 00 Telefax (015) 261 08 21 www.geodelft.nl	datum	get.	Bestandsnaam:	.dwg
	2003-07-11	Ros.	b-si-002	
	CO-750201	gez.	datum rev.	
	form.	A3	Ardeeling:	
ACTIEF BODEMBEHEER IN STEDEN	BIJL. 2		900	
KAART PILOTGEBIED ROTTERDAM - FEYENOORD				

Bijlage I: Rapportage deelproject I



Gemeentewerken

Gemeente Rotterdam

Ingenieursbureau

Adaptief Bodembeheer in Steden

Deelproject I: brondefinitie

Datum

21 oktober 2003

Versie

definitief

Oprichtgever

Delft Cluster

Opsteller

G.C. Ypenburg (Gemeentewerken Rotterdam)

J. Jansen (Gemeentewerken Rotterdam)

Projectleider

Dhr B. Sman (GeoDelft)

Projectleider

Dhr J. Verheul (Gemeentewerken Rotterdam)

Inhoudsopgave

1 Inleiding	5
2 Methodiek	7
2.1 Uitgangspunten en begrippenkader	7
2.1.1 Bron	7
2.1.2 Beheersaspecten	7
2.2 Gegevens	8
3 Toepassing	11
3.1 Bedrijfsgegevens	11
3.2 Bodemonderzoekresultaten	11
3.2.1 Samenvatting inventarisatie onderzochte locaties	12
3.2.2 Samenvatting bronkarakterisatie	13
3.2.3 Aandachtspunten en beperkingen gevolgde systematiek	14
3.3 Kaartbeelden brongebieden	15
4 Evaluatie	17
4.1 Conclusies	17
4.2 Aanbevelingen	18
5 Referenties	19

1 Inleiding

Structuur van het project

Het Delft Cluster project **Adaptief Bodembeheer In Steden** [ABIS] behelst de ontwikkeling van een methodiek voor bodembeheer met betrekking tot mobiele verontreinigingen in stedelijk gebied. Een demonstratie van de bruikbaarheid van de methodiek aan de hand van een pilotgebied maakt deel uit van het project. Als pilotgebied is in ABIS gekozen voor het stedelijk gebied van Rotterdam, in de nadere uitwerking toegespitst op het deelgebied Feijenoord. Het project is onderverdeeld in vijf samenhangende deelprojecten:

- I. brondefinitie
- II. fysische karakterisatie transportsysteem
- III. chemische karakterisatie reactorvat
- IV. opstellen en evalueren scenario's voor bodembeheer
- V. wisselwerking tussen ruimtelijke ontwikkeling en bodembeheer

De eerste 3 deelprojecten tezamen leiden tot een model van het object van beheer, de mobiele verontreinigingen in de stedelijke bodem. Dit is toegespitst op de kwantificering van het risico van verspreiding. Deelproject 5 voegt daar de voorwaarden aan toe waarbinnen beslissingen over bodembeheer optimaal bijdragen aan de ruimtelijke ontwikkeling. Deelproject 4 levert het feitelijk eindresultaat, een vergelijkende evaluatie van enkele strategieën voor bodembeheer. De autonome ontwikkeling [niets doen] is een van die varianten. In het resultaat van deelproject 4 komt tot uitdrukking hoe strategische keuzen doorwerken in termen van:

- kosten;
- planning; en
- milieuverdienste/gebruiksruimte.

Doelstelling

Deelproject I, brondefinitie, heeft tot doel informatie over bronnen van mobiele verontreinigingen te ontsluiten, analyseren en te schematiseren. Dit resulteert in een kaart met potentiële bronlocaties en een index die een maat is voor het verspreidingsrisico. Deze kaart dient als invoer voor de modellering.



2 Methodiek

2.1 Uitgangspunten en begrippenkader

2.1.1 Bron

Een bron wordt gedefinieerd door een (gedeelte van een voormalige) bedrijfslocatie waar (mogelijk) een bodemverontreiniging heeft plaatsgevonden. De bron wordt gekarakteriseerd door een op kaart weergegeven oppervlak waarover de verontreiniging zich (mogelijk) heeft verspreid. Daarnaast wordt de bron gekarakteriseerd met een diepte waarop de verontreiniging maximaal is of kan worden aangetroffen. Tenslotte is de aard van de aan te treffen verontreiniging een onderdeel van de karakterisatie. In de huidige brondefinitie is uitgegaan van twee stofgroepen (BTEXN en VOCl).

Bedrijfsinventarisaties

Uitgangspunt voor de methodiek om bronnen te karakteriseren is de beschikbaarheid van een overzicht van bedrijfsactiviteiten die tot op heden hebben plaatsgevonden in het te beheren gebied. In het kader van het landsdekkend beeld is elk bevoegd gezag verplicht een dergelijke inventarisatie uit te voeren. Deze lijst vormt een opsomming van alle plaatsen waar op enig moment in het verleden verontreinigende stoffen in de bodem terecht kunnen zijn gekomen. Iedere betreffende locatie van voormalige industriële activiteit is in principe verdacht en vormt derhalve een potentiële bron. Van deze bronnen beschouwt ABIS alleen die, waar sprake is van mobiele verontreinigingen.

BIO-bedrijven

Als voorloper van het landsdekkend beeld is door Rotterdam een zogenaamd Bijzonder Inventariserend Onderzoek uitgevoerd naar alle (voormalige) bedrijfsterreinen (BIO-Bedrijven [BIO 1999]) in de Rotterdamse regio. Eerder waren al inventarisaties uitgevoerd voor galvaniseerbedrijven (BIO Galvano [BIO 1993]) en chemische wasserijen [BIO 1996] in Rotterdam. Deze inventarisatie bestaat uit een lijst van (voormalige) bedrijfsterreinen, waarbij globaal onder andere de bedrijfsactiviteit, omvang en productieperiode is aangegeven.

2.1.2 Beheersaspecten

Het object van beheer is een bodemvolume, aan het maaiveld begrenst door een grenslijn [gemeentegrens, terreingrens of dergelijke]. Voor mobiele verontreinigingen valt de grens van het beheersobject verder samen met het deel van het geohydrologisch systeem wordt bestreken door stoftransport vanuit bronnen¹. Via een *bron-pad-receptor* analyse kan dit worden vastgesteld met behulp van een geohydrologisch model voor het beheersobject. Bij autonome ontwikkeling [*niets doen* ook *nul-scenario* genoemd] kan de gehele *bron-pad-receptor-zone* worden beïnvloed door de verontreiniging.

¹ *Strikt genomen is er de mogelijkheid dat een beheersgebied deels ook receptor is. Bij integraal beleid wordt de verspreiding vanuit alle relevante bronnen tegelijkertijd beschouwd.*

Milieuambitie

De milieu-ambitie van de beheerder komt tot uitdrukking in:

1. de keuze van het receptorvlak. Het receptorvlak vormt de grens tussen dat deel van het beheersobject dat als reactorvat wordt beschouwd, en waarin geen eisen worden gesteld aan de kwaliteit van bodem en grondwater, en het beschermde deel van het beheersobject.
2. de keuze van het niveau van bescherming voor het beschermde deel. Dit correspondeert met de maximaal toegelaten concentratie verontreiniging in grondwater dat over het receptorvlak uit het reactorvat naar de beschermde zone stroomt.

Bodemonderzoek

Bodemonderzoeksprogramma's zijn erop gericht de actuele bronnen uit de lijst van potentiële bronnen te identificeren. Bodemsaneringsprogramma's zijn erop gericht de risico's van de actuele bronnen tot een aanvaardbaar niveau te reduceren.

Twee belangrijke elementen van het adaptieve beheer zijn:

- de veronderstelling dat een onderzoeksprogramma niet primair gericht moet zijn op het stuk voor stuk onderzoeken van het actuele verspreidingsrisico van potentiële bronnen van mobiele verontreiniging; maar, ten eerste, op het leren van voorgaand onderzoek en ten tweede het karteren van risicobepalende factoren [de kwetsbaarheid van receptoren] om prioriteit van onderzoek vast te stellen
- de gedachte dat sanerende maatregelen niet primair per individuele bron beschouwt dienen te worden, maar de maatregelen zo mogelijk af te stemmen op het totale risico van alle bronnen voor het beheersobject.

Een bodembeheerstrategie is een combinatie van onderzoek en maatregelen die erop zijn gericht voor het te beheren gebied het gecombineerde risico van verspreiding van verontreinigingen tot een maatschappelijk aanvaardbaar niveau terug te brengen.

2.2 Gegevens

Theoretische kans op verontreiniging: UBI en BIO-Bedrijven

Leren van het verleden is het onderwerp van deelproject I. In het theoretisch model van de Uniforme Bron Indeling [UBI, 2001] is al een belangrijke hoeveelheid informatie beschikbaar. Het legt een verband tussen het type bedrijfsactiviteit, de stoffen die daarbij worden gebruikt en de intensiteit van dit gebruik. In combinatie met de bedrijfsinventarisatie (§ 2.1) is daarmee een kaart te maken met de theoretische kans op bodemverontreiniging.

Potentiële bronnen

Uit bedrijfsinventarisatie is dus bekend *waar, wanneer, welke* bedrijfsactiviteit heeft plaatsgevonden. Uit de UBI is per bedrijfsactiviteit bekend welke stoffen er gebruikt worden. De NSX-score duidt de kans aan dat bodemverontreiniging is opgetreden als gevolg van de bedrijfsvoering. Een dergelijke bodemverontreiniging duiden we in ABIS-kader aan als een potentiële bron. Uit een *bron-pad-receptor* analyse volgt dan de bijdrage van iedere potentiële bron aan emissie van verontreiniging naar de gekozen receptor.

Uit de bedrijfsinventarisatie is nog niet bekend wat de omvang is van de bron, met andere woorden *hoe groot* het verontreinigde bodemvolume is en daarmee het emissierisico.

Omvang bron en emissierisico

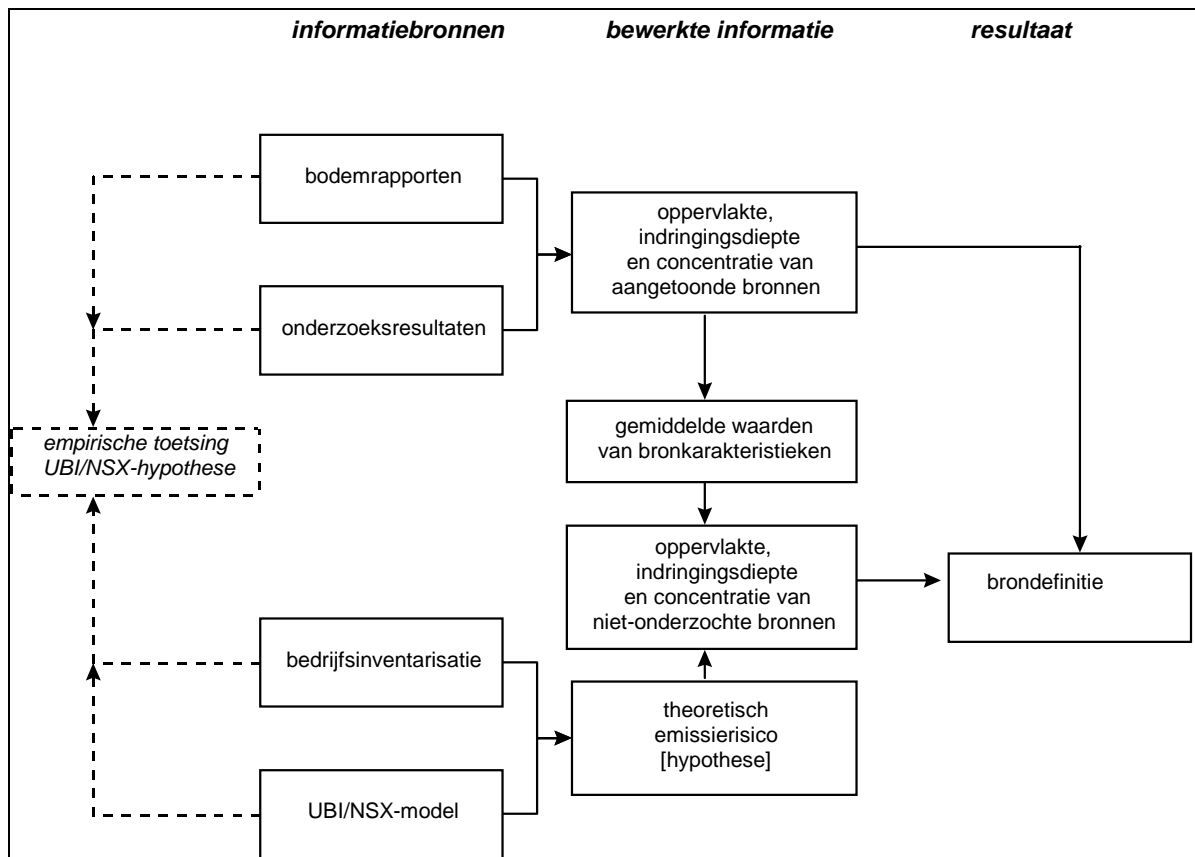
Bevoegde gezagen laten in het kader van de Wet Bodembescherming (WBB) bodemonderzoeken en bodemsaneringen uitvoeren. Daarnaast worden onderzoeken en saneringen uitgevoerd om de bodemhygiënische geschiktheid van locaties voor bouwprojecten te onderzoeken en zonodig te verbeteren. De betreffende rapporten worden door het bevoegd gezag getoetst aan de WBB. Op basis van het uitgevoerde onderzoek kunnen oppervlakte, indringingsdiepte en concentratie per onderzochte bron worden bepaald (A). Deze gegevens kunnen direct worden vertaald in termen van emissierisico.

Voor de niet-onderzochte bedrijfslocaties is niet bekend of er sprake is van een bron. Derhalve dient de *kans* op een bron te worden bepaald (A). Dit is in feite een strategische keuze met betrekking tot bodembeheer.

Door onderzoek naar correlatie tussen NSX-score en daadwerkelijke verontreiniging kan deze keuze worden onderbouwd. In de *worst case* benadering worden alle niet-onderzochte potentiële bronnen als actuele bronnen beschouwt, in een optimistisch scenario geen enkele.

Voor het bepalen van de karakteristieken van potentiële bronnen (B) worden de gemiddelde waarden gebruikt van de wel onderzochte bronnen (A).

De beschreven methodiek is in figuur 1.1 grafisch weergegeven.



Figuur 1.1: werkwijze om te komen tot bepaling brondefinitie op basis van bodemrapporten (A) en bedrijfsgegevens (B)

3 Toepassing

3.1 Bedrijfsgegevens

Stofkeuze en pilotgebied

In overleg met Milieubeleid Rotterdam (MR) en met het WELCOME-project is er voor gekozen om de demonstratie van de methodiek uit te voeren voor twee stofgroepen: de vluchtige gechloreerde koolwaterstoffen (**VOCI**) en de aromatische koolwaterstoffen (**BTEXN**). Tevens is besloten de kaarten met (potentiële) bronnen te produceren voor een deel van de deelgemeente **Feijenoord**.

Vertaling bedrijfsgegevens naar kaartmateriaal

De afdeling Milieubeleid van Gemeentewerken Rotterdam heeft een bedrijfsinventarisatie laten uitvoeren (Bijzonder Inventariserend Onderzoek Bedrijventerreinen [BIO 1999]). Het resultaat van het BIO-bedrijven is een lijst van adressen waar bedrijfsactiviteiten plaatsvinden of hebben plaatsgevonden die verdacht zijn als mogelijke veroorzakers van bodemverontreinigingen. Aangezien binnen BIO Bedrijven per bedrijf ook de verdachte parameters zijn aangegeven is een selectie mogelijk geweest van activiteiten in het proefgebied die verontreinigingen met BTEXN en VOCl kunnen hebben veroorzaakt. De activiteiten zijn vervolgens gekoppeld aan de betreffende NSX-score [UBI 2001] om een *kans op verontreiniging* te genereren.

Om een indruk te krijgen van de mogelijke omvang van een verontreiniging zijn de adresgegevens uit het BIO Bedrijven vertaald naar bedrijfsoppervlakten. Bedrijfsterreinen kleiner dan 1 hectare zijn in hun totaliteit als de oppervlakte van de potentiële bron genomen. Indien het bedrijfsterrein groter is 1 ha zijn de afzonderlijke activiteiten binnen het bedrijf in kaart gebracht.

Aangezien de ruimtelijke indeling van het proefgebied in de loop der tijd grote veranderingen heeft ondergaan, zijn vele voormalige bedrijfsterreinen gelokaliseerd via projecties van oud kaartmateriaal over de huidige topografie.

3.2 Bodemonderzoekresultaten

In het verleden heeft MR in het kader van de WBB een groot aantal bodemonderzoeken en een aantal bodemsaneringen laten uitvoeren in de zogenaamde jaarlijkse uitvoeringsprogramma's. Daarnaast is een groot aantal bodemonderzoeken en bodemsaneringen uitgevoerd om locaties geschikt te maken voor bouwprojecten. MR heeft de betreffende rapporten getoetst aan de WBB.

Een groot deel van de betreffende bodemrapporten is opgenomen in het **ROtterdam's Bodem-informatieSysteem** [ROBIS]. Van die onderzoeken die door het I-bureau van Gemeentewerken Rotterdam [IGWR] zijn uitgevoerd zijn de onderzoeksgegevens eveneens beschikbaar in ROBIS.

Koppeling inventarisatiegegevens en bodemonderzoek

Voor de in ABIS gevolgde methodiek is een koppeling noodzakelijk tussen de bedrijfsinventarisatie en bodemonderzoekresultaten.

Dit betekent dat bij iedere verdachte locatie het meest recente bodemonderzoeksrapport moet

worden gevonden. Om verschillende redenen is het niet mogelijk gebleken om een geautomatiseerde koppeling te maken. Daarom is de volgende weg bewandeld:

1. alle monsters [grond en grondwater] zijn geselecteerd die op BTEXN of VOCI zijn geanalyseerd;
2. voor monsters met een waarde boven de I-waarde is het meest recente door de toetsingscommissie van MR getoetste rapport gezocht;
3. uit deze verzameling rapporten zijn de gemiddelde bronkenmerken vastgesteld;
4. tenslotte is een uitspraak gedaan over de samenhang tussen de door het UBI-model voorspelde kans op bodemverontreiniging en de daadwerkelijk aangetroffen situatie.

3.2.1 Samenvatting inventarisatie onderzochte locaties

grond			grondwater			grond en grondwater		
toetsingswaarde	aantal dossiers	%	toetsingswaarde	aantal dossiers	%	toetsingswaarde	aantal dossiers	%
>S	912	78	>S	290	39	>S	643	51
>T	146	12	>T	438	58	>T	508	39
>I	111	9	>I	24	3	>I	121	9
totaal	1169	100	totaal	752	100	totaal	1272	100

Tabel 1.1: aantal dossiers waar overschrijdingen van de toetsingswaarde voor **BTEXN** is gerapporteerd.

Uit tabel 1.1 volgt dat er in 1272 dossiers een waarde voor de stofgroep BTEXN is gemeten groter dan de streefwaarde (>S). In circa 9% van de dossiers betreft dit een concentratie boven de interventiewaarde (>I). Verhoudingsgewijs betreft dit vaker een grond- dan grondwaterverontreiniging. In 24 van de in totaal 1272 dossiers (minder dan 2%) wordt in het grondwater een overschrijding van de interventiewaarde gemeten.

grond			grondwater			grond en grondwater		
toetsingswaarde	aantal dossiers	%	toetsingswaarde	aantal dossiers	%	toetsingswaarde	aantal dossiers	%
>S	118	62	>S	617	82	>S	643	79
>T	41	21	>T	97	13	>T	126	15
>I	32	17	>I	37	5	>I	50	6
totaal	191	100	totaal	751	100	totaal	819	100

Tabel 1.2: aantal dossiers waar overschrijdingen van de toetsingswaarde voor **VOCI** is gerapporteerd.

Uit tabel 1.2 volgt dat het totaal aantal dossiers waar voor de stofgroep VOCI een concentratie wordt gemeten boven de streefwaarde kleiner is dan voor BTEXN (819 versus 1272). Ook is het aantal

dossiers waarbij een concentratie boven de interventiewaarde wordt gemeten relatief kleiner met 6% van het totaal aantal dossiers (versus 9% bij BTEXN). Uit het overzicht blijkt verder dat de stofgroep VOCl eerder aanleiding geeft tot een overschrijding van de interventiewaarde in het grondwater. In absolute zin overtreft het aantal van 37 aangetroffen dossiers (concentratie in grondwater >I) die van BTEXN (24) duidelijk. Bij de stofgroep VOCl blijkt in 37 van de 819 dossiers (circa 4,5%) sprake te zijn van een interventiewaarde overschrijding in het grondwater.

De resultaten geven aan dat op 5 tot 10% van alle onderzochte locaties verontreiniging boven de I-waarde in grond en grondwater wordt aangetroffen. Op 2 tot 5% van de locaties betreft dit een overschrijding van de Interventiewaarde in het grondwater. Deze laatste categorie van locaties zijn met name bepalend voor het risico van verspreiding zoals dat in het kader van ABIS wordt beschouwd.

Per bedrijfscategorie zijn geen statistisch onderbouwde uitspraken mogelijk over de trefkans. Om te komen tot een statische onderbouwing is het noodzakelijk om ook de rapporten te beschouwen behorend bij schone locaties. Daarnaast is het waarschijnlijk noodzakelijk een grotere verzameling van dossiers te beschouwen, dan alleen beschikbaar voor de regio Rotterdam.

3.2.2 Samenvatting bronkarakterisatie

Uit de onderzoeksrapporten zijn de volgende gemiddelde afmetingen voor BTEXN-bronnen afgeleid (tabel 1.3):

<i>activiteit</i>	<i>n</i>	<i>D</i>	<i>V</i>	<i>A=V/D</i>
benzinstation	8	3,9	891,9	173,2
tanks	3	3,3	746,7	210,1
scheepswerf	1	1,8	360,0	200,0
gasfabriek	3	5,2	3366,7	650,0
stortplaats	2	9,3	8001,5	1081,4
vatenspoelinrichting	1	2,4	2500,0	1041,7
leidingentrace	1	1,5	55,0	36,7
oliehandel	1	6,5	2850,0	438,5
<i>totaal</i>	<i>20</i>	<i>4,4</i>	<i>2062,2</i>	<i>392,3</i>
<i>standaarddeviatie</i>		<i>3,2</i>	<i>2678,9</i>	<i>390,2</i>

Tabel 1.3: beschrijvende statistiek vlekparameters voor BTEXN bronnen

Op grond van deze statistieken is gekozen om voor de regio Rotterdam de volgende representatieve BTEXN-bron te definiëren: een volume van 2000 m³, een oppervlakte van 400 m² en een gemiddelde diepte van 5 m.

Uit de onderzoeksrapporten zijn de volgende gemiddelde afmetingen voor VOCl-bronnen afgeleid (tabel 1.4):

<i>activiteit</i>	<i>n</i>	<i>D</i>	<i>V</i>	<i>A=V/D</i>
chemicalienhandel	1	4,5	100	22,2
chemische wasserij	9	16,5	812	49,2
galvaniseerbedrijf	1	6	950	158,3
onbekend	1	6,8	2500	367,6
<i>totaal</i>	<i>12</i>	<i>13,8</i>	<i>904,0</i>	<i>82,6</i>
<i>standaarddeviatie</i>		<i>63,0</i>	<i>2903,2</i>	<i>182,4</i>

Tabel 1.4: beschrijvende statistiek vlekparameters voor VOCl bronnen

Op grond van deze statistieken is gekozen om voor de Rotterdamse regio de volgende representatieve VOCl-bron te definiëren: een volume van 1000 m³, een oppervlakte van 100 m² en een gemiddelde diepte van 10 m. De categorie chemische wasserijen vormt een duidelijke subpopulatie met een bovengemiddelde indringingsdiepte. Deze hangt waarschijnlijk samen met het optreden van zaklagen wanneer zware VOCl's als tri en per zich als puur product verspreiden in de bodem.

In bijlage 1 zijn, voor de beschouwde stofgroepen de onderliggende dossiers samengevat.

3.2.3 Aandachtspunten en beperkingen gevolgd systematiek

De verdachte locaties uit het BIO Bedrijven zijn nagelopen op de eventueel op dat adres uitgevoerde bodemonderzoeken. Wanneer er op de bedrijfslocatie een bodemonderzoek is uitgevoerd, waarbij geen verontreinigingen zijn aangetroffen met BTEXN of VOCl is de activiteit van de lijst afgevoerd. Dit geldt ook voor de activiteiten die een verontreiniging met genoemde stoffen hebben veroorzaakt met waarden die de interventiewaarde niet overschrijden.

Wanneer uit bodemonderzoeken is gebleken dat de bodem tot boven de interventiewaarde is verontreinigd met BTEXN en VOCl en deze verontreiniging nog niet, of slechts gedeeltelijk is gesaneerd, is de (rest)verontreiniging als bron aangemerkt.

Voor voldoende onderzochte bronnen zijn de onderzoeksresultaten gebruikt voor het bepalen van de bronkarakteristieken. Niet of nog niet onvolledig onderzochte bronnen zijn gelijk verondersteld aan de representatieve bron voor de betreffende stofgroep.

In de momenteel gevolgde werkwijze is geen rekening gehouden met de periode waarin een bepaalde activiteit heeft plaatsgevonden. Aan de potentiële bronlocaties is dan ook geen ouderdom als kental toegekend.

Een belangrijk aandachtspunt bij de uitwerking van de methodiek van de brondefinitie betreft het ontstaan van drijf- of zinklagen. Dit zijn lagen van puurproduct, die mede als gevolg van het voorkomen van verstoringen in de bodem aanleiding kunnen zijn voor een sneller dan verwachte

verspreiding van verontreinigingen. Vooral voor de stofgroep VOCL werd verwacht dat door de aanwezigheid van zandpalen en zandgeulen een meer dan evenredige verspreiding in de verticaal zou optreden. Dit vermoeden wordt bevestigd op basis van de uit de bodemonderzoekrapportages afgeleide bronkarakteristieken. Zo wordt voor de diepte van BTEXN een waarde bepaald van 5 m-mv, terwijl dit voor VOCl 10 m-mv is. Daarnaast kent de onbekende BTEXN verontreiniging een oppervlak van 400 m², terwijl dit voor VOCl juist beperkt is tot 100 m². Hieruit valt af te leiden dat de vorming van lagen van puur product mede van invloed is geweest op de bepaling van de kentallen. Opgemerkt moet worden dat vanuit het risico van verspreiding naar het diepere grondwater, de aanwezigheid van VOCl als puur product in combinatie met een eventuele verstoring van de slecht doorlatende lagen in de deklaag dit type verontreiniging in de hoogste risicoklasse doet belanden.

Opmerkingen

- BTEXN en VOCl worden regelmatig ook gemeten als er op grond van het UBI/NSX-model geen aanleiding toe is [breed analysepakket in verband met beeld van achtergrondwaarden voor de bodemkwaliteitskaart];
- veel locaties verkeren nog in de fase van het Nader Onderzoek, hierdoor zijn er nog geen gegevens over de omvang van de verontreiniging bekend. Deze gegevens zijn dan ook niet in de statistieken in tabellen 1.3 en 1.4 opgenomen;
- voor galvaniseerbedrijven en chemische wasserijen zijn Bijzondere Inventariserende Onderzoeken (BIO's) uitgevoerd [BIO 1993 en BIO 1996]. Er is waarschijnlijk sprake van een oververtegenwoordiging van deze branches in de tabel;
- op grond van de resultaten van de inventarisatie is alleen voor de categorieën benzinestations (n=8) en chemische wasserijen (n=9) een uitspraak mogelijk over gemiddelde kenmerken van de bron. Deze uitspraak heeft een beperkte betrouwbaarheid vanwege de geringe omvang van de steekproef.

3.3 Kaartbeelden brongebieden

Met betrekking tot verdachte locaties [potentiële bronnen] moet de bodembeheerder besluiten of en hoe ermee rekening wordt gehouden. Er zijn op hoofdlijnen 3 keuzemogelijkheden om de geïnventariseerde gegevens te vertalen naar kaartbeelden:

1. bekende brongebieden [= door onderzoek aangetoond]
2. bekende + *alle* potentiële brongebieden (worst case);
3. bekende + *selectie* van potentiële brongebieden. Selectie gebaseerd op de kans van een emissie naar bodem en grondwater boven een bepaalde waarde.

Voor het pilotgebied zijn de niet-onderzochte locaties zijn met behulp van het UBI-model ondergebracht in de klassen:

- activiteiten met een grote kans op verontreiniging ($G > 750$ uit UBI-model)
- activiteiten met een kleine kans op verontreiniging ($G < 750$ uit UBI-model)

Voor elk van deze situaties is een overzichtskaart gemaakt voor het pilotgebied Feijenoord. Dit betreft de in bijlage 2 opgenomen figuren I-3.1 t/m I-3.6. In figuur I-3.7 staan de locaties aangegeven van de bekende bronnen. De bronnen op deze kaart zijn gebruikt voor beschrijving van de bronkarakteristieken t.b.v. de modellering in deelproject II. Het gaat hierbij om de volgende locaties c.q. onderzoeken:

- 1: Kieboomterrein, BTEX-bron [Kieboom 1999]
- 2: Piekstraat 60, BTEXN-bron [Piekstraat 1998]
- 3: Pretorialaan 6, VOCl-bron [Pretorialaan 2001]
- 4: Rosestraat 8, VOCl-bron [Rosestraat 1998]

In figuur I-3.1 zijn de bekende bronlocaties voor de stofgroep BTEXN weergegeven. Wat opvalt is dat voor een aantal bekende bronnen de diepte waarop de verontreiniging wordt aangetroffen significant groter is dan de karakteristieke waarde voor niet onderzochte locaties (5 m-mv). In het noordoostelijk deel van Feijenoord wordt de verontreiniging zelfs gemeten op een diepte van 40 m-mv. Daarnaast wordt op enkele (grotere) locaties de verontreiniging aangetroffen op 10 m-mv. In figuur I-3.2 zijn naast de bekende bronlocaties ook de potentiële bronlocaties met een grotere kans van het ontstaan van een bodemverontreiniging weergegeven. Voor deze laatste locaties zijn de gegevens voor de karakteristieke bron gebruikt (diepte 5 m-mv, oppervlak 400 m²).

In figuur I-3.3 tenslotte zijn naast alle bekende locaties ook alle locaties weergegeven waarbij op basis van de UBI systematiek verwacht mag worden dat er BTEXN is gebruikt. Alle potentiële bronnen zijn wederom weergegeven op basis van de gegevens van de karakteristieke bron.

In figuur I-3.4 zijn de bekende bronlocaties voor de stofgroep VOCl weergegeven. Wat opvalt is dat de twee bekende locaties ook bekend zijn als brongebieden voor de stofgroep BTEXN. Bij de bron in het noordoostelijk deel van Feijenoord wordt de verontreiniging op zeer grote diepte gemeten 40 m-mv. In figuur I-3.5 zijn naast de bekende bronlocaties ook de locaties met een grotere kans op bodemverontreiniging weergegeven. Voor deze laatste locaties zijn de gegevens voor de karakteristieke bron gebruikt (diepte 10 m-mv, oppervlak 100 m²).

In figuur I-3.6 tenslotte zijn naast alle bekende locaties ook alle locaties weergegeven waarbij op basis van de UBI systematiek verwacht mag worden dat er VOCl is gebruikt. Alle potentiële bronnen zijn wederom weergegeven op basis van de gegevens van de karakteristieke bron.

4 Evaluatie

4.1 Conclusies

1. Het blijkt goed mogelijk te zijn om op basis van de beschikbare bedrijfsinventarisaties een overzicht samen te stellen van locaties, waar uit de aard van de bedrijfsactiviteiten, mogelijk een bodemverontreiniging zou kunnen zijn ontstaan. Wanneer bij de bedrijfsinventarisatie gebruik is gemaakt van de UBI-systematiek en aan de activiteit een NSX-score is toegekend, dan is het mogelijk onderscheid te maken naar potentiële bronlocaties met een bepaalde verwachtingswaarde ten aanzien van het ontstaan van een verontreiniging.
2. Door gebruik te maken van rapportages van uitgevoerde bodemonderzoeken is voor de twee beschouwde stofgroepen een bronkarakterisatie uitgevoerd. Wanneer van een bronlocatie geen nadere gegevens bekend zijn, dan kunnen op basis van deze karakterisatie voor het Rotterdamse gebied toch een gemiddeld oppervlak en een diepte van voorkomen van de verontreiniging worden toegekend. Hiermee zijn de minimaal benodigde gegevens beschikbaar om een modellering van het verspreidingsrisico te kunnen uitvoeren.
3. Een belangrijk aandachtspunt bij de uitwerking van de methodiek van de brondefinitie betreft het ontstaan van drijf- of zinklagen. Vooral voor de stofgroep VOCL werd verwacht dat door de aanwezigheid van zandpalen een meer dan evenredige verspreiding in de verticaal zou zijn opgetreden. Dit stemt overeen met de afgeleide bronkarakteristieken. Zo wordt voor de diepte van BTEXN een waarde bepaald van 5 m-mv, terwijl dit voor VOCl 10 m-mv is. Daarnaast kent de gemiddelde BTEXN verontreiniging een oppervlak van 400 m², terwijl dit voor VOCl beperkt is tot 100 m². Hieruit valt af te leiden dat de vorming van lagen van puur product mede van invloed is geweest op de bepaling van de kentallen. Opgemerkt moet worden dat vanuit het risico van verspreiding naar het diepere watervoerende lagen, de aanwezigheid van VOCl als puur product in combinatie met een eventuele verstoring van de slecht doorlatende lagen in de deklaag dit type verontreiniging in de hoogste risicoklasse behoort.
4. De kwaliteit van de kaart met potentiële bronlocaties wordt in hoge mate bepaald door de betrouwbaarheid van de uitgevoerde bedrijfsinventarisatie. De mogelijkheid om aan deze locaties een specifieke bronkarakterisatie toe te kennen is mede afhankelijk van de beschikbaarheid van bodemonderzoeksgegevens voor die activiteit. In de uitgevoerde pilot kwam naar voren dat er onvoldoende bedrijfsactiviteit gerelateerde gegevens beschikbaar waren met betrekking tot bodemverontreiniging om te komen tot een statistisch onderbouwde karakterisatie.

4.2 Aanbevelingen

1. Wanneer geredeneerd vanuit het eindresultaat van ABIS de noodzaak bestaat de betrouwbaarheid van de bronkarakterisatie te vergroten, dan is het noodzakelijk meer dossiers te beschouwen. Waarschijnlijk dienen dan ook andere dossiers te worden beschouwd dan die van Rotterdam. Bij deze verbreding dient dan wel rekening gehouden te worden met de verschillen in lokale bodemgesteldheid.
2. Voor een nadere uitwerking van de beschrijvende statistiek is het wenselijk dat niet alleen de dossiers met een *aangetoonde verontreiniging*, maar ook de dossiers van *bekend schone locaties* worden verwerkt.
3. In de momenteel gevolgde werkwijze is geen rekening gehouden met de periode waarin een bepaalde activiteit heeft plaatsgevonden. Aan de potentiële bronlocaties is dan ook geen ouderdom als kental toegekend. Wanneer er meer dossiers worden beschouwd zou het aspect van de ouderdom mede in beschouwing genomen kunnen worden.
4. Het UBI model geeft een goede indicatie van de risico's voor emissie naar grond en grondwater gebaseerd op (voormalige) bedrijfsactiviteit. Deze indicatie is gebaseerd op stoffeigenschappen gerelateerd aan het productieproces. Om tot een meer accurate schatting van de risico's te komen zal er een vertaling gemaakt moeten worden naar daadwerkelijke emissies naar grond en grondwater (zoals verwoord in bovenstaande punten 1 en 2). Om deze vertaling generiek te houden zou per branche bepaald kunnen worden of er een correlatie is tussen bedrijfsgrootte, periode van bedrijvigheid (techniek), aantal werknemers en vlek grootte. Hiermee zou vervolgens op basis van een beperkte verscheidenheid aan gegevens, relatief eenvoudig een accurate ruimtelijke dimensies voor de vlek kunnen worden geschat.

5 Referenties

BIO 1993

Bijzonder inventariserend onderzoek naar galvaniseerbedrijven in Rotterdam (BIO Galvano), Gemeentewerken Rotterdam, juli 1993

BIO 1996

Bijzonder inventariserend onderzoek naar chemische wasserijen in Rotterdam (BIO Chemische Wasserijen), IM Gemeentewerken Rotterdam, juli 1996

BIO 1999

Bijzonder inventariserend onderzoek voormalige bedrijfsterreinen in Rotterdam, Arcadis, januari 1999 (BIO Bedrijven)

Kieboom 1999

Aanvullend nader onderzoek ter plaatse van de Emplacementsweg fase K (Kieboom) te Rotterdam, Gemeentewerken Rotterdam, april 1999, dossier nummer: 1995-0018.

Piekstraat 1998

Nader bodemonderzoek ter plaatse van de Piekstraat 43-61 (Mirandol) te Rotterdam, Gemeentewerken Rotterdam, 3-9-1998, dossier nummer: 1996-0079

Pretorialaan 2001

HO/OO Pretorialaan 16 te Rotterdam, Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam, dossier nummer 2001-0695.

Rosestraat 1998

Nader onderzoek ter plaatse van de Rosestraat 8 te Rotterdam, Gemeentewerken Rotterdam, dossiernummer 1998-0326.

UBI 2001

Uniforme Bron Indeling (UBI) potentieel bodemvervuilende activiteiten, Register, Arcadis, April 2001



Bijlage 1 Samenvatting geïnventariseerde dossiers

- I-1.1 Dossiers BTEXN
- I-1.2 Dossiers VOCI

I 1.1 BTEXN dossiers

nr	KODE_ Max TC_FO Van RMAT toets	aard	adres	bedrijfsacti viteit	periode	vocl	diepte filter	omvan g	antropo geen	samenst elling	opmerkingen
1	01-45-03	3 HO/OO	Zeemanstr 8	metaalwar enfabr.	1960- 1980	g+gw > l	3,0 m- mv	_	4,4 m- mv	klei/zand	
2	00-01-16	3 HO/OO	Bovenstr 162	chem. wasserij	1965- 1976	gw > l	7-7 m- mv	_		klei/puin/ zand	
3	03-10-10	3 NO	Pr. Hendrikweg	stortplaats	1953- 1967						geen vocl
4	02-49-07	3 HO/OO	Ossensissew eg 67	chem. wasserij	1973- 1991	g+gw > l	8 m-mv	_	4,0 m- mv	klei	
5	02-46-11	3 SO	Pupillenstr 8	galvano		g+gw > l	6 m-mv	950 m3	1,5 m- mv	zand/pui n	99-50-03 (NO)
6	02-31-10	3									
7	02-20-27	3 NO	Zenostr 182-190	chem. wasserij	1972- 1992	g+gw > l	17,5 m- mv	300 m3	2,5 m- mv	zand	
8	02-07-08	3 NO	Burg. Hoffmanpl. 39	chem. wasserij	1965- 1990	g+gw > l	22 m- mv	360 m3	3 m-mv	zand/klei /puin	
9	02-02-15	3 HO/OO	Hudsonstr. 141-157								geen vocl
10	02-02-14	3 NO	Gouwstr 51	chem wasserij	1972- 1980	g+gw > l	7 m-mv	1150 m3	2 m-mv	zandige klei	
11	02-02-12	3 NO	Goudse Rijweg 14- 16	chem. wasserij	1975- 1984	g+gw > l	16 m- mv	1800 m3	3,5 m- mv	zand/klei /puin	
12	96-37-07	3 OO	diverse	bio galvano							15 locaties
13	01-47-06	3 HO/OO	Zwaanshals 558-570	chem. wasserij	1977- 1994	g+gw > l	7 m-mv	_	2,5 m- mv	zand/pui n	
14	96-44-04	3 NO	Overschie weg 21-23	verffabriek	1912- 1978	gw > l	5 m-mv		2 m-mv	zand/pui n	
15	01-35-12	3 NO	Slaghekstr 153	chem. wasserij		g+gw > l	19 m- mv	1900 m3	1 m-mv	zand	
16	01-34-24	3 SP	Schiedamse weg 114	chem. wasserij		g+gw > l	5m -mv	50.000 m3	4,8 m- mv	zand/pui n	98-09-10(NO)
17	01-19-11	3 HO/OO	Schiedamse dijk 140	???		g+gw > l	5,5 m- mv	_	4,5 m- mv	zand puin	
18	01-19-08	3 NO	Hooglandstr 131-143	chem. wasserij	1974- 1982	g+gw > l	17,5 m- mv	1200 m3	3 m-mv		
19	01-06-	3 HO/OO	Gr.	verffabriek	1977-	gw<T					licht veront met

nr	KODE_ Max TC_FO Van RMAT toets	aard	adres	bedrijfsacti viteit	periode	vocl	diepte filter	omvan g	antropo geen	samenst elling	opmerkingen
09			Visserijstr 37		1988						EOX
20 01-01- 16	3 NO		Krabbedijke hof 50	chem. wasserij	1969- 1975	g+gw >l	5 m-mv m3	200	1,3 m- mv		zand /puin
21 00-30- 08	3 HO/OO		Rochussens tr 48	chem. wasserij	1942- 1953	g+gw >l	17,5 m- mv	_	4,5 m- mv		zand/pui incl ververij n/klei
22 00-26- 11	3 SP		Giessenweg 79	apparaten fabriek		g+gw >l	_	_	_	_	_
23 00-19- 01	3 nulonde rz		Neptunusstr 8								geen vocl veront.
24 00-02- 11	3 NO		Nw Crooswijkse weg 66	chem. wasserij	1975- 1991	g+gw >l	21,8 m- mv	300 m3	2,3 m- mv		zand/klei /puin
25 01-48- 04	3 HO/OO		Huydecoper str	????		gw>l	6,8 m- mv	2500 m3			99-39-01
26 98-50- 09	3 HO/OO		Dordtselaan 200	chem. wasserij	1972- 1991	g+gw >l	19,7 m- mv	_	1,5 m - mv		zand/pui n
27 99-48- 09	3 NO		Rosestraat 8	chem. wasserij	1942- 1954	gw>l	16,7 m- mv	100 m3	8,4 m- mv		klei/zand incl ververij
28 99-43- 03	3 HO/OO		Achterhaven 37	chem. wasserij	1900- 1984	g+gw >l	8,28 m- NAP		2,1 m- mv		puin/zan d/klei
29 99-39- 01	3 HO/IO		Huydecoper str								zie 01-48-04
30 99-34- 09	3 nulonde rzoek		Keilestr 9c	chemicalie nhandel		gw>l	4,5 m- mv	100 m3	3,5 m- mv		puin/zan d/klei
31 99-30- 07	3 HO/OO		Oostzeedijk 182-186	chem. wasserij	1950- 1975	g+gw >l	16,34m- NAP		3,5 m- mv		puin/zan d/klei
32 99-20- 19	3 HO/OO		Abtsweg 49	chem. wasserij	1971- 1993	gw>l	20,3 m- NAP		2 m-mv		puin/zan d/klei
33 99-17- 03	3 HO/OO		Achterhaven 52-66	chem. wasserij	1942- 1979	g+gw >l	5,19 m- NAP		2 m-mv		zand/klei /puin
34 99-14- 16	3 HO/OO		Noorderhav enkade 87c	chem. wasserij	1973- 1990	gw>l	6,66 m- NAP		3,7 m- mv		zand/pui n/klei
35 99-06- 07	3 HO/OO		Beijerlandse laan 182	chem. wasserij	1972- 1979	gw>l	9,20 m- NAP		3 m-mv		puin/zan d/klei
36 99-05- 09	3 HO/OO		Passerelstra at ong	chem. wasserij		g+gw >l	5,12 m- NAP		3,5 m- mv		puin/zan d/klei
37 96-26- 18	3 nulonde rzoek		Ceintuurbaa n 213			g+gw >l					
38 99-02- 05	3 HO/OO		Burg. Hoffmanstra	chem. wasserij	1965- 1990	gw>l	10,39 m-NAP		7,15 m- mv		puin,zan d,klei

nr	KODE_	Max	aard	adres	bedrijfsacti	periode	vocl	diepte	omvan	antropo	samenst	opmerkingen
	TC_FO	Van			viteit			filter	g	geen	elling	
	RMAT	toets										
				at 39								
39	99-50-03	3	HO/OO	Pupillenstr 8								zie 02-46-11
40	98-49-07	3	HO/OO	Zenostr 182-190								zie 02-20-27
41	98-49-05	3	HO/OO	Slaghekstr 153								zie 01-35-12
42	98-48-02	3	HO/OO	Gouwstr 51								zie 02-02-14
43	98-39-18	3	SV	Naussauhav en	chemicalie nhandel			gw>l				schuddebeurs
44	98-29-02	3	NO	Naussauhav en	apparaten fabriek			gw>l				2 vlekken Ermaf en Schuddenbeurs
45	98-11-07	3	HO/OO	Bergweg 196	chem. wasserij	1902- 1976		gw>l 10 m- NAP		3,5 m- mv		zand/klei /puin
46	98-09-10	3	NO	Schiedamse weg 114								zie 01-34-24
47	98-08-14	3	HO/OO	Rosestraat 8								zie 99-48-09
48	97-44-05	3	HO/OO	Provenierssi ngel 66	chem. wasserij	1941- 1986		g+gw <T				lichte veront voel
49	99-02-11	3	HO/OO	Benthuizerst raat 27	chem. wasserij	1979- heden		gw>l 20,22 m-NAP		3 -mv		zand

I 1.2 VOCl –dossiers

nr	KOD	Max aard	adres	activiteit	periode	btex	diepte	omvang	onderkant	klei/zand	opmerkingen	
	E TC FOR MAT	Van toet s									antrop ogeen	
1	00- 07-07	3 HO/OO	3e Schanstraat	machiefabriek		btex<T(gw)					olievlek	
2	99- 03-02	3 SV	Aelbrecht skade 145								carbolineum vlek	
3	00- 17-14	3 SP	Airportbaan	tankstation		btex(g+ gw)	3,5 m - mv	250 m2				
4	00- 32-13	3 SP	Almstraat 4- 8	oliehandel		btex>I(gw)	6,5 m - mv	2850 m3				
5	95- 03-06	3 Ho/nul- onderzo ek	Aluminiumst raat 10-16	garage		geen btex						
6	95- 41-17	3 HO/IO	Berghaven 11-18	gasfabriek	1880- 1960	btex>I(g+gw)	3,5 m - mv	500 m2	3,33m +NAP		zand/klei/puin	
7	92- 10-08	3 OO	Bijlstraat 2			tex<T						
8	01- 50-04	3 HO/OO	Bovendijk 180								olievlek	
9	02- 38-06	3 HO/OO	Bovenstraat 27-29	benzinestat ion	1927- 1977	x>I (gw)	1,5 m - mv	niet bepaal d	1m - mv		zand, puin	
10	02- 06-11	3 VO/SP	Branco van Dantzigstra at			x<T(gw)						
11	02- 14-09	3 NO	Bree 95	benzine- installatie	1927- 1982	b>I(gw)	1,5 m - mv	200 m3	1,5 m - NAP		puin, koolas, zand, klei	
12	99- 15-14	3 SP	Charloissek ade			geen btex						
13	01- 07-08	3 SP	chemiehave n	leidingentrac e		btex>I(g)	1,5 m - mv	55 m3			vopak	
14	95- 14-10	3 HO/IO	Crooswijkse straat	koolaslagen		btex<T(gw)						
15	01- 48-07	3 monitori ng	Crooswijkse weg 131			x<I(gw)						
16	96- 17-16	3 nulonder zoek	Delftweg 46- 52	benzine- installatie	?	btex>I(gw)	4,0 m - mv		0,95m -mv		klei/puin/grind/ koolas	2 mogelijke bronnen
17	02-	3 HO/OO	Dijkstraat	teerproducte	1931-	btex<T(gw)						



nr	KOD	Max aard	adres	activiteit	periode	btex	diepte	omvan	onderk	klei/zand	opmerkingen
	E	Van						verontr g	ant		
	TC	toet									
	FOR	s							antrop		
	MAT								ogeen		
	33-07		8,10	nfabriek	1939	g+gw)					
18	01-28-08	3 HO/OO	Doelwater								olievlek
19	02-41-04	3 HO/OO	Dordtsestraa tweg 689- 701	vulcaniseeri nrichting		b,X<T(g+gw)					
20	95-26-10	3 NO/SO	Empalceme ntsweg	ophoging							min. olieverontrei niging
21	95-42-13	3 nulonder zoek	Galileistraat (EZH)			btex<T(gw)					
22	96-09-08	3 VO	Geysendorf erweg 66	benzine- installatie		btex<T(gw)					min. olievlak
23	99-16-10	3 HO/IO	Gordelweg			geen btex					
24	00-39-04	3 VO/NO	Hoestraat 33-35	tank	?	b>l(g) mv	2,0 m - 20 m3 mv	2m - mv		klei/zand/puin	
25	95-39-13	3 AO	Hogenwaard straat 11-49	carboleneum ?		b<l(gw)					
26	98-47-06	3 SV	Hoofdweg 139			geen btex					
27	99-05-13	3 SP	Hoofdweg 157			BTEX< T(gw)					
28	00-01-26	3 HO/OO	Hoogenwaar dstraat eo	stortplaats	1948- 1955	btex>l(gw)	3,5 m - 500m3 mv	4,5 m - mv		kleilig zand/stortmatr iaal	
29	02-06-15	3 SP	Hoodrift 38- 50	olietank		geen btex					
30	99-21-12	3 SP	Huniadijk 2	tankstation		btex>l(gw)	3,5 m - 150 m3				
31	96-08-08	3 VO	Ijsselmond aan 175								niet geanalyseer d op BTEX
32	00-03-03	3 SP	Ijsselmonds elaan 362	tankstation							
33	02-49-06	3 HO/OO	Insulindestra at 240-256	garage met benzine- installatie	1951- 1991	x,e>l(g +gw)	2m - mv	5m - NAP		puin, koolas, zand, klei	
34	00-	3 NO/SO	Keilestraat	tanks	1950-	x>l(g)	4,5 m - 220				

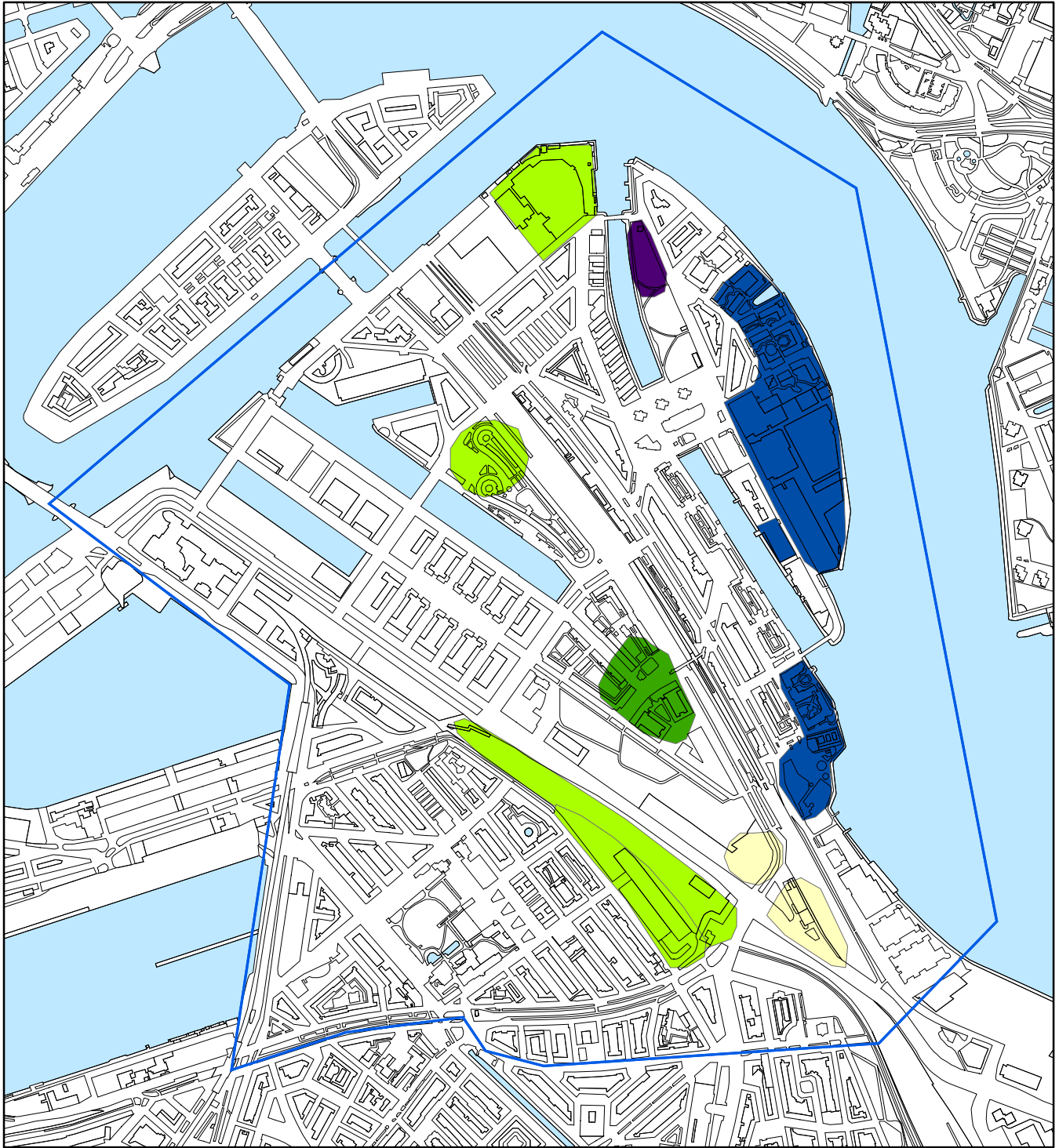
nr	KOD	Max	aard	adres	activiteit	period	btex	diepte	omvan	onderk	klei/zand	opmerkingen
	E	Van				e		verontr	g	ant		
	TC	toet										
	FOR	s								antrop		
	MAT									ogeen		
	30-10			2-10		1983		mv	m3			
35	01-40-09	3	SP	kop Sluisjesdijk								olievlek
36	00-99-10	3	nulonder zoek	Landfarm Maashaven NZ			btx<T(g +gw)					
37	98-42-17	3	HO/IO	Langeweg			geen btex					
38	99-15-02	3	AO	Langeweg			tx<T(g w)					
39	93-10-02	3	MO	Lathyrusplei n 3	HBO-tank		x<T(g)					olievlek
40	01-46-09	3	SP	Maashaven			betx<T(gw)					
41	96-36-03	3	HO/IO	Mahlersingel	niet bekend		btex<l(gw)					
42	01-51-11	3	HO/OO	Marconistra at 12	tanks	1953- 1965	btex>l(g+gw)	3,50 m	2000			
43	00-03-05	3	SP	Merseyweg 96	metaalbewer king		btex<T(gw)					olievlek
44	96-08-01	3	VO	Montrealweg 15	chem. industrie	1962- heden	b+t>l(g +gw)	2,5 m - mv		1,5 m - mv	sintels, zand/klei/koold eeltjes	
45	98-47-08	3	SP	Neckarhave n			nafta>l					
46	96-48-05	3	NO	Nieuwe Binnenweg	ret-remise							olievlek
47	98-42-21	3	NO	Noordereilan d			geen btex					
48	98-40-14	3	NO	Noordsingel 113	gasfabriek	1872- 1897	btex>l(g+gw)	5m - mv	4500 m3	5,0 m - mv	klei/zand/puin	
49	98-39-08	3	HO/OO	Nozemanstr aat 6-16								olievlek
50	98-42-14	3	NO	Oudedijkse Schiekade 2-136			geen btex					olievlek
51	96-18-05	3	NO	Overschiese Kleiweg 561- 565	vatenspeolin richting	1933- 1980	ex>l(g w)	2,4 m - mv	2500 m3	1,5 m - mv	zandige klei/puin, koolas,	niet volledig uitgekarteerd

nr	KOD	Max aard	adres	activiteit	periode	btex	diepte	omvang	onderkant	klei/zand	opmerkingen
	E	Van						g	antrop		
	TC	toets							ogeen		
	FOR	s									
	MAT										
verfresten											
52	02-03-13	3 VO	Overschiese weg 52-55			geen btex					
53	98-49-11	3 NO	Overschiese weg 68			geen btex					olievlek
54	01-44-13	3 HO/OO	Overschiese weg 74			btex<T(gw)					
55	03-10-10	3 NO	Pr Hendrikweg	stortplaats	1953-1967	btex>I(gw)	15m - mv	11.000 m3	0 m +NAP	zand, klei, puin, koolas	
56	02-07-04	3 VO	Pr Willemweg	parkeerplaats		geen btex					
57	01-19-13	3 HO/OO	Rechter Rottekade 357			bx<T(g w)					
58	00-16-09	3 SP	Rivierstraat 149	tankstation		btex>I	9 m - mv	450 m2			
59	00-16-08	3 OO	Scheibroeks esingel 1	tankstation	1961-heden	btex>I(g+gw)	4,0 m - mv		2,3 m - mv	zand, klei, veen	
60	95-11-04	3 HO/OO	s-Gravenweg 752			t<T(gw)					
61	96-30-07	3 nazorgplan	s-Gravenweg naast 752								betreft restverontreiniging olie
62	91-22-02	3 OO	Sluisjesdijk 127	motorenwerkplaats	1973-?	geen btex					min. olie-verontreiniging
63	02-09-11	3 NO	Spangesekade	houthandel	1899-1932	btex<T(gw)					olievlek
64	00-40-03	3 SP	Stadionweg 91	scheepswerf	1915-1980	btex>I(g+gw)	1,8 m - NAP	200 m2	1,8 m - NAP		
65	01-01-15	3 HO/OO	Strandweg			tx<T(g w)					
66	99-10-08	3 NO	Tuinlaan 41	gasfabriek	1921-1950	b>I(gw)	7m - NAP	550 m2			
67	00-29-08	3 SP	Valkeniersweg 79								olievlek
68	98-50-10	3 HO/OO	Walenburgerhof			btex<T(gw)					

nr	KOD	Max aard	adres	activiteit	periode	btex	diepte	omvang	onderkant	klei/zand	opmerkingen
	E TC FOR MAT	Van toet s					verontr g				antrop ogeen
69 98- 46-07		3 SP	Walenburgh of 17	tankstation		btex>l	5 m - mv	640 m3			
70 02- 10-09		3 NO	Walravenstr aat 135	benzine stati on	1962- 1990	B>l(gw)	1,6 m - mv	200 m3	1,5 m - NAP	klei, zand. koolas, puin	
71 03- 05-04		3 NO	Walravenstr aat e.o.	benzine stati on		b>l(g+g w)	3.1 m - mv	20 m3			
72 00- 20-07		3 SP	Weissenbru chlaan 10	tankstation	1956- heden	btex(g+ gw)	4,0m - mv	250 m2			2 btex vlekken
73 00- 01-19		3 SV	Weteringstra at 62-108	gasfabriek		geen btex					
74 00- 29-04		3 SP	Zaagmoleng ebied								olievlek
75 01- 02-07		3 VO	Zaagmolenk ade 214	garagebedrij f		tx<T(g w)					
76 94- 04-05		3 NO	Zwaanshals 56			geen btex					geen btex na herbemonste ring
77 93- 07-02		3 hist. onderz.									geen analyses
78 95- 20-27		3 IO				t<T(gw)					

Bijlage 2: Kaartbeelden overzicht brongebieden

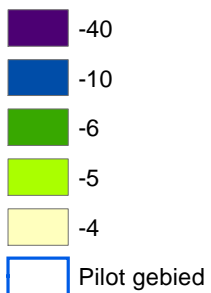
- Figuur I 3.1 BTEXN: bekende verontreinigingslocaties
Figuur I 3.2 BTEXN: bekende + potentiële kansrijke verontreinigingslocaties
Figuur I 3.3 BTEXN: bekende + alle potentiële verontreinigingslocaties
- Figuur I 3.4 VOCl: bekende verontreinigingslocaties
Figuur I 3.5 VOCl: bekende + potentiële kansrijke verontreinigingslocaties
Figuur I 3.6 VOCl: bekende + alle potentiële verontreinigingslocaties
- Figuur I 3.7 Voorbeeldlocaties bekende BTEXN (2x) en bekende VOCl (2x) verontreiniging

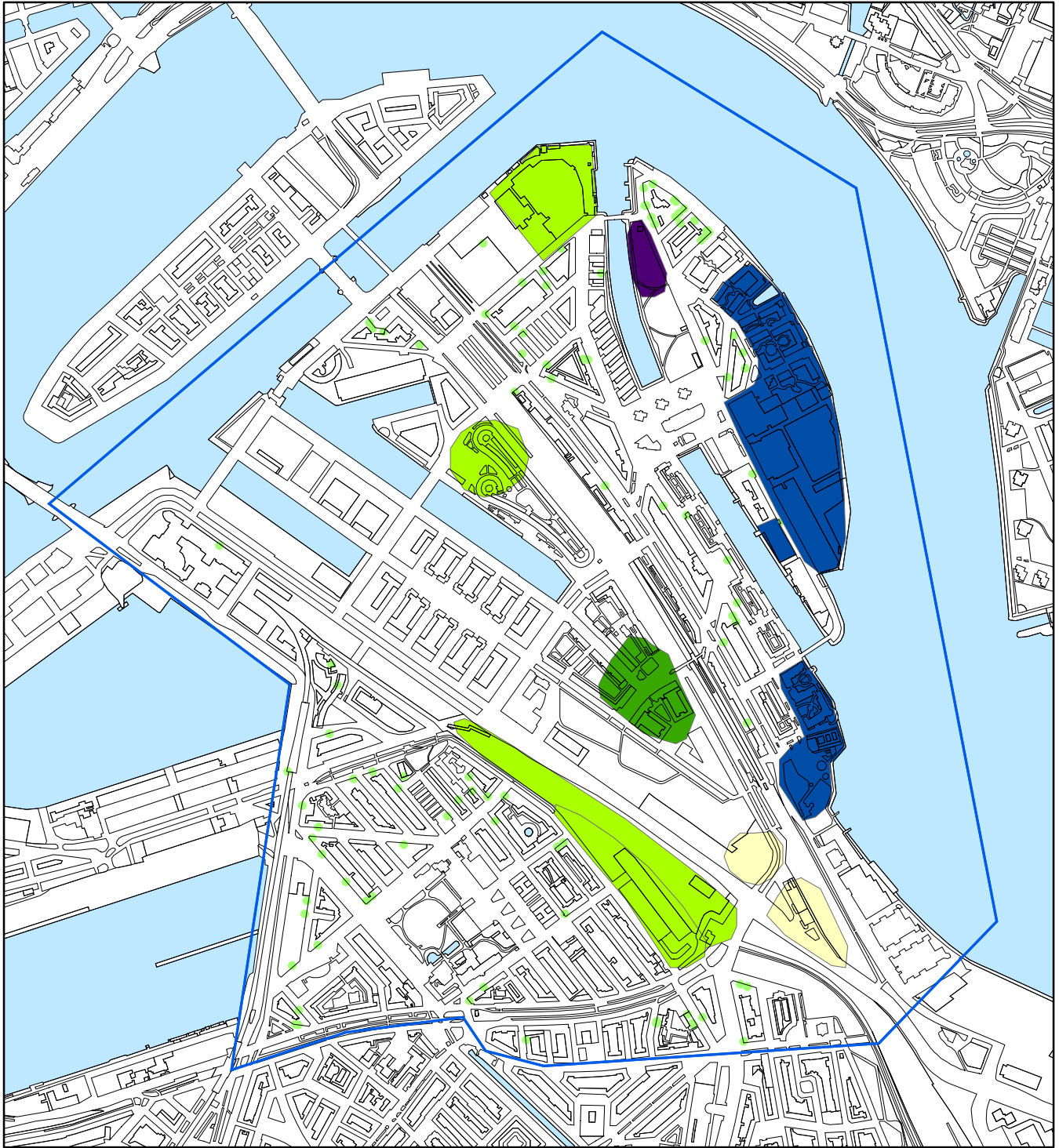


ABIS; deelproject I

figuur I-3.1: bekende verontreinigingslocaties voor BTEXN

diepte zwaartepunt van de verontreiniging (m-mv)

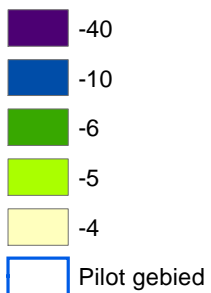


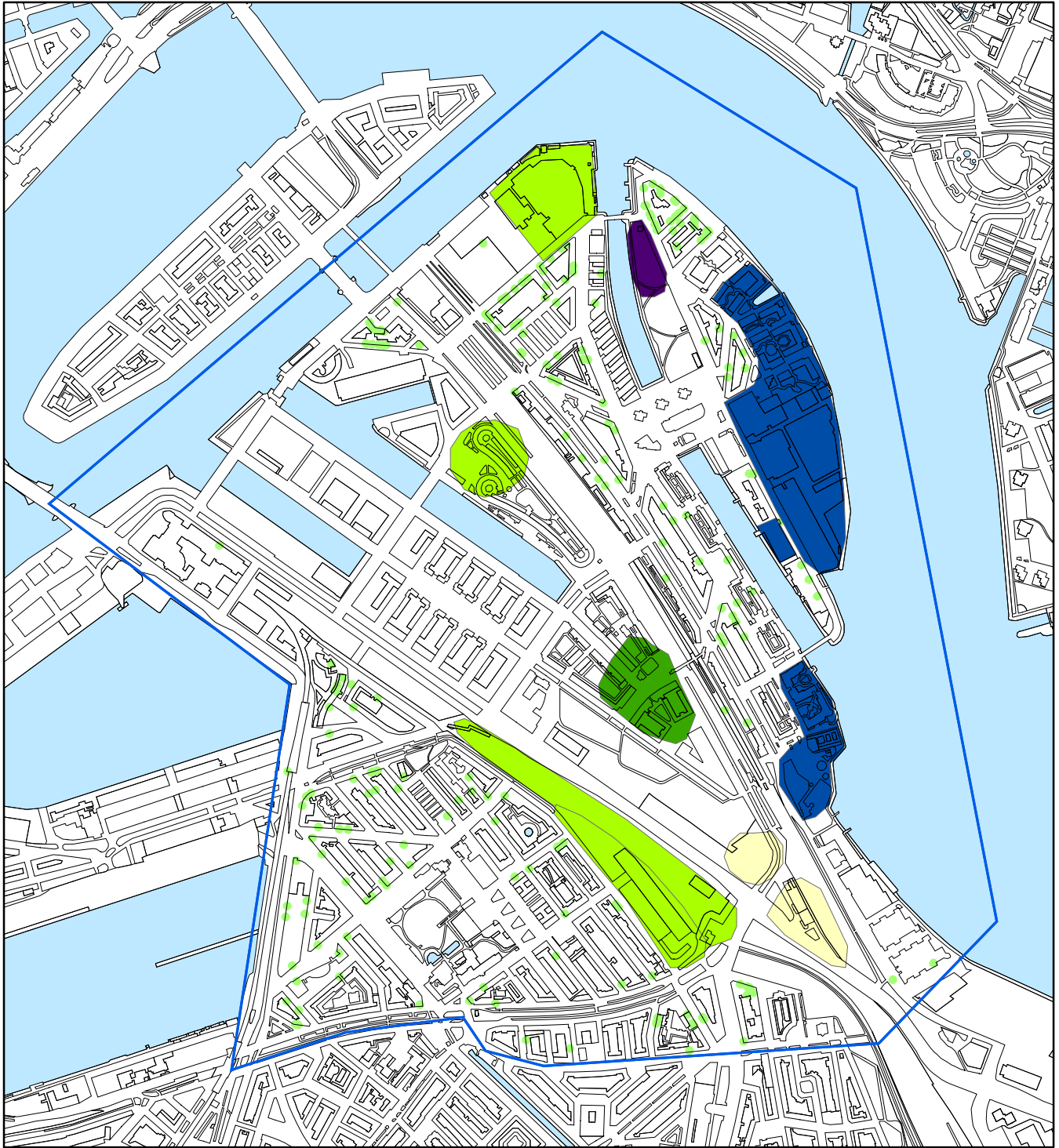


ABIS; deelproject I

figuur I-3.2: bekende en hypothetisch kansvolle verontreinigingslocaties voor BTEXN

diepte zwaartepunt van de verontreiniging (m-mv)

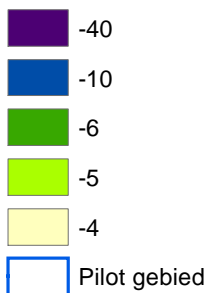


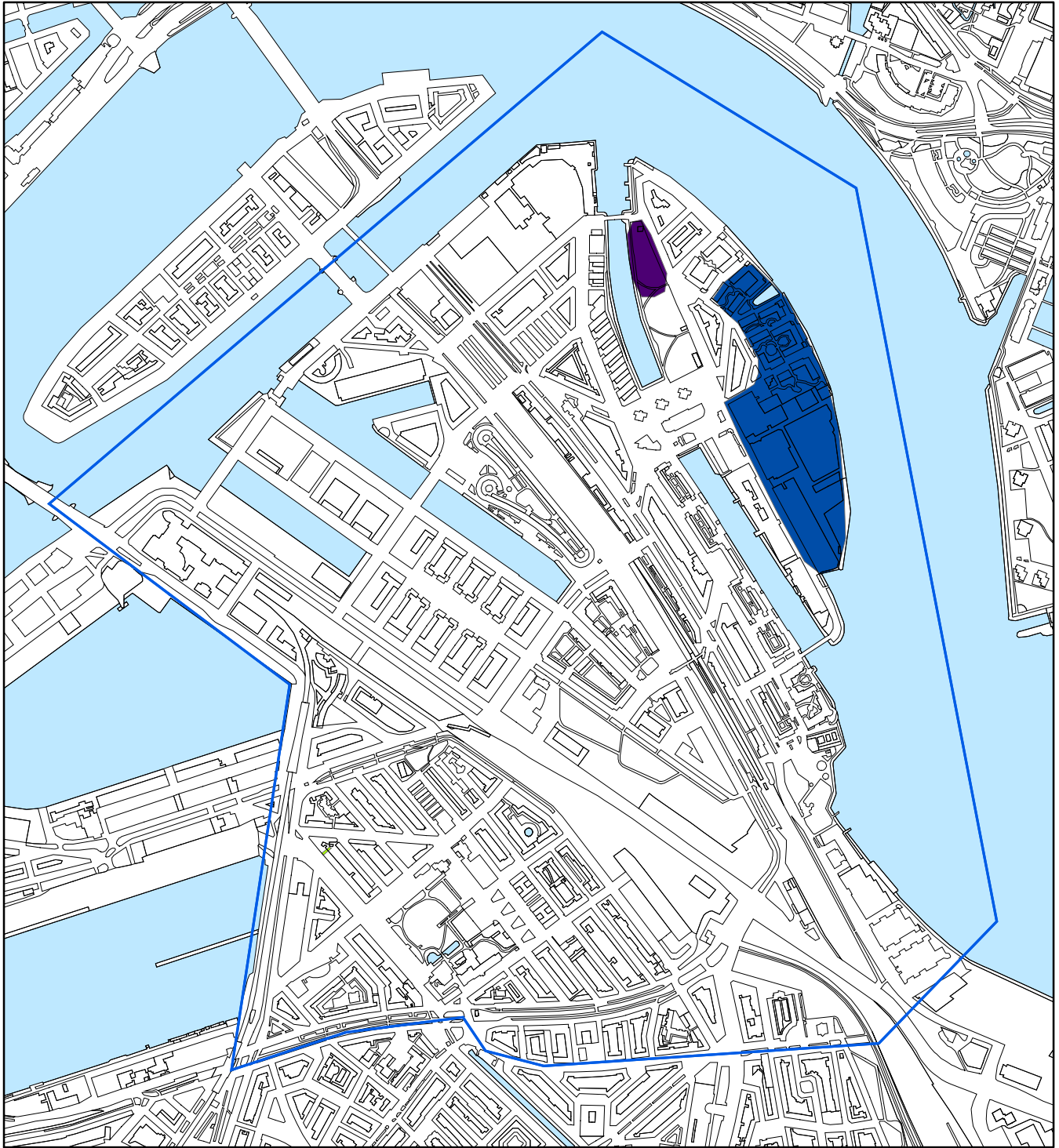


ABIS; deelproject I

figuur I-3.3: bekende en alle hypothetische verontreinigingslocaties voor BTEXN (worst case)

diepte zwaartepunt van de verontreiniging (m-mv)

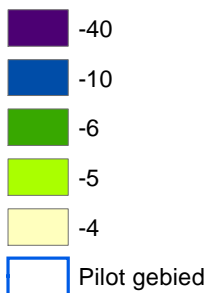


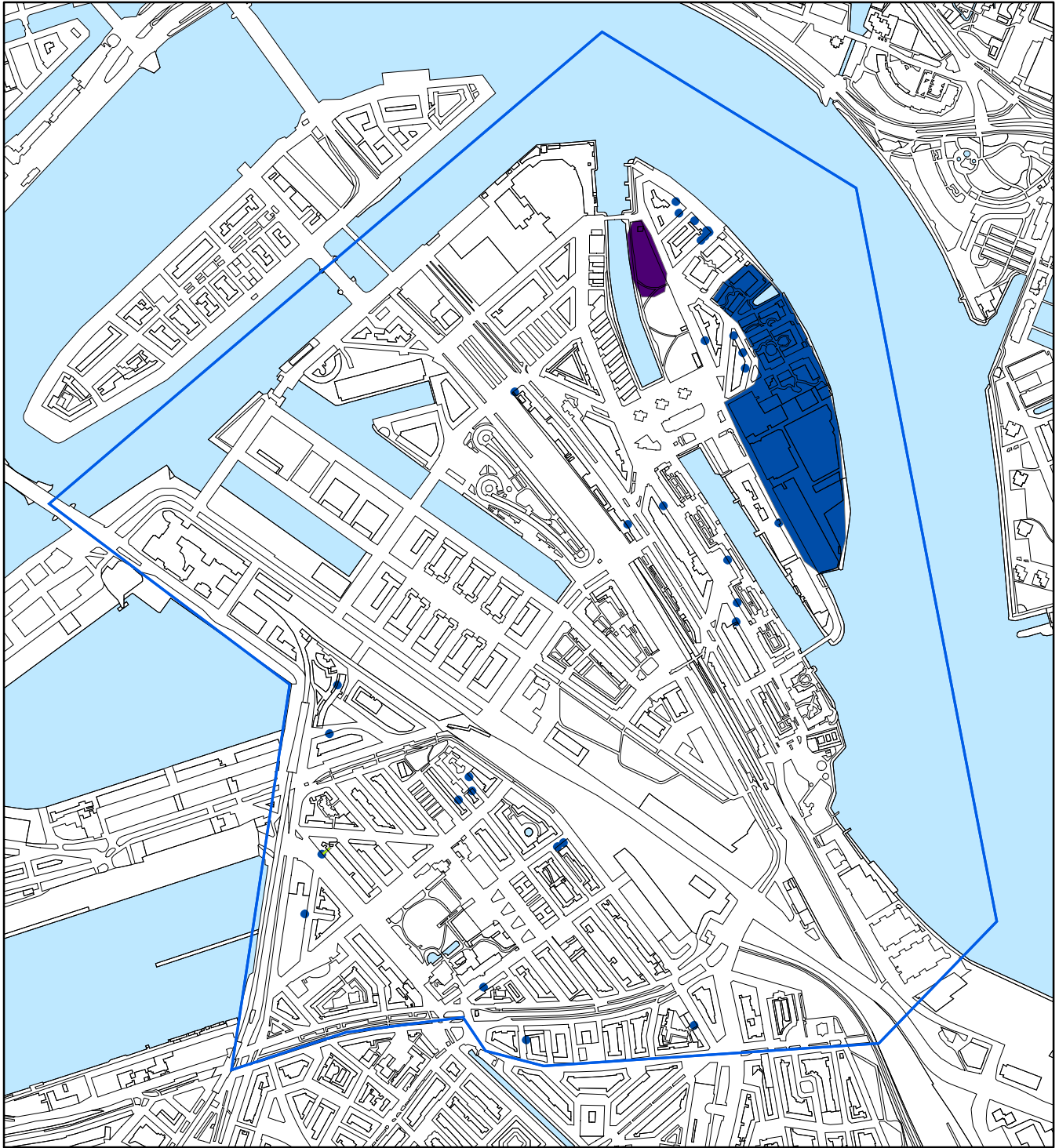


ABIS; deelproject I

figuur I-3.4: bekende verontreinigingslocaties voor VOCI

diepte zwaartepunt van de verontreiniging (m-mv)

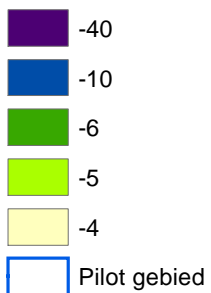


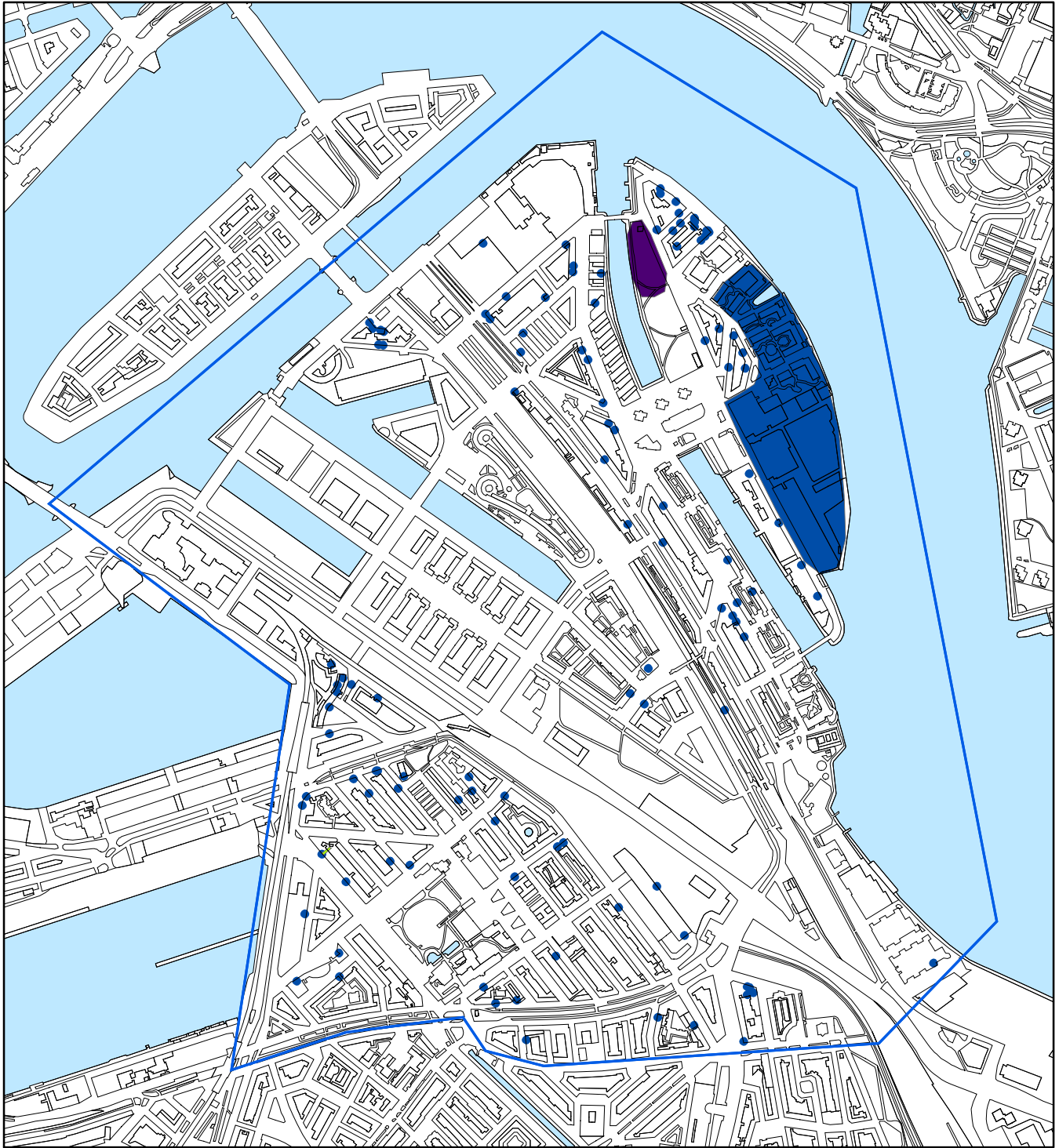


ABIS; deelproject I

figuur I-3.5: bekende en hypothetische kansvolle verontreinigingslocaties voor VOCI

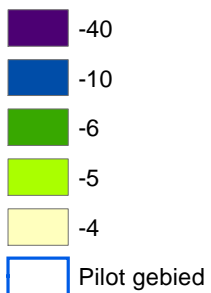
diepte zwaartepunt van de verontreiniging (m-mv)

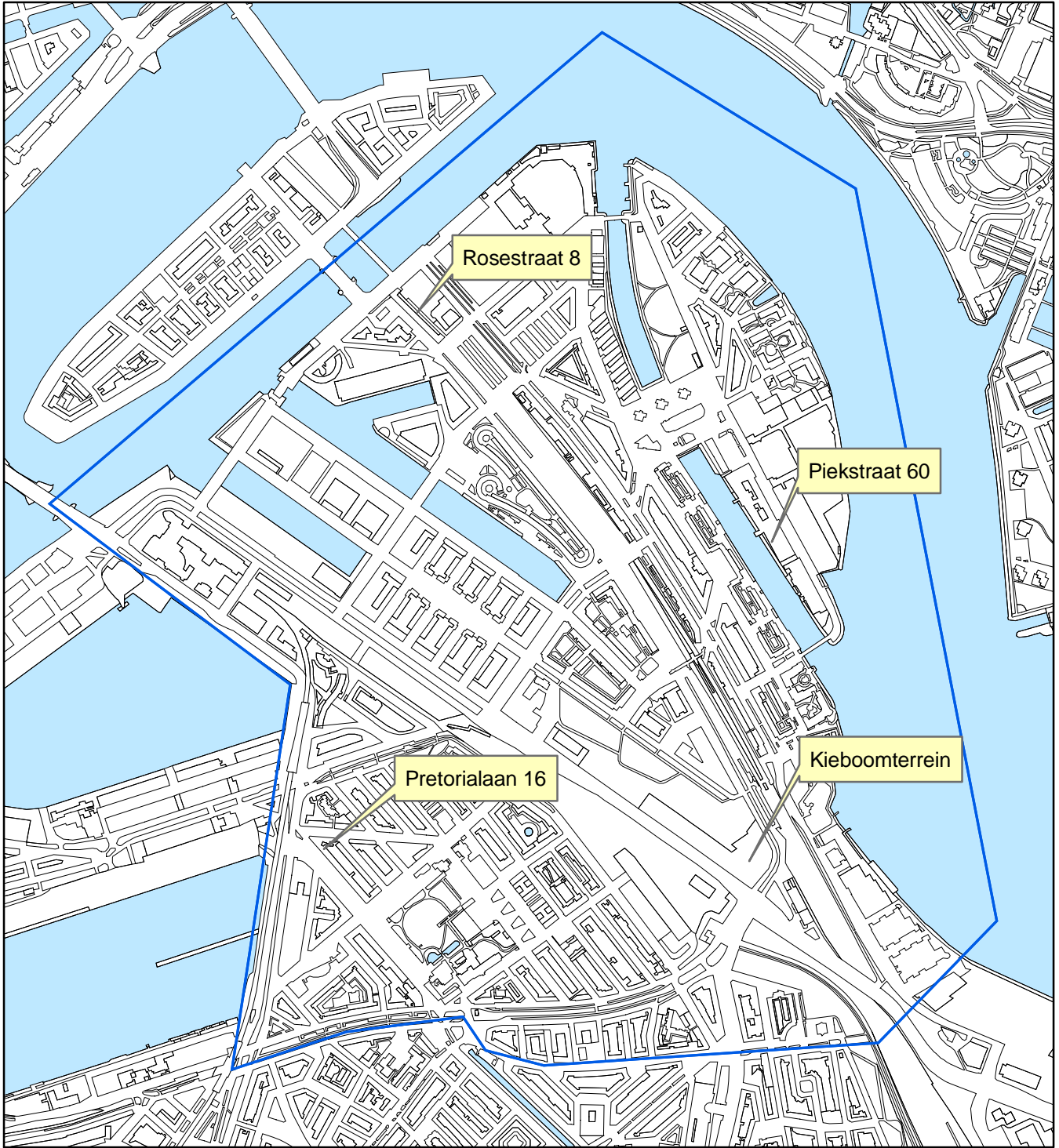




ABIS; deelproject I

figuur I-3.6: bekende en alle hypotetische verontreinigingslocaties voor VOCl (worst case)
 diepte zwaartepunt van de verontreiniging (m-mv)



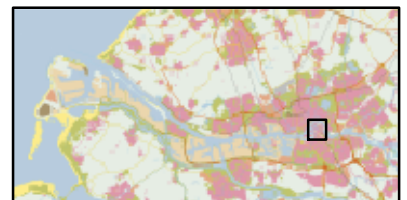


ABIS; deelproject I

figuur I-3.7: voorbeeldlocaties

 Pilot gebied

250 125 0 250 Meters

Bijlage II: Rapportage deelproject II



Gemeentewerken

Gemeente Rotterdam

Ingenieursbureau

Adaptief Bodembeheer in Steden

Deelproject II: Pad, grondwaterstroming in pilotgebied Feyenoord

Datum

20 november 2003

Versie

definitief

Opdrachtgever

Delft Cluster

Delft

Opsteller

E.R. van Nieuwkerk

G.C. Ypenburg

Projectleider

J.M.A. Streng

J.M.C. Verheul

Inhoudsopgave

1. Perspectief	7
1.1 Inleiding	7
1.2 Doelstelling	7
1.3 Aanpak	7
1.3.1 Locatie; pilotgebied	8
1.3.2 Bronnen	8
1.3.3 Ondergrondmodel	9
1.3.4 Grondwatermodel	9
1.3.5 NA-potentie van de ondergrond	9
1.3.6 Stoftransportmodel	9
2. Grondwater in Rotterdam	11
2.1 Regionale grondwaterstroming	11
2.2 Hydrogeologie	12
2.3 Zoet / zout grensvlak in het grondwater	14
3. Modellerings grondwater in Feyenoord	15
3.1 Modelgebied en netwerk	15
3.1.1 Omvang modelgebied	16
3.1.2 Verfijning	16
3.2 Geohydrologische lagen en randvoorwaarden	17
3.2.1 Antropogene zandlaag (modellaag 1)	17
3.2.2 Holocene deklaag (modellaag 2 t/m 5)	18
3.2.3 Eerste watervoerend pakket	19
3.2.4 Eerste slechtdoorlatende laag en dieper	19
3.3 Neerslagoverschot	19
3.4 Topsysteem (oppervlaktewater)	19
3.4.1 Rivieren, plassen/meren	20
3.4.2 Polders/peilbeheersingsgebieden	21
3.4.3 Stedelijke gebieden en havens zonder peilbeheersing	21
3.5 Kalibratie en gevoeligheidsanalyse	21
3.5.1 Kalibratieperiode	22
3.5.2 Gevoeligheidsanalyse	24
3.5.3 Resultaten van de kalibratie	25
3.6 Stoftransportmodellering	26



3.6.1 Processen	26
3.6.2 Stoffen	26
3.6.3 Modelling	27
3.7 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek	30
3.7.1 Grondwaterstromingsmodellering	30
3.7.2 Stoftransportmodellering	30
4. Impressies	31
4.1 Afstroming	32
4.2 Kwel en infiltratie	34
4.3 Herkomst grondwater in plangebieden	36
4.4 Grondwaterbelastbaarheid	38

Literatuur

Verklarende woordenlijst

Bijlagen

- Bijlage II.1: Pilotgebied Deelgemeente Feyenoord**
- Bijlage II.2: Zoet zout grensvlak van grondwater in watervoerende pakketten**
- Bijlage II.3: Overzicht grondwatermodel Feyenoord**
- Bijlage II.4: Bodemprofieltypes ingedeeld als geohydrologische eenheden**
- Bijlage II.5: Beschrijving stromingssituatie bij de havens**
- Bijlage II.6: Kalibratieresultaten grondwatermodel**
- Bijlage II.7: Maaiveldhoogtes Pilotgebied**
- Bijlage II.8: Theorie stroombaananalyse**

1. Perspectief

1.1 Inleiding

Verontreinigende stoffen verspreiden zich naar de omgeving en kunnen (potentieel) *kwetsbare objecten* bedreigen. Verspreiding vindt in horizontale en in verticale richting plaats via stedelijke ophooglagen (lokationiveau), holocene zand- en kleilagen (buurt- en wijkniveau) en het eerste watervoerend pakket (regionaal niveau). Inzicht in verspreidingspaden is essentieel voor een goed begrip van verspreidingsnelheden (urgentie). Het kan tevens worden gebruikt bij een geclusterde bronaanpak (welke paden leiden tot hetzelfde object) en het ontwerpen van een toekomstige beheersstrategie voor mobiele verontreinigingen (monitoring van processen en bewaking van kwetsbare objecten).

Om de samenhang tussen de diverse aspecten te onderzoeken zijn 5 deelprojecten geformuleerd (DPI t/m DPV). Voorts is er een onderzoek gaande om de reactiviteit van de diepe ondergrond in beeld te brengen (Beeld Diepe Ondergrond, BDO).

1.2 Doelstelling

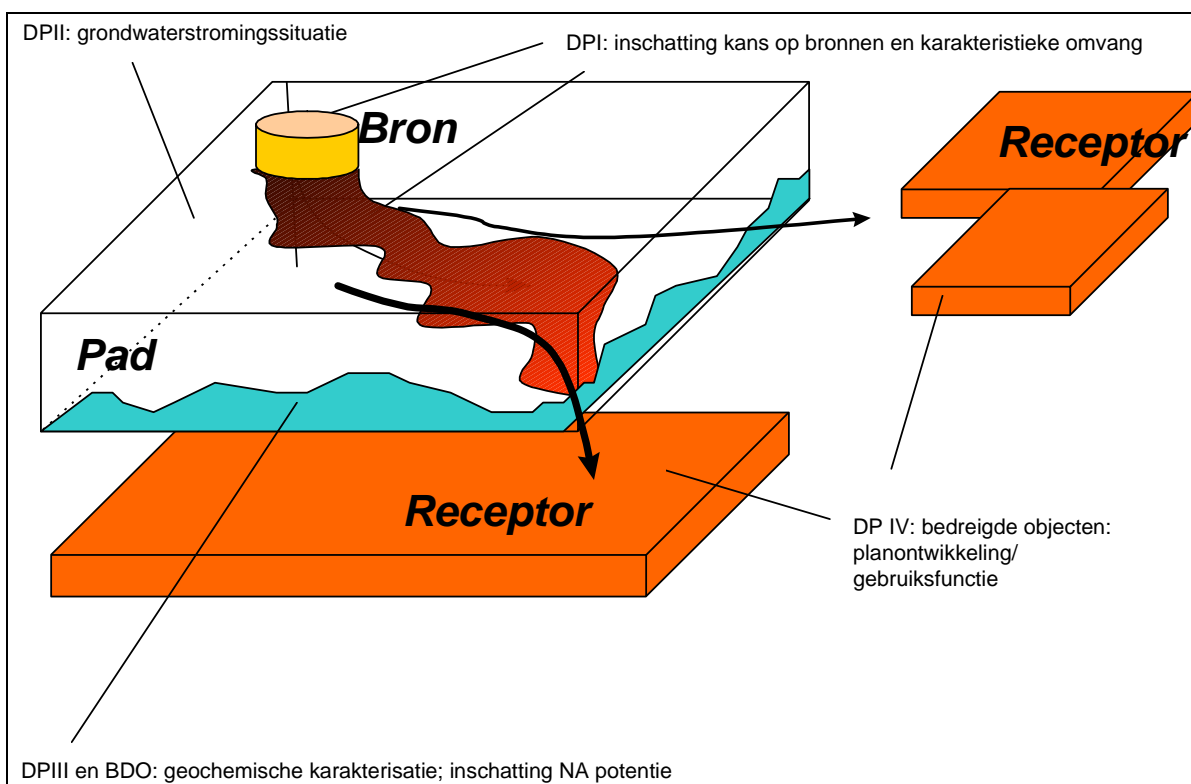
Het doel van Deelproject II is inzicht te verkrijgen in de verspreidingsrisico's van grondwaterverontreinigingen ("pad" in de "bron-pad-receptor" optiek; lit.5). Dit inzicht wordt gekoppeld aan de acties en resultaten van de overige deelprojecten.

Op basis van de resultaten kunnen potentiële bronlocaties worden gerangschikt op basis van hun risico's voor bedreigde objecten.

1.3 Aanpak

Het geschetste concept van "bron-pad-receptor" omvat een breed scala aan processen die deels van nature in de ondergrond optreden en deels door menselijk handelen zijn veroorzaakt. Voor de afzonderlijke aspecten zijn deelprojecten geformuleerd. Deelproject II behelst de 'interface' waaraan de processen horende bij "bron-pad" worden aangehaakt. De resultaten van DP I, III en BDO vormen derhalve input voor DP II.

Vervolgens kunnen "bron" (DPI) en "receptor" (DP IV) aan elkaar worden gekoppeld als "bron-pad-receptor" of als "receptor-pad-bron", al naar gelang het type vraagstelling aangaande de relatie tussen verontreinigingen en planontwikkeling (Figuur 1.1).



Figuur 1.1: samenhang tussen de deelprojecten en het concept van ABIS

1.3.1 Locatie; pilotgebied

Het pilotgebied Feijenoord (zie Bijlage 1) is op verschillende fronten interessant. Enerzijds is er een langdurige en intensieve bedrijfsactiviteit geweest welke een grote milieudruk op de bodem heeft uitgeoefend. In de tweede plaats heersen er binnen het pilotgebied meerdere (geo)hydrologische zones. Voorst is het een stadsvernieuwingsgebied waar de komende jaren veel gaat gebeuren met de bovengrond.

1.3.2 Bronnen

In Deelproject I is een onderzoek gedaan naar de mogelijke verontreinigingen van de bodem met VOCl's en BTEXN:

1. Getracht is om een karakteristieke brongrootte vast te stellen voor BTEXN en VOCl op basis van de statistieken van reeds onderzochte locaties. Deze karakteristieke brongrootte dient als invoer voor de modellering.
2. Voorts zijn van alle verdachte locaties de bedrijfscontouren in kaart gebracht. De verdachte locaties zijn in de resulterende kaartbeelden opgenomen.

1.3.3 Ondergrondmodel

Aangezien zowel het advectioneel transport van verontreinigingen (grondwaterstroming) als de *NA-potentie* sterk afhankelijk zijn van de lokale bodemopbouw is een gedetailleerd ondergrondmodel belangrijk. Voor de constructie van een ondergrondmodel zijn profielen bestudeerd die gemaakt zijn in het kader van infrastructurele projecten (Willemsspoortunnel, metrotunnel) aangevuld met sonderingen.

1.3.4 Grondwatermodel

In het kader van BIO diep grondwater (lit.4) is voor de gehele regio een grondwatermodel geconstrueerd. Het ondergrondmodel waar het regionale grondwatermodel ten dele op is gebaseerd is REGISv3.2. Dit model is te grof om te gebruiken voor de onderhavige studie. Er is voor de Deelgemeente Feyenoord een uitsnede gemaakt uit dit model en vervolgens daar waar nodig sterk verfijnt. In dit lokale grondwatermodel zijn tevens een groot aantal aanvullende gegevens verwerkt:

- maaiveldhoogtes
- neerslaggegevens
- werking van het *topstelsel*
- bodemopbouw

1.3.5 NA-potentie van de ondergrond

In het kader van deelproject III en BDO is een inventarisatie gemaakt van enerzijds literatuurwaarden en anderzijds gemeten waarden van NA-bepalende parameters om de *NA-potentie* in beeld te brengen. Deze gegevens zijn gekoppeld aan de lithologie in het ondergrondmodel.

1.3.6 Stoftransportmodel

Modellering van de belangrijkste mechanismen voor de verspreiding van verontreiniging zijn noodzakelijk om inzicht te verkrijgen in de verspreidingsrisico's. Het modelleren van de grondwaterstroming alleen is niet genoeg. Met het oog op (gestimuleerde) afbraak zijn stofspecifieke eigenschappen die van invloed zijn op de verspreiding van even groot belang. Deze stofspecifieke eigenschappen zijn afhankelijk van de geochemische omstandigheden die op hun beurt weer afhankelijk zijn van bodemspecifieke parameters. Derhalve dient er een inzicht verkregen te worden in de ondergrond zowel in chemische als in fysische zin. In totaal dient er inzicht verkregen te worden in ruimte en in tijd van alle processen die zich in de bodem afspelen.

Een uitputtende inzicht hierin zal echter niet verkregen kunnen worden. Derhalve is het zaak een onderzoekssystematiek te ontwikkelen waarmee de verspreidingsrisico's kunnen worden gekarakteriseerd. Belangrijk daarbij is een afwegingskader; wat is de kans dat een verontreiniging als risicovol wordt gekarakteriseerd terwijl deze dat niet is en vice versa. Voorts dient inzichtelijk te zijn welke parameters cruciaal zijn voor het inschatten van de risico's van verspreiding.



2. Grondwater in Rotterdam

2.1 Regionale grondwaterstroming

Karakteristiek voor de grondwaterstromingssituatie in de omgeving van Rotterdam zijn de infiltrerende rivieren die lagergelegen *binnendijkse poldergebieden* doorkruisen. Het rivierwater infiltreert met name in het eerste watervoerend pakket. Uiteindelijk kwelt een deel van het infiltrerende rivierwater vanuit het eerste watervoerend pakket weer op in de lagergelegen poldergebieden. Het overige deel van het infiltrerende rivierwater stroomt af naar de diepere watervoerende pakketten of wordt afgevangen door onttrekkingen voor de industrie of drinkwatervoorziening (Figuur 2.1).

In de poldergebieden wordt het peil van het oppervlaktewater in sloten beheerst en het water kunstmatig afgevoerd naar het *boezemwaterstelsel* en uiteindelijk naar de grote rivieren. Vanuit de *boezemwatergangen* wordt in drogere periodes water de polder ingelaten.

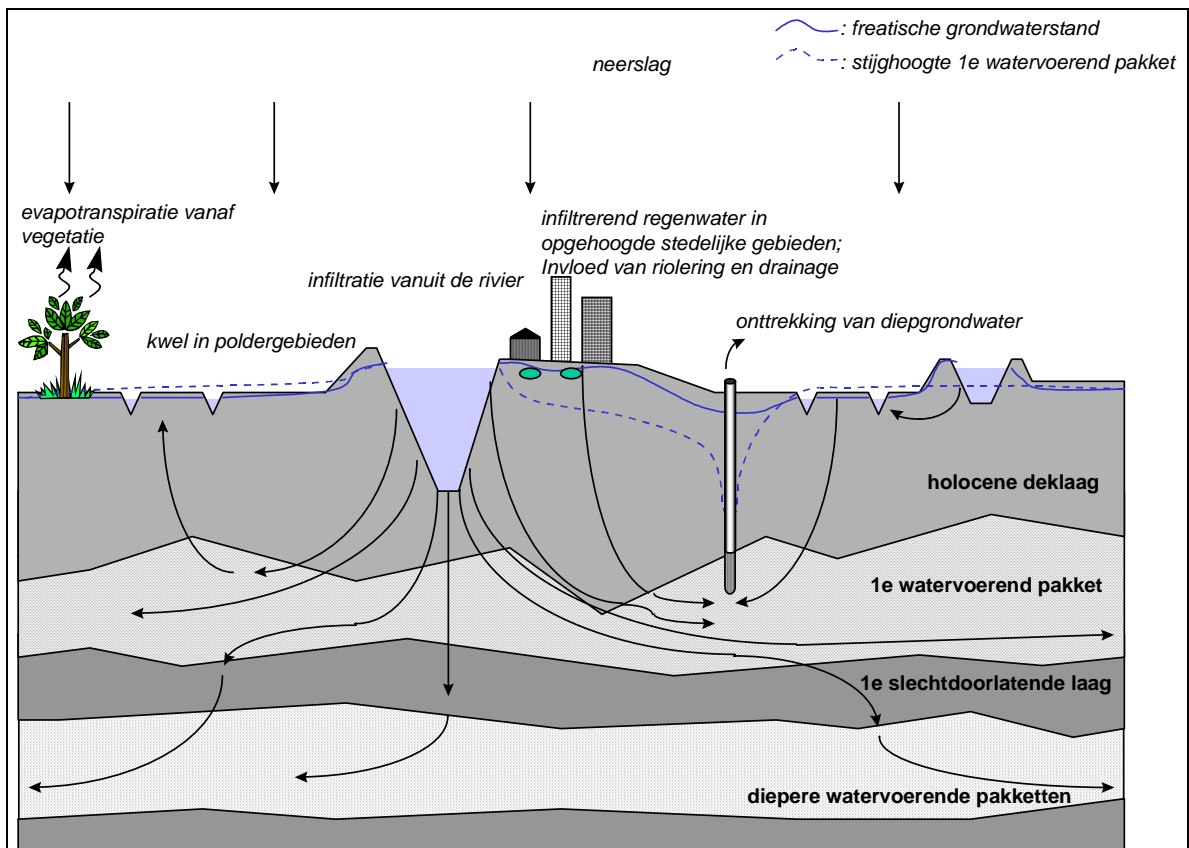
Afgezien van infiltrerend oppervlaktewater draagt de neerslag eveneens bij aan de grondwateraanvulling. De neerslag die op het land valt zal ten dele door diverse processen worden gereduceerd, alvorens het zal infiltreren en het grondwater aanvult:

- verdamping aan het oppervlak;
- *interceptie* en *evapotranspiratie* door vegetatie (respectievelijk verdamping vanaf het bladerdek en opname door wortels in combinatie met verdamping uit plantenporiën);
- oppervlakkige afstroming naar het oppervlaktewater en naar de riolering;
- verdamping uit de *onverzadigde zone* in het bodemprofiel;
- drainage door stedelijk waterbeheer (lekkende riolering, drainagesystemen etc.).

Het deel van de totale neerslag dat het grondwater zal aanvullen wordt de *effectieve neerslag* of het *neerslagoverschot* genoemd.

In deze studie wordt onderscheid gemaakt tussen de freatische *grondwaterstand* en de *stijghoogte*. De freatische grondwaterstand betreft de meest ondiepe grondwaterspiegel. Bij watervoerende pakketten wordt gesproken over stijghoogte. In gebieden waar het eerste watervoerend pakket wordt afgesloten door de *holocene deklaag* wordt gesproken over spanningswater in het eerste watervoerende pakket.

De watervoerende lagen in de ondergrond van Rotterdam komen in de gehele regio voor en zijn zelfs grotendeels in heel Nederland te vervolgen. Het diepe grondwater in de regio Rotterdam wordt derhalve ten dele door regionale instroming gevoed.



Figuur 2.1: profiel van regionale grondwaterstromingssituatie

2.2 Hydrogeologie

Het studiegebied bestaat grotendeels uit een polderlandschap gevormd in veenweidegebieden die typerend zijn voor West-Nederland. Hoofdzakelijk is er klei- en veen afgezet in deze gebieden. Gedeeltelijk hebben kreken het veen weggeërodeerd en zijn zandige *geulopvullingen* en *oeverwallen* ontstaan. Voorts zijn langs oude rivierlopen plaatselijk rivierduinen ontstaan onder invloed van de wind. Deze structuren in de ondiepe bodem vormen zandbanen, die lokaal door hun afwijkende *doorlatendheid* de grondwaterstroming beïnvloeden.

Het belangrijkste onderscheid dat er vanuit *geohydrologisch* oogpunt kan worden gemaakt tussen bodemlagen is dat naar doorlatendheid. De verzameling lagen die in geologische zin te onderkennen zijn (lit.1 en 2) kan op basis van contrasten in doorlatendheid geschematiseerd worden tot een opeenvolging van watervoerende en slechtdoorlatende lagen. De watervoerende lagen bestaan voornamelijk uit zand en grind, terwijl klei- en veenafzettingen de slechtdoorlatende lagen vormen.

Op basis van beschikbare boringen heeft de toenmalige Dienst Grondwaterverkenning van TNO (DGV, thans NITG-TNO) de bodem van Nederland in geohydrologische zin geschematiseerd (lit.3a en 3b). Het resultaat van deze schematisatie wordt beschreven in de grondwaterkaart van Nederland, die thans digitaal beschikbaar is in de vorm van REGISv3.2. Het lagenmodel voor de

regio Rotterdam is opgebouwd uit de volgende geohydrologische eenheden (zie ook figuur 2.1):

1. *Freatisch pakket*. Op plaatsen waar de bovenste bodemlaag doorlatend is, wordt gesproken over een freatisch pakket. De dikte van het freatisch pakket varieert van enkele decimeters tot meer dan 30 m in het westen. Daar vormen de zandige duingebieden langs de kust en de Maasvlakte een freatisch pakket. In stedelijke gebieden komt plaatselijk eveneens een freatisch pakket voor. In deze gebieden is de bovenste bodemlaag (variërend in dikte van centimeters tot vele meters) beïnvloed door menselijk ingrijpen, zoals ophoging en bodemverbetering. Deze zogenaamde *antropogene laag* is sterk wisselend van samenstelling, maar bestaat in veel gevallen uit zand. De verbreding van deze laag is afgeleid van het verschil tussen de hoogte van het maaiveld en de bovenkant van de holocene deklaag.
2. *Deklaag (Holoceen; Westland Formatie)*. Deze laag bestaat voornamelijk uit afzettingen van klei en veen en heeft in het algemeen een slechte doorlatendheid. De dikte varieert tussen 5 en 25 m. In de driehoek Den Haag, Rotterdam centrum en Hellevoetsluis is de dikte van deze laag groter dan 20 m. Plaatselijk is de deklaag meer zandig ontwikkeld, samenhangend met het voorkomen van geulopvullingen of oude rivierduinen, waardoor de deklaag ter plaatse een grotere doorlatendheid kent.
3. *Eerste watervoerend pakket (Pleistoceen; Formaties van Twente, Eem, Urk en Kreftenheye)*. De holocene deklaag wordt aan de onderkant begrensd door het eerste watervoerend pakket. De top van het eerste watervoerend pakket ligt in het algemeen op NAP -15 à -20 m en de dikte varieert van 10 tot 20 m. Deze laag bestaat voornamelijk uit in het Pleistoceen afgezette middelfijne tot middelgrove zanden en grinden met enkele inschakelingen van klei en veen van relatief geringe dikte. Het eerste watervoerend pakket is zeer goed doorlatend.
4. *Eerste slecht doorlatende laag (Pleistoceen; Formatie van Kedichem en Tegelen)*. De top ligt op NAP-25 à -35 m; de dikte van varieert 5 tot 40 m. Met name vlak onder Rotterdam en rond Delft is deze laag tamelijk dun (minder dan 5 m). Aan de bovenkant wordt de eerste slechtdoorlatende laag gevormd door een pakket zandige kleien met inschakelingen van zand. Middenin is een gecompacteerd laag veen aanwezig. Ook de basis van de eerste slechtdoorlatende laag bestaat uit zandige kleien met zandinschakelingen.
5. *Tweede watervoerend pakket (Pleistoceen; Formatie van Tegelen)*. Deze fijne tot middelfijne zandige lagen hebben een goede doorlatendheid. De top van het tweede watervoerend pakket ligt op NAP-25 à -70 m. De dikte varieert van 30 tot 100 m.
6. *Tweede slecht doorlatende laag (Pleistoceen; Formatie van Tegelen)*. Deze slechtdoorlatende kleiige afzettingen vormen een slechtdoorlatende laag tussen het tweede en het derde watervoerend pakket. De top ligt tussen NAP-70 tot -150 m. De dikte varieert van 2 m tot 35 m.
7. *Derde watervoerend pakket (Pleistoceen; Formatie van Maassluis)*. Deze fijne tot middelfijne zandige lagen hebben een goede doorlatendheid. De top van het tweede watervoerend pakket ligt op NAP-80 à -150 m. De dikte varieert van 50 tot 100 m.
8. *Geohydrologische basis (Pliocene; Formatie van Oosterhout)*. De nagenoeg ondoorlatende kleiafzettingen van de Formatie van Oosterhout vormen de onderkant van het geohydrologisch systeem zoals dat in deze studie voor de regio Rotterdam wordt beschouwd. De geohydrologische basis bevindt zich op circa NAP-130 tot -260 m.

2.3 Zoet / zout grensvlak in het grondwater

De samenstelling van het grondwater in de watervoerende pakketten onder Rotterdam en omgeving varieert sterk. In het westen van het gebied tot aan de lijn Delft - Nesselande - Schiedam Centrum - Waalhaven - Rhoon is het diepe grondwater zowel in het eerste als in de diepere watervoerende pakketten brak tot zout. Het betreft deels fossiel zeewater en deels grondwater dat in voorgaande eeuwen door inbraken van de zee is verzilt. Ten oosten van de lijn Delft - Nesselande - Schiedam Centrum - Waalhaven - Rhoon is onder invloed van de infiltrerende rivieren verzoeting opgetreden van de watervoerende pakketten. Als maat voor het zoutgehalte wordt in onderhavige studie de chlorideconcentratie beschouwd:

- Cl^- van zoetwater < 150 mg/l;
- Cl^- van brak water > 150 mg/l en < 1000 mg/l;
- Cl^- van zoutwater > 1000 mg/l

Op plaatsen waar sprake is van een sterke verticale of laterale gradiënt in het zoutgehalte (chlorideconcentratie) van het grondwater, is het mogelijk dat dichtheidsverschillen in het grondwater mede bepalend zijn voor de grondwaterstromingssituatie. Als het grondwater in het tweede watervoerend pakket veel zouter is dan in het eerste watervoerend pakket, mag worden aangenomen dat er geen verticale stroming vanuit het eerste watervoerend pakket naar het tweede zal optreden. De ligging van het *zoet / zout grensvlak in het grondwater* is daarbij van belang. Het grensvlak valt samen met de chlorideconcentratie van 1000 mg/l.

De ligging van het zoet / zout grensvlak in de regio Rotterdam is opgenomen in REGISv3.2 (lit.1). Ten westen van de lijn Delft - Nesselande - Schiedam Centrum - Waalhaven - Rhoon bevindt het zoet / zout grensvlak zich midden in het eerste watervoerend pakket. Ten oosten van deze lijn duikt het zoet / zout grensvlak in de diepte weg onder de top van het tweede watervoerend pakket (Bijlage 2). Onduidelijk is in hoeverre er grote dichtheidsverschillen optreden tussen het grondwater in het eerste watervoerend pakket en het tweede watervoerend pakket in de regio ten westen van de lijn Schiedam Centrum - Waalhaven - Rhoon. In ieder geval is het duidelijk dat ten oosten van deze lijn, dus in het pilotgebied (§1.3), tussen het eerste en de diepere watervoerende pakketten geen grote dichtheidsverschillen zijn in het grondwater. Er treedt infiltratie op vanuit het eerste watervoerend pakket richting de diepere watervoerende pakketten.

3. Modelling grondwater in Feyenoord

Het pilotgebied (deelgemeente Feyenoord; zie Bijlage 1) wordt gekenmerkt door een tamelijk complexe grondwaterstromingssituatie; alle in Hoofdstuk 2 genoemde aspecten beïnvloeden in dit gebied de grondwaterstroming.

Ten behoeve van onderhavig onderzoek is een grondwaterstromingsmodel opgesteld van het pilotgebied Deelgemeente Feyenoord (§1.3.1). Met dit grondwatermodel is het mogelijk inzicht te krijgen in de schaal en de mate waarop de diverse aspecten de grondwaterstroming beïnvloeden. Aangezien opgeloste grondwaterverontreinigingen met het grondwater mee stromen is het bovendien mogelijk het verspreidingspad van de verontreinigingen in beeld te brengen met dit model. De dynamiek van niet opgeloste verontreinigingen (drijfslagen en zaklagen) kunnen niet worden beschouwd.

Het grondwatermodel is vervaardigd in de grondwatermodelcode *Modflow*. Daarbij is gebruik gemaakt van het softwarepakket *GMS* versie 3.1 voor de bewerking van het model. In *Modflow* wordt gerekend met een eindige differentie numeriek rekenschema. *Modflow* is de meest bekende en meest toegepaste grondwatermodelcode voor regionale grondwaterstudies. Er bestaat een directe koppeling tussen *Modflow* en de stoftransportmodellen *MT3D* en *RT3D* (lit.6) waarmee verspreiding van onder meer verontreinigingen in grondwater kan worden gesimuleerd. In de tekst wordt gebruik gemaakt van bepaalde *Modflow*-terminologie en algemene geohydrologische begrippen. Deze zijn beschreven in de verklarende woordenlijst.

Het model voor het pilotgebied is grotendeels afgeleid van het regionale grondwatermodel van de regio Rotterdam Rijnmond dat in het kader van het BIO Diepgrondwater is vervaardigd (lit.4). Specifiek voor het pilotgebied (Deelgemeente Feyenoord) zijn additionele gegevens verzameld en verdisconteerd in het model.

3.1 Modelgebied en netwerk

Het interessegebied in het grondwatermodel valt samen met het pilotgebied (Deelgemeente Feyenoord). Het totale *modelgebied* is groter (Bijlage 3). Daardoor kunnen de effecten van grondwaterstromingssystemen worden verdisconteerd, die buiten het interessegebied liggen maar wel invloed hebben op de grondwaterstroming binnen het interessegebied.

3.1.1 Omvang modelgebied

Als vuistregel is gehanteerd dat de *modelranden* op een afstand liggen van minimaal driemaal de *spreidingslengte* vanaf het interessegebied:

$$3\lambda = 3\sqrt{K D c}$$

en

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_{\text{deklaag}}} + \frac{1}{c_{1eSDL}}$$

met,

- λ : spreidingslengte [m]
 K : doorlatendheid eerste watervoerend pakket [m/dag]
 D : dikte eerste watervoerend pakket [m]
 c : effectieve *weerstand* [dag]
 c_{deklaag} : weerstand deklaag [dag]
 c_{1eSDL} : weerstand eerste slechtdoorlatende laag [dag]

Uitgaande van de waardes uit Tabel 3.1 is een gebied van ongeveer 4500 m gehanteerd voor de ligging van de randen van het totale modelgebied.

Tabel 3.1: gemiddelde hydraulische parameters omgeving Feyenoord

Parameter	Symbool	Indicatieve waarde
Spreidingslengte [m]	λ	1500
Doorlatendheid eerste watervoerend pakket [m/dag]	K	50
Dikte eerste watervoerend pakket [m]	D	18
Effectieve <i>weerstand</i> [dag]	c	2500
Weerstand deklaag [dag]	c_{deklaag}	6500
Weerstand eerste slechtdoorlatende laag [dag]	c_{1eSDL}	4000

3.1.2 Verfijning

Uitgangspunten voor verfijning van het *modelnetwerk* vormen de volgende aspecten:

- aanwezigheid sterke gradiënt in het stijghoogtepatroon (treedt onder meer op bij onttrekkingen en sterk voedende / infiltrerende oppervlaktewaterlichamen);
- ligging van het interessegebied;
- er dienen geen grote dichtheidssprongen in het modelnetwerk op te treden; sprongen groter dan 50% kunnen zorgen voor instabiliteiten in de numerieke oplossing.

De volgende verfijningen zijn in het model aangebracht:

- Buitengebied (400x400 m)
- Tussengebied (van 200x200 m naar 50x50 m)
- Interessegebied (25x25 m)
- 4 Bronlocaties (10x10 m)

In totaal ontstaat er een netwerk van circa 17.000 knooppunten per modellaag (Bijlage 3).

3.2 Geohydrologische lagen en randvoorwaarden

In het grondwatermodel zijn 7 modellagen geïntroduceerd. Uit het oogpunt van stoftransport-modellering is met name de holocene deklaag sterk verfijnd in het model opgenomen. De diktes en hydraulische parameters zijn grotendeels overgenomen uit het BIO Diepgrondwatermodel. De indeling is opgenomen in Tabel 3.2.

Tabel 3.2: indeling van de geohydrologische lagen

Modellaag	Geohydrologische laag	Geologische laag	Randvoorwaarden
1	freatisch pakket; horizontale en verticale stroming	antropogene zandlaag	geen randvoorwaarden; topsysteem is maatgevend
2 t/m 5	deklaag; met name verticale stroming	holocene klei-, veen- en tussenzandlagen	geen randvoorwaarden; topsysteem is maatgevend
6	eerste watervoerend pakket; met name horizontale stroming, maar ook verticale stroming	pleistocene zanden	<ul style="list-style-type: none"> • Noord- en zuidrand deels een vaste stijghoogte • stijghoogtes zijn overgenomen uit het BIO Diepgrondwatermodel • In Bijlage 3 zijn de ligging van de randvoorwaarden in beeld gebracht
7	eerste slechtdoorlatende laag en diepere watervoerende pakketten; zowel verticale als horizontale stroming	Kedichem, Tegelen en diepere formaties	<ul style="list-style-type: none"> • Noord- en zuidrand deels een vaste stijghoogte • stijghoogtes zijn overgenomen uit het BIO Diepgrondwatermodel • In Bijlage 3 zijn de ligging van de randvoorwaardes in beeld gebracht

3.2.1 Antropogene zandlaag (modellaag 1)

De onderkant van de holocene deklaag is bepaald op basis van een geostatistische interpolatie van de analyses van circa 30 sonderingen (Bijlage 4). Het maaiveld is bepaald aan de hand van maaiveldhoogte informatie van Afdeling L&V van IGWR (Bijlage 7). De dikte van de antropogene zandlaag is berekend door het maaiveldniveau te verminderen met het niveau van de onderkant van de antropogene zandlaag. De antropogene zandlaag is niet overal aanwezig. Met name in het dieper gelegen poldergebied ontbreekt de antropogene zandlaag. De modelcellen in laag 1 zijn niet actief voor de zones waar de antropogene zandlaag ontbreekt.

3.2.2 Holocene deklaag (modellaag 2 t/m 5)

De holocene deklaag is in modellaag 2 t/m 5 opgenomen. Vanuit geohydrologisch oogpunt wordt binnen de holocene deklaag onderscheid gemaakt tussen slechdoorlatende klei- en veenlagen en de goed doorlatende tussenzandlagen. De tussenzandlagen doorsnijden plaatselijk de klei- en veenlagen. In de klei- en veenlagen zal vrijwel uitsluitend een geringe verticale stroming optreden. In de tussenzandlagen zal ook horizontale stroming optreden. Met name daar waar de tussenzandlagen zich in de buurt van oppervlaktewater bevinden, speelt deze horizontale afstroming een belangrijke rol. Aangenomen wordt dat bepaalde clusters van *bodemprofieltypes* een kenmerkende horizontale en verticale doorlatendheid hebben. Het bodemprofiel in het pilotgebied is opgedeeld in 5 karakteristieke geohydrologische bodemprofieltypes. Deze zijn weergegeven in Tabel 3.3. Bij de kalibratie van het grondwatermodel zijn de hydraulische parameters (*k-waardes*) van de bodemprofieltypes zoals opgenomen in Tabel 3.3 geoptimaliseerd (§ 3.5).

De totale dikte van de holocene deklaag (modellaag 2 t/m 5) is bepaald op basis van de interpolatie van de diktes bekend uit de gebruikte sonderingen (Bijlage 4). De modellagen 2 t/m 5 hebben in verticale richting dezelfde dikte; de totale dikte van de holocene deklaag is gelijkmatig verdeeld over de 4 lagen.

Deels dient de geologische kaart (NITG-TNO) als uitgangspunt voor de horizontale en verticale doorlatendheid van deze laag. De vlakken zoals ingetekend in de geologische kaart zijn bij de vertaling naar een bodemprofieltype kaart, genuanceerd op basis van bodeminformatie uit RoBIS (Bijlage 4).

Tabel 3.3: Gehanteerde Geohydrologische bodemprofieltypes

Bodemprofieltype:						
Modellaag:	1	[m/dag]	2	[m/dag]	3	[m/dag]
freatisch pakket*	1	$kv^{**}=kh^{***}=1$		$kv=kh=1$		$kv=kh=1$
deklaag	2	$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$
	3	$kv=0,08 / kh=0,8$		$kv=0,1 / kh=1$		$kv=kh=0,003$
	4	$kv=kh=0,003$		$kv=0,1 / kh=1$		$kv=0,5 / kh=5$
	5	$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$
1e wvp	6					
diepere lagen	7					

Bodemprofieltype:						
Modellaag:	4	[m/dag]	5	[m/dag]	Legenda:	
freatisch pakket*	1	$kv=kh=1$		$kv=kh=1$	*niet overal aanwezig	
deklaag	2	$kv=kh=0,003$		$kv=0,1 / kh=1$	**kv: verticale doorlatendheid	
	3	$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$	***kh: horizontale doorlatendheid	
	4	$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$		
	5	$kv=kh=0,003$		$kv=kh=0,003$		
1e wvp	6					
diepere lagen	7					

3.2.3 Eerste watervoerend pakket

De diktes van het eerste watervoerend pakket zijn overgenomen uit BIO Diepgrondwater (lit. 4). Deze zijn weer afgeleid van REGISv3.2. De k-waardes verkregen uit pompproeven variëren tussen circa 20 tot 100 m/dag. In het BIO Diepgrondwater model zijn de k-waardes van het eerste watervoerend pakket geoptimaliseerd op basis van pompproefinformatie. Deze gegevens zijn overgenomen in het model Feyenoord.

3.2.4 Eerste slechtdoorlatende laag en dieper

De eerste slechtdoorlatende laag en de diepere watervoerend pakketten zijn tezamen als een modellaag (laag 7) ingevoerd. De gemiddelde horizontale doorlatendheid in BIO Diepgrondwater (op basis van REGISv3.2) van het tweede en derde watervoerend pakket is als horizontale doorlatendheid voor deze modellaag gehanteerd. De verticale doorlatendheid komt overeen met de k-waarde van de eerste slechtdoorlatende laag (Kedichem). Aan de vier modelranden zijn vaste stijghoogtes toegekend, zoals deze in BIO Diepgrondwater (op basis van REGISv3.2) zijn opgenomen.

3.3 Neerslagoverschot

Het neerslagoverschot (deel van de neerslag dat het grondwater aanvult) is in het model verdisconteerd op basis van *landgebruikstypes*. Daarbij is een indeling gemaakt in maatgevende landgebruikstypes op basis van hun invloed op het neerslagoverschot. In Tabel 3.4 zijn de gehanteerde waardes weergegeven. De ruimtelijke verbreiding van de landgebruikstypes is opgenomen in Bijlage 1.

Tabel 3.4: neerslagoverschot in het model

Landgebruik	Neerslagoverschot [mm/dag]
Landbouw (grasland); buiten pilotgebied	1,10
Groenstroken, parken, recreatie gebieden en braakliggend terrein	1,15
Intensief <i>verhard oppervlak</i> (container terminals); industrieterrein	0,70
Verhard oppervlak (industriegebieden, wegen, overige bebouwing)	0,80

Op basis van digitale landgebruikskaarten zijn de diverse maatgevende landgebruikstypes met behulp van *GIS* in het modelnetwerk opgenomen. De neerslag is toegekend aan de hoogste actieve modelcel.

3.4 Topsysteem (oppervlaktewater)

In het modelgebied worden 3 verschillende *topsystemen* onderscheiden. De ligging is opgenomen in Bijlage 3.

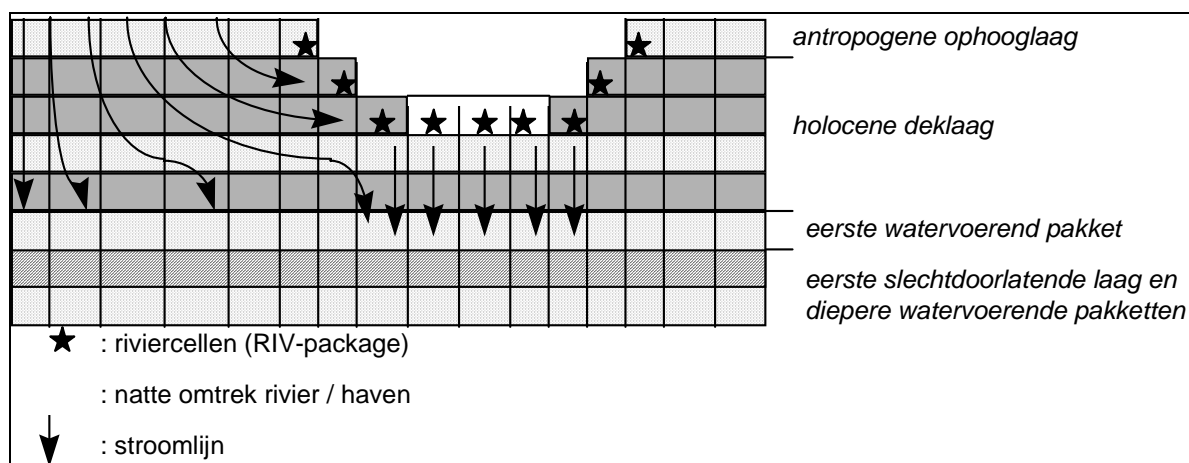
3.4.1 Rivieren, plassen/meren

De rivieren, kanalen, plassen en meren van meer dan 50 m breed, zijn verdisconteerd met de *RIV-package*. Daarbij is het oppervlaktewaterpeil, de *infiltratie/uittreeweerstand* en de bodem van het oppervlaktewaterlichaam opgegeven.

Voor de meeste van deze oppervlaktewaterlichamen is een weerstand van 100 dagen aangehouden. Deze weerstand geldt voor de riviercellen in de lagen 4 en 5. In GMS 3.1 wordt de intree/uitreeweerstand ingevoerd als een *'conductance'*. Deze is gelijk aan de weerstand in dagen per m² celoppervlak. De weerstand geeft uiting aan de invloed van waterbodemsedimenten op de grondwaterstroming.

De RIV-package is ingevoerd afhankelijk van de insnijdingsdiepte van de rivier in de holocene deklaag. De invloed van het resterende deel van de onderliggende holocene deklaag is verdisconteerd als een k-waarde afhankelijk van het betreffende bodemprofieltype. Plaatselijk is de holocene deklaag vrijwel geheel afwezig onder enkele diepingesneden delen van de rivier. In die gebieden is een verticale en horizontale doorlatendheid van 0,5 tot 5 m/dag ingevoerd. Bovendien zijn de cellen in de modellagen 2 t/m 5 ter plaatste van oppervlaktewater voorzien van een fictieve doorlatendheid (K=100 m/dag).

De lagen zijn zodanig ingevoerd dat horizontale stroming door tussenzandlagen richting het oppervlaktewater mogelijk is (zie Figuur 3.1). De situatie bij de rivier en in havens is in meer detail beschouwd in Bijlage 5.



Figuur 3.1: verdiscontering van de rivier in het model

Voor de weerstand van civieltechnische constructies (damwanden, kadenwanden etc.) tussen het oppervlaktewater en het grondwater is eveneens een waarde van 100 aangehouden (is ingevoerd als *'conductance'* in de riviercellen).

3.4.2 Polders/peilbeheersingsgebieden

Gebieden waarin een peil beheerst wordt, zijn ingevoerd met zowel *GHB-package* als *DRN-package*. Net als bij de RIV-package dient de 'conductance' te worden ingevoerd. Met de GHB-package wordt in het model water ingelaten als de onderliggende grondwaterstand lager is dan het peil in de GHB-package en water gedraineerd als de onderliggende grondwaterstand hoger is. Aangenomen wordt dat een peilbeheerst gebied makkelijker gedraineerd kan worden dan dat infiltratie optreedt. Het water ondervindt dus een geringere weerstand om uit het gebied te draineren dan om in het gebied te infiltreren. De DRN-package kent derhalve een weerstand die circa 2 x kleiner is dan de GHB-package.

Bij de kalibratie is gebleken dat diverse poldergebieden verschillend reageren. In diepere polders is de afwatering 'intensiever' dan in ondiepere polders; om de sterke kweldruk af te vangen is in diepe polders in de loop van de tijd een fijnmaziger netwerk aan sloten aangelegd. Dit zorgt ervoor dat de drainageweerstand in deze gebieden op regionale schaal geringer is dan in minder diepe polders. In Tabel 3.5 zijn de gehanteerde waardes weergegeven.

Tabel 3.5: deelgebieden polderweerstanden

Deelgebied	Weerstand GHB [dag]	Weerstand DRN [dag]
Delfland	600	300
Schieland	100	50
IJsselmonde	880	440

De DRN-package en GHB-package zijn actief in modellagen 1, 2 en 3 afhankelijk van de maaiveldhoogte en het drainage/infiltratie peil ter plaatse.

3.4.3 Stedelijke gebieden en havens zonder peilbeheersing

In stedelijke gebieden zonder *peilbeheersing* is met name in de oudere wijken sprake van verouderde lekkende riolering ('meterse' buizen). Voorts wordt in Rotterdam een *ontwateringspeil* van de bebouwing en straten gehandhaafd van 1 m-mv onder wegen, straten en parkeerterreinen. Het gecombineerde effect van lekkende riolen en handhaving van een ontwateringspeil van 1 m-mv is verdisconteerd in het model middels het DRN-package. Het grondwater wordt in feite 'afgetopt' op 1 m-mv in deze gebieden. De weerstand in de DRN-package van deze cellen bedraagt 5 dag/m² celoppervlak. De maaiveldhoogtes van het Pilotgebied zijn opgenomen in Bijlage 7.

3.5 Kalibratie en gevoeligheidsanalyse

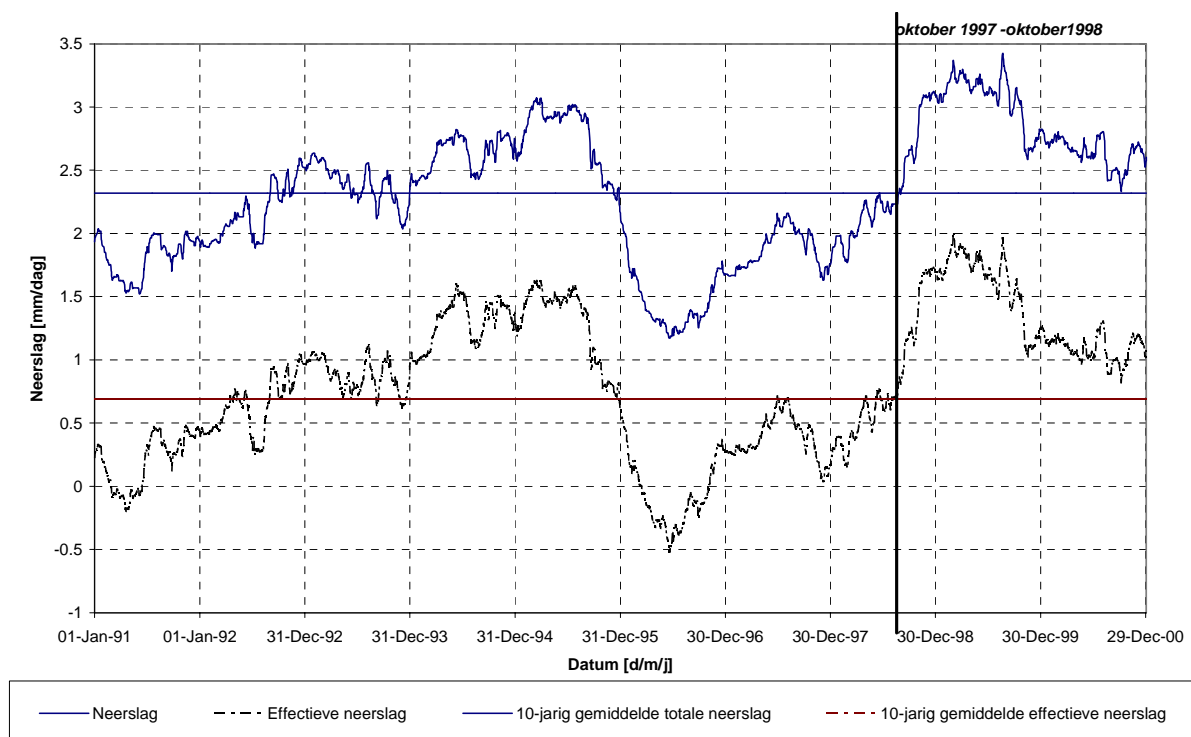
Het grondwatermodel is een afspiegeling van de werkelijkheid. Om deze afspiegeling zo betrouwbaar mogelijk te krijgen dient het model gekalibreerd te worden. Modelkalibratie van een stromingsmodel verwijst naar het proces waarbij de parameters, randvoorwaardes en schematisaties van het model

zodanig worden aangepast dat het model gemeten stijghoogtes en fluxen binnen een vooraf gestelde fout kan simuleren (lit.9). Het aanpassen van parameterwaardes wordt *optimalisatie* van de modelparameters genoemd. Via kalibratie is inzicht verkregen in de bijdrage van de diverse fysische grootheden op het grondwaterstromingssysteem en dus op de resultaten van het grondwatermodel.

3.5.1 Kalibratieperiode

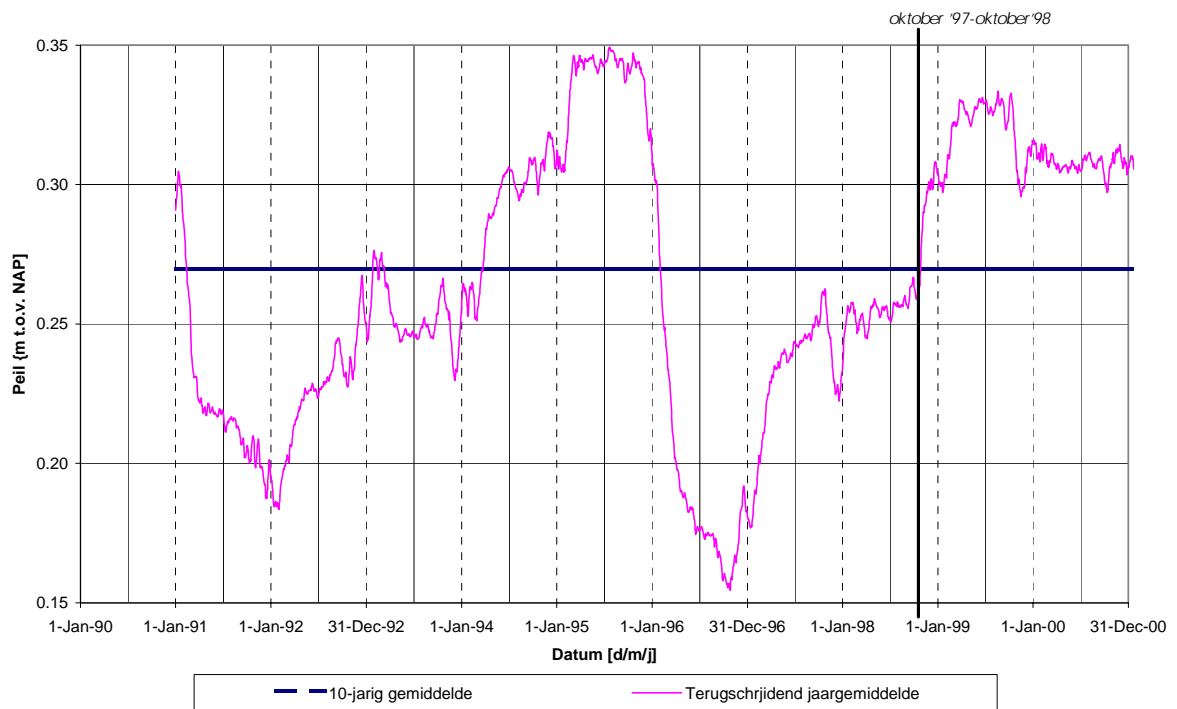
Bij de keuze van een kalibratieperiode is met de volgende aspecten rekening gehouden:

- Binnen de periode zijn de (geo)hydrologische omstandigheden gemiddeld. Dit betekent dat neerslagoverschot, rivierpeilen, onttrekkingshoeveelheden en stijghoogtes binnen de periode allen gemiddelde waardes hebben.
- Voldoende (geo)hydrologische gegevens in die periode beschikbaar zijn.
- Gedurende deze periode is evenveel in als uit het totale grondwatersysteem gestroomd; de netto berging in deze periode is gelijk aan nul. In deze situatie is er sprake van een lineair grondwaterstromingssysteem.

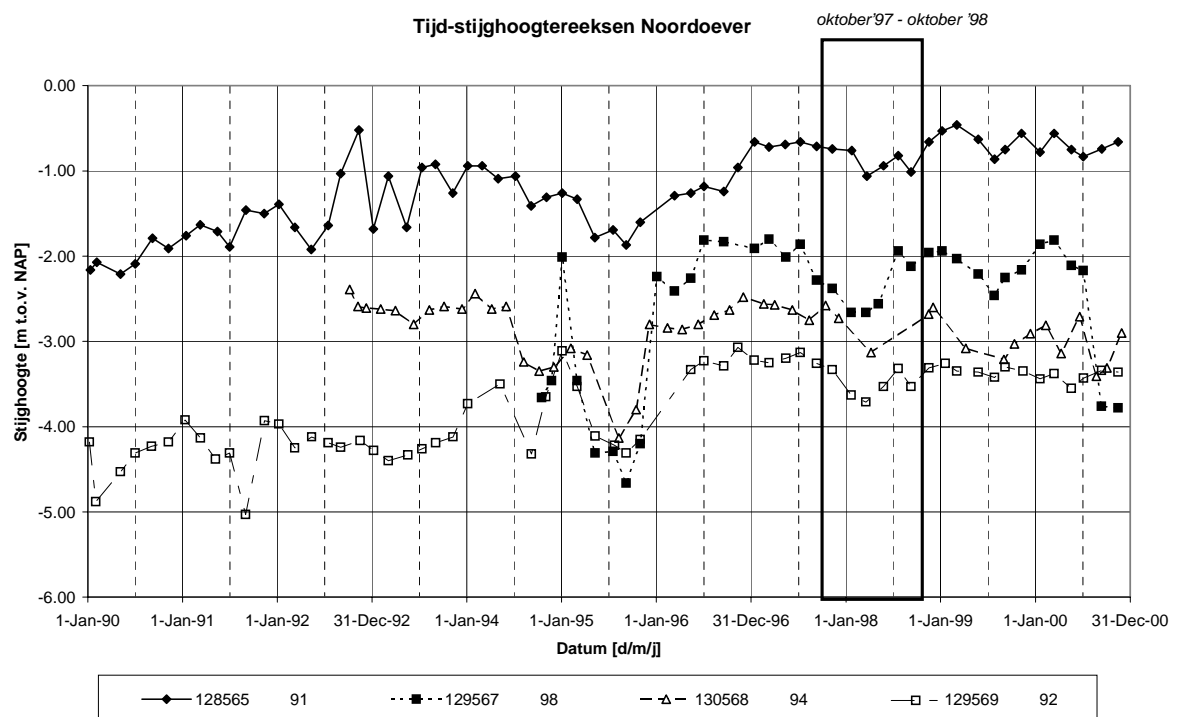


Figuur 3.2: terugschrijdend jaargemiddelde van de neerslag

Op basis van tijdreeksen van de neerslag, de rivierpeilfluctuaties en stijghoogtefluctuaties is een keuze gemaakt welke periode in de laatste tien jaar het meest geschikt is om als kalibratieperiode te gebruiken. Tevens is onderzocht of er in die periode geen sterke fluctuaties zijn opgetreden in de onttrekkingen.



Figuur 3.3: terugschrijdend jaargemiddelde van rivierstand Nieuwe Maas



Figuur 3.4: tijd-stijghoogtereeks eerste watervoerend pakket; Noordoever

De neerslag- en verdampingsreeks en de rivierpeilreeks zijn omgerekend naar 'terugschrijdende jaargemiddelden'. Daarbij wordt tussen 1991 en 2000 voor elke dag het gemiddelde berekend van alle dagwaarden in de periode tussen de betreffende dag en de dag precies een jaar daarvoor. Voorts is het langjarige gemiddelde van de periode 1990 tot 2000 berekend. De periodes waarin het terugschrijdende jaargemiddelde nagenoeg gelijk is aan het langdurige jaargemiddelde kan als een gemiddeld hydrologisch jaar worden beschouwd. In Figuur 3.2 en 3.3 zijn de terugschrijdende jaargemiddelden van de neerslag en de rivierpeilfluctuaties weergegeven.

Voor de tijd-stijghoogtereeksen zijn alleen gegevens beschikbaar met een meetfrequentie van een meting om de 14 dagen (Figuur 3.4). De periodes die als gemiddeld hydrologisch jaar kunnen worden bestempeld op basis van de neerslag- en rivierpeilfluctuaties, zijn voor de stijghoogtefluctuaties de volgende aspecten onderzocht:

- De periode dient te beginnen met nagenoeg dezelfde stijghoogtes als waarmee deze eindigt.
- De periode mag niet gekenmerkt worden door uitzonderlijk sterke fluctuaties in een bepaald seizoen, die in het daaropvolgende seizoen niet worden gecompenseerd. Dit doet zich voor wanneer bijvoorbeeld extreem hoge stijghoogtes gedurende een natte winter worden gemeten, die wordt opgevolgd door een periode met hoge stijghoogtes in een betrekkelijk natte zomer. Ook periodes met grootschalige bemalingen gedurende een half jaar, voldoen niet aan de gestelde criteria.

Op basis van de genoemde criteria is de periode 1 oktober 1997 tot en met 1 oktober 1998 gekozen. In deze periode bevinden zich binnen het interessegebied 2 aanzienlijke onttrekkingen, die enige fluctuatie vertonen in de onttrekkingshoeveelheden:

- Sanering Gasfabriek Kralingen (830.000 m³/jaar)
- Weena Towerhotel (650.000 m³/jaar)

Beide onttrekkingen zijn gedurende vrijwel de gehele kalibratieperiode actief. Aangenomen is dat de gemeten stijghoogtes in overeenstemming zijn met de onttrokken debieten. Dat wil zeggen dat er in de kalibratieperiode sprake was van een (nagenoeg) stationaire situatie.

Voorts heeft de onttrekking bij DSM Gist Brocades (circa 13 Mm³/jaar) veel invloed op de diepe grondwaterstroming in de gehele regio, maar onttrekt permanent.

3.5.2 Gevoeligheidsanalyse

De *gevoeligheidsanalyse* is een belangrijk onderdeel van de kalibratie. Met een gevoeligheidsanalyse zijn de volgende aspecten onderzocht:

- Verkrijgen van inzicht in de invloed van diverse parameters op het geohydrologisch systeem.
- Verkrijgen van inzicht in de onderlinge samenhang van diverse parameters met betrekking tot het geohydrologisch systeem
- Het kwantificeren van de onzekerheden in het gekalibreerde grondwatermodel veroorzaakt door de onzekerheid in de geoptimaliseerde modelparameters en randvoorwaarden (lit.9).

In Tabel 3.6 zijn de resultaten van de gevoeligheidsanalyse opgenomen.

Tabel 3.6: resultaten van gevoeligheidsanalyse op geoptimaliseerde model

Parameter	Gevoeligheid	Invloed	Optimalisatie
weerstand oppervlaktewater in polderdistricten	zeer gevoelig	zowel op stijghoogtes in het 1 ^e wvp als in het freatisch pakket van invloed	polders aan de zuidkant enigszins aangepast
weerstand/doorlatenheid bodemprofielen holocene deklaag	zeer gevoelig	met name invloed op freatische grondwaterstanden	sterk aangepast in het kader van de lokale verfijning tov uitgangssituatie (BIO diepgrondwatermodel)
rivierweerstand	gevoelig	met name op freatische grondwaterstanden en stijghoogtes 1 ^e wvp dichtbij de rivier tot maximaal 1 km buiten de rivier	iets hogere weerstand opgenomen in riviercellen in modellaag 2 en 3 om effect van kadewanden te simuleren
KD-1 ^e wvp	weinig gevoelig	met name voor de gradiënt van de stijghoogte in het 1 ^e wvp vlakbij onttrekkingen	niet aangepast tov uitgangssituatie (BIO diepgrondwatermodel)
KD-2 ^e en 3 ^e wvp	weinig gevoelig	gebiedsdekkende invloed is onderzocht; met name gevoelig op stijghoogtes 2 ^e en 3 ^e wvp	niet aangepast tov uitgangssituatie (BIO diepgrondwatermodel)
weerstand 1 ^e sdl	weinig gevoelig	gebiedsdekkende invloed is onderzocht; met name gevoelig op stijghoogtes 2 ^e en 3 ^e wvp	niet aangepast tov uitgangssituatie (BIO diepgrondwatermodel)

3.5.3 Resultaten van de kalibratie

De resulterende verschillen tussen gemeten en berekende grondwaterstanden en stijghoogtes zijn opgenomen in Bijlage 6. Op basis van deze resultaten wordt geconcludeerd dat het model betrouwbaar genoeg is om op de schaal van het pilotgebied uitspraken te doen over de grondwaterstroming.

Op locatieschaal is het model plaatselijk niet betrouwbaar genoeg. Op enkele locaties in het model zijn er nog opvallende verschillen:

- Gasfabriek Feyenoord (zowel te hoge als te lage freatische grondwaterstanden; zeer locatiespecifieke omstandigheden liggen hier aan ten grondslag)
- Dortselaan (freatische grondwaterstand plaatselijk circa 1 m te laag berekend)
- Putsebocht (freatische grondwaterstand plaatselijk circa 0,7 m te hoog berekend; bevindt zich in peilbeheerst gebied)
- Beijerlandse laan (freatische grondwaterstand plaatselijk circa 0,7 m te laag berekend; bevindt zich in peilbeheerst gebied)
- Hillesluis (freatische grondwaterstand plaatselijk circa 1 m te hoog berekend)
- Noordpunt schiereiland Feyenoord / noordpunt Kop van Zuid (freatische grondwaterstand plaatselijk circa 0,6 m te laag berekend)

3.6 Stoftransportmodellering

Bij stoftransportmodellering wordt onderzocht op welke wijze stoffen door de bodem kunnen worden getransporteerd, die zijn opgelost in het grondwater. Daarmee kan worden onderzocht hoe snel grondwaterverontreinigingen zich verspreiden en waar ze uiteindelijk zullen terechtkomen.

3.6.1 Processen

Opgeloste stoffen (dus ook opgeloste verontreinigingen) verplaatsen zich in dezelfde richting als het grondwater. Gedurende het transport van de opgeloste stoffen kunnen diverse geo- en hydrochemische processen optreden, die de snelheid van transport en de concentratie kunnen beïnvloeden. Voor de meeste grondwaterverontreinigingen spelen de volgende processen een rol (deze zijn nader omschreven lit.7):

- *Advectie*: wanneer stoffen met dezelfde snelheid en richting met het grondwater meestromen, waarin ze zijn opgelost
- *Retardatie*: wanneer opgeloste stoffen worden geabsorbeerd aan bodemdeeltjes zal dit leiden tot een afname van de transportsnelheid van de stoffen. De opgeloste stoffen zullen vertraagd afstromen in dezelfde richting waarin het grondwater stroomt.
- *Natuurlijke afbraak (NA)*: onder invloed van micro-organismen zullen onder bepaalde omstandigheden in de bodem (onder meer redoxcondities) bepaalde stoffen worden afgebroken.
- *Dispersie*: dit is het proces dat er voor zorgt dat het front van een stofpluim (bijvoorbeeld een verontreinigingspluim) wordt uitgesmeerd. De stof zal al eerder doorbreken dan het front van de pluim. Hieraan ten grondslag liggen locale verschillen in verplaatsingssnelheid van moleculen onder invloed van de grondwaterstroming. Er wordt onderscheid gemaakt tussen dispersie in de stromingsrichting (longitudinale dispersie) en de dispersie in de richting loodrecht daarop (transversale dispersie).

Afgezien van dispersie zijn de bovengenoemde processen beschouwd bij onderhavig onderzoek.

3.6.2 Stoffen

In onderhavige studie is gekozen de verspreiding voor de stofgroepen BETXN en VOCI's te onderzoeken. Binnen deze stofgroepen is voor de verspreidingsberekeningen een selectie gemaakt op basis van afbreekbaarheid en mobiliteit. Hoge afbreekbaarheid is relatief gunstig, terwijl een hoge mobiliteit juist ongunstig is. Vanuit die optiek vormt de stof benzeen de grootste risico's in de stofgroep BTEXN. Voor VOCI's vormen de stoffen PER en VC de grootste risico's.

3.6.3 Modellerings

Het effect van de transportprocessen (§ 3.6.1) kunnen worden gesimuleerd met (analytische en numerieke) rekenmethodes. In onderhavig onderzoek zijn de volgende methodes overwogen:

1. Geo- en hydrochemisch modelleren met het softwarepakket RT3D en het grondwatermodel waarbij alle bovengenoemde processen worden gesimuleerd en tevens de onderlinge beïnvloeding van de genoemde processen.
2. Stroombaananalyse met Modpath en het grondwatermodel waarbij langs de stroombaan de effecten van retardatie en afbraak op de doorbaaksnelheden worden berekend (Bijlage 8).
3. Analytische berekening van doorbraak van verontreinigingen naar het eerste watervoerend pakket voor de gebieden waar alleen verticale afstroming richting het eerste watervoerend pakket optreedt.

De opties 1 en 2 bleken in onderhavig gebiedsgericht onderzoek minder geschikt. Aangezien in het overgrote deel van het pilotgebied verticale afstroming naar het eerste watervoerend pakket maatgevend bleek, kan met optie 3 op relatief eenvoudige wijze een betrouwbaar totaalbeeld worden verkregen. Vooralsnog is de top van het eerste watervoerende pakket als receptor beschouwd, waarbij de volgende methodiek is toegepast:

1. Met het grondwatermodel wordt de verticale flux (in 1 dimensie; m/dag) tussen de holocene deklaag en het eerste watervoerend pakket berekend, ter hoogte van het grensvlak tussen deklaag en eerste watervoerend pakket (V). Alleen de modelcellen waarin een neerwaartse flux optreedt zijn beschouwd; in alle andere cellen vindt geen verticale afstroming naar het eerste watervoerende pakket plaats. Door deze flux te delen door de effectieve porositeit (n) wordt de effectieve stroomsnelheid (V_e) van grondwaterdeeltjes berekend:

$$V_e = \frac{V}{n}$$

2. De reistijden van het grondwater ($T_{\text{grondwater}}$) onder in de holocene deklaag worden bereken door de dikte (D) van de deklaag aldaar te delen door de effectieve stroomsnelheid:

$$T_{\text{grondwater}} = \frac{D}{V_e}$$

Dit levert een kaartbeeld met de minimale reistijden van de opgeloste stoffen middels alleen advectief transport (zie figuur 4.4a).

3. De mate van adsorptie van de verontreinigingen is afhankelijk van de bodemopbouw en de eigenschappen van de betreffende verontreinigingen. De retardatie (vertraging) wordt uitgedrukt met een retardatiefactor (R) in de volgende formule:

$$R = 1 + 0,58 \cdot f_{oc} \cdot K_{oc} \cdot \frac{\rho_b}{n}$$

met,

- R** : retardatiefactor
f_{oc} : fractie organisch stof in de bodem
K_{oc} : partiticoëfficiënt van de stof
ρ_b : bulkdichtheid van het bodemmateriaal
n : porositeit

De bulkdichtheid, porositeit en organisch stofgehalte zijn bodemeigenschappen. Voor de bulkdichtheid en organisch stofgehalte is per bodemprofieltype (§ 3.4.2) vastgesteld wat de maatgevende waarde is (zie Deelproject III). De porositeit wordt constant verondersteld. In Tabel 3.7a zijn de berekende waarden per bodemprofieltype opgenomen.

Tabel 3.7a: retardatieparameters bodemprofieltypes

Bodemprofieltype	Bulkdichtheid (ρ _b)	Organisch stofgehalte (f _{oc})
1	1,52	0,12
2	1,61	0,05
3	1,57	0,08
4	1,36	0,26
5	1,56	0,14

De K_{oc} waarde is stof afhankelijk. In de literatuur wordt per stof een brede marge gemeld (Deelproject III). De gehanteerde waardes zijn opgenomen in Tabel 3.7b.

Tabel 3.7b: retardatieparameters verontreinigingen

Stof	marge log(K _{oc})	gehanteerde waarde log(K _{oc})
benzeen	1,42 tot 2,95	1,42
PER	2,25 tot 2,94	2,25
VC	0,34 tot 1,66	0,34

Het een en ander resulteert in retardatiefactoren (R_{stof}) per bodemprofieltype. Deze zijn in tabel 3.8 opgenomen.

Tabel 3.8: resulterende retardatiefactoren (R_{stof}) per bodemprofieltype

Bodemprofieltype	Benzeen (-)	PER (-)	VC (-)
1	8,73	53,27	1,64
2	4,59	25,26	1,30
3	6,64	39,11	1,47
4	16,12	103,21	2,26
5	10,23	63,39	1,77

Middels bovenstaande waarden en de formule voor de retardatiefactor is per bodemprofieltype en per stof een retardatiefactor (R_{stof}) berekend. Vervolgens wordt de effectieve transportsnelheid van de stof ($V_{e, stof}$) bepaald door de onderstaande formule:

$$V_{e, stof} = \frac{V_e}{R_{stof}}$$

4. Het effect van natuurlijke afbraak is bepaald aan de hand van de reistijden van de geretardeerde stof. Gedurende de periode voorafgaande aan doorbraak naar het eerste watervoerend pakket, zal de stof onder bepaalde omstandigheden afbreken. Een eerste orde logaritmische afbraakrelatie wordt verondersteld:

$$C_T = C_0 \cdot e^{-\lambda T}$$

met,

- C_T : concentratie van de stof op tijdstip T
 C_0 : startconcentratie van de stof; concentratie in de bron
 λ : afbraakconstante
 T : reistijd tot doorbraak van de stof

Voor de afbraakconstanten worden de waarden bekend uit Deelproject III gehanteerd (Tabel 3.9).

Tabel 3.9: retardatieparameters verontreinigingen

Stof	gehanteerde waarde λ
benzeen	0,003
PER	0,04
VC	0,005

De afbraakconstanten zijn zeer gevoelige parameters (afhankelijk van milieucondities in de bodem, de aanwezige bacteriepopulaties en de beschikbaarheid van voedingsstoffen) en maatgevend voor de vracht aan verontreiniging, die uiteindelijk in het eerste watervoerend pakket kan terechtkomen.

Het een en ander levert 'grondwaterbelastbaarheidskaarten' op. Voor elke stof wordt een bepaalde eenheidsconcentratie als bron van de verontreinigingspluim ingevoerd in het model. Dit resulteert in een kaartbeeld waarin per locatie wordt gevisualiseerd welke percentage van de beginconcentratie van de betreffende stof doorbreekt in het eerste watervoerend pakket (Hoofdstuk 4). Gezien de veronderstelde eerste orde logaritmische afbraak relatie, kan deze kaart worden doorvertaald naar elke willekeurige factor maal de interventiewaarde.

3.7 Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

3.7.1 Grondwaterstromingsmodellering

Ter verhoging van de betrouwbaarheid van de modelresultaten worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Er dient een goed ondergrondmodel vervaardigd te worden van het interessegebied binnen het model op basis van meerdere sonderingen. Ook dienen de lodingen van de rivier beter verdisconteerd te worden. Daarmee kan de laterale verbreiding en diktes van de diverse holocene lagen beter in beeld worden gebracht. Vanuit geochemisch oogpunt is eveneens het voorkomen van veenlagen en kleilagen van belang (retardatie en reactiviteit; Deelproject III).
- Middels automatische optimalisatie kunnen diverse gevoelige hydraulische parameters nauwkeurig worden bepaald. Met name voor de k-waardes van de diverse bodemprofieltypes en de weerstanden van het poldertopsysteem wordt aanbevolen deze middels automatische kalibratie te optimaliseren.

3.7.2 Stoftransportmodellering

- Het bepalen van de daadwerkelijk optredende afbraaksnelheden in de wijk Feyenoord voor de stoffen benzeen, naftaleen en PER zal de bandbreedte van de modelvoorspellingen sterk reduceren. Daartoe dient er voor een aantal pluimen een gerichte monitoring te worden vastgesteld waarbij de invloed van de afbraak onafhankelijk kan worden bepaald. Hierbij valt te denken aan het meten van de afbraakproducten van PER (TRI, CIS, VC, etheen en ethaan) of aan een isotopenanalyse voor benzeen.
- De reistijden van de verontreinigingen hangen sterk af van de aannames waarop het grondwatermodel is gebaseerd. Om deze aannamen te valideren kunnen er ouderdomsbepalingen van het grondwater worden uitgevoerd. Hierbij is het raadzaam om te kijken naar de locaties waar de reistijden het kortste zijn.
- De invloed van de lokale drainagemiddelen op de grondwaterstroming in de wijk Feyenoord alsmede de toelaatbare belastbaarheid aan verontreinigingen in deze drainagemiddelen zullen nog moeten worden vastgesteld.

4. Impressies

Enkele kaartbeelden worden gepresenteerd die de basis vormen van een regionale afwegingsstrategie van de verspreidingsrisico's van grondwaterverontreinigingen. De kaarten zijn een uiting van de synergie tussen de diverse deelprojecten.

Aan de hand van Deelproject II (grondwatermodellering) zijn de volgende kaarten geproduceerd:

4.1 Afstroming

4.2 Kwel en infiltratie

4.3 Herkomst grondwater in plangebieden:

- a. kantoren en voorzieningen; VOCl
- b. kantoren en voorzieningen; BETXN
- c. parken en verblijfsgebieden; VOCl
- d. parken en verblijfsgebieden; BETXN
- e. woningen, kantoren en voorzieningen; VOCl
- f. woningen, kantoren en voorzieningen; BETXN

4.4 Grondwaterbelastbaarheid:

- a. reistijden bij advection transport
- b. reistijden met retardatie; benzeen
- c. reistijden met retardatie; PER
- d. reistijden met retardatie; VC
- e. doobraakfractie bij NA en retardatie; benzeen
- f. doobraakfractie bij NA en retardatie; PER
- g. doobraakfractie bij NA en retardatie; VC

In elke paragraaf is een kaartbeeld beschreven. Per kaartbeeld is beschreven welke elementen zijn opgenomen, hoe de kaart geïnterpreteerd moet worden en op welke wijze de kaart gebruikt kan worden voor het afwegen van de risico's en formuleren van maatregelen.

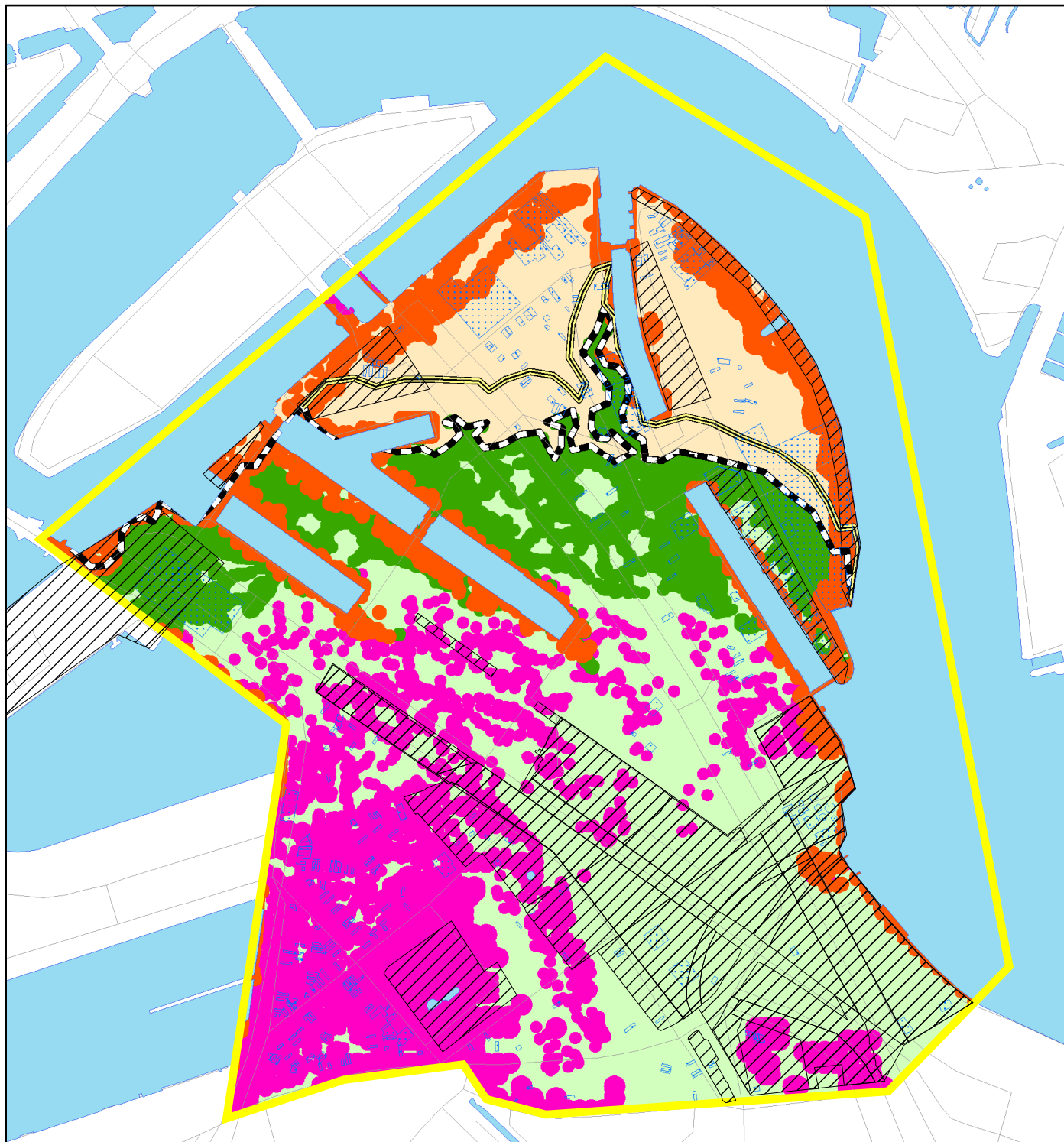
4.1 Afstroming

Elementen in het kaartbeeld:

1. horizontale afstroming richting oppervlaktewater (havens en rivier)
2. afstroming naar de noordoever
3. waterscheiding (met en zonder intensieve onttrekking aan noordoever)
4. afstroming naar de diepte binnen het pilotgebied
5. regionale afstroming
6. afstroming naar poldergebieden direct ten zuiden van het pilotgebied
7. kwelzone
8. brongebieden
9. plangebieden

Interpretatie:

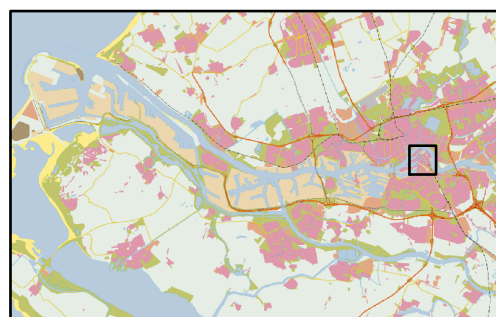
1. Bronnen binnen de zone van horizontale afstroming richting de havens zullen in relatief korte tijd afstromen naar het oppervlaktewater. De zone is veelal niet breder dan 50 m; slechts bij een sterke horizontale doorlatendheid van de holocene deklaag door de aanwezigheid van vele tussenzandlagen kan de zone plaatselijk groter zijn. Het effect van kadewanden etc. is slechts gedeeltelijk verdisconteerd. Plaatselijk kunnen kadewanden vele malen doorlatender of juist ondoorlatender zijn. Respectievelijk zal de zone van horizontale afstroming richting de havens groter of juist kleiner zijn. De reistijden vanaf de freatische grondwaterstand tot afstroming naar het oppervlaktewater zijn relatief kort (< 50 jaar).
2. Binnen zone (2) zal al het infiltrerende grondwater via het eerste watervoerend pakket richting de noordoever stromen. Het grondwater zal aan de noordoever afstromen naar winningen en met name naar de diepe polders ten noordoosten van Rotterdam. De reistijden tot afstroming zijn lang (>500 jaar).
3. De waterscheiding markeert de grens waar ten noorden ervan het grondwater in noordelijke richting zal afstromen. Ten zuiden van de lijn zal het grondwater afstromen richting de diepere watervoerende pakketten of in zuidelijk richting afstromen en al dan niet opkwellen in de zuidelijk gelegen polders. De reistijden zijn hier extreem lang.
4. In zone (4) stroomt het infiltrerende grondwater binnen het pilotgebied af naar diepere watervoerende pakketten. Het duurt vele duizenden jaren voordat het water in deze zone op natuurlijke wijze weer aan de oppervlakte komen.
5. In zone (5) stroomt het infiltrerende grondwater buiten het pilotgebied af naar diepere watervoerende pakketten of naar polders dan wel grondwaterwinningen gelegen op grote afstand van het pilotgebied. De reistijden richting polders of winningen zijn vele duizenden jaren.



0 250 500 1,000 Meters

ABIS; deelproject II
Figuur 4.1: Afstroming

-  verdachte locaties
-  planlocaties
-  pilotgebied
-  afstroming naar noordoever
-  afstroming naar nabijgelegen polders
-  afstroming naar diepere watervoerende pakketten
-  regionale afstroming
-  waterscheiding bij geringe onttrekking noordoever
-  waterscheiding bij grote onttrekking noordoever



6. Deze zones markeren de gebieden waarin het infiltrerende grondwater uiteindelijk zal opkwellen in de direct zuidelijk van het pilotgebied gelegen polders. Het grondwater kwelt op in sloten, singels en vijvers. Onder meer het Afrikanerpark ontvangt kwelwater direct uit het pilotgebied. Infiltrerend freatisch grondwater zal binnen circa 50 tot 200 jaar het eerste watervoerend pakket bereiken. Vervolgens zal het grondwater binnen 50 jaar opkwellen in de sloten van de direct zuidelijk van het pilotgebied gelegen polders.
7. In de kwelzone zal geen water infiltreren naar het eerste watervoerend pakket. Neerslag water en opkwellend diep grondwater komt terecht in sloten, singels en vijvers in dit gebied.
8. De bronlocaties markeren de locaties waar in het verleden een bedrijf is geweest dat mogelijk een bodem- en grondwaterverontreiniging heeft veroorzaakt. De bestemming van het infiltrerende grondwater in de brongebieden wordt gemarkeerd door de bovenbeschreven afstromingszones. Hiermee kan in beeld worden gebracht waar mogelijke grondwaterverontreinigingen uiteindelijk terecht zullen komen.
9. De bestemming van het infiltrerende grondwater in de plangebieden wordt gemarkeerd door de bovenbeschreven afstromingszones.

Gebruik:

- De diverse zones geven de bestemming van het infiltrerende grondwater en derhalve verontreinigingen die erin zijn opgelost aan.
- Voor grondwaterverontreinigingen is de zone met horizontale afstroming in principe de meest kritische zone, aangezien de reistijden daar het kortste zijn. Locatiegericht veldonderzoek voor locaties binnen 100 m van de havens, dient er op gericht te zijn om te achterhalen hoe groot de zone van afstroming kan zijn. Dit kan gebeuren door insitu doorlatenheidsproeven in de diverse tussenzandlagen en door getijdeproeven om de doorlatenheid van de kadewand te achterhalen.
- Ook zeer kritisch zijn de zones binnen het pilotgebied waarin het infiltrerende grondwater afstroomt naar de nabij gelegen polders. De reistijden variëren sterk (50 tot 250 jaar). Uit het oogpunt van verspreidingsrisico's binnen het eerste watervoerend pakket zijn de bronnen in deze twee zones het meest kritisch.
- De plangebieden omvatten gebieden waarin op korte termijn diverse plannen zullen worden gerealiseerd. Bij de realisatie zal deels gesaneerd gaan worden. Het is gezegd 'mooi meegenomen' dat er bronnen zijn die daarbij worden verwijderd. Verder kan worden aangestuurd op het saneren van bronnen die volgens deze kaart als kritisch kunnen worden beschouwd.

4.2 Kwel en infiltratie

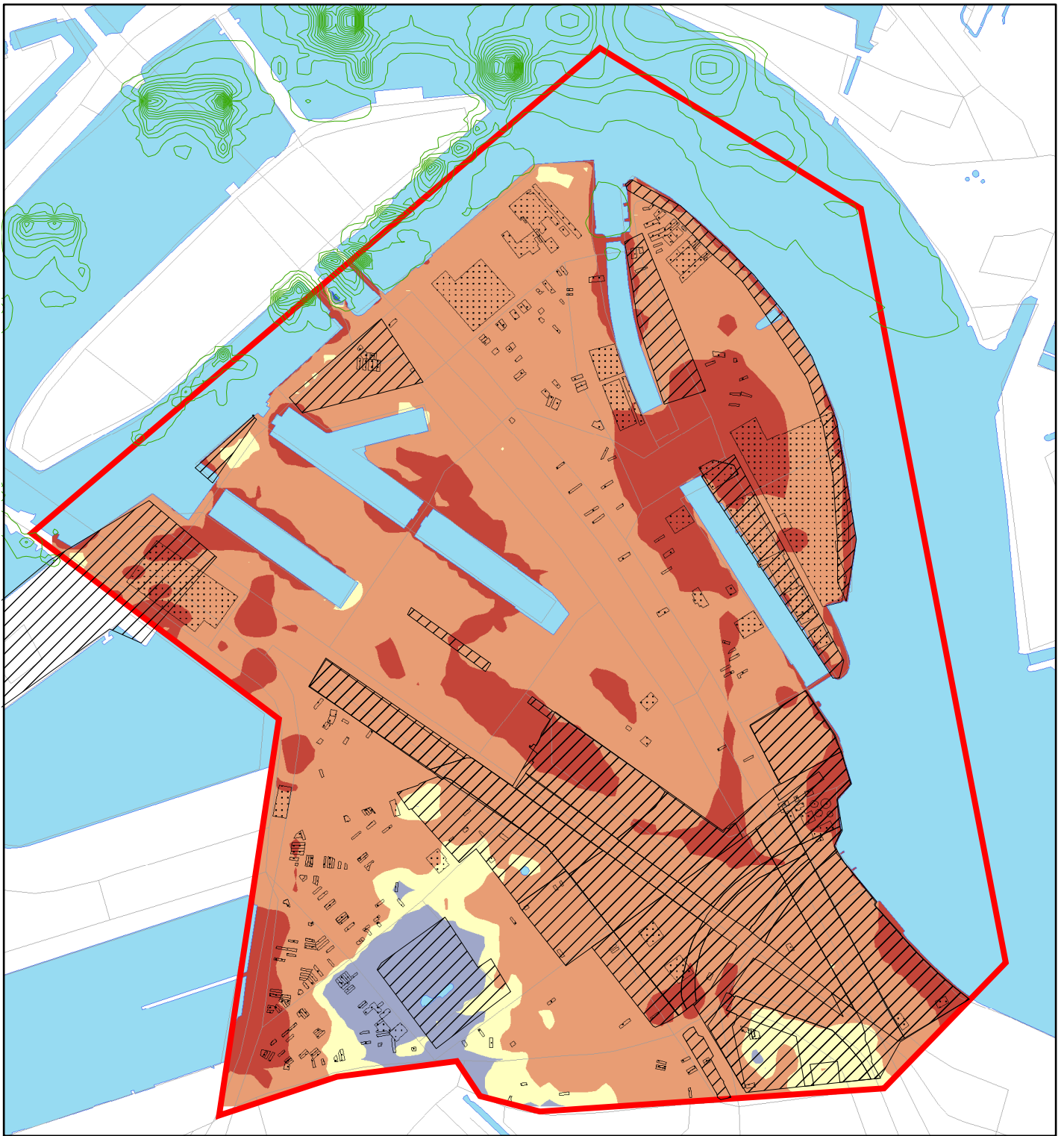
Elementen in het Kaartbeeld:

1. Infiltratiezone
2. Kwelzone
3. Verschillen in bemaling noordoever
4. Waterbalans
5. Plangebieden
6. Bronlocaties

Interpretatie:

De kwel- en infiltratiekaart is vervaardigd op basis van de verticale flux tussen het eerste watervoerend pakket en de onderkant van de holocene deklaag, zoals deze is berekend door het model.

1. In het grootste deel van het pilotgebied treedt infiltratie op. Het grondwater en daarin opgeloste verontreinigingen stromen daarbij ten dele af naar het eerste watervoerend pakket. De intensiteit van de infiltratie varieert in het ruimtelijk beeld. Met name de bodemopbouw van de holocene deklaag (voorkomen van tussenzandlagen) en het landgebruik, beïnvloeden in sterke mate de infiltratie intensiteit. Een variatie in bemalingsintensiteit aan de noordoever heeft een beperkt effect op de infiltratieintensiteit in het pilotgebied (zie ook punt 3).
2. In de kwelzone zal geen water infiltreren naar het eerste watervoerend pakket. Neerslagwater en opkwellend diepgrondwater komt terecht in sloten, singels en vijvers in dit gebied.
3. Bij intensievere onttrekkingen aan de noordoever uit het eerste watervoerende pakket, zal meer water uit de rivier worden aangetrokken. In het kaartbeeld is met de groene lijn aangegeven waar de verandering in infiltratie plaatsvindt bij het stopzetten van een winning direct aan de noordoever van circa 1 Mm³/jaar.
4. De waterbalans geeft aan op welke wijze de in- en uitstroming in het gebied is verdeeld op basis van de herkomst en bestemming van het grondwater. De herkomst van het kwelwater in de sloten van de zuidelijk gelegen polders is verdeeld op basis van de stroombaananalyse. Daaruit blijkt dat het grootste deel van het water in de polder afkomstig is uit de polder zelf (hemelwater dat afstroomt naar de sloten).
5. De plangebieden bevinden zich grotendeels in infiltratiegebieden. Dat betekent dat het merendeel van het grondwater afkomstig is uit het gebied zelf (hemelwater). In de plangebieden in de kwelzones kan wel toestroming afkomstig van buiten het gebied plaatsvinden.



0 250 500 1,000 Meters

ABIS; deelproject II

Figuur 4.2: Kwel en infiltratie

- Planlocaties
- Pilotgebied
- meer dan 0,5 mm/dag kwel
- 0,5 tot 0,1 mm/dag kwel
- minder dan 0,1 mm/dag kwel of infiltratie
- 0,1 tot 0,5 mm/dag infiltratie
- meer dan 0,5 mm/dag infiltratie
- verschillen in bemaling noordoever (0,1 en 0,5 mm/dag)

Infiltratiezone			
In	percentage	Uit	percentage
Neerslagoverschot	100.0%	Afstroming naar eerste watervoerend pakket	25.0%
Horizontale instroming rivier	0.0%	Afstroming naar rivieren	2.5%
		Afstroming naar stedelijk waterbeheer	72.5%

Kwelzone			
In	percentage	Uit	percentage
Neerslagoverschot	43.0%	Afstroming naar oppervlaktewater	100.0%
Instroming vanuit eerste watervoerend pakket	57.0%		
afkomstig uit de rivier	15.4%		
afkomstig uit de infiltratie zone	15.9%		
afkomstig uit de kwel zone in de polder	25.6%		

6. De bronlocaties markeren de locaties waar in het verleden een bedrijf is geweest dat mogelijk een bodem- en grondwaterverontreiniging heeft veroorzaakt. Vanuit bronlocaties die zich bevinden in de infiltratiezone kan verspreiding optreden richting het eerste watervoerend pakket van opgeloste grondwaterverontreinigingen. Bronlocaties in de kwelzone zullen geen verspreiding richting het eerste watervoerend pakket veroorzaken.

Gebruik:

Met name de bronnen die zich in zones bevinden met intensieve infiltratie kennen een groot potentieel risico voor verspreiding naar het eerste watervoerende pakket. De reistijden zijn in de regel relatief lang (50 tot >100 jaar). In de kwelzones treedt geen verspreiding op naar het eerste watervoerend pakket. In kwelzones zal grondwater afstromen naar de sloten en ook infiltrerend hemel water stroomt af naar het oppervlaktewater. De reistijden zijn relatief kort (< 50 jaar).

Vanuit het oogpunt van bescherming van het eerste watervoerend pakket is het met name van belang om de bronlocaties in intensieve infiltratiegebieden te onderzoeken en de risico's te beoordelen.

4.3 Herkomst grondwater in plangebieden

Er worden 6 kaarten gepresenteerd:

- a.kantoren en voorzieningen
- b.kantoren en voorzieningen
- c.parken en verblijfsgebieden
- d.parken en verblijfsgebieden
- e.woningen, kantoren en voorzieningen
- f.woningen, kantoren en voorzieningen

Elementen in het kaartbeeld:

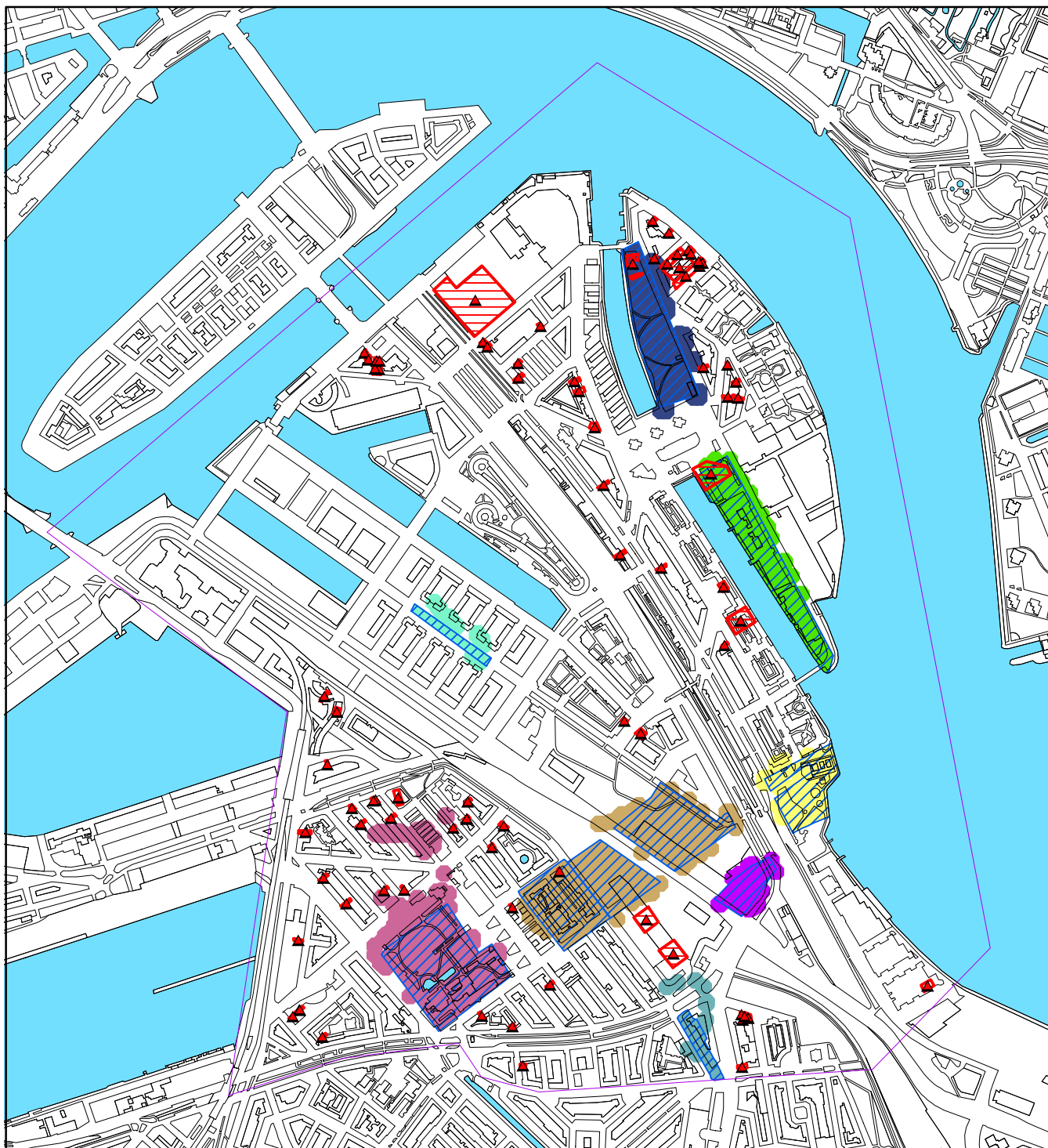
1. plangebieden
2. herkomst grondwater midden in de holocene deklaag
3. Verdachte locaties met kans op verontreiniging van BETXN
4. Verdachte locaties met kans op verontreiniging van VOCI's

Interpretatie:

1. De plangebieden zijn opgegeven vanuit Deelproject IV en V. Dit zijn gebieden die in de toekomst en deels al op het moment worden heringericht.
2. De zones geven aan waar het grondwater dat zich midden in de holocene deklaag bevindt (circa NAP- 5 m), oorspronkelijk vandaan komt. Grotendeels betreft het infiltrerend hemelwater uit het plangebied zelf. Bij enkele plangebieden zal het water afkomstig kunnen zijn van buiten het plangebied.

Gebruik:

In de meeste plangebieden is het grondwater afkomstig uit het plangebied zelf (infiltrerend hemelwater). Enkele plangebieden die zich in kwelzones bevinden, ontvangen wel water uit andere gebieden. Het Afrikanerpark is daarvan een voorbeeld. De zones van herkomst zijn echter tamelijk dichtbij en de reistijden zijn relatief kort (10 tot 50 jaar gerekend vanaf de top van het eerste watervoerend pakket).



Figuur 4.3a: herkomst van het water binnen de plangebieden voor parken en verblijfsgebieden in relatie met potentiële emissie bronnen.

locatie bronnen met hoge VOCl emissie kans:

▲ bedrijfs centrum

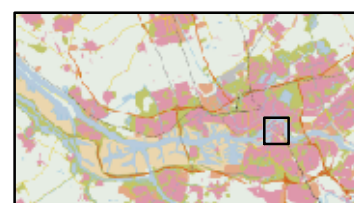
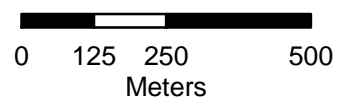
▭ bedrijfs omtrek

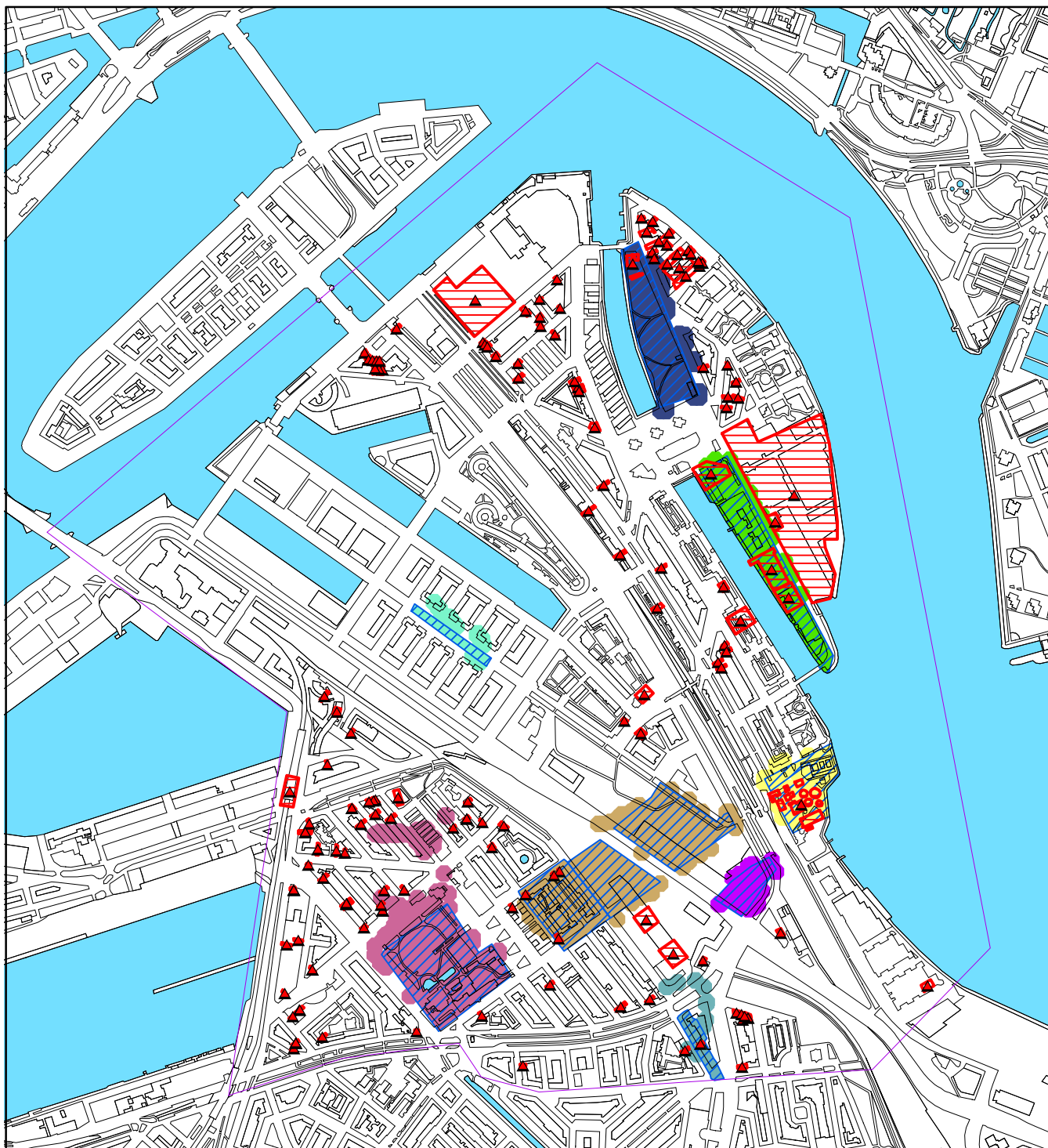
locatie receptoren:

▨ water, aangetroffen binnen de arcering heeft als herkomst het gebied met de corresponderende achterliggende kleur.

overig:

▭ begrenzing pilotgebied





Figuur 4.3b: herkomst van het water binnen de plangebieden voor parken en verblijfsgebieden in relatie met potentiële emissie bronnen.

locatie bronnen met hoge BTEXN emissie kans:

▲ bedrijfs centrum

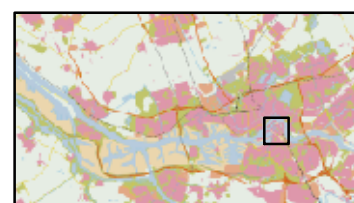
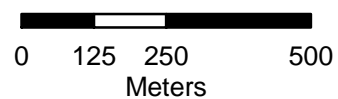
▭ bedrijfs omtrek

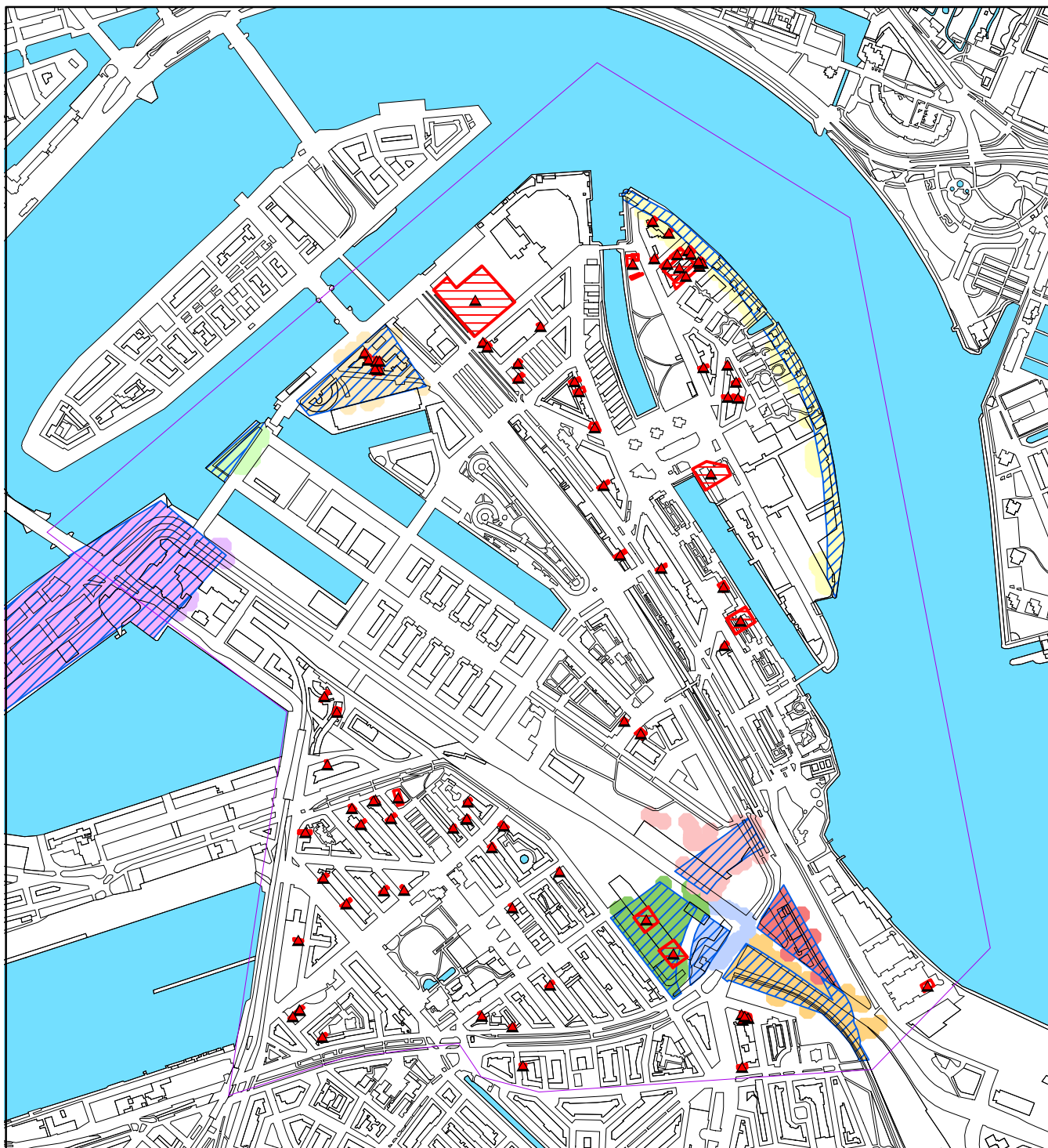
locatie receptoren:

▨ water, aangetroffen binnen de arcering heeft als herkomst het gebied met de corresponderende achterliggende kleur.

overig:

▭ begrenzing pilotgebied





Figuur 4.3c: herkomst van het water binnen de plangebieden voor kantoren en verblijfsgebieden in relatie met potentiële emissie bronnen.

locatie bronnen met hoge VOCl emissie kans:

▲ bedrijfs centrum

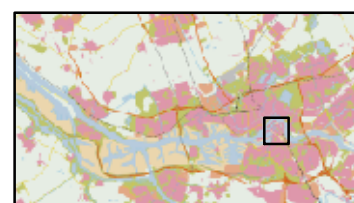
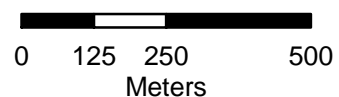
▭ bedrijfs omtrek

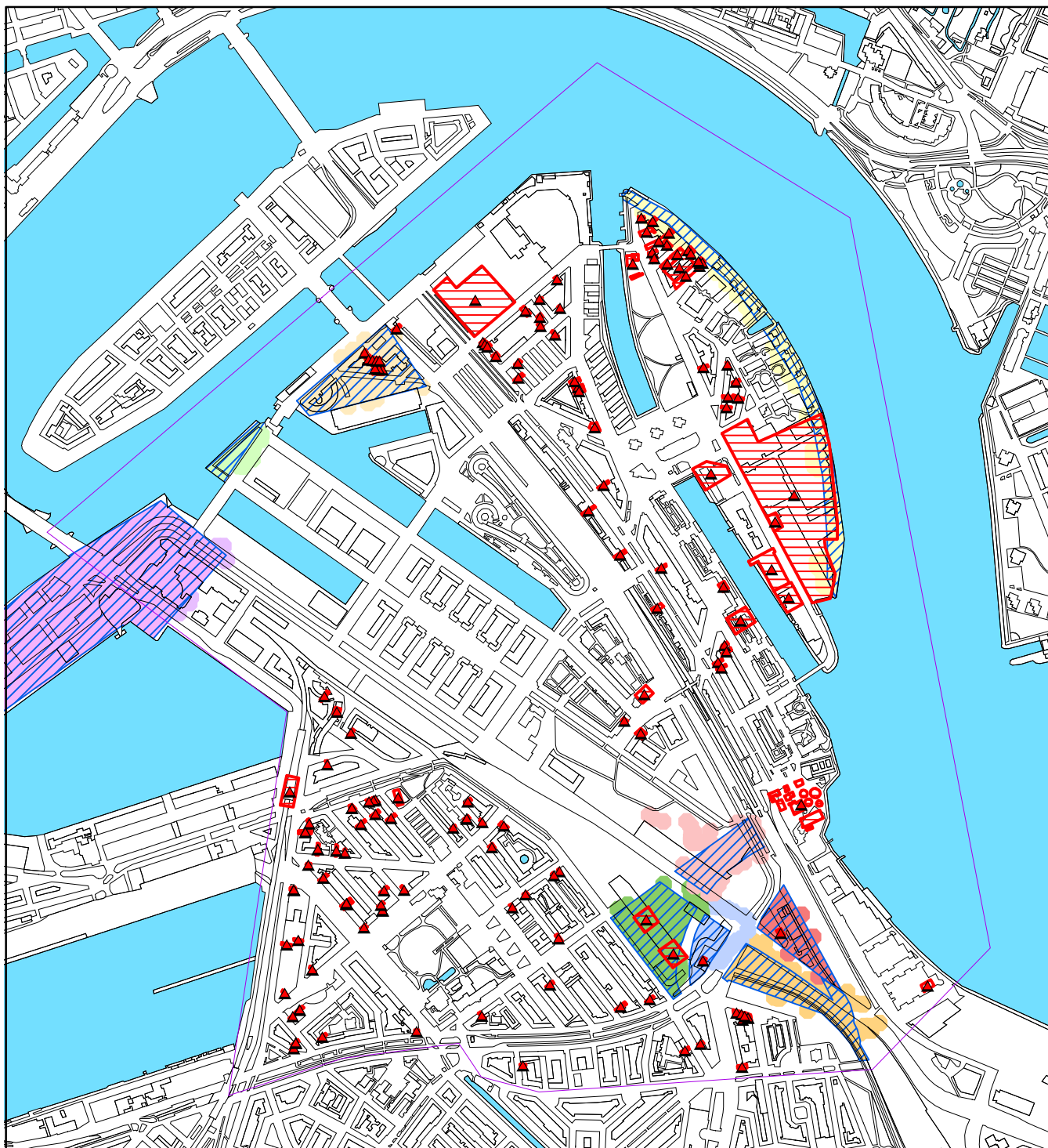
locatie receptoren:

▨ water, aangetroffen binnen de arcering heeft als herkomst het gebied met de corresponderende achterliggende kleur.

overig:

▭ begrenzing pilotgebied





Figuur 4.3d: herkomst van het water binnen de plangebieden voor kantoren en verblijfsgebieden in relatie met potentiële emissie bronnen.

locatie bronnen met hoge BTEXN emissie kans:

▲ bedrijfs centrum

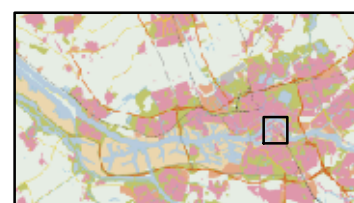
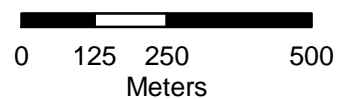
▨ bedrijfs omtrek

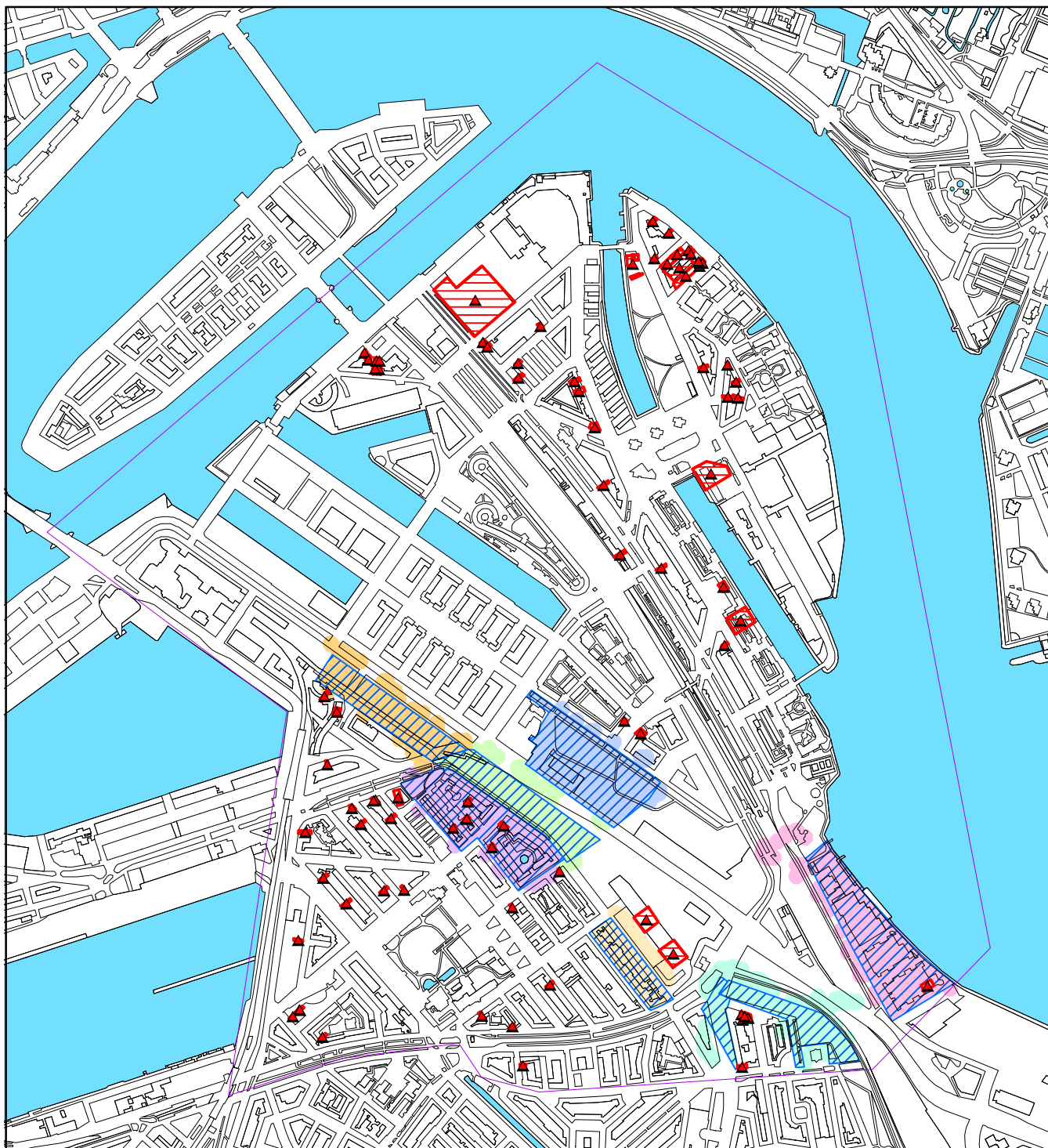
locatie receptoren:

▨ water, aangetroffen binnen de arcering heeft als herkomst het gebied met de corresponderende achterliggende kleur.

overig:

□ begrenzing pilotgebied





Figuur 4.3e: herkomst van het water binnen de plangebieden voor woningen en voorzieningen in relatie met potentiële emissie bronnen.

locatie bronnen met hoge VOCl emissie kans:

▲ bedrijfs centrum

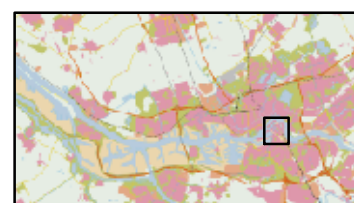
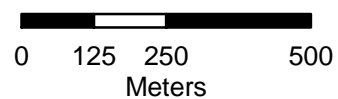
▭ bedrijfs omtrek

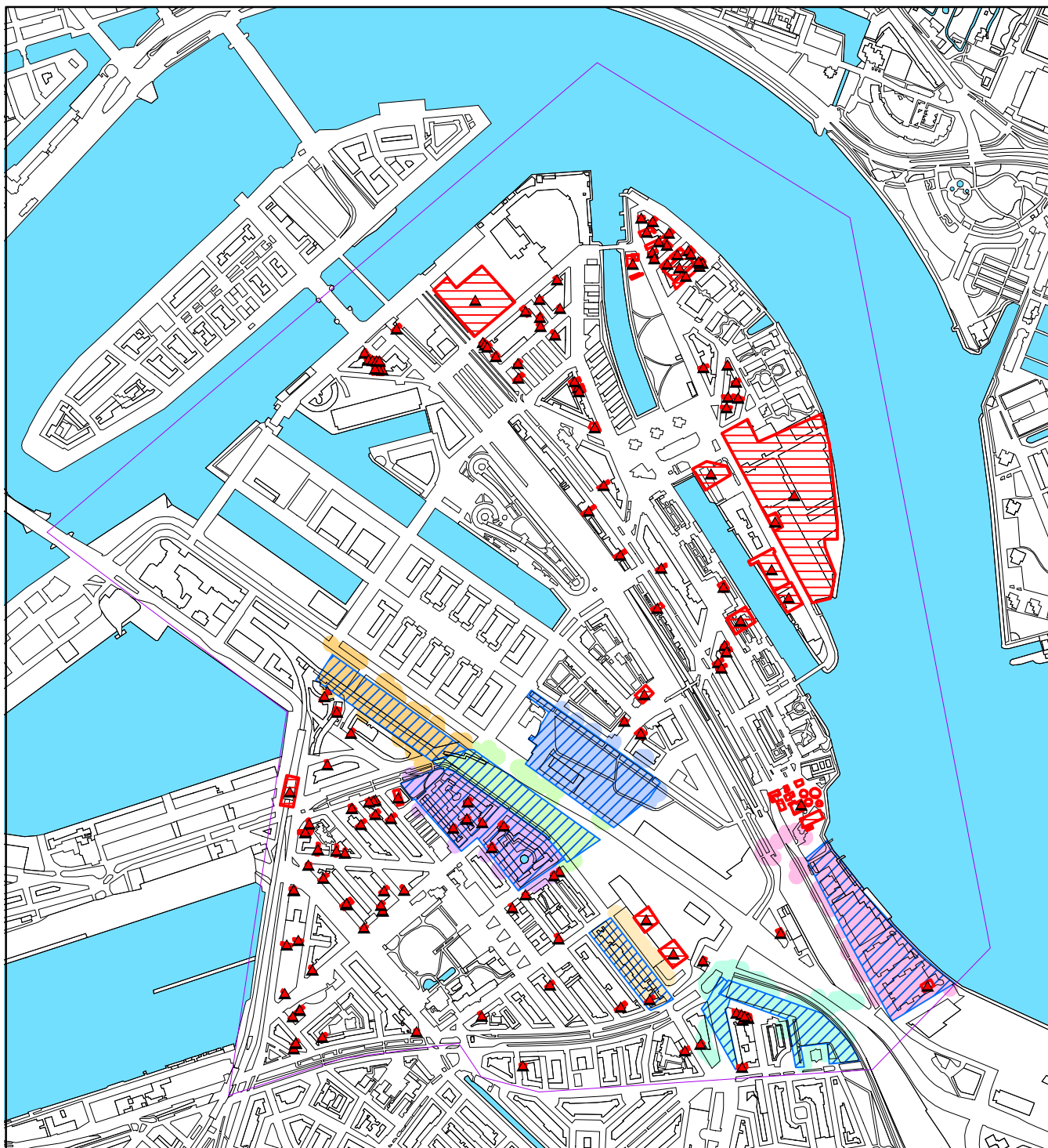
locatie receptoren:

▨ water, aangetroffen binnen de arcering heeft als herkomst het gebied met de corresponderende achterliggende kleur.

overig:

▭ begrenzing pilotgebied





Figuur 4.3f: herkomst van het water binnen de plangebieden voor woningen en voorzieningen in relatie met potentiële emissie bronnen.

locatie bronnen met hoge BTEXN emissie kans:

▲ bedrijfs centrum

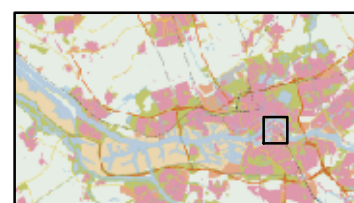
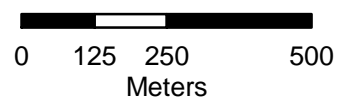
▭ bedrijfs omtrek

locatie receptoren:

▨ water, aangetroffen binnen de arcering heeft als herkomst het gebied met de corresponderende achterliggende kleur.

overig:

▭ begrenzing pilotgebied



De plannen voor deze plangebieden zijn grotendeels nog niet volledig uitgekristaliseerd en ten aanzien van sanering van grond en grondwater is nog veel onduidelijkheid. Op basis van de gepresenteerde kaarten kunnen prioriteiten worden toegekend aan het onderzoeken en eventueel saneren van verdachte locaties op basis van het feit dat ze:

- een plangebied beïnvloeden
- een object buiten het plangebied beïnvloeden
- het watervoerende pakket beïnvloeden

4.4 Grondwaterbelastbaarheid

Er worden 7 kaarten gepresenteerd:

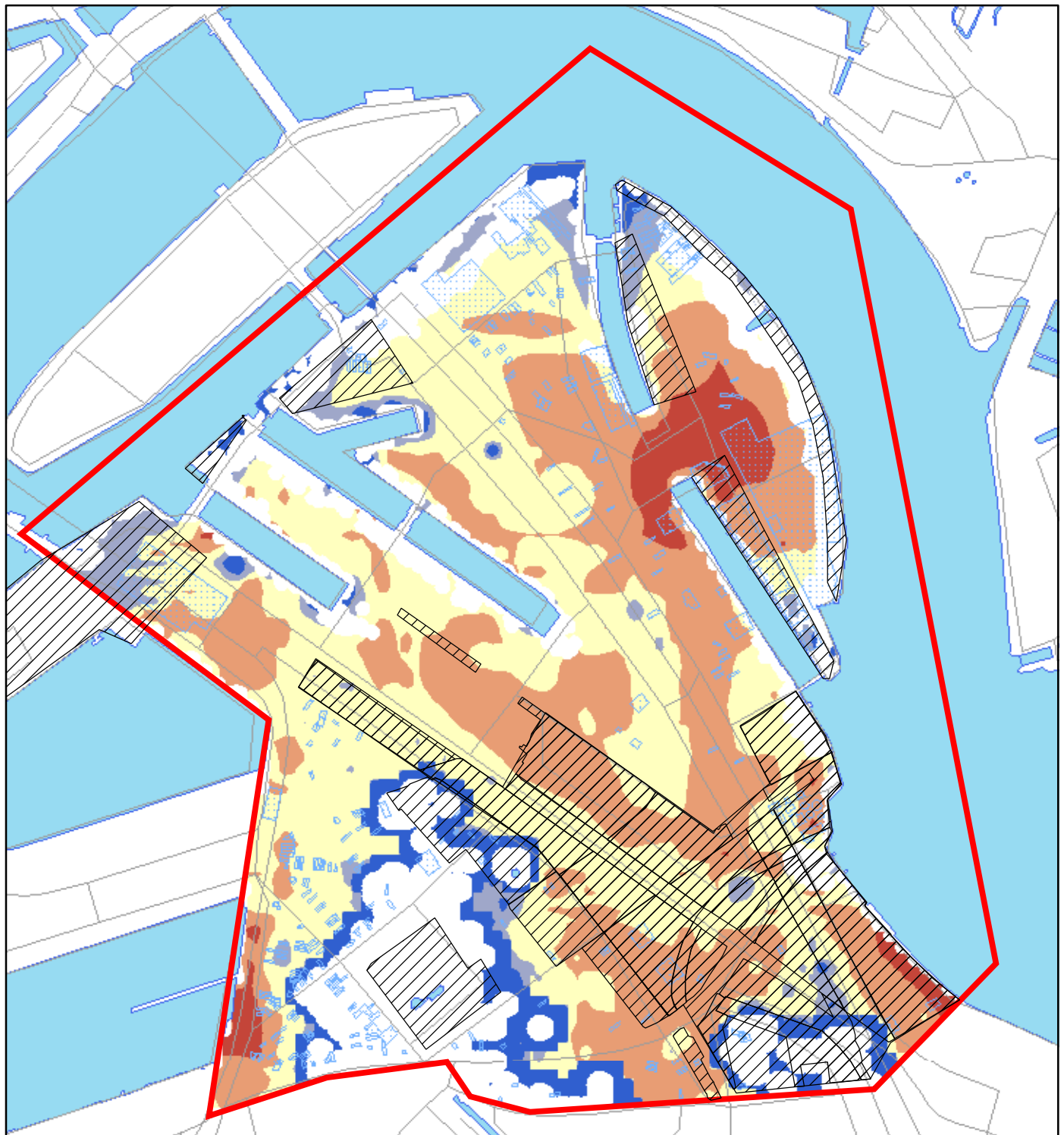
- a. reistijden bij advection transport
- b. reistijden met retardatie; benzeen
- c. reistijden met retardatie; PER
- d. reistijden met retardatie; VC
- e. doorbraakfractie bij NA en retardatie; benzeen
- f. doorbraakfractie bij NA en retardatie; PER
- g. doorbraakfractie bij NA en retardatie; VC

Elementen in het kaartbeeld:

1. Reistijden bij advection transport
2. Reistijden bij geretardeerd transport
3. Doorbraakfractie bij retardatie en NA
4. Bronlocaties

Interpretatie:

1. Dit geeft de reistijden aan van doorbraak van stoffen in het grondwater naar het eerste watervoerend pakket, die niet worden geretardeerd noch afgebroken. Feitelijk geeft dit kaartbeeld de minst gunstige situatie aan.
2. In het pilotgebied is tamelijk veel organisch stof in de bodemlagen aanwezig. Het is realistisch aan te nemen dat het transport van opgeloste stoffen wordt beïnvloed door retardatie. Als er geen afbraak optreedt vormen deze kaartbeelden de resulterende doorbraaktijd van de maximale concentraties van de verontreinigingen.
3. De doorbraakfracties bij retardatie en NA kunnen worden geschaald naar elke willekeurige gemeten maximale concentratie. Dit levert de te verwachte concentratie op het moment van doorbraak naar het eerste watervoerend pakket.
4. De bronlocaties markeren de locaties waar in het verleden een bedrijf is geweest dat mogelijk een bodem en grondwaterverontreiniging heeft veroorzaakt.



0 250 500 1,000 Meters

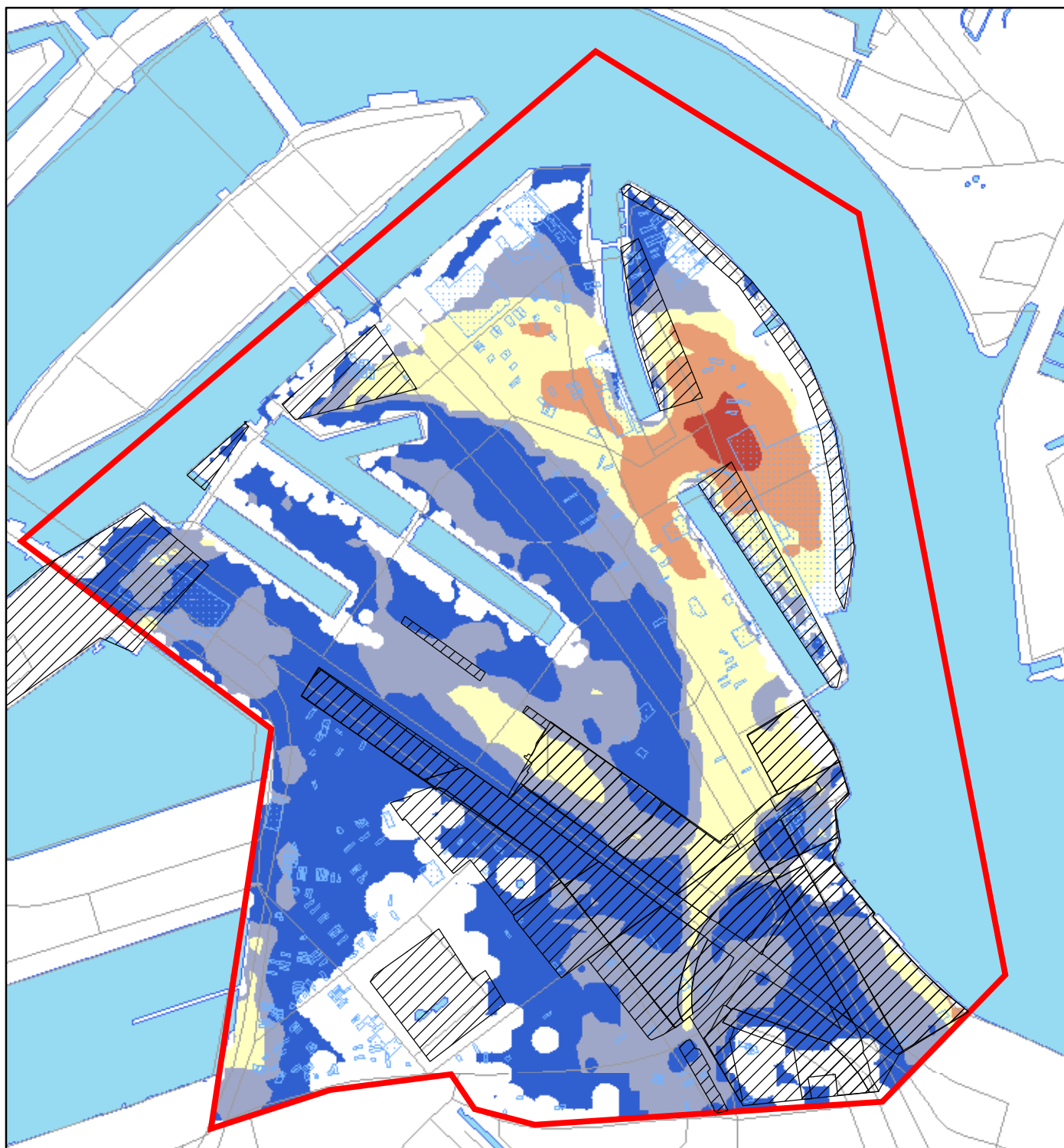
ABIS; deelproject II

Figuur 4.4: Grondwaterbelastbaarheid

a. Advectief transport

- minder dan 20 jaar
- 20 tot 40 jaar
- 40 tot 80 jaar
- 80 tot 160 jaar
- meer dan 160 jaar
- geen afstroming naar 1ewvp
- planlocaties
- pilotgebied
- verdachte locaties





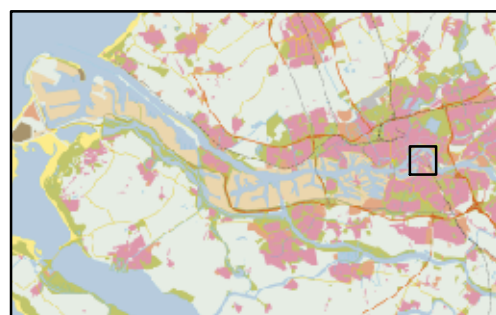
0 250 500 1,000 Meters

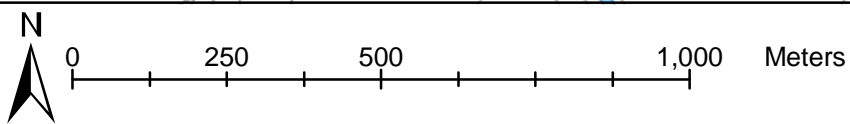
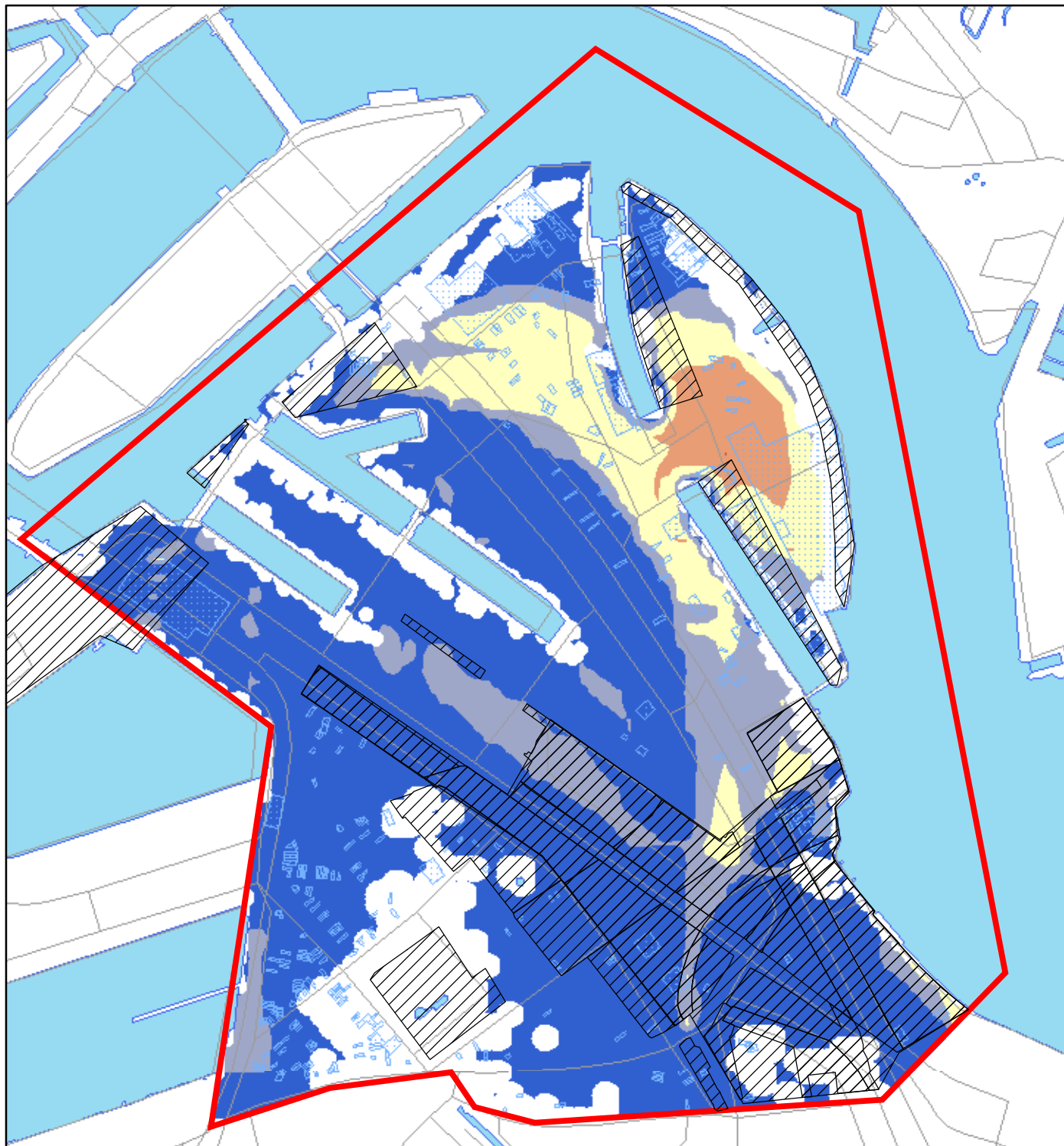
ABIS; deelproject II

Figuur 4.4: Grondwaterbelastbaarheid

b. Transport benzeen met retardatie

- minder dan 80 jaar
- 80 tot 160 jaar
- 160 tot 320 jaar
- 320 tot 640 jaar
- meer dan 640 jaar
- geen afstroming naar 1ewvp
- planlocaties
- pilotgebied
- verdachte locaties



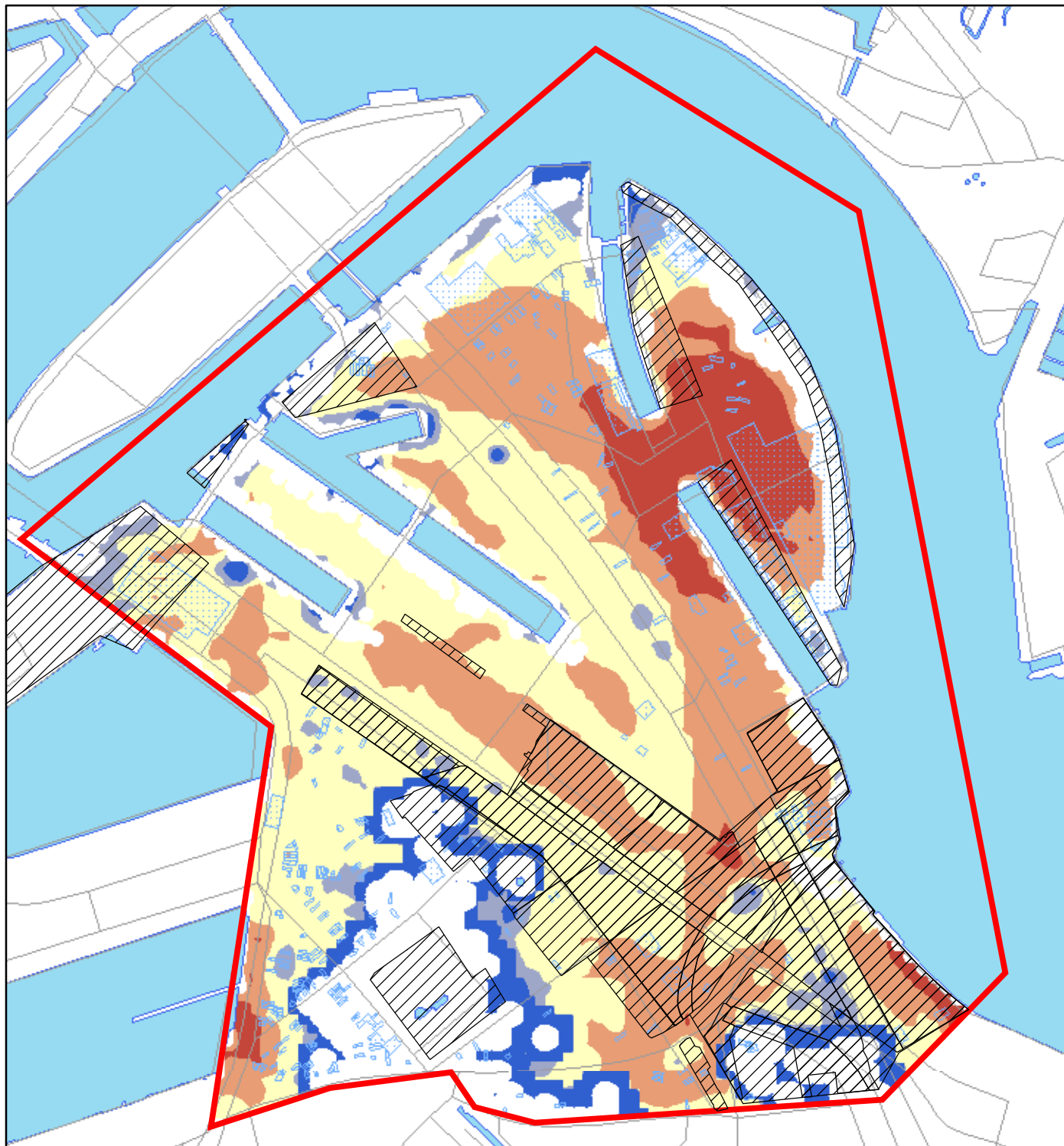


ABIS; deelproject II
Figuur 4.4: Grondwaterbelastbaarheid

c. Transport PER met retardatie

- minder dan 320 jaar
- 320 tot 640 jaar
- 640 tot 1280 jaar
- 1280 tot 5120 jaar
- meer dan 5120 jaar
- geen afstroming naar 1ewvp
- planlocaties
- pilotgebied
- verdachte locaties





0 250 500 1,000 Meters

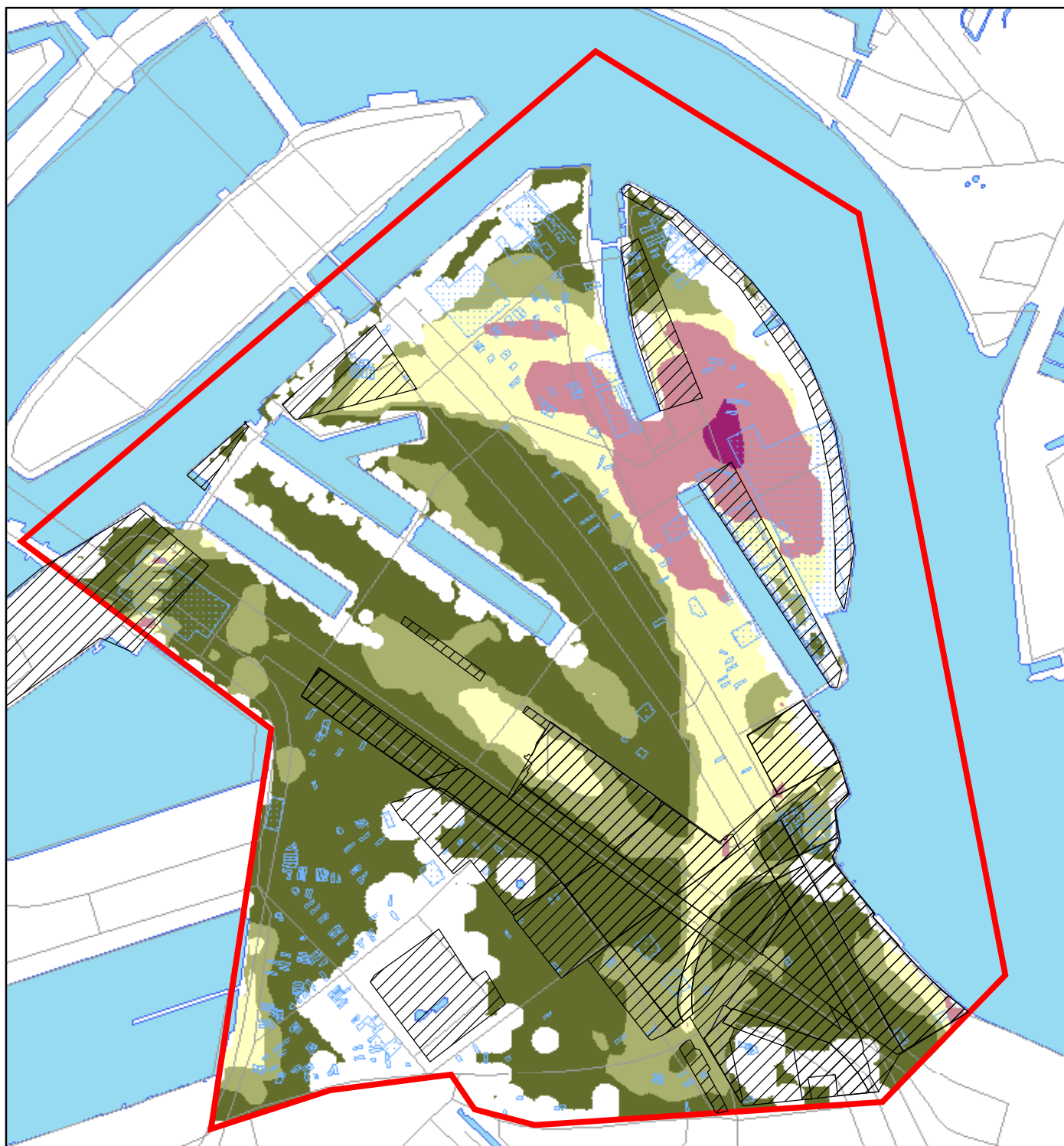
ABIS; deelproject II

Figuur 4.4: Grondwaterbelastbaarheid

d. Transport VC met retardatie

- minder dan 40 jaar
- 40 tot 80 jaar
- 80 tot 160 jaar
- 160 tot 320 jaar
- meer dan 320 jaar
- geen afstroming naar 1ewvp
- planlocaties
- pilotgebied
- verdachte locaties





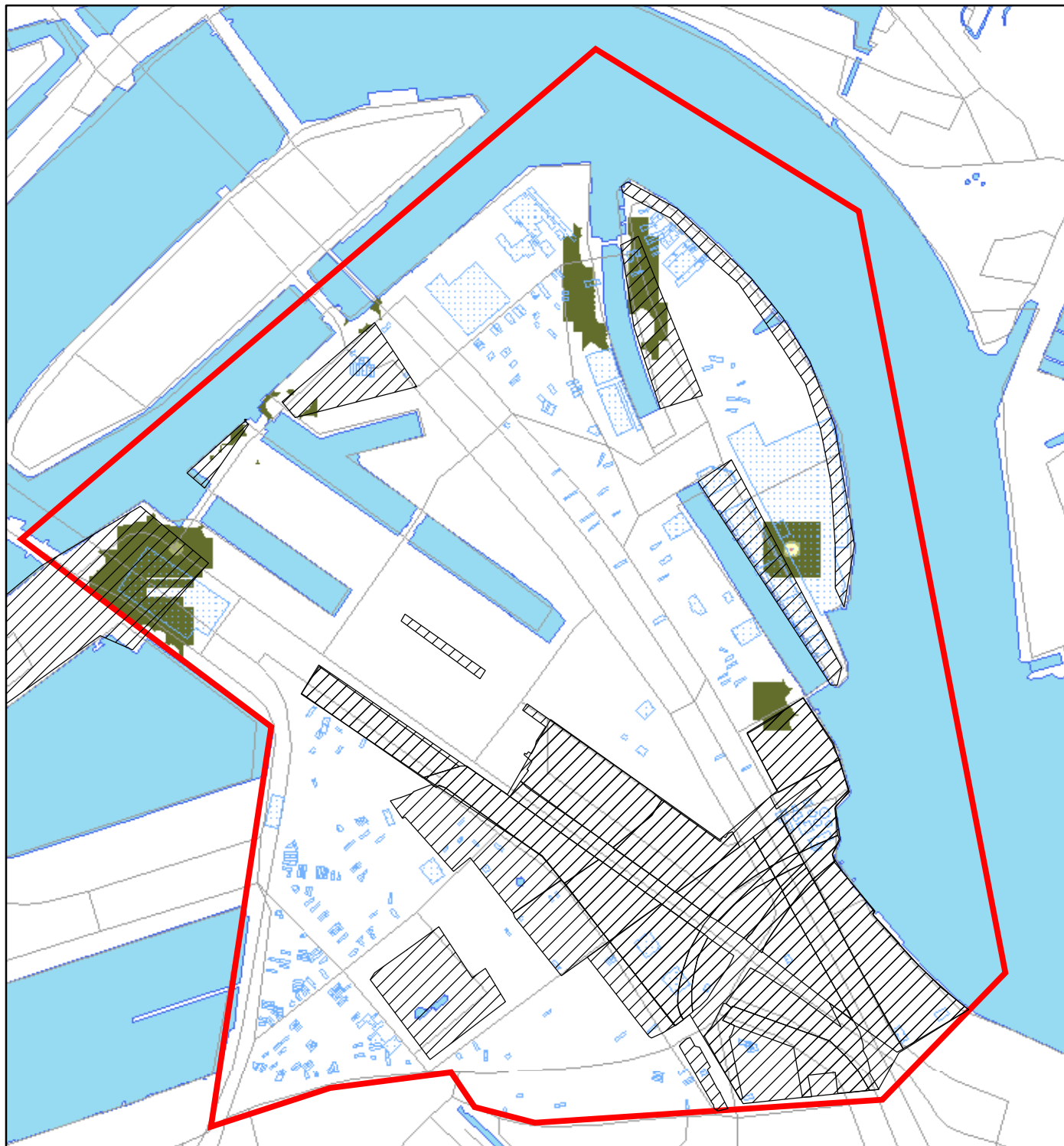
ABIS; deelproject II

Figuur 4.4: Grondwaterbelastbaarheid

e. Maximale percentage van doorbraak; benzeen

- minder dan 20 % van invoerconcentratie
- 20 tot 40 % van invoerconcentratie
- 40 tot 60 % van invoerconcentratie
- 60 tot 80 % van invoerconcentratie
- meer dan 80 % van invoerconcentratie
- geen doorbraak naar 1ewvp
- planlocaties
- pilotgebied
- verdachte locaties





0 250 500 1,000 Meters

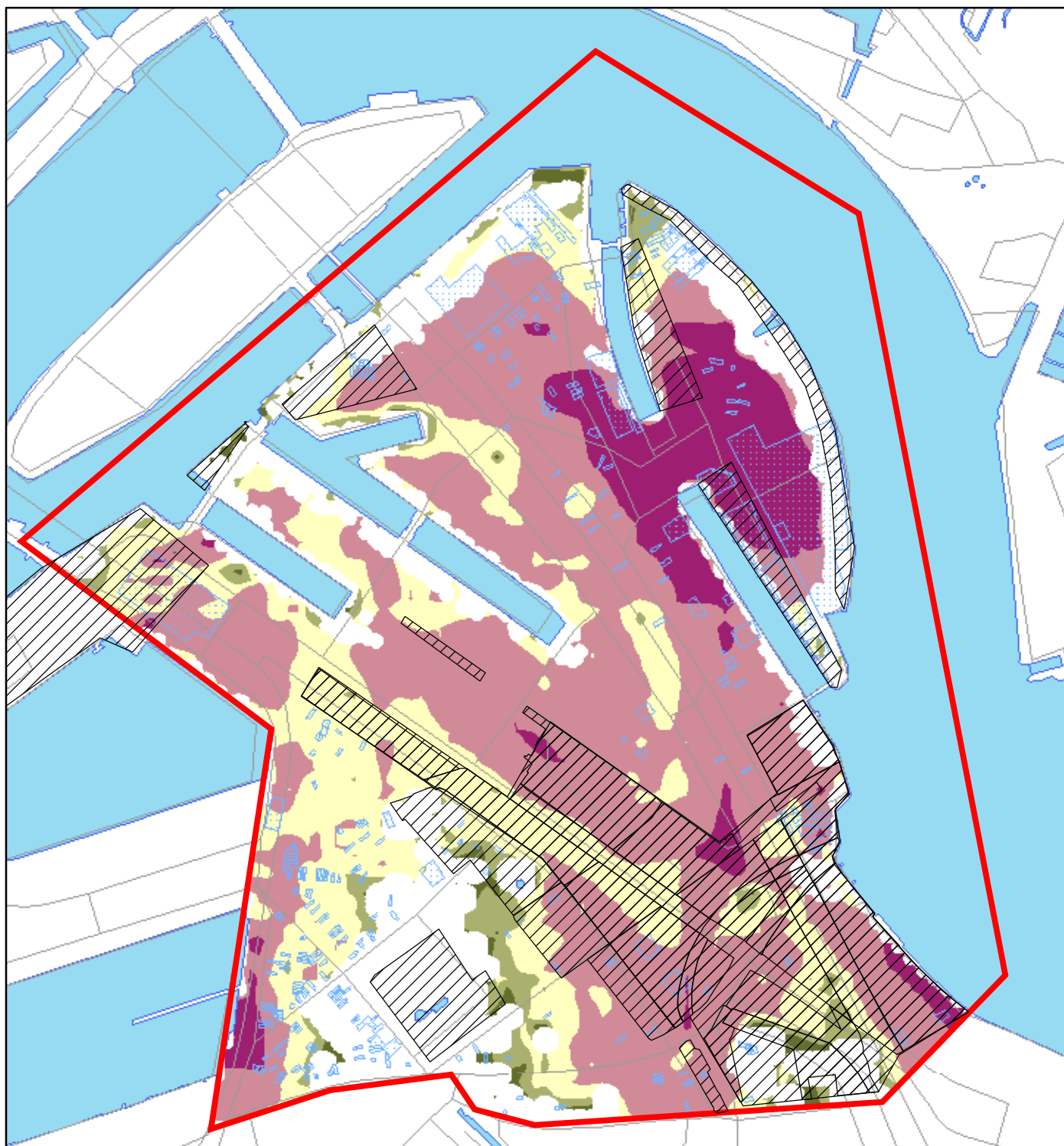
ABIS; deelproject II

Figuur 4.4: Grondwaterbelastbaarheid

f. Maximale percentage van doorbraak; PER

- minder dan 0,1 % van de invoerconcentratie
- 0,1 tot 0,2 % van invoerconcentratie
- 0,2 tot 0,4 % van invoerconcentratie
- 0,4 tot 0,8 % van invoerconcentratie
- meer dan 0,8 % van invoerconcentratie
- geen doorbraak in 1ewvp van opgeloste fractie
- planlocaties
- pilotgebied
- verdachte locaties





ABIS; deelproject II

Figuur 4.4: Grondwaterbelastbaarheid

g. Maximale percentage van doorbraak; VC

- minder dan 20 % van invoerconcentratie
- 20 tot 40 % van invoerconcentratie
- 40 tot 60 % van invoerconcentratie
- 60 tot 80 % van invoerconcentratie
- meer dan 80 % van invoerconcentratie
- geen afstroming naar het 1ewvp
- planlocaties
- pilotgebied
- verdachte locaties



Gebruik:

- Op basis van deze kaarten is het mogelijk een verwachting uit te spreken over de risico's van een verdachte locatie. De maximale belasting van het eerste watervoerend pakket door een potentiële bron kan worden gekwantificeerd. Op basis daarvan kan direct het risico van een bepaalde verdachte locatie worden geëvalueerd. Ook de onderlinge verschillen tussen diverse verdachte locaties is nu in beeld en er kan een prioritering worden gemaakt.
- Met name gebieden waarin veel tussenzandlagen de holocene deklaag doorsnijden vormen de grootste risico's. Daar waar de holocene klei- en veenlagen continu aanwezig zijn, zijn er geen actuele risico's. Nader onderzoek naar de verspreidingsrisico's richting het eerste watervoerend pakket kan sober worden ingestoken in deze laatste gebieden.
- De risico's van zaklagen kunnen niet met deze kaartbeelden worden geëvalueerd. Op basis van de kaartbeelden is overigens duidelijk dat alleen zaklagen een korte termijn risico vormen. Opgeloste verontreinigingen zullen pas na vele tientallen zo niet honderden jaren actueel worden.



Gemeentewerken
Gemeente Rotterdam

Literatuur

- lit. 1. Streng, J.M.A./A.Pepels/E. de Heer, Integrale Grondwaterverkenning Stadsregio Rotterdam. Fase 1: Inventarisatie en karakterisatie. TNO/NITG en I-bureau Gemeentewerken
- lit. 2. TNO, 1984, Grondwaterkaart van Nederland, Rotterdam, 37 west, 37 oost, rapportnummer: GWK 35
- lit. 3. a) Rijksgeologische Dienst, 1979, Geologische kaart van Nederland 1:50.000, kaartblad Rotterdam West
b) NITG-TNO, 1998, Geologische kaart van Nederland 1:50.000, kaartblad Rotterdam Oost
- lit. 4. IGWR, MRO Bodem, 2002, BIO Diepgrondwater; deelrapport 1: modellering, dossiernummer 2000-0640, conceptrapportage.
- lit. 5. IGWR, 2003, Adaptief Bodembeheer in Steden, Hoofdocument
- lit. 6. Zheng, C., Wang, P., 1998, MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulating of Advection, Dispersion and Chemical reactions of Contaminants in Groundwater Systems, University of Alabama.
- lit. 7. IGWR, 2003, Adaptief Bodembeheer in Steden, Deelproject III: Receptor; het reactorvat
- lit. 8. McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., 1988, 1996, A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater-Flow-Model, Techniques of Water Resources Investigations 06-A1, United States Geological Survey.
- lit. 9. Anderson, M.P., Woessner, W.W., 1992, Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press
- lit. 10. Vereniging voor Landinrichting, 2000, Cultuurtechnisch Vademecum, Handboek voor inrichting en beheer van land, water en milieu, Elsevier bedrijfsinformatie, Doetinchem



Gemeentewerken
Gemeente Rotterdam

Verklarende woordenlijst

Bedreigde objecten	: benaming voor gebieden of objecten zoals natuurgebieden, oppervlakte water, woonwijken of het watervoerende pakket, waarvan de kwaliteit bedreigd wordt door verspreiding van verontreinigingen
Berging	: opslag van water binnen het grondwaterstromingssysteem; volume water dat per volume eenheid van een watervoerend pakket vrijkomt bij een grondwaterstand of stijghoogteverandering
Binnendijkse poldergebieden	: ter bescherming van lagergelegen land zijn dijkringen aangelegd langs rivieren; binnendijkse gebieden bevinden zich binnen de dijkkring
Bodemprofieltypes	: indeling van karakteristieke bodemopbouwprofielen in de holocene deklaag op basis van hun geohydrologische eigenschappen
Boezemwatergangen	: stelsel van hogergelegen watergangen in poldergebieden, waarheen het overtollige water uit de polder wordt afgevoerd. Boezemwaterstelsel lozen vervolgens water op de grote rivieren.
Boezemwaterstelsel	: zie boezemwatergangen
Conductance	: Engelse term voor de doorlatendheid per oppervlakte eenheid. Deze grootheid wordt gebruikt in GMS om de stroming van en naar een oppervlaktewaterlichaam of een drainagesysteem in een Modflow-model te beschrijven.
Deklaag	: bovenste slechtdoorlatende laag in het grondwaterstromingssysteem. Door de afsluitende werking van deze laag is er sprake van spanningswater in de watervoerende pakketten.
Doorlaatvermogen	: hydraulische eigenschap van een watervoerend pakket; product van de doorlatendheid en de dikte van het betreffende watervoerende pakket. Het symbool is KD.
Doorlatendheid	: volume water dat per tijdseenheid door een poreus medium (zand) stroomt, afhankelijk van de heersende hydraulische gradient. Het symbool is K.

- DRN-package** : module van Modflow waarmee de invloed van drainagesystemen wordt verdisconteerd in het model. Als de DRN-package in een cel is geactiveerd, zal grondwater worden afgevoerd door de drain zodra de grondwaterstand / stijghoogte in de onderliggende cel boven het drainageniveau komt. De mate van afvoer is afhankelijk van de drainageweerstand en van het verschil tussen het drainageniveau en de stijghoogte in de onderliggende cel.
- Effectieve neerslag** : zie neerslagoverschot
- Evapotranspiratie** : geheel aan processen die de opname van water uit de verzadigde en onverzadigde zone in de bodem door plantewortels en de verdamping van water vanuit de bladeren beschrijven.
- Freatisch pakket** : doorlatend pakket waarin de grondwaterstand in direct contact met de atmosfeer staat.
- Geohydrologie** : studie naar de processen die het grondwaterstromingssysteem bepalen.
- Geologie** : studie naar de opbouw en verbreiding van losse afzettingen en gesteentes in de ondergrond.
- Geulopvullingen** : zandige afzettingen waarmee geulen zijn opgevuld, die de holocene deklaag in het verleden doorsneden.
- Gevoeligheidsanalyse** : analyse van de invloed die diverse parameters in een model op de resultaten van het model hebben. Voorts wordt de samenhang tussen de parameters in het betreffende model onderzocht.
- Gewasfactor** : constante waarmee de invloed van verschillen in vegetatietypes op het neerslagoverschot wordt verdisconteerd bij de bepaling van de Makkingverdamping lit.4
- GHB-package** : module van Modflow waarmee de invloed van peilbeheersing wordt verdisconteerd in het model. Als de GHB-package in een cel is geactiveerd, zal grondwater worden afgevoerd door de sloot zodra de grondwaterstand / stijghoogte in de onderliggende cel boven het slootpeil komt. Als de stijghoogte in de onderliggende cel onder het slootpeil raakt, zal de sloot juist water gaan infiltreren. De mate van afvoer en infiltratie is afhankelijk van de drainage/infiltratie weerstand en van het verschil tussen het slootpeil en de stijghoogte in de onderliggende cel.
- GIS** : Geografisch Informatie Systeem.

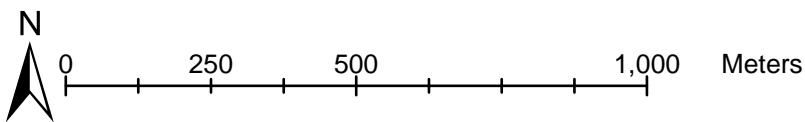
GMS	: Pre- en postprocessor van Modflow; software waarmee de invoerbestanden van Modflow grondwaterstromingsmodellen kunnen worden vervaardigd.
Grondwaterstand	: de meest ondiepe grondwaterspiegel.
Hydrogeologie	: studie waarin de opbouw en verbreiding van bodemlagen wordt ingedeeld op basis van hun geohydrologische eigenschappen.
Interceptie	: afvangen van hemelwater door het bladerdek van vegetatie of door verhard oppervlak voordat het hemelwater op het maaiveld valt.
Interessegebied	: het gebied waarover op basis van het model uitspraken zullen worden gedaan aangaande de grondwatersystemen.
K-waarde	: zie doorlatendheid.
Kalibratie	: verwijst naar het proces waarbij de parameters, randvoorwaardes en schematisaties van het model zodanig worden aangepast dat het model gemeten stijghoogtes en fluxen binnen een vooraf gestelde fout kan simuleren.
Kalibratieperiode	: periode waarvan de gemiddelde gemeten stijghoogtes en grondwaterstanden worden vergeleken met de berekende stijghoogtes en grondwaterstanden. In het model dienen eveneens de gemiddelde onttrekkingshoeveelheden, polder- en rivierpeilen en neerslaghoeveelheden horende bij de kalibratieperiode te worden ingevoerd.
Kwetsbare objecten	: zie bedreigde objecten
Landgebruikstype	: inrichting / functie van een bepaald gebied; in onderhavige studie zijn landgebruikstypes ingedeeld op basis van hun hydrologische eigenschappen.
Makkingverdamping	: verdampingsclassificatie volgens Makking (lit.4 en 10).
Meterse buizen	: verouderd type rioolbuizen met een ovaalvormige doorsnede. De verbinding tussen de buizen worden in de meeste gevallen in de loop van de tijd lek. Dit type buis zorgt voor aanzienlijke drainage van het ondiepe grondwater in de stad Rotterdam.
Modelgebied	: gehele gebied dat in het grondwatermodel is opgenomen.

- Modelnetwerk** : netwerk van cellen waarin het modelgebied is opgedeeld. In elke cel wordt op basis van de geohydrologische eigenschappen in die cel en op basis van de stijghoogte in naburige cellen de in- en uitstroom in de cel en de stijghoogte in de cel berekent
- Modelrand** : zijkant van het grondwatermodel.
- Modflow** : numeriek 3 dimensionaal grondwaterstromingsmodel gebaseerd op de eindigde differentie oplossingsmethode (lit.8).
- NA-potentie** : Natuurlijke Afbraakpotentie van verontreinigingen in de bodem onder invloed van micro-organismen aldaar.
- Neerslagoverschot** : het deel van de neerslag die uiteindelijk zal infiltreren en het grondwater zal aanvullen.
- Oeverwallen** : natuurlijk gevormde verhoging langs de rivier die onder invloed van verschillen in stroomsnelheden bij overstrooming van de rivier worden gevormd.
- Ontwateringspeil** : niveau onder straten en wegen waarboven het grondwater wordt afgevangen door het stedelijk waterbeheer.
- Onverzadigde zone** : zone in de bodem waarin de vaste fase, de gasfase en de waterfase naast elkaar voorkomen.
- Oppervlaktewater (lichamen)** : sloten, rivieren, meren etc.
- Optimalisatie** : het aanpassen van parameterwaardes op basis van gemeten stijghoogtes zodat het model de grondwaterstroming beter beschrijft.
- Peilbeheersing** : in peilbeheerste gebieden (polders en droogmakerijen) wordt door middel van een fijnmazig netwerk van sloten en greppels, het oppervlakte waterpeil en de ondiepe grondwaterstand kunstmatig op het gewenste peil gehouden.
- Randvoorwaarde** : In dit kader wordt onder randvoorwaarden de manier verstaan waarop de zijkanten van het grondwatermodel zijn gedefinieerd. Onderscheidt wordt gemaakt tussen vaste stijghoogterand waarover grondwater vrijelijk kan toestromen en een 'dichte rand' waarlangs geen stroming plaats kan vinden. Het verloop van een stroomlijn wordt in de regel als dichte rand gekozen en een stijghoogte isohyps dient meestal als vaste rand. Zie lit.8 en 9.

- REGISv3.2** : Regionaal Geohydrologisch Informatiesysteem versie 3.2, opgesteld door NITG-TNO en IGWR, zie lit.1
- RCH-package** : module van Modflow waarmee de invloed van de toevoer van de neerslag wordt verdisconteerd in het modelgebied.
- RIV-package** : module van Modflow waarmee de invloed van rivieren en meren wordt verdisconteerd in het model. Feitelijk werkt deze package nagenoeg hetzelfde als de GHB-package (zie aldaar). Het enige verschil is dat de grootte van de toestroom naar de watervoerende laag in de RIV-package afhankelijk is van zowel het verschil tussen rivierpeil en rivierbodem.
- Slechtdoorlatende laag** : bodemlaag waarin slechts zeer geringe stroming kan optreden. Door de grote weerstand zal gezien op regionale schaal alleen verticale stroming plaatsvinden. In de regel reageren pakketten die hoofdzakelijk uit klei- en veen bestaan als slechtdoorlatende laag.
- Spreadingslengte (λ)** : – $\lambda = \sqrt{KDc}$, met KD als doorlaatvermogen van watervoerend pakket en c als effectieve weerstand van de boven- en onderliggende slechtdoorlatende lagen.
- maat voor de invloed van bemaling van een watervoerend pakket. Met behulp van de spreidingslengte kan de haalbaarheid van een winning uit een bepaald watervoerend pakket worden afgewogen tegen de spreidingslengte van andere watervoerende pakketten (waarin bijvoorbeeld succesvolle winning van grondwater plaatsvindt).
- Stijghoogte** : hoogte waar het grondwater in een watervoerend pakket onder spanning zal stijgen in de peilbuis.
- Stoftransportmodellering** : bij *stoftransportmodellering* wordt onderzocht op welke wijze stoffen door de bodem kunnen worden getransporteerd, die zijn opgelost in het grondwater.
- Terugschrijdend jaargemiddelde** : voor elke dag wordt het gemiddelde berekend (van bijvoorbeeld de neerslag) van alle dagwaardes in de periode tussen de betreffende dag en de dag precies een jaar daarvoor.
- Topsysteem** : in grondwatermodellen wordt de invloed van de interactie tussen grond- en oppervlaktewater en de invloed van neerslag / verdamping binnen aan de bovenkant (de top) van het grondwater model verdisconteerd. Feitelijk dient het topsysteem als 'rand'voorwaarden aan de bovenkant van het model.

- Verhard oppervlak** : in bebouwde gebieden vormen asfalt en daken van gebouwen een obstakel voor infiltratie van hemelwater naar het grondwater. Het totale oppervlak van asfalt en daken wordt het verhard oppervlak in een bepaald gebied genoemd.
- Watervoerend pakket** : opeenvolging van goed doorlatende lagen in de bodem. In deze pakketten kan zowel horizontale als verticale stroming optreden.
- Watervoerende laag** : zie watervoerend pakket
- Weerstand** :
 - onder weerstand wordt de weerstand voor verticale stroming door een slechtdoorlatende laag verstaan.
 - de weerstand (C) is evenredig met de laagdikte (D) en omgekeerd evenredig met de doorlatendheid (k):
$$k = \frac{D}{C}$$
- Zoet / zout grondwatergrensvlak** : scheiding tussen brak grondwater ([Cl⁻] < 1000 mg/l) en zout grondwater ([Cl⁻] > 1000 mg/l). Deze scheiding houdt eveneens een scheiding tussen dichtheden in. Op regionale schaal zal er op nauwelijks zoet of brakwater verticaal afstromen naar zoutwater en kan het zoet / zout grondwatergrensvlak gezien worden als een ondoorlatende laag.

Bijlage 1 Pilotgebied Deelgemeente Feyenoord



ABIS; deelproject II; bijlage 1

figuur 1: bodemgebruiksvormen in 2003

categorie I

- Woningen
- Woningen - terrein
- Openbaar groen
- Overig groen

categorie II

- Braak
- Wegbermen/groene linten

categorie III

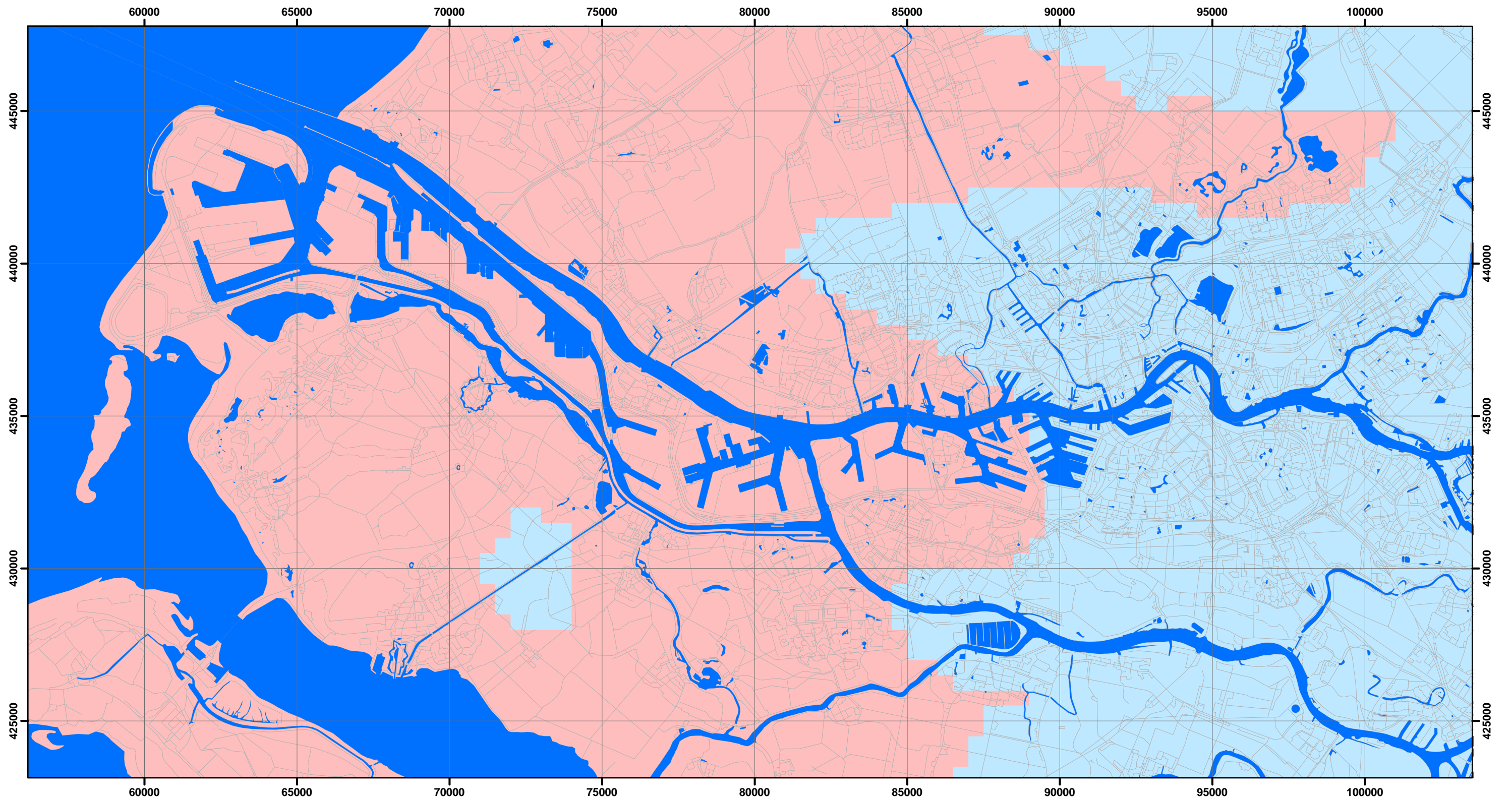
- Kantoren/voorzieningen
- Industrie
- Industrie - terrein

overig

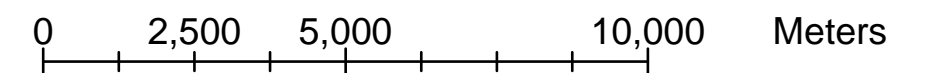
- Pilot gebied
- Infrastructuur



Bijlage 2 Zoet zout grensvlak van grondwater in watervoerende pakketten



ABIS; Deelproject II, Bijlage 2



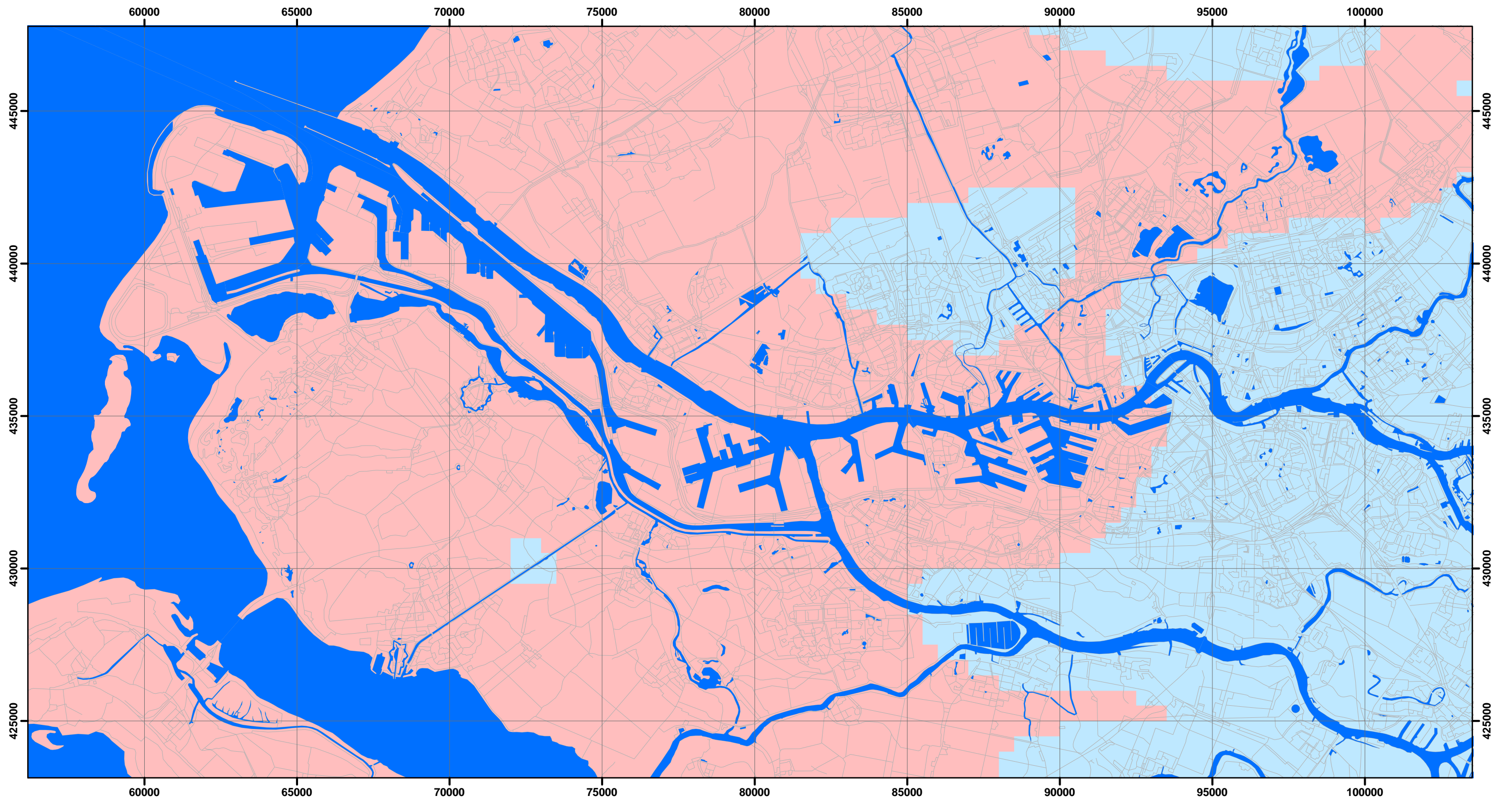
Zoet zout grondwatergrensvlak (1000 mg/l)

- grensvlak in 1e wvp
- grensvlak onder 1e wvp



Gemeentewerken
Gemeente Rotterdam

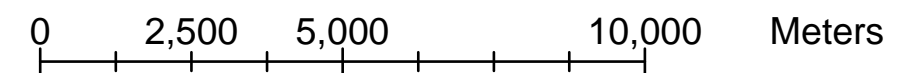
Ingenieursbureau



ABIS; Deelproject II, Bijlage 2

Zoet zout grondwatergrensvlak (1000 mg/l)

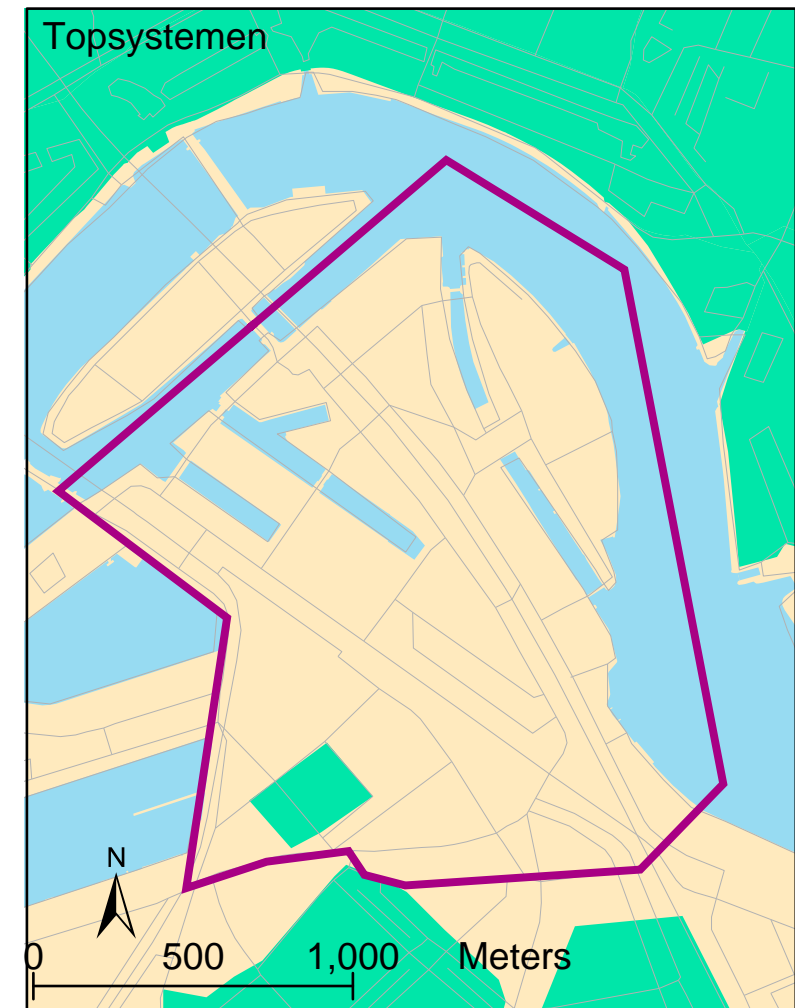
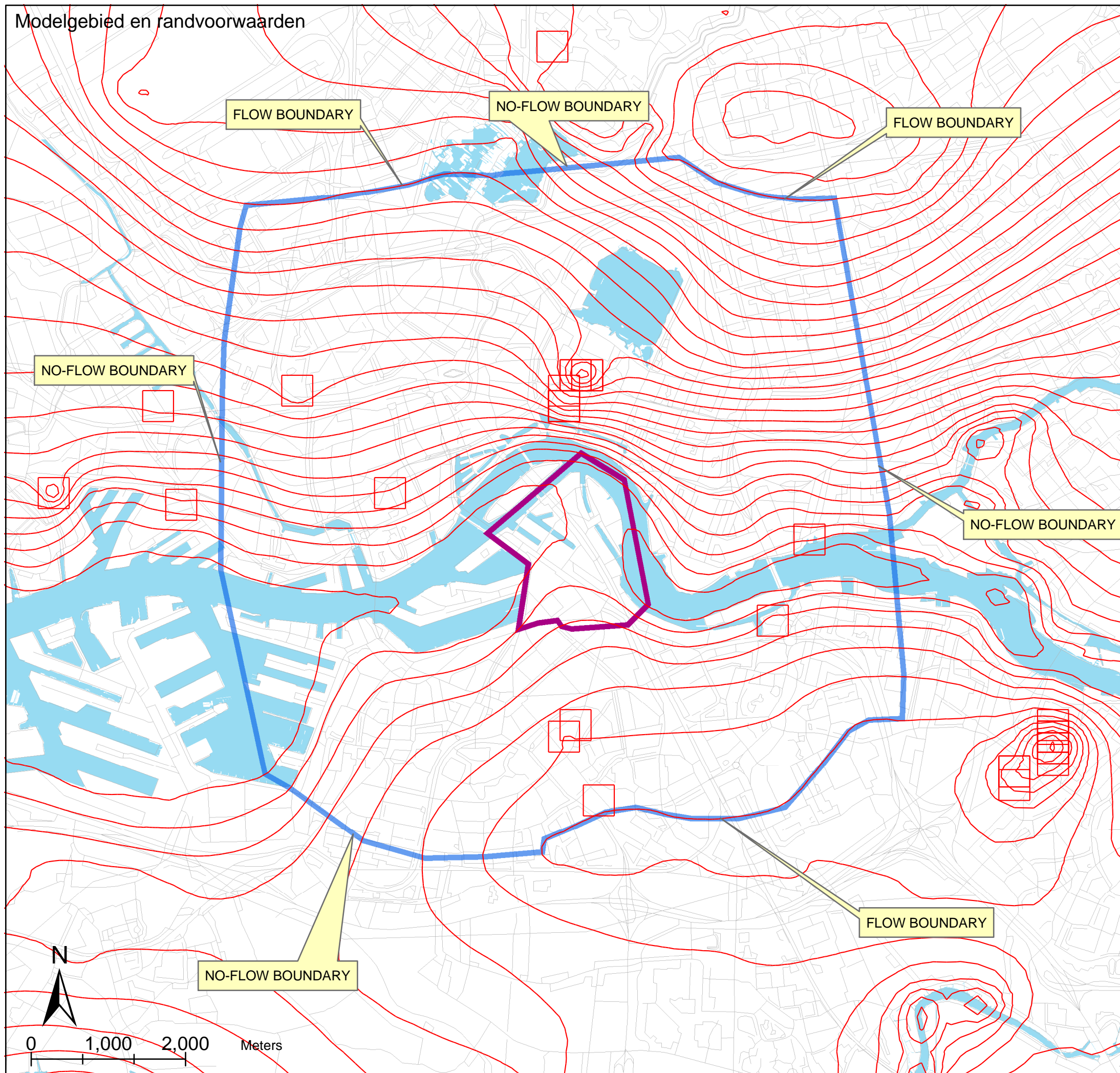
- grensvlak onder 2e wvp
- grensvlak in of boven 2e wvp



Gemeentewerken
Gemeente Rotterdam

Ingenieursbureau

Bijlage 3 Overzicht grondwatermodel Feyenoord



Legenda

- peilbeheerste gebieden (polder)
- oppervlaktewater (rivieren e.d.)
- stedelijk waterbeheer (riolering en drainage)
- grondwateronttrekking eerste watervoerend pakket
- stijghoogte eerste watervoerende pakket
- ModelFeyenoord
- interessegebied

Modelnetwerk:

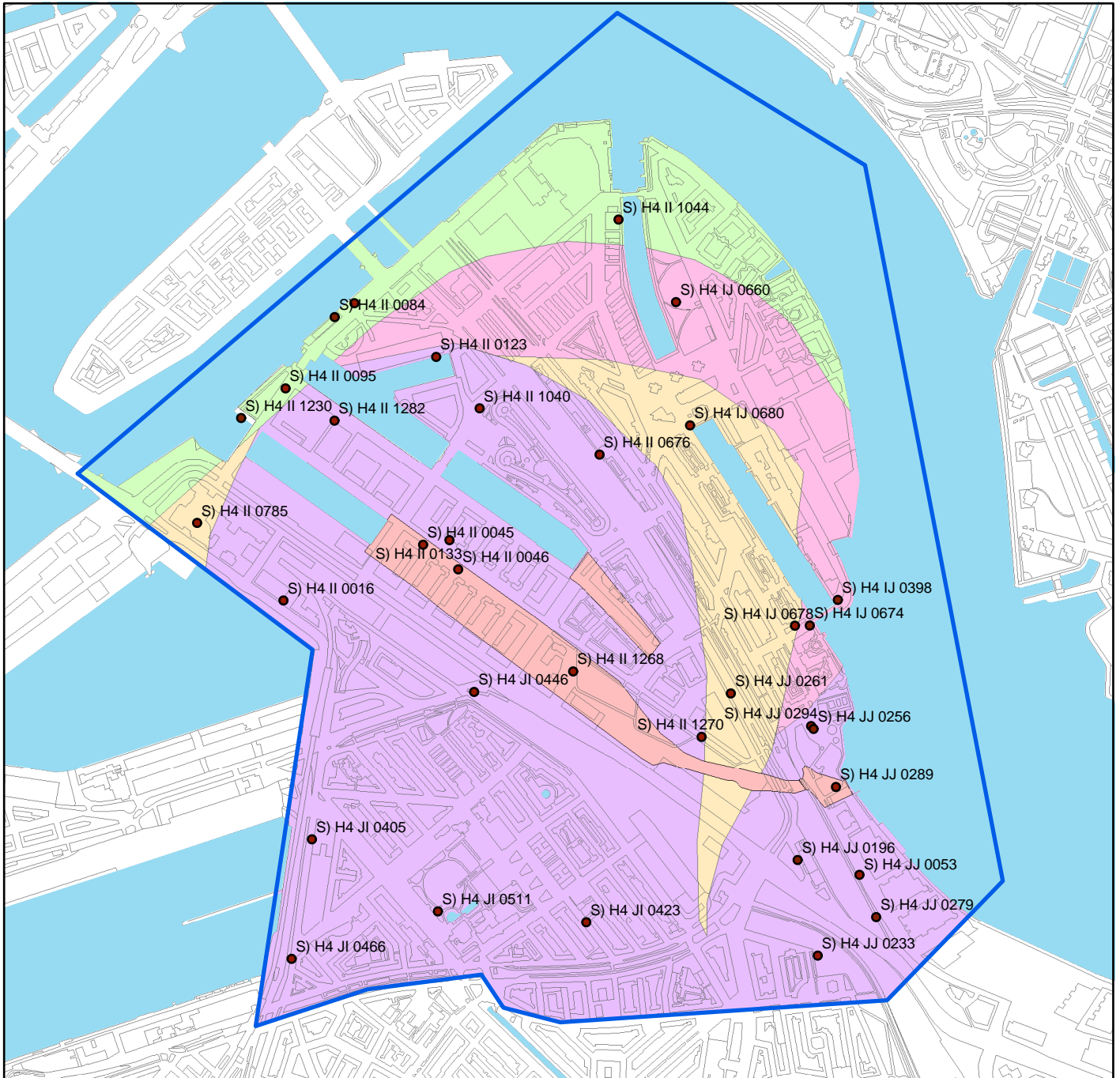
- Buitengebied: 200 m x 200 m
- Interessegebied: 25 m x 25 m
- Bronzones: 10 m x 10 m

(NB: bronzones omvatten de 2 locaties met VOCI's en 2 locaties met BTEXN t.b.v. de stoftransportmodellering)

Tussen bovengenoemde zones worden overgangsgebieden ingebracht waarmee gezorgd wordt dat er niet meer dan 50 % dichtheidsverschillen in het netwerk ontstaat.



Bijlage 4 Bodemprofieltypes ingedeeld als geohydrologische eenheden









0 250 500 1,000 Meters

ABIS, deelproject II; bijlage 4

 pilot gebied

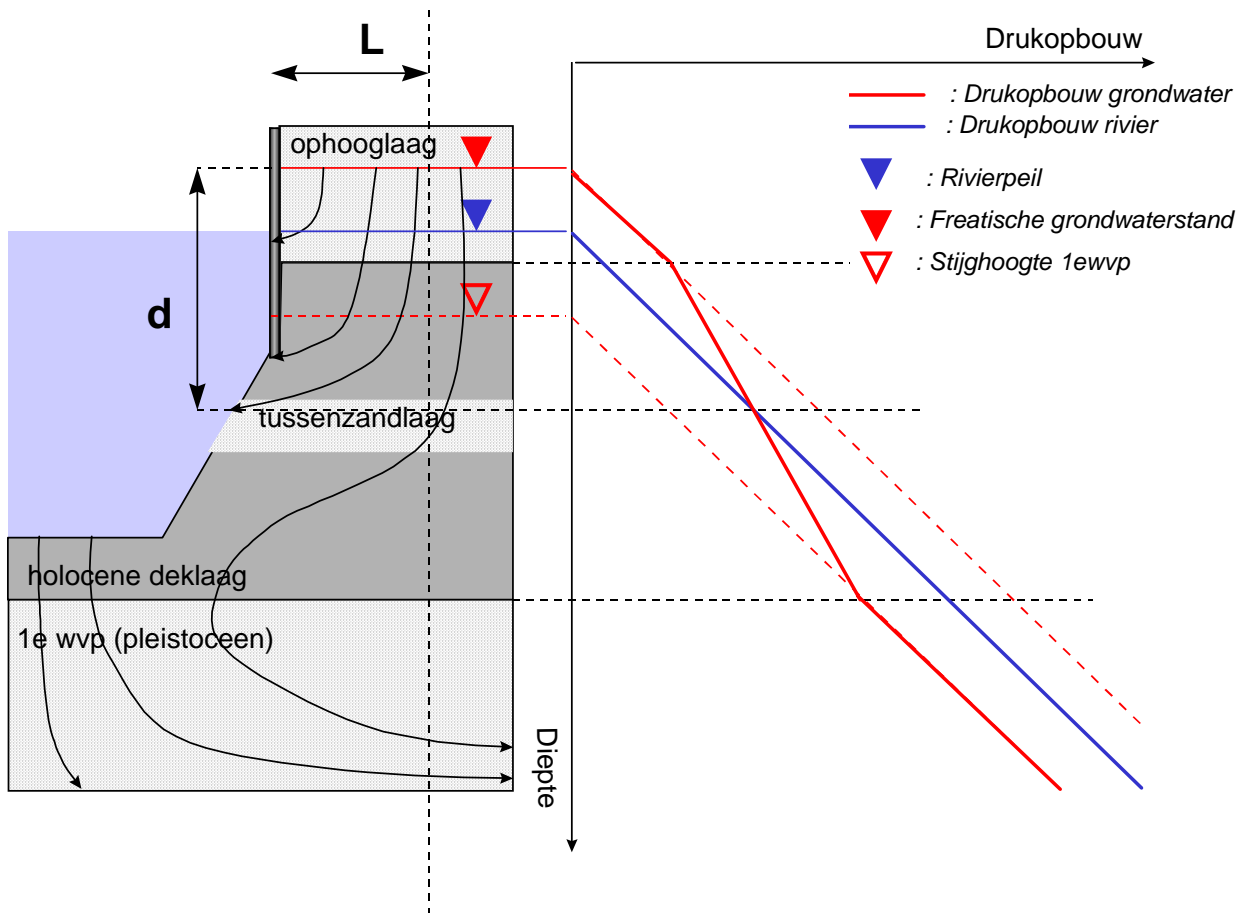
bodemprofieltypes

-  type 1: klei/veen met tussenzandlaag bovenin holoceen pakket
-  type 2: klei/veen met tussenzandlaag in het midden van holoceen pakket
-  type 3: klei/veen met tussenzandlaag onderin holoceen pakket
-  type 4: klei/veen zonder tussenzandlagen
-  type 5: gedempte havens
-  geselecteerde sondingen



Bijlage 5 Beschrijving stromings situatie bij de havens

De stromingssituatie en drukopbouw bij het merendeel van het havengebied is weergegeven in Figuur 1. De freatische grondwaterstand is hoger dan zowel het rivierpeil als de stijghoogte in het 1ewvp. Hierdoor treedt er afstroming richting de rivier en richting het 1ewvp op. Voorts is het rivierpeil hoger dan de stijghoogte in het 1ewvp, waardoor er infiltratie vanuit de rivier optreedt.



Figuur 1: drukopbouw langs de kadewand

Aangezien er weinig informatie is over de exacte ligging van de zandgeulen wordt aangenomen dat het stijghoogteverloop over het Holoceen lineair is. De flux die naar het oppervlaktewater stroomt kan plaatsvinden in twee zones: 1 in de antropogene ophooglaag en 2 in het bovenste deel van het Holoceen waar de stijghoogte hoger is dan het rivierpeil.

1. In de antropogene ophooglaag ondervindt het grondwater een weerstand bij het passeren van de damwand/kademuur en door horizontale stroming door de zandige antropogene laag. Aangenomen wordt dat de laatste weerstand te verwaarlozen is ten opzichte van de eerste. De flux die dan naar de haven stroomt is te bepalen uit:

$$q_a = \frac{\Delta H}{c} d_a$$

met,

- q_a flux naar de rivier via de antropogene ophooglaag
- ΔH verschil tussen stijghoogte in antropogene ophooglaag en rivierpeil
- c de weerstand van de damwand/kademuur waar 100 dagen voor wordt aangehouden
- d_a de verzadigde dikte van de kademuur/damwand in de antropogene ophooglaag

2. In de Holocene deklaag wordt de flux met behulp van een waterbalans bepaald: de lengte L is de zone langs de kade waar het grondwater vanuit het Holoceen horizontaal zal afstromen richting het oppervlakte water (havens). De diepte d_h is de zone in de diepte waardoor horizontale afstroming plaatsvindt. Buiten de zones L en d zal het grondwater afstromen naar het eerste watervoerend pakket (Figuur 1).

Met onderstaande formule wordt de lengte L en daarmee de hoeveelheid afstroming in 2-D berekend:

$$q_h = NL = \Delta H k d_h$$

met,

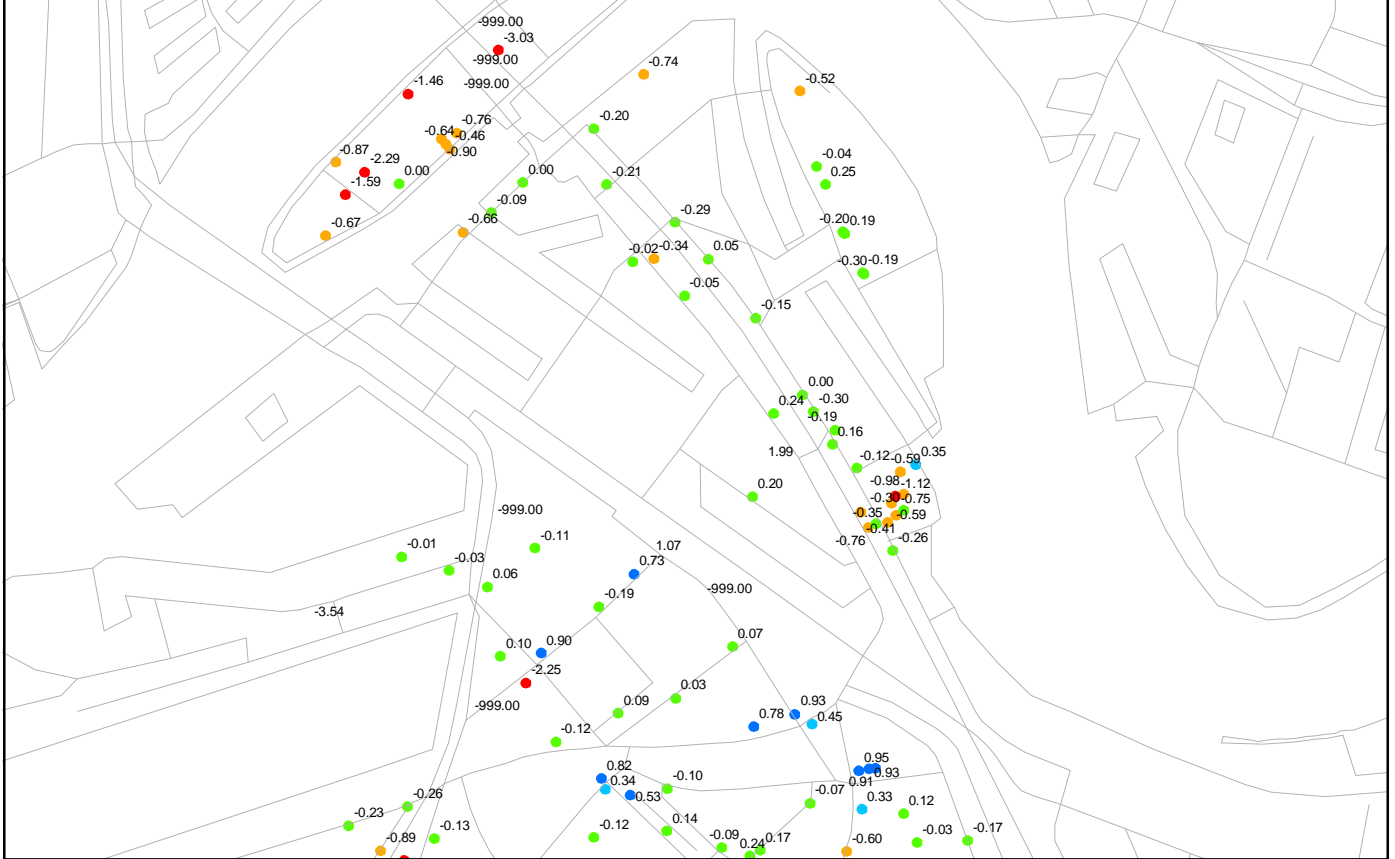
q_h	:	flux naar rivier via Holoceen
N	:	effectieve neerslag [m/dag]
L	:	lengte van horizontale afstroming [m]
ΔH	:	verschil tussen stijghoogte in ophooglaag en rivierpeil [m]
k	:	effectieve doorlatendheid van Holocene laag [m/dag]
d_h	:	diepte van horizontale afstroming in Holocene laag [m]

De totale afstroming naar de haven is de som van de twee deelfluxen. Voor de bepaling de inputparameters wordt uitgegaan van de gegevens uit het grondwatermodel (effectieve neerslag, doorlatendheid, rivierpeil, stijghoogte watervoerend pakket); de stijghoogte in de antropogene laag gekoppeld aan de hoogte van het maaiveld, waarbij de relatie tussen maaiveldhoogten en stijghoogte wordt bepaald uit rapporten van studies in het havengebied.

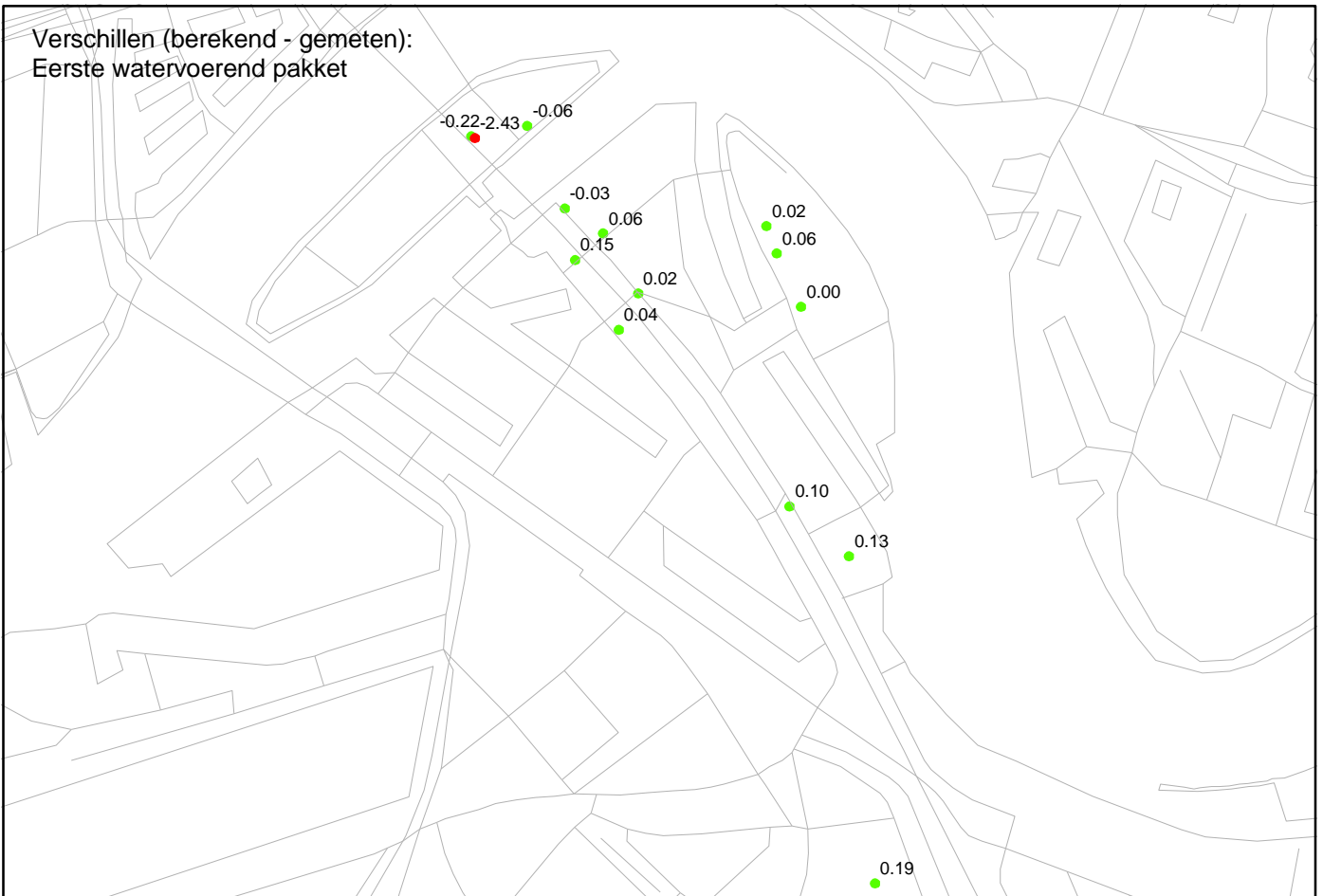
Tijdens de stroombaanalyse zal bepaald worden welk percentage van het water dat in een cel naast de rivier/haven infiltreert, zal afstromen naar de rivier/haven. Een evenredig grote massapercentage van de verontreiniging zal dan ook naar de rivier/haven afstromen en het resterende deel zal naar de diepere pakketten stromen.

Bijlage 6 Kalibratieresultaten grondwatermodel

Verschillen (berekend - gemeten):
Holocene deklaag en freatisch pakket

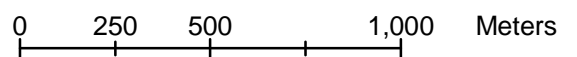


Verschillen (berekend - gemeten):
Eerste watervoerend pakket



ABIS

-- feyenoord8 --



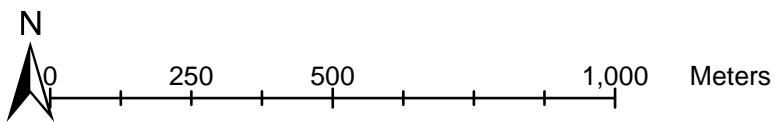
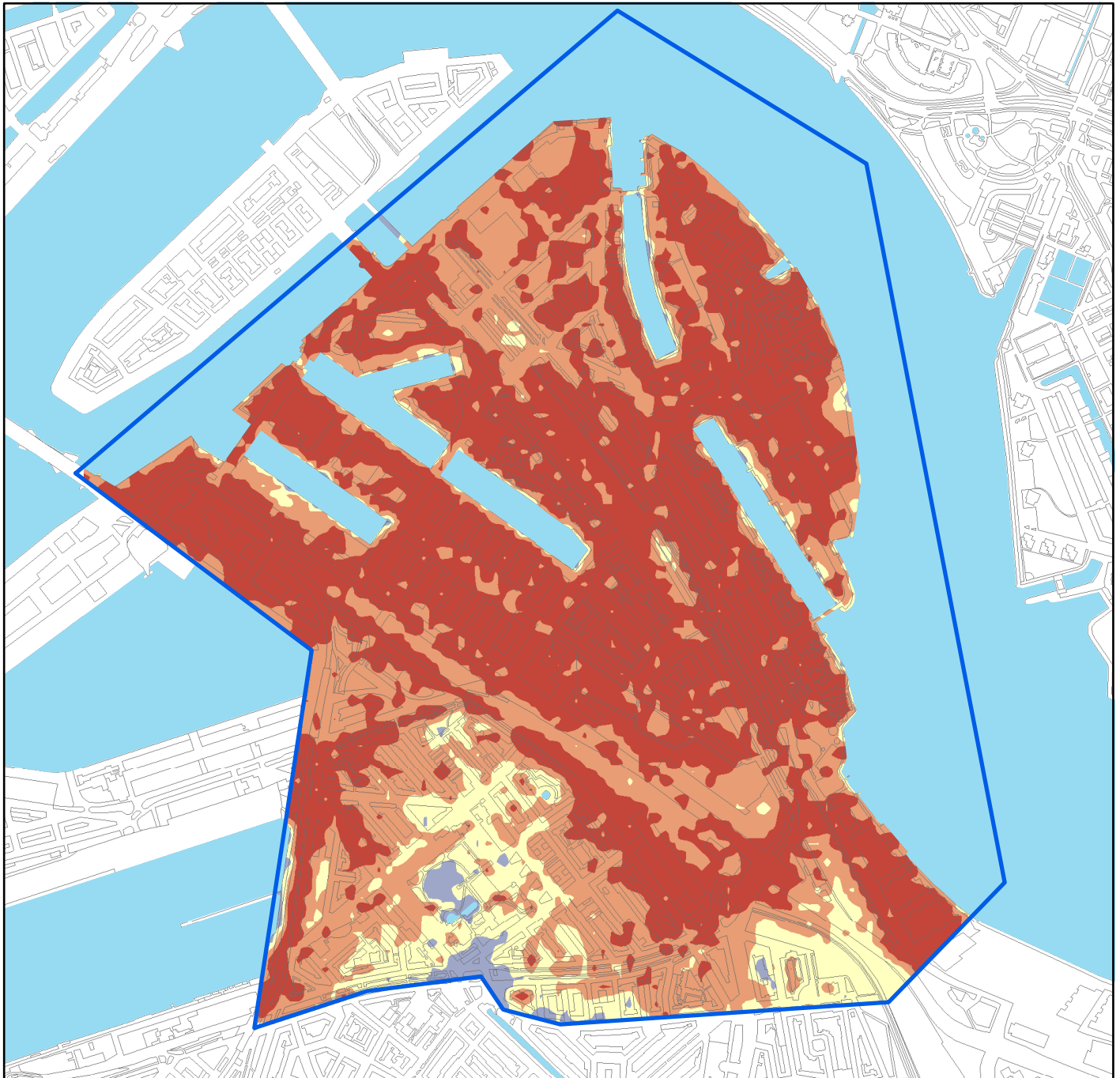
Lalibratie resultaten model Feyenoord
(calibratiejaar oktober '97- oktober '98)



Gemeentewerken
Gemeente Rotterdam








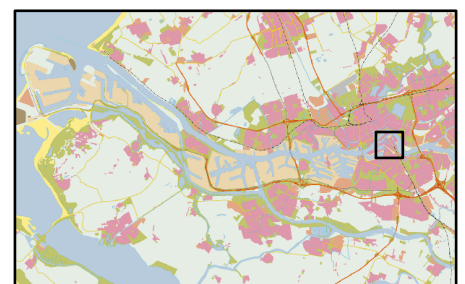
Bijlage 7 Maaiveldhoogtes Pilotgebied



ABIS, deelproject II; bijlage 7

geïnterpreteerd maaiveldniveau (m t.o.v. NAP)

-  minder dan -1,5
-  -1,5 tot 0
-  0 tot 1,5
-  1,5 tot 3
-  meer dan 3
-  pilot gebied





Bijlage 8 Theorie stroombaanalyse

Het regionale model wordt doorgerekend met een methodiek die gebruik maakt van de stroombanen die worden berekend met het softwarepakket MODPATH (Pollock, 1994). Deze methodiek bepaalt via welke modelcellen een deeltje stroomt en hoelang het in iedere modelcel verblijft. In de transportanalyse wordt tevens vastgesteld hoe groot de concentratie van een punt in de startcel is en welke waterflux erbij hoort. Tevens wordt er in iedere cel waar de stroombaan doorheen gaat, bepaald hoe groot de afname van de concentratie is door afbraak. Hiertoe geldt er in iedere cel een bepaalde redoxtype (aëroob, gematigd anaëroob en sterk anaëroob) en geldt er per redoxtype een afbraakconstante voor iedere stof. De vergelijking waarmee de afbraak in iedere cel wordt bepaald is:

$$C_t = C_0 \times e^{-(k(t-t_0))}$$

hierin is

C_t : concentratie op tijdstip t , waarop deeltje de cel verlaat [mg/l]

C_0 : concentratie op tijdstip t_0 , waarop deeltje de cel binnenkomt [mg/l]

t : tijd [dagen]

k : 1^e orde afbraaksnelheid, afhankelijk van de verontreiniging en de redoxtype [1/dag]

Voor ieder deeltje geldt dat de beginconcentratie in de volgende cel gelijk is aan de eindconcentratie van de voorgaande cel. Uiteindelijk bereiken de deeltjes een receptor, zoals de top van het eerste watervoerende pakket of een kwelgebied in een polder. Hier worden de totale massaflux uitgerekend (som van de producten van de concentratie en de verticale waterflux in de startcel voor alle deeltjes) en ook de uiteindelijke concentratie (massaflux van de verontreiniging gedeeld door de waterflux). Ook wordt de aankomsttijd in beschouwing genomen door voor een aantal tijdstippen te bekijken of de deeltjes wel of niet in de receptor zullen zijn aangekomen. Hierbij wordt ook rekening gehouden met de vertragende invloed van retardatie.

De gebruikte methodiek komt overeen met de methodiek die is gebruikt in het project WELCOME/SV600 voor het havengebied.

Tijdens de uitvoering van het project ABIS bleek dat het niet mogelijk was om een schatting te geven van de bronconcentraties in de wijk Feyenoord. Daarom is de werkwijze iets aangepast. Er is aangenomen dat elke locatie in de wijk Feyenoord mogelijk verontreinigd is en de concentratiereductie door afbraak bij instroming in het eerste watervoerende pakket is bepaald. Hieruit is de maximale belastbaarheid van de wijk Feyenoord afgeleid.

Literatuur

[1] Pollock, W. David (september 1994), User's Guide for Modpath/Modpath-plot, version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference groundwater flow model, open-file report 94-464

Bijlage III: ..Rapportage deelproject III



Gemeentewerken

Gemeente Rotterdam

Ingenieursbureau

Adaptief Bodembeheer in Deelproject III: Bodemprocessen; het reactorvat

Datum

20 oktober 2003

Versie

definitief

Opdrachtgever

Delft Cluster

Delft

Opsteller

P.R.M. van der Lugt

Projectleider

C. Anbeek

Inhoudsopgave

1. Inleiding	5
2. Transport- en afbraakmechanismen	7
3. Bodemkarakterisatie	9
3.1 Inleiding	9
3.2 Bodemopbouw	9
3.3 Hypothese redoxcondities	10
3.4 Bevindingen Beeld Diepe Ondergrond	12
3.5 Hypothesen versus BDO	13
3.6 Conclusie bodemkarakterisatie	15
3.7 Potentie van afbraak	15
4. Verontreinigingen	17
4.1 Stofkeuze	17
4.2 Mono-cyclische aromatische koolwaterstoffen (BTEXN = benzeen, toluen, ethylbenzeen, xylenen en naftaleen)	17
4.3 Vluchtige koolwaterstoffen (VOCI)	17
4.4 Algemeen	19
5. Conclusies en aanbevelingen	21
5.1 Conclusies	21
5.2 Aanbevelingen	21
6. Literatuur	23
Bijlage III.1 Bodemkarakterisatie	
Bijlage III.2 Chemische en biologische afbraak-reacties	
Bijlage III.3 Modelling biologische afbraak	
Bijlage III.4 Gebruikte parameters in stoftransportmodel	
Bijlage III.5 Locaties gemeten peilbuizen BDO	

1. Inleiding

In het kader van de 'bron-pad-receptor' analyse ten behoeve van ABIS beschrijft deelproject III (reactorvat) de processen die plaatsvinden op het pad. Er vindt stoftransport plaats. Tijdens dit transport door de bodem vinden talloze reacties plaats, afhankelijk van de aanwezige stoffen, milieuomstandigheden en bacteriën. Bij aanwezigheid van bodemverontreinigingen kunnen deze processen gebruikt worden om de verontreinigingen te verwijderen. Soms blijkt dat de natuurlijk optredende processen in voldoende mate plaatsvinden om het probleem binnen de gewenste tijd op te lossen, maar indien nodig kunnen deze processen ook actief gestimuleerd worden door te zorgen voor optimale condities. Door de complexiteit van de processen en het grote aantal verschillende reacties dat op kan treden, zal eerst inzicht verkregen moeten worden in de opbouw en werking van dit reactorvat.

Hieronder zal een bodemkarakterisatie van het pilot-gebied Feyenoord beschreven worden. Aan de hand van de bodemopbouw zullen hypothesen opgesteld worden met betrekking tot de redoxcondities ter plaatse. Deze zullen vergeleken worden met de uitkomsten van het meetprogramma Beeld Diepe Ondergrond (BDO). Vervolgens worden de diverse mogelijkheden van 'natuurlijke afbraak' beschreven (diffusie, adsorptie, chemische/biologische afbraak). Daarna worden de omstandigheden waaronder de, voor het pilotgebied relevante, verontreinigingen chemisch/biologisch afbreken belicht. Dit leidt tot een potentie van de bodem om de verontreiniging op een natuurlijke manier af te breken. Deze informatie wordt als uitgangspunt genomen voor de modelberekeningen, waarmee het reactorvat gesimuleerd wordt.



2. Transport- en afbraakmechanismen

In de bodem spelen verschillende mechanismen die een verontreiniging beïnvloeden, een rol. Bij de onderstaande processen wordt uitgegaan van een met water verzadigde bodem.

- Vorming van drijf- en zaklagen. Bij het ontstaan van een bodemverontreiniging (lekkage, lozing) kan een stof als pure fase in de bodem terechtkomen. Afhankelijk van de dichtheid van de stof kan deze stof op het grondwater drijven of naar beneden zakken totdat hij een slechter doorlatende laag tegenkomt. Ook kan een gedeelte van de stof als pure fase achterblijven in de poriën van de gepasseerde bodemlagen. Dit proces verloopt, in vergelijking met de overige processen, zeer snel. Derhalve wordt het in deze studie niet meegenomen. Er wordt van uit gegaan dat de verplaatsing van de stof in pure fase (dus de vorming van drijf- en zaklagen) voltooid is en dat de verontreiniging van daar uit langzaam oplost in het grondwater.
- Oplossing vanuit de bronzone (puur product) naar het grondwater.
- Advectie. Hierbij worden de opgeloste stoffen meegenomen door de stroming van het grondwater.
- Adsorptie/Retardatie. Hierbij adsorberen stoffen aan de grond en zijn dus niet meer in oplossing. Indien sprake is van een instantaan evenwicht tussen de hoeveelheid geadsorbeerde stof en de hoeveelheid opgeloste stof wordt ook wel gesproken van retardatie. Hierbij wordt een lineaire relatie verondersteld. De grootte van de retardatiefactor bepaalt de verhouding tussen de gemiddelde snelheid van het grondwater in de poriën van de bodem en de migratiesnelheid van de verontreiniging. Tevens is de retardatiefactor uniform over de dikte van de Holocene deklaag verondersteld. Naast de gemiddelde verblijftijd van waterdeeltjes, kan nu met de retardatiefactor ook de verblijftijd worden vastgesteld van de verontreinigingen die in beschouwing zijn genomen.
- Diffusie/dispersie. Diffusie is het effect van de willekeurige verplaatsing van moleculen waarbij er een netto flux optreedt van hoge naar lage concentraties. Dispersie is het effect van locale verschillen in verplaatsingssnelheid van moleculen onder invloed van de grondwaterstroming. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen dispersie in de stromingsrichting (longitudinale dispersie) en de dispersie in de richting loodrecht daarop (transversale dispersie). Dispersie en diffusie hebben hetzelfde effect op de verspreiding van de verontreiniging, waarbij het effect van de dispersie over het algemeen dominant is.
- Chemische en biologische afbraak. Dit is de daadwerkelijke afbraak van de verontreiniging in tegenstelling tot de overige processen, waarbij de verontreiniging alleen verplaatst of verdund wordt. De chemische afbraak van verontreinigende stoffen vindt meestal plaats door middel van redoxreacties. Bij een redoxreactie vindt een overdracht van elektronen plaats tussen een elektrondonor en elektronenacceptor. Zuurstof is een voorbeeld van een elektronenacceptor. Bij gebrek aan zuurstof wordt achtereenvolgens nitraat, mangaan, ijzer en sulfaat als elektronenacceptor gebruikt, afhankelijk van de redoxcondities. Als elektrondonor kan een verontreinigende stof gebruikt worden. Een uitzondering is de reactie die plaatsvindt onder methanogene omstandigheden. Hierbij is methaan de elektrondonor, terwijl de verontreinigende stof optreedt als elektronenacceptor. De redoxreactie die plaatsvindt is afhankelijk van de redoxsituatie in de bodem. Hierin kan de volgende classificatie gemaakt worden (tabel 1):

Tabel 1. Overzicht elektronenacceptoren, halfreacties en redoxpotentialen.

Elektronacceptor	Halfreactie	Eh – interval (mV)(Sposito 1989)
Zuurstof	$O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$	700 - 470
Nitraat ¹	$NO_3^- + 2H^+ + 2e \rightarrow NO_2^- + H_2O$	500 - 200
Mangaan ²	$MnO_2 (s) + 4H^+ + 2e \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	400 - 200
	$Fe(OH)_3 (s) + 3H^+ + 4e \rightarrow Fe^{2+} + 3H_2O$	400 - 100
IJzer		
Sulfaat	$SO_4^{2-} + 9H^+ + 8e \rightarrow HS^- + 4H_2O$	- 150 - 0
(Methaan) ³	$CO_2 + 8H^+ + 8e \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	< -150

¹ Afhankelijk van het soort bacteriën kan nitraat ook omgezet worden in stikstof (N₂).

² Indien mangaan aanwezig is, zal deze reactie verlopen voordat ijzer gereduceerd wordt.

³ Methaan is hier de elektrondonor, de verontreinigende stof treedt op als elektronenacceptor.

Redoxreacties beïnvloeden de redoxcondities in de bodem. Deze reacties verlopen vaak onder aanwezigheid van bacteriën, waarbij de bacteriën zorgdragen voor het elektronentransport. Elke reactie wordt ondersteund door een andere 'set' bacteriën.

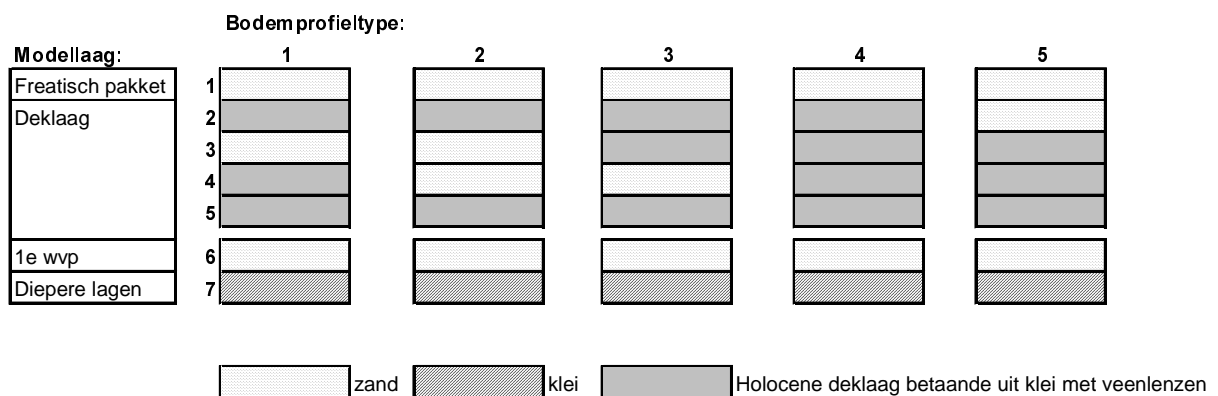
3. Bodemkarakterisatie

3.1 Inleiding

De milieumomstandigheden in de bodem worden gekarakteriseerd door verschillende parameters, zoals zuurgraad, temperatuur en concentraties van macroparameters, zoals nader omschreven in bijlage III.1. Deze milieumomstandigheden hangen nauw samen met de lokale bodemopbouw. In dit hoofdstuk wordt aan de hand van de te verwachten bodemopbouw in het pilot-gebied Feijenoord een voorspelling gedaan ten aanzien van de ruimtelijke verdeling van de redoxcondities in de bodem. Deze condities zijn van belang voor de bepaling van de potentie van de bodem voor natuurlijke afbraak van verontreinigingen. De voorspelde redoxcondities worden getoetst aan de resultaten van van de gelijktijdig met onderhavig project uitgevoerde meetcampagne in het kader van het project Beeld Diepe Ondergrond (BDO). Deze toetsing vindt plaats ter verificatie van de geformuleerde hypothesen.

3.2 Bodemopbouw

Aan de hand van sonderingen in het pilot-gebied Feijenoord zijn 5 bodemprofieltypen opgesteld, die representatief zijn voor deelgebieden in het pilot-gebied. De bodemprofieltypen verschillen van elkaar doordat de tussenzandlagen anders gepositioneerd zijn in het Holocene pakket. De onderscheiden bodemprofieltypen zijn schematisch weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: Bodemprofieltypen in het pilotgebied Feijenoord¹

In bijlage II.4 (Bodemprofieltypes) zijn op een kaart van het pilotgebied Feijenoord de locaties aangegeven waar welk profiel verondersteld wordt, op grond van de beschouwde sonderingen.

¹ In het project Welcome is voor de modellering van het havengebied onderscheid gemaakt in drie bodemprofieltypen. Globaal geldt: P1=4 (zonder antropogene laag, P2=4+5 en P3=1 t/m 3, waarbij P1 t/m P3 de bodemprofieltypes uit Welcome zijn.

Bodemprofieltype 1 komt voornamelijk voor in het noordelijke deel van het pilotgebied, direct grenzend aan de rivier. Profiel 2 komt voornamelijk voor iets ten zuiden van profieltype 1 en aan de oostelijk grens met de rivier. Profieltype 3 wordt weer iets zuidelijker verwacht, in een noord-zuid-richting. Profieltype 5 zijn de gedempte havens. Hierin zitten niet zozeer tussenzandlagen, het zand zit voornamelijk bovenaan in het profiel. Bodemtype 4 vertegenwoordigt de overige bodems. Deze bevat geen tussenzandlagen in het Holocene pakket. De antropogene zandlaag zoals aangegeven in alle bodemprofieltypen in figuur 1 is niet overal aanwezig.

In het gebruikte stoftransportmodel wordt het (verticale bron-pad) verloop van de verontreinigingen in het grondwater nagebootst door per modelcel een reistijd te bepalen. Hier wordt alleen het 'pad' (reactorvat) ter plaatse van het Holocene pakket beschouwd. De reistijd wordt bepaald aan de hand van het grondwatermodel en het gehalte organisch stof. Hiertoe moet een representatief organisch stofgehalte bepaald worden per profiel. Daarom zijn aan de hand van nabijgelegen sonderingen (waar tevens de profielen op gebaseerd zijn) representatieve organisch stofgehalten geschat, door de fracties veen, klei en zand in het totale bodemprofiel vast te stellen. Deze fracties worden vermenigvuldigd met het voor die grondsoort karakteristieke organisch stofgehalte. Hiermee wordt per bodemprofieltype een retardatiefactor vastgesteld. In combinatie met de verticale grondwaterstroomsnelheid kan hiermee de reistijd vanaf de freatische grondwaterstand tot de top van het Pleistoceen (receptor) worden berekenen. De resultaten van deze modellering zijn inzichtelijk gemaakt in bijlage II.4.4 a t/m d. De berekening van de geschatte waarden voor het organisch stofgehalte en overige in te voeren parameters in het stoftransportmodel (retardatiefactoren, bulkdichtheid) zijn vermeld op bijlage III.4.

3.3 Hypothese redoxcondities

Voor elk van de 5 onderscheiden bodemprofieltypen is een hypothese opgesteld betreffende de te verwachten (representatieve) redoxcondities. De condities zullen onderling variëren door de verschillende tussenzandlagen in de profielen. Met de hypothesen kunnen de meest waarschijnlijke afbraakconstanten voor de transportmodellering worden geselecteerd.

De redoxcondities zijn afhankelijk van de diepte, de (chemische) samenstelling van het betreffende pakket en de grondwaterstroming. Voor de laatste wordt gebruik gemaakt van de kaart over infiltratie- en kwelzones (figuur II 4.3). Alleen het 'pad' ter plaatse van de Holocene deklaag wordt beschouwd, omdat voor het pilot-gebied Feijenoord vooralsnog het 1^e watervoerend pakket als receptor wordt beschouwd.

Bij transport door het 1^e watervoerend pakket (zandig) dient als gevolg van de grote verblijftijden rekening gehouden te worden met een sterk anaëroob milieu.

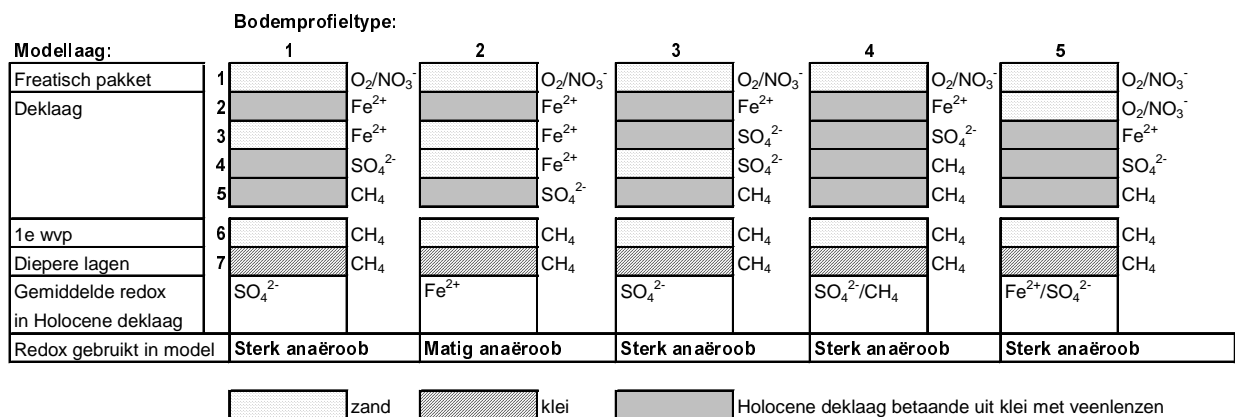
Het gehele pilotgebied wordt overheerst door infiltratie van grondwater. Daardoor zal er tussen de verschillende bodemprofielen geen onderscheid zijn (binnen het pilotgebied) ten aanzien van de invloed van kwel en infiltratie op de redoxcondities.

In de antropogene zandlaag (bovenste laag in de beschouwde bodemprofieltypen) wordt voor elk profiel aangenomen dat het redoxmilieu aëroob tot licht anaëroob is, afhankelijk van de stromingssnelheid.

De redoxcondities in de Holocene deklaag zijn afhankelijk van de plaats en de hoeveelheid tussenzandlagen, omdat deze direct invloed hebben op de verblijftijd van het grondwater (niet te verwarren met de reistijd van de verontreinigende stoffen zoals in voorgaande paragraaf beschreven is). Deze verblijftijd van het grondwater bepaalt mede de redoxpotentiaal van het grondwater, doordat in de tijd afbraak van organisch materiaal de redoxpotentiaal kan hebben veranderd.

Als hypothese wordt aangenomen dat zandlagen niet of nauwelijks van invloed zullen zijn op veranderingen in de redoxpotentiaal. Hier is weinig organisch stof wat afgebroken kan worden. Als tweede hypothese wordt aangenomen dat de klei/veenlagen die het grondwater passeert de redoxcondities dusdanig zullen beïnvloeden dat een opvolgende oxidator uit de sequentie gebruikt gaat worden. In het watervoerend pakket worden gezien de lange verblijftijd sterk anaërobe redoxcondities aangenomen (methanogene omstandigheden).

Uitgaande van nitraat/zuurstofreducerende condities in de antropogene zandlaag zijn op basis van de overige hypothesen de redoxcondities afgeleid zoals schematisch weergegeven in figuur 2:



Figuur 2. Redoxcondities in de onderscheidenbodemprofieltypen

Deze onderverdeling in redoxcondities doet ten onrechte een bepaalde nauwkeurigheid vermoeden. Daarom is voor de uiteindelijke categorisering ten behoeve van de modelberekeningen gekozen voor de verdeling in aëroob (O_2/NO_3^-), matig anaëroob (Fe^{2+}) en sterk anaëroob (SO_4^{2-}/CH_4).

In bodemprofieltype 1 en 3 zijn de representatieve redoxcondities van het totale pakket (top Holocéen tot top Pleistoceen) sulfaatreducerend, ofwel sterk anaëroob. In profiel 2 is dit ijzerreducerend, ofwel matig anaëroob. In profieltype 4 is het milieu sterk anaëroob. Profiel 5 geeft een overgangssituatie weer. Er wordt hier gekozen voor sterk anaërobe omstandigheden².

² In het project Welcome variëren de redoxcondities tussen matig tot sterk anaëroob. In dit project is de indeling niet afgeleid uit de bodemprofieltypen, maar gebaseerd op gemeten sulfaat- en ijzer (II)-concentraties op diverse diepten.

3.4 Bevindingen Beeld Diepe Ondergrond

De hypothesen met betrekking tot de redoxcondities kunnen worden getoetst met behulp van metingen in het veld. Hiervoor zijn de momenteel beschikbare bevindingen van het project Beeld Diepe Ondergrond gebruikt.

In het meetprogramma Beeld Diepe Ondergrond (BDO) wordt een beeld verkregen van de Rotterdamse bodemopbouw aan de hand van metingen in de ondergrond. Door middel van metingen op locaties die representatief zijn voor de diverse Rotterdamse bodemprofielen, kan een bodemkarakterisatie gemaakt worden voor het gehele onderzoeksgebied. Omdat BDO zich met name richt op het bepalen van de afbraakpotentie onder natuurlijke omstandigheden, is er op onbelaste (=niet-verontreinigde) locaties gemeten. Voor het pilot-gebied Feijenoord is het grondwater op twee locaties onderzocht. Deze locaties staan aangegeven op bijlage III.5. Een samenvatting van de veld- en laboratoriummetingen is opgenomen in tabel 2.

Tabel 2. Overzicht resultaten BDO in pilotgebied.

Locatie	Feyenoord	Feyenoord
Peilbuisnummer	131565-99	131566-99
Adres	Rosestraat tpv Steven Hoogendijkstraat	Hoek van Steven Hoogendijkstraat en Oranjeboomstraat
Diepte peilbuis	21 m-mv; NAP-18 m	22 m-mv; NAP-20 m
PH	6,7	6,9
O ₂ (mg/l)	0,6	0,7
EC _{25°C} (μS/cm)	1811	1822
Eh (mV)	- 180	- 144
T (°C)	11,9	12,0
Na ⁺ (mg/l)	100	190
Ca ²⁺ (mg/l)	183	102
K ⁺ (mg/l)	14	11
Mg ²⁺ (mg/l)	27	18
NH ₄ ⁺ (mg/l)	12	18
Fe ²⁺ (mg/l)	< 0,3	0,6
Fe _{tot} (mg/l)	0,36	14
Cl ⁻ (mg/l)	140	320
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	690	490
NO ₃ ⁻ (mg/l)	2,3	< 0,2
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	110	< 2
S ²⁻ (mg/l)	< 0,1	< 0,1
CH ₄ (μg/l)	-	12.000
DOC (mg/l)	5,3	30
TOC (mg/l)	5,8	35

Bron: Voorlopige resultaten meetprogramma BDO

De bepaling van de redoxcondities is bepaald aan de hand van de concentraties zuurstof (O₂), nitraat,(NO₃⁻), ijzer (Fe²⁺) en (Fe_{tot}) (= (Fe²⁺) en (Fe³⁺)), sulfaat (SO₄²⁻) en methaan (CH₄).

Bij interpretatie van de ijzerconcentraties is nadere toelichting nodig. Wanneer de ijzer (Fe^{2+}) concentratie wordt gemeten, is mogelijk een deel van het ijzer reeds geoxideerd door zuurstof uit de lucht. Tijdens de BDO-werkzaamheden zijn analyses in het veld en in het laboratorium uitgevoerd. De laboratoriumanalyses vinden met enige vertraging plaats, waardoor een deel van (Fe^{2+}) dan reeds omgezet kan zijn in (Fe^{3+}) door oxidatie met zuurstof uit de lucht. Hierdoor kan een onjuist beeld ontstaan van de redoxcondities. Uit de veldanalyses blijkt dat (Fe^{2+}) en (Fe_{tot}) ongeveer gelijk waren, dus (Fe_{tot}) wordt in deze peilbuizen voornamelijk gevormd door (Fe^{2+}). Fe_{tot} wordt niet beïnvloed door een dergelijke storing in de meting en kan dus gebruikt worden als indicatie voor de concentratie (Fe^{2+}).

Er moet rekening gehouden worden met de stijging van gevormd methaangas. Een aangetroffen methaanconcentratie kan ook veroorzaakt zijn door gasvorming in diepere bodemlagen. Methanotrofe bacteriën spelen een belangrijke rol in de oxidatie van methaan in natuurlijke milieus zoals hoogveen en moerassen. In het veen wordt methaan biologisch geproduceerd door methanogene, en biologisch geconsumeerd door methanotrofe bacteriën. Gezien bovenstaande opmerkingen is het belangrijk om niet aan de hand van één parameter een redoxconditie aan te nemen. Het is raadzaam om ook andere parameters mee te nemen in de redoxbepaling.

Peilbuis 131565-99 (Rosestraat tpv Steven Hoogendijkstraat)

De zuurstofconcentratie is lager dan 1 mg/l, dus het milieu is niet aëroob. De nitraatconcentratie ligt boven de 1 mg/l. Dit zou op een nitraatreducerend milieu wijzen. De ijzeranalyse kan echter gestoord zijn (door oxidatie door zuurstof). Als de Fe_{tot} -concentraties uit het veld gebruikt worden ($\text{Fe}_{\text{tot}} = 7,1$ mg/l) als indicatie voor de Fe^{2+} -concentratie, leidt dit tot de aanname dat de redoxcondities ijzerreducerend zijn. In beide gevallen wordt gesproken over **matig anaërobe** omstandigheden. Ook zijn er geen methaan en sulfide aangetroffen, wat eveneens wijst op matig gereduceerde omstandigheden.

Peilbuis 131566-99 (Hoek van Steven Hoogendijkstraat en Oranjeboomstraat)

De zuurstofconcentratie is lager dan 1 mg/l, dus het milieu is niet aëroob. Ook de nitraatconcentratie is laag. Ook hier wijst de Fe_{tot} -concentratie (veld en laboratorium zijn ongeveer gelijk) erop dat ijzerreductie heeft plaatsgevonden en dat de redoxpotentiaal verder gedaald is. De lage sulfaatconcentratie en de hoge methaanconcentratie leiden tot de aanname dat het een **sterk anaërobe** omstandigheden betreft.

Deze peilbuis staat in brak water (150 mg/l < Cl⁻ < 1000 mg/l). Dit betekent dat er van origine waarschijnlijk meer sulfaat in het water aanwezig is geweest dan in de ander peilbuis, waar de chloride concentratie wijst op zoet water. In vergelijking met de andere peilbuis is er dus meer sulfaat afgebroken, wat een bevestiging is van de verhouding tussen deze milieus (matig tov sterk anaëroob).

3.5 Hypotheses versus BDO

Om de betrouwbaarheid van de BDO-resultaten in te schatten, is een inventarisatie gemaakt van de overige BDO-resultaten (buiten het pilotgebied Feyenoord). Er is gekeken naar de diepte en de

daarbij verwachte redoxomstandigheden. Hieruit blijkt dat alle diepe peilbuizen (dieper dan circa 19 m-mv) in methanogene milieus staan, terwijl het beeld bij de ondiepe peilbuizen (0 tot circa 3 m-mv) wisselt.

Peilbuis 131565-99 (Rosestraat tpv Steven Hoogendijkstraat) uit BDO is gelokaliseerd ter plaatse van bodemprofieltype 4. Op basis van bovengenoemde karakterisatie van de redoxcondities op basis van het bodemprofieltype zou de gemiddelde redoxconditie sterk anaëroob zijn. In BDO wordt geconcludeerd dat de omstandigheden matig tot sterk anaëroob zijn in deze peilbuis. Peilbuis 131566-99 (Hoek van Steven Hoogendijkstraat en Oranjeboomstraat) uit BDO is gelokaliseerd ter plaatse van bodemprofieltype 2. De peilbuis staat echter in een grensgebied. Deze grenzen zijn indicatief, waardoor de locatie van de peilbuis binnen de grenzen van bodemprofieltype 2 en/of bodemprofieltype 3 valt. Op basis van het bodemprofieltype zou de gemiddelde redoxconditie matig tot sterk anaëroob zijn. In BDO worden de redoxcondities in deze peilbuis als sterk anaëroob gekarakteriseerd.

De metingen verricht in het kader van BDO lijken enigszins in strijd met de gehanteerde redoxclassificatie op basis van bodemprofieltypen (tabel 3). De redoxcondities zijn echter niet alleen afhankelijk van bodemprofieltype maar meer nog van grondwaterstromsnelheden en -richting. Beide peilbuizen bevinden zich in infiltratiegebied, echter peilbuis 131565-99 bevindt zich in een zone met een hogere verticale grondwaterstromsnelheid dan peilbuis 131566-99. Dit lijkt te bevestigen dat de verbreiding van bepaalde redoxzones afhankelijk is van de grondwaterstromsnelheden en -richting. Bij hogere snelheden dus kortere reistijden lijkt de grens tussen sterk gereduceerd en matig gereduceerd verder stroomafwaarts te liggen.

Op het niveau waarop uitspraken gewenst zijn ten aanzien van de afbraaksnelheid is de mate van overeenkomst voldoende. Omdat de resultaten van BDO gebaseerd zijn op een geringe hoeveelheid data wordt de meeste waarde gehecht aan de hypothesen aan de hand van de bodemopbouw. Daarom wordt voor beide peilbuizen de aanname gedaan / gehouden dat er sterk anaërobe omstandigheden heersen. In de volgende tabel staat is dit in een overzicht opgenomen.

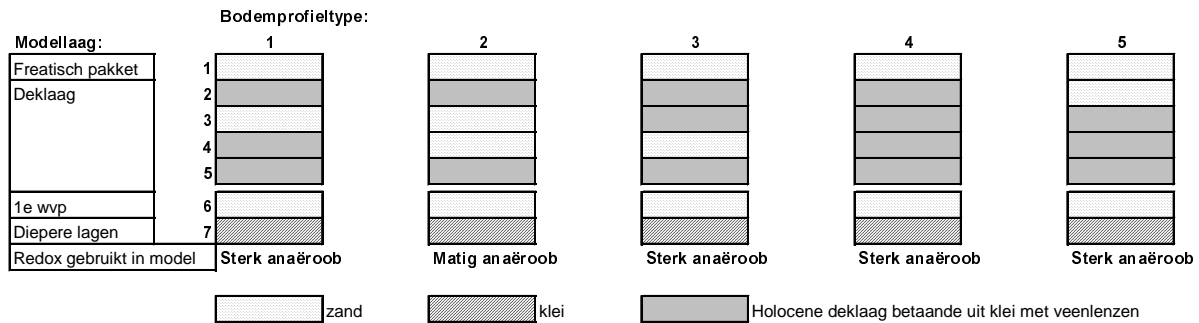
Tabel 3. Overzicht redoxcondities bodemopbouw en BDO

Peilbuis	Hypothese bodemopbouw	BDO	Uiteindelijke aanname
131565-99 (Rosestraat tpv Steven Hoogendijkstraat)	Sterk anaëroob (Bodemprofieltype 4)	Matig tot Sterk anaëroob	Sterk anaëroob
131566-99 (Hoek van Steven Hoogendijkstraat en Oranjeboomstraat)	Matig /sterk anaëroob (Bodemprofieltype 2 / 3)	Sterk anaëroob	Sterk anaëroob

Met de beschikbare metingen in deze twee peilbuizen kunnen niet alle bodemprofieltypen getoetst worden. Daarom is voor de overige bodemprofieltypen uitgegaan van de hypothesen (omtrent de redoxcondities) die vastgesteld zijn op basis van de bodemopbouw.

3.6 Conclusie bodemkarakterisatie

De bodemkarakterisatie wordt bepaald door de bodemopbouw en de redoxcondities. De bodemopbouw van de profielen met bijbehorende redoxcondities is als volgt:



Figuur 3. Bodemkarakteristieken voor pilotgebied Feyenoord.

De aanname voor redoxcondities van de bodem zijn gebaseerd op de hypothesen die vastgesteld zijn op basis van de bodemopbouw. Deze hypothesen kunnen bijgesteld worden bij inbreng van meer resultaten van BDO.

3.7 Potentie van afbraak

De heersende redoxcondities zijn een maat voor de potentie van de bodem om verontreinigingen af te breken. Dergelijke informatie is waardevol als vanuit het oogpunt van beheersmaatregelen beslist moet worden over de toepassing van (al dan niet gestimuleerde) biologische afbraak. Voor de bepaling van deze afbraak-potentie kunnen verschillende systemen gebruikt worden, o.a.:

- Beslissings Ondersteunend Systeem Natuurlijke afbraak (BOSNA)(Sinke et al., 2001);
- Calculated Assimilation Capacity (Kampbell, D.H., Wiedemeier, T.H. et al., 1994).

Naast de redoxcondities wordt de potentie voor natuurlijke afbraak in belangrijke mate bepaald door het organisch stof-gehalte. Biologische afbraak van organisch stof (als substraat) is bij afbraak van VOCl de drijfveer achter de redoxprocessen (VOCl wordt cometabolisch afgebroken). Bij biologische afbraak van BTEXN is organisch stof een concurrent van de BTEXN (Beiden spelen de rol van substraat).

Ook kan een grondwaterkarakterisatie uitgevoerd worden met behulp van de Stuyfzand-classificatie (Stuyfzand 1991). Hiermee kunnen mogelijk afwijkingen in de resultaten van de redoxcondities verklaard worden.

Uit het meetprogramma Beeld Diepe Ondergrond worden resultaten verwacht waarmee de hypothesen over redoxcondities getoetst kunnen worden. Daarmee kan samen met het organisch stofgehalte kwalitatief en/of kwantitatief een uitspraak gedaan worden over de potentie van de bodem voor natuurlijke afbraak.

Deze natuurlijke afbraak vindt alleen plaats als ook andere locatiespecifieke kenmerken, zoals de bacteriepopulatie, de concentratie van organisch stof en de concentratie elektronendonoren en -acceptoren, voldoen aan de benodigde condities. Met behulp van de redoxcondities en het organisch stofgehalte zoals hier is gedaan, wordt alleen bepaald of voldaan wordt aan bepaalde randvoorwaarden. Dit is geen garantie voor daadwerkelijke afbraak.

4. Verontreinigingen

4.1 Stofkeuze

Er is binnen ABIS gekozen voor twee stofgroepen: vluchtige chloorkoolwaterstoffen (VOCI) en aromaten (BTEXN = benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen en naftaleen).

Deze keuze is gemaakt aan de hand van de volgende criteria:

- De stoffen vormen werkelijk een probleem wat betreft de frequentie waarin zij voorkomen binnen het pilotgebied.
- Er zijn verspreidingsrisico's en toxicologische risico's aanwezig.
- Er is informatie beschikbaar over het voorkomen (omvang en concentratie) van de verontreiniging.

Andere veel voorkomende verontreinigingen zijn minerale olie en poly-aromatische koolwaterstoffen (PAK's). Deze zijn echter minder mobiel en vormen een minder ernstig risico. Een aparte groep betreft de zware metalen. Zware metalen kunnen heel mobiel zijn als ze oplossen in het grondwater. Meestal echter zijn de metalen gebonden aan kleideeltjes. De metalen worden dus niet gebruikt voor het model. Ze spelen in de praktijk wel degelijk een rol in verband met de toxiciteit voor bacteriën bij een hoge concentratie. Dit is van belang bij eventuele biologische afbraak van verontreinigingen (Hunter and Stewart, 1992).

De beschouwde stofgroepen en hun karakteristieke eigenschappen wat betreft afbraak zullen hieronder kort beschreven worden. Voor een gedetailleerde beschrijving van mogelijke reacties van de stoffen wordt verwezen naar de bijlage III.2.

4.2 Mono-cyclische aromatische koolwaterstoffen (BTEXN = benzeen, toluen, ethylbenzeen, xylenen en naftaleen)

De BTEXN-afbraak vindt voornamelijk plaats onder aërobe omstandigheden. Hierbij wordt zuurstof verbruikt. Een aantal van de aromaten breken ook onder nitraatreducerende omstandigheden af, onder inlevering van de reactiesnelheid. Afbraak van BTEXN onder nitraatreducerende condities is afhankelijk van de aanwezigheid van zuurstof. Zolang er nog zuurstof aanwezig is, zal de reactie niet verlopen met nitraat, omdat dit energetisch minder oplevert.

Meestal vindt er één reactie plaats, in de overgangsfase van de ene redox-omstandigheid naar de andere, kunnen er twee reacties gelijktijdig plaatsvinden. De totale afbraaksnelheid van BTEXN is dan de som van de separate reactiesnelheden. Dit wordt meer gedetailleerd beschreven in de bijlage III.3.

4.3 Vluchtige koolwaterstoffen (VOCI)

In tegenstelling tot natuurlijke afbraak van BTEXN, waarbij de BTEXN zelf als elektron donoren fungeren, is bij de natuurlijke afbraak van VOCL de verontreiniging de elektron-acceptor of oxidator.

Deze reactie levert micro-organismen dan ook geen energie op. Het mechanisme is cometabolisch, dat betekent dat een organische koolstofbron wordt omgezet, waarbij VOCl dienst doet als elektron acceptor. Hierdoor verandert de redoxconditie van de bodem. Ook de concentratie van de organische koolstofbron neemt af.

De vluchtige koolwaterstoffen geven bij afbraak een reeks tussen- en afbraakproducten. Perchloorethyleen (PER) breekt af tot trichloorethyleen (TRI). Deze breekt af tot cis-dichloorethyleen (CIS), vervolgens wordt vinylchloride (VC) gevormd en uiteindelijk kan dit afgebroken worden tot etheen en ethaan.

De reacties van PER naar TRI en van TRI naar CIS vinden alleen plaats in een sterk reducerend milieu, d.w.z in methanogene omstandigheden. De andere reacties vinden plaats bij een iets minder sterk reducerend milieu, en de laatste reacties (omzetting van VC naar etheen en ethaan) vinden vooral plaats in een aëroob milieu.

In tabel 4 is de mogelijkheid weergegeven van biologische afbraak onder de betreffende omstandigheden. Dit is een wezenlijk verschil met de afbraaksnelheid, die hierin niet zijn opgenomen. Voor de afbraaksnelheden wordt verwezen naar bijlage III.3.

Tabel 4: Mogelijkheid tot afbraak
 (Aronson&Howard, 1997; PAO cursus Grondwatersanering door natuurlijke afbraak)

Redoxcondities	Aëroob	Nitraat	IJzer	Sulfaat	Methanogeen
PER	-	+/-	+/-	+	+
TRI	-	+/-	+/-	+	+
CIS	+	+/-	+/-	+	+
VC	+	+/-	+/-	+	+
Etheen	+	+	+	+	+

+ Afbraak mogelijk
 +/- Langzame tot geen afbraak mogelijk
 - Geen afbraak mogelijk

Deze redox-differentiatie heeft ook effect op de afbraaksnelheid. De snelheid van dechlorering is naast de redoxcondities ook sterk afhankelijk van de chloreringsgraad. In een sterk gereduceerd milieu zullen de hoger gechlorideerde koolwaterstoffen, zoals PER en TRI, sneller afbreken dan CIS, VC en etheen. Onder ijzer- en nitraatreducerende condities zullen juist de minder gechlorideerde koolwaterstoffen sneller afbreken. Onder dezelfde condities kunnen de minder gechlorideerde koolwaterstoffen, net als BTEX, ook via oxidatie afgebroken worden.

In het stoftransportmodel zijn afbraaksnelheidsconstanten nodig voor het berekenen van de diverse chemisch/biologische reacties die plaatsvinden. Deze zijn verzameld uit diverse literatuurbronnen. Voor een overzicht van de bron en keuze voor deze constanten wordt verwezen naar bijlage III.3.

Bij aanwezigheid van vluchtige koolwaterstoffen kan zich een zaklaag vormen. De pure verontreiniging is zwaarder dan water en kan tot grote diepte zakken. Door de relatief hoge snelheid waarmee dit plaatsvindt, kunnen de vluchtige koolwaterstoffen binnen een relatief korte tijd een serieuze bedreiging vormen voor het diepere grondwater.

4.4 Algemeen

Voor beide stofgroepen geldt dat oplossing naar het grondwater, advectie, adsorptie/retardatie en diffusie/dispersie kunnen optreden naast microbiële afbraak.

De in de bijlage III.3 vermelde snelheidsconstanten van microbiële afbraak moeten met voorzichtigheid gebruikt worden, aangezien het aantal studies waaruit ze zijn afgeleid en de omstandigheden waaronder ze zijn gemeten sterk variëren. Uit de literatuurbronnen blijkt bijvoorbeeld dat degradatiesnelheden sterk afhankelijk zijn van de locatie. Dit kan o.a. voortkomen uit verschillen in de bodemopbouw (bijvoorbeeld het gehalte organisch stof) en door aan- of afwezigheid van bepaalde bacteriën (Wiedemeier et al., 1995, Dobbins et al., 1992).

Voor het gebruik van het stoftransportmodel is een aantal aannames gedaan:

- de verontreiniging is niet toxisch voor de bacteriën;
- de microbiële populatie is constant;
- de degradatiereacties vinden alleen plaats in de waterfase.

De redoxomstandigheden in de bodem worden ook beïnvloed door de afbraak van organisch stof. Organisch stof kan optreden als concurrent voor de afbraak van verontreinigingen. Daarom worden zowel het opgeloste organische stof als het vaste organische stof meegenomen in de modellering. De afbraak van organisch stof wordt gemodelleerd op dezelfde wijze als de benzeenafbraak, waarbij de opgeloste en vaste fase organische stof ieder een eigen afbraakconstante hebben. Voor de chemische reacties wordt verwezen naar bijlage III.2. Voor de modellering van de andere processen in het reactorvat, zoals retardatie en diffusie, wordt verwezen naar bijlage III.4.

De hierboven beschreven theorie dient als input voor de stoftransportmodellering. Deze staat beschreven in deelproject II.

Op basis van de theorie is een beeld geschetst van de wijze waarop de fenomenen adsorptie / desorptie en biologische afbraak zijn beschreven in deze studie. Deze beschrijving is complex. Tevens dient er veel informatie over de ondergrond (bodemeigenschappen en geochemische omstandigheden) beschikbaar te zijn. Voor veel stedelijke gebieden is die informatie slechts globaal beschikbaar.

Bij het vaststellen van biologische afbraak spelen de redox omstandigheden een belangrijke rol. De redox-omstandigheden variëren met de diepte. Per profiel is ingeschat wat de natuurlijke afbraak gemiddeld zal zijn. De uitkomsten van de modellering kunnen dan aanleiding zijn om meer en gedetailleerdere informatie te verwerven over bodemeigenschappen in relatie met aanwezige (potentiële) bronnen.

Ook voor het pilotgebied Feyenoord is slechts globale informatie beschikbaar. Voor de geochemische modelberekeningen is daarom in eerste instantie gewerkt met een vereenvoudiging. Voor iedere modelcel wordt de flux van het grondwater bepaald (aan de hand van de resultaten van het regionale model). Als hier de retardatiefactor en het organisch stofgehalte worden meegenomen, wordt de verblijftijd van de stof per cel bepaald. Ook kan een afbraakconstante voor biologische afbraak ingevoerd worden. Op deze manier kan de verticale reistijd en uiteindelijke bestemming (afbraak of 1^e watervoerend pakket) van de verontreinigingen bepaald worden.

De wijze van gebruik van de uitvoer van de stoftransportmodellering wordt verwezen naar deelproject II en IV/V.



5. Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

In het kader van de “bron-pad-receptor” benadering is in dit deelproject getracht de processen te beschrijven die plaatsvinden op het “pad”. Dergelijk inzicht is nodig om bij het opzetten van een managementstrategie verantwoorde keuzes te kunnen maken omtrent de te beschermen objecten, doeltreffende maatregelenscenario's, etc.

Het “pad” kan vertaald worden in termen van “reactorvat”, door de processen te beschouwen die in de bodem plaatsvinden. De in deze studie voor Feijenoord beschouwde en relevante processen betreffen: 1) de retardatie en 2) de chemische/biologische afbraak.

Voor het voorspellen van stofconcentraties langs het “pad” is het belangrijk de heersende redoxomstandigheden te kennen. Binnen ABIS is daarvoor gebruik gemaakt van twee middelen: 1) het opstellen van hypothesen rond bodemopbouw, leidend tot hypothesen rond redoxcondities en 2) verificatie door middel van veldmetingen (BDO). Binnen ABIS is gebruik gemaakt van relatief eenvoudige methode van redoxclassificatie op basis van het voorkomen van bepaalde bodemprofieltypes.

Het aanwezig zijn van bepaalde redoxcondities is nog geen garantie dat de afbraakreacties die dan geacht worden te verlopen ook daadwerkelijk zullen verlopen. De aanwezigheid - in voldoende aantallen - van de juiste bacteriën is een van de belangrijkste randvoorwaarden waaraan voldaan moet zijn. Over het algemeen lijkt dit in de praktijk niet een echt knelpunt te zijn voor het optreden van afbraakreacties. Toch lijkt het, daar waar vergaande managementbeslissingen worden genomen op grond van de “ABIS-methode”, raadzaam om enige vorm van zekerheid daaromtrent te verkrijgen, bijvoorbeeld door een eerste screening vanuit (reeds aanwezige) monitoringspeilbuizen.

Via literatuuronderzoek is getracht inzicht te verkrijgen in de meest reële schattingen rond afbraaksnelheidsconstanten. Uit het literatuuronderzoek blijkt dat de waarde van deze constanten sterk afhankelijk is van een aantal factoren, zoals bodemopbouw, temperatuur, aanwezigheid van toxische verontreinigingen, etc. Een en ander resulteert onvermijdelijk in een relatief grote spreiding van de uitkomsten.

5.2 Aanbevelingen

Het verdient aanbeveling om in een eventueel vervolg eveneens te kijken naar: 1) de vorming van drijf- en zaklagen; 2) het in oplossing gaan vanuit de bronzone, en 3) diffusie/dispersie. In samenhang met de genoemde processen retardatie en afbraak zou dit een veel vollediger beeld opleveren. De vorming van drijf- en zaklagen is met name relevant omdat daardoor veel grotere bronzones kunnen ontstaan dan vanuit simpele aannames rond lekkage zou blijken. Aangezien de vorming van drijf- en zaklagen snel verlopende processen zijn in vergelijking met de overige kan de

eindsituatie (dwz. de gevormde drijf- en zaklagen) beschouwd worden als de situatie op het tijdstip dat de grondwatermodellering aanvangt ($t=0$). Hierdoor kan veel overbodig modelleren worden voorkomen.

In een eventueel vervolg zouden de redoxclassificatie methodiek op basis van bodemprofieltypes verder uitgewerkt en getoetst kunnen worden. Daarbij dient de methodiek vergeleken te worden met werkelijk gemeten waarden in de diverse bodemprofieltypes, zoals deze in het meetprogramma van BDO worden bepaald. Op dergelijke wijze kan inzicht worden verkregen in de mate van correlatie tussen bodemtype enerzijds en geconstateerde redoxcondities anderzijds.

Het verdient de aanbeveling om, bijvoorbeeld via de resultaten vanuit BDO, te bezien of de gehanteerde afbraakconstanten ook specifiek voor Rotterdamse bodem gelden.

6. Literatuur

Appelo en Postma, Geochemistry, groundwater and pollution, Balkema Rotterdam, 1993

Aronson D., Citra M., Shuler K., Printup H., Howard P.H., Aerobic biodegradation of organic chemicals in environmental media: a summary of field and laboratory studies, Environmental science center, NY, January 1999.

Aronson, D., Howard, P.H., Anaerobic biodegradation of organic chemicals in groundwater: a summary of field and laboratory studies, Environmental science center, NY, November 1997.

Sinke, A.J.C., Heimovaara, T.J., Tonnaer, H., Ter Meer, J., BOSNA, Beslissingsondersteunend systeem voor de beoordeling van natuurlijke afbraak als saneringsvariant (versie 2.0), NOBIS 98-1-21, april 2001.

Buscheck, T.E. et al. Evaluation of intrinsic bioremediation at field sites. In: Proceedings of the 1993 Petroleum Hydrocarbon and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection, and Restoration. Dublin, OH: Water Well J. Publ. pp. 367-381 (1993).

Clement, T.P., (1997): RT3D, A modular computer code for simulating Reactive multi-species Transport in 3-Dimensional groundwater systems, Pacific Northwest National Laboratory, U.S.A.

Dobbins, D.C. et al.. Subsurface, Terrestrial Microbial Ecology and Biodegradation of Organic Chemicals: A Review. Crit. Rev. Environ. Control. 22: 67-136 (1992).

Gelhar, L.W.; Welty, C. en Rehfeldt, K.R., 1992, A critical review of data on field scale dispersion in aquifers, Water Resources Research, Vol. 28 No. 7, P. 1955-1974.

Hunter, R.M., and Stewart, F.M., 1992. Method and apparatus for bioremediation of mixed hazardous wastes. In: VISITT 4.0, 1995. Bioremediation - In-situ groundwater by Yellowstone Environmental Sciences, Inc.

Hurst, C.J. Sims, R.C., Sims, J.L., Sorensen, D.L., McLean, J.E. en Huling, S. Polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation as a function of oxygen tension in contaminated soil, Proceedings of the 10th Annual conference on hazardous waste research, 1994.

Kampbell, D.H., Wiedemeijer, T.H. and Jansen, J.E., Proceedings of the 10th annual conference on hazardous waste research, 1994, Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK 74820, Parsons Engineering Science, Inc., Denver, CO 80290, U.S. Air Force Center For Environmental Excellence, Brooks Air Force Base, TX 78235.

Lide, D.R., 1993, Handbook of chemistry and physics, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Middeldorp, P., Luijten, M.L.G.C., van de Pas, B. A. , van Eekert, M.H.A., et. al., Anaerobic microbial reductive dehalogenation of chlorinated ethenes, *Bioremediation Journal* 3(3):151-169 (1999).

PAO cursus Grondwatersanering door natuurlijke afbraak, Delft, 21 en 22 maart 2002.

Sposito, G., *The Chemistry of Soils*, University of California at Berkeley (1989).

Stuyfzand, P. J., *Samenstelling, genese en kwaliteitsvariaties van ondiep grondwater in kustduinen*, KIWA N.V., SWE 91.008, Nieuwegein (1991).

Suarez, P., Rifai, H.S., Biodegradation rates for fuel hydrocarbons and chlorinated solvents in groundwater, *Bioremediation Journal* 3(4):337-362 (1999).

Wiedemeier T. et al. *Technical Protocol for Implementing Intrinsic Remediation with Long-Term Monitoring for Natural Attenuation of Fuel Contamination Dissolved in Groundwater. Volume 1*. Air Force Center for Environmental Excellence, Technology Transfer Division Brooks AFB, San Antonio, TX (1995).

Bijlage III.1 Bodemkarakterisatie



De bodem wordt gekarakteriseerd door verschillende parameters. Gezamenlijk beschrijven deze de milieuecondities in de bodem. Direct en eenvoudig meetbaar onder veldomstandigheden zijn de volgende parameters:

- Zuurgraad (pH);
- Redoxpotentiaal (Eh);
- Temperatuur (T);
- Geleidbaarheid (EC).
- Zuurstof (O₂)

Het meten van de redoxpotentiaal is echter storingsgevoelig en zuurstofbepalingen in een peilbuis in slechtdoorlatende grond zijn onbetrouwbaar. De bruikbaarheid van metingen van deze parameters is derhalve beperkt.

Voorts zijn de volgende redoxparameters van belang, die middels laboratorium analyses bepaald moeten worden:

- Nitraat (NO₃⁻)
- Tweewaardig ijzer (Fe₂⁺)
- IJzer totaal
- Sulfaat (SO₄²⁻)
- Sulfide (HS⁻)
- Methaan (CH₄)

De beschikbaarheid van nutriënten voor micro-organismen wordt vastgesteld met de onderstaande parameters, die eveneens middels laboratoriumanalyses worden bepaald.

- Totaal gehalte aan stikstof op basis van nitraat (NO₃⁻), nitriet (NO₂⁻) en ammonium (NH₄⁺)
- Ortho-fosfaat (PO₄³⁻)
- DOC/TOC

De combinatie van de veldwaarnemingen en laboratoriumanalyses geeft een sluitend beeld over de redox-karakterisatie. Metingen van sulfide en methaan zijn betrekkelijk kostbaar en arbeidsintensief. Deze metingen zullen alleen worden verricht wanneer op basis van de overige parameters geen sluitend beeld te vormen is.

Voor de karakterisering van de herkomst van grondwater (Stuyfzand-classificatie, lit.2 en 3) is de ionenbalans van belang (hypothese 2 en 5). De volgende parameters worden in dit kader onderzocht:

- Carbonaat evenwicht (wordt bepaald met HCO₃⁻ in combinatie met pH). Dit is een maat voor het pH-bufferend vermogen van de bodem.
- Specifiek voor de Stuyfzand-classificatie dienen ook de volgende parameters in beeld gebracht te worden: K⁺, Na⁺ en Mn²⁺
- Hardheid / alkaliteit (Ca²⁺ en Mg²⁺): in combinatie met de specifieke Stuyfzand-parameters kan met deze parameter aangeduid worden in hoeverre het grondwater op die plaats onderhevig is aan onder meer verzilting of verzoeting.
- Chloride (Cl⁻). Onduidelijk is in hoeverre biologische afbraak wordt beïnvloed door zoutgehalten in het grondwater. Voorts kan het zoutgehalte implicaties hebben voor de regionale grondwaterstroming (ligging zoet/zout grensvlak; dichtheidsstroming). Het zoet/zout grensvlak wordt in de regel uitgedrukt middels de verbreiding van de chlorideconcentratie in het grondwater (hypothese 4).

Onder invloed van de aanwezigheid van een verontreiniging kunnen deze parameters veranderen, doordat reacties kunnen plaatsvinden die invloed hebben op de bodemcondities.



Bijlage III.2 Chemische en biologische afbraak-reacties



De chemische afbraak van verontreinigende stoffen vindt meestal plaats door middel van redoxreacties. Bij een redoxreactie vindt een overdracht van elektronen plaats tussen een elektrondonor en elektronacceptor. Zuurstof is een voorbeeld van een elektronenacceptor. Als elektrondonor kan een verontreinigende stof gebruikt worden.

Als de zuurstof is verbruikt wordt achtereenvolgens nitraat, mangaan, ijzer en sulfaat als elektronenacceptor gebruikt, afhankelijk van de redoxcondities. De redoxcondities worden in de praktijk aangegeven door een meting van Eh. Dit is een maat voor de geleidingspotentiaal en het aantal vrije elektronen, weergegeven in mV.

Hieronder is een schema opgenomen waarin bij de gebruikte elektronacceptor aangegeven is met de bijbehorende halfreactie. De andere halfreactie wordt gevormd door de verontreiniging, die dienst doet als elektrondonor. Ook is een interval van redoxpotentialen aangegeven, waarbinnen deze reacties plaatsvinden.

Tabel 1. Redoxcondities en bijbehorende halfreacties.

Elektronacceptor	Halfreactie	Eh – interval (mV)(Sposito 1989)
Zuurstof	$O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$	700 - 470
Nitraat ¹	$NO_3^- + 2H^+ + 2e \rightarrow NO_2^- + H_2O$	500 - 200
(Mangaan) ²	$MnO_2 (s) + 4H^+ + 2e \rightarrow Mn^{2+} + 2H_2O$	400 - 200
Ijzer	$Fe(OH)_3 (s) + 3H^+ + 4e \rightarrow Fe^{2+} + 3H_2O$	400 - 100
Sulfaat	$SO_4^{2-} + 9H^+ + 8e \rightarrow HS^- + 4H_2O$	- 150 - 0
Methaan ³	$CO_2 + 8H^+ + 8e \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	< -150

¹ Afhankelijk van het soort bacteriën kan nitraat ook omgezet worden in stikstof (N₂).

² Indien mangaan aanwezig is, zal deze reactie verlopen voordat ijzer gereduceerd wordt.

³ Methaan is hier de elektrondonor, de verontreinigende stof treedt op als elektronacceptor.

Om een energetisch zo groot mogelijke opbrengst te hebben, vinden de reacties plaats volgens afnemende redoxpotentiaal.

De redoxreacties verlopen vaak onder aanwezigheid van bacteriën, waarbij de bacteriën zorg dragen voor het elektronentransport. Elke reactie wordt ondersteund door een andere 'set' bacteriën. (Als de zuurstofconcentratie gedaald is tot 0,5 tot 1 mg/l kunnen anaërobe bacteriën gaan werken (Aronson, 1997)).

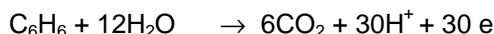
In dit rapport wordt de bacterie-populatie niet verder besproken. Er wordt vanuit gegaan dat de juiste bacteriepopulatie aanwezig is op de site.

Uit deze halfreacties blijkt duidelijk dat de milieucondities kunnen veranderen door deze reacties. De zuurgraad (pH) kan stijgen, doordat een waterstof-ion wordt verwijderd uit de waterfase. Bij de afbraak van organische verbindingen komt ook koolstofdioxide vrij, wat de alkaliniteit van de bodem kan beïnvloeden. De mate van invloed is afhankelijk van de bufferende werking van de bodem en verschilt dus per locatie.

Mono-cyclische aromatische koolwaterstoffen (BTEX = benzeen, toluen, ethylbenzeen, xylenen en naftaleen)

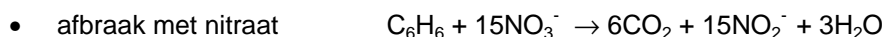
De BTEXN-afbraak vindt voornamelijk plaats onder aërobe omstandigheden. Een paar van de aromaten breken ook onder nitraatreducerende omstandigheden af, onder inlevering van de reactiesnelheid. Momenteel wordt onderzoek gedaan naar de mogelijkheden en reactiesnelheden onder diverse anaërobe milieus.

De algemene halfreactie van de afbraak van BTEXN is als volgt:

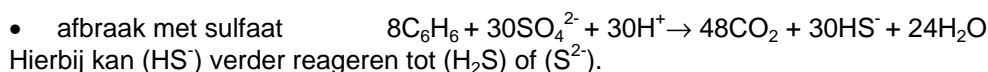


(Hierbij wordt benzeen als voorbeeld voor alle BTEXN genomen.)

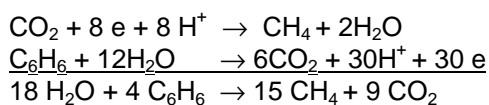
Als deze reactie samengevoegd wordt met de eerder beschreven halfreacties voor de reductie van elektronenacceptoren, worden de volgende reacties verkregen:



In het algemeen wordt ook nitriet verder afgebroken en kan de totale reactie worden geschreven als: $\text{C}_6\text{H}_6 + 6\text{NO}_3^- + 6\text{H}^+ \rightarrow 3\text{N}_2 + 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ (dit mechanisme wordt ook wel denitrificatie genoemd).



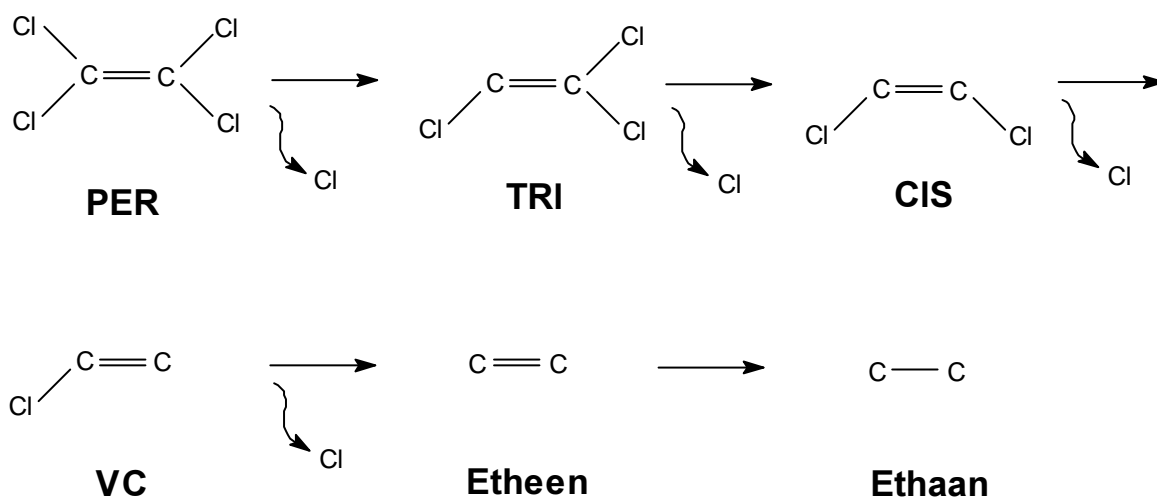
Voor de reactie onder methanogene omstandigheden wordt de totale reactie de som van de twee halfreacties:



Vluchtige koolwaterstoffen (VOCI)

In tegenstelling tot natuurlijke afbraak van BTEXN, waarbij de BTEXN zelf als elektron donor fungeert, is bij de natuurlijke afbraak van VOCL de verontreiniging de elektron-acceptor. Deze reactie levert micro-organismen dan ook geen energie op. Het mechanisme is cometabolisch, dat betekent dat een organische koolstofbron wordt omgezet, waarbij VOCL dienst doet als elektron acceptor. Hierdoor verandert de redoxconditie van de bodem. Ook de concentratie van de organische koolstofbron neemt af.

De vluchtige koolwaterstoffen geven bij afbraak een reeks tussen- en afbraakproducten. De reeks is als volgt: perchloorethyleen (Per), trichloorethyleen (Tri), cis-dichloorethyleen (Cis), vinylchloride (VC), etheen en ethaan. De reacties staan afgebeeld in figuur 1.



Figuur 1: Schematische weergave van afbraakreacties van VOCL's

De reacties van Per naar Tri en van Tri naar Cis vinden alleen plaats in een sterk reducerend milieu, d.w.z in methanogene omstandigheden. De andere reacties kunnen plaatsvinden in een iets minder sterk reducerend milieu, en de laatste reacties (VC naar etheen en ethaan) vinden plaats in een aëroob milieu. Dit is duidelijk weergegeven in tabel 2. Hierin is de mogelijkheid aangeduid van biologische afbraak onder de betreffende omstandigheden. Dit is een wezenlijk verschil met de afbraaksnelheid, die hierin niet zijn opgenomen. Voor de afbraaksnelheden wordt verwezen naar bijlage III.3.

Tabel 2. Mogelijkheid tot afbraak

(Aronson&Howard, 1997; PAO cursus Grondwatersanering door natuurlijke afbraak)

Redoxcondities	Aëroob	Nitraat	IJzer	Sulfaat	Methanogeen
PER	-	+/-	+/-	+	+
TRI	-	+/-	+/-	+	+
CIS	+	+/-	+/-	+	+
VC	+	+/-	+/-	+	+
Etheen	+	+	+	+	+

+ Afbraak mogelijk

+/- Langzame tot geen afbraak mogelijk

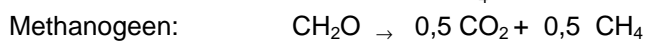
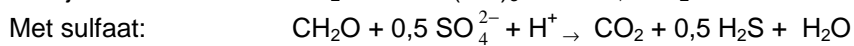
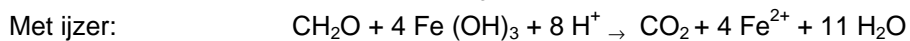
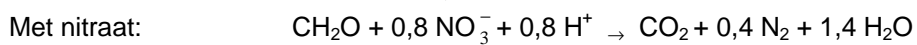
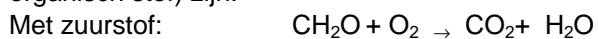
- Geen afbraak mogelijk

De gegevens in deze tabel komen slechts ten dele terug in de afbraaksnelheidsconstanten, zoals weergegeven in tabel 3 in bijlage III.3 over de modellering. Ook voor de reacties die volgens bovenstaande tabel niet plaatsvinden kan een afbraaksnelheidsconstante gegeven zijn. Bijvoorbeeld anaëroobe afbraak van TRI vindt volgens deze tabel niet plaats, terwijl wel een (lage) afbraaksnelheidsconstante gegeven is. Deze is afkomstig van enkele gevallen waar wel aëroobe afbraak is gesignaleerd.

Organisch stof

De redoxomstandigheden in de bodem worden ook beïnvloed door de afbraak van organisch stof. Organisch stof kan optreden als concurrent voor de afbraak van verontreinigingen. Daarom zijn zowel het opgeloste organische stof als het vaste organische stof beschouwd.

De redoxreacties voor afbraak van organisch stof (met CH₂O als een vereenvoudigde weergave voor organisch stof) zijn:





Bijlage III.3 Modelling biologische afbraak

Voor de modellering van de natuurlijke afbraak zijn diverse mogelijkheden voor gebruikte vergelijkingen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen 2 situaties:

1. Als er weinig zuurstof in oplossing is, zal de degradatiesnelheid afhankelijk zijn van de zuurstofconcentratie.
2. Als er veel zuurstof in oplossing zal de zuurstofconcentratie nauwelijks invloed hebben op de degradatiesnelheid, omdat er een overmaat is. Alleen de electronendonor-concentratie is dan direct van invloed op de degradatiesnelheid.

Aërobe afbraak

Voor beide situaties wordt een vergelijking gebruikt, waarbij de waarden van constanten moeten worden aangepast aan de situatie. Voor de degradatiesnelheid van BTEXN met zuurstof als elektronenacceptor geldt:

$$r_{\text{Benzeen},O_2} = -k_{\text{Benzeen},O_2} [\text{Benzeen}] \frac{[O_2]}{K_{O_2} + [O_2]}$$

Hierin is r_{Benzeen,O_2} de degradatiesnelheid van benzeen voor aërobe afbraak in $\text{mg.l}^{-1}.\text{T}^{-1}$.

k_{O_2} is de 1^e orde degradatiesnelheidsconstante voor Benzeen in T^{-1} .

K_{O_2} is de Monod half-verzadigingsconstante in mg.l^{-1} .

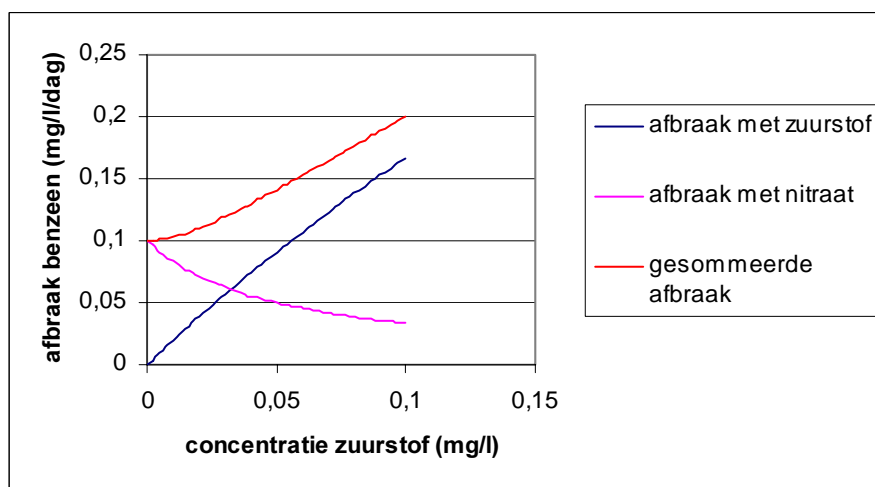
Bij een hoge zuurstofconcentratie zal er een nulde orde vergelijking ontstaan ten opzichte van zuurstof en een 1^e orde vergelijking voor BTEXN. Bij een lage zuurstofconcentratie constante zal de afbraaksnelheid lineair afhangen van de zuurstofconcentratie. Dit is van toepassing als de BTEXN-concentratie zo hoog is, dat de concentratie zuurstof uitgeput kan raken. De reactiesnelheid zal dan dalen als de concentratie zuurstof daalt. Buscheck et al. (1993) geeft aan dat een dergelijke 1e orde vergelijking gebruikt kan worden als de concentratie BTEX kleiner is dan 1.000 $\mu\text{g/l}$. Of dit ook hier van toepassing is, zal zich nog moeten uitwijzen. Hurst et al. (1994) geven voor zuurstof een half-verzadigingsconstante van ongeveer 0,5 mg/l . Voor de overige electronacceptoren zijn geen halfverzadigingsconstanten gevonden. Al met al is de verwachting dat de invloed van de halfverzadigingsconstante op de totale afbraak gering is. De afbraak met zuurstof zal net zo lang doorgaan totdat alle zuurstof uitgeput raakt. Daarna gaat de afbraak verder met nitraat met meestal een veel lagere afbraaksnelheid. Het iets eerder of later uitgeput raken van zuurstof (door een andere halfverzadigingsconstante) heeft dus slechts een beperkte invloed op de totale afbraak van BTEXN. Voor de overige electronacceptoren zal ook een halfverzadigingsconstante van 0,5 mg/l worden gebruikt.

Nitraatreducerende afbraak

Afbraak van BTEXN onder nitraatreducerende condities is afhankelijk van de concentratie zuurstof. Zolang er nog zuurstof aanwezig is, zal de reactie niet verlopen met nitraat, omdat dit energetisch minder oplevert. Dit heeft tot gevolg dat de vergelijking voor de afbraaksnelheid van BTEXN onder nitraatreducerende omstandigheden als volgt wordt:

$$R_{BTEX,NO_3} = -k_{NO_3} [BTEX] \frac{[NO_3]}{K_{NO_3} + [NO_3]} \cdot \frac{K_{i,O_2}}{K_{i,O_2} + [O_2]}$$

Hierin zijn R, k en K hetzelfde als bij de vergelijking voor zuurstof, en K_{i,O_2} is een zuurstof-imbibitie, die de opeenvolging van het gebruik van de elektronen acceptoren simuleert. Deze constante zorgt dat de nitraatreducerende afbraak niet begint voordat de zuurstofconcentratie voldoende gedaald is. Een waarde voor deze parameter is niet gevonden in de literatuur. De waarde wordt echter gekozen zodanig dat bij een overmaat van nitraat de gesommeerde afbraak van benzeen met zuurstof en met nitraat asymptotisch de eerste orde afbraakconstante van nitraat benadert indien de zuurstofconcentratie naar 0 gaat. Dit wordt visueel weergegeven in figuur 1.



Figuur 1: Afbraak benzeen met zuurstof en nitraat als functie van zuurstofconcentratie bij overmaat aan nitraat; benzeenconcentratie is 1 mg/l, halfverzadigingsgraad van zuurstof is 0,5 mg/l, 1e orde afbraak benzeen is 1/dag (met zuurstof) en 0.1 / dag (met nitraat)

De waarde voor de zuurstofimbibitieconstante is volgens deze aanname te bepalen uit:

$$K_{i,O_2} = \frac{k_{Benzeen,NO_3} \cdot K_{O_2}}{k_{benzeen,O_2}}$$

Ijzerreducerende, sulfaatreducerende en methanogene afbraak

Dezelfde vergelijkingen kunnen samengesteld worden voor ijzerreductie, sulfaatreductie en methanogenese (Clement, RT3D (1997)), waarbij er voor iedere vergelijking steeds een extra vermenigvuldigingsterm wordt toegevoegd voor de remming van de reactie indien er nog een meer dominante electronacceptor aanwezig is. Bij methanogenese is er echter geen stof die uitgeput kan raken. Daarom wordt echter vaak gewerkt met de concentratie methaan die maximaal geproduceerd kan worden en die wordt bepaald uit veldmetingen (Clement, RT3D (1997)).

Totale afbraaksnelheid

De totale afbraaksnelheid van een component is dan de som van alle separate reactiesnelheden:

$$R = R_{O_2} + R_{NO_3^-} + R_{Fe^{2+}} + R_{SO_4^{2-}} + R_{CH_4}$$

Eén reactie heeft de overhand en in de overgangssituatie kan een andere reactie parallel lopen. Deze reacties verlopen dus niet allemaal tegelijkertijd.

De snelheden waarmee de verschillende electron-acceptoren reageren, zijn de snelheden van BTEXN-afbraak voor de desbetreffende electronacceptor vermenigvuldigd met een stoichiometrische constante. Deze wordt bepaald uit de verhouding waarin de moleculen met elkaar reageren en de massa's van de moleculen (Wiedemeier et al., 1995). Deze stoichiometrische constanten worden weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: Stoichiometric ratio's tussen electronacceptor en electrodonor.

	Benzeen	Tolueen	Ethylbenzeen	Xyleen	Naftaleen	Organisch stof
Zuurstof	3,072	3,126	3,165	3,165	3,0	1,065
Nitraat	4,763	4,845	4,906	4,906	4,65	1,652
IJzer (III)	21,448	21,819	22,093	22,093	20,95	7,440
Sulfaat	4,612	4,692	4,750	4,750	4,50	1,600
Methaan	0,770	0,784	0,710	0,710	0,75	0,267

De snelheid in een 1^e orde reactie wordt beschreven door een percentage van de verontreiniging per tijdseenheid of door de halfwaardetijd. Het omrekenen van halfwaardetijden gaat als volgt: De halfwaardetijd is $t_{1/2}$ in T en de afbraakconstante is k in T^{-1} .

$$\text{Er geldt: } k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

Voor het gebruik van het model zijn een aantal aannames gedaan:

- de verontreiniging is niet toxisch voor de bacteriën;
- de microbiële populatie is constant;
- de degradatiereacties vinden alleen plaats in de waterfase.

Er zijn voor BTEXN veel snelheidsconstanten vermeld in de literatuur. De waarde van deze constanten is sterk afhankelijk van hoe de constanten bepaald zijn. Deze kunnen komen uit kolomproeven, batchproeven, veldstudies, in situ microkosmos studies en laboratorium microkosmos studies. Deze resultaten komen uit pluimstudies, waar monitoringspeilbuizen geplaatst zijn langs de as van de verontreinigingspluim of uit experimenten met continue injecties (van verontreinigingen) waar monitoringspeilbuizen in rijen staan geplaatst langs het stromingspad, dichtbij het injectiepunt.

Het blijkt dat de resultaten van de veldstudies en in situ studies het meest geschikt zijn om in modellen te gebruiken. In deze veldstudies is gecorrigeerd voor effecten als dispersie, advection, sorptie en verdunning door middel van tracers die niet biologisch afbreekbaar zijn. (Aronson, 1997). In tabel 2 staan de in deze studie gebruikte constanten vermeld.

Tabel 2. Afbraaksnelheidsconstanten BTEXN.

Constanten	Aëroob	Anaëroob ¹	Nitraatreducerend	IJzerreducerend	Sulfaatreducerend	Methanogeen
benzeen	0,200	0,003	0,002	0,004	0,010	0,003
tolueen	0,250	0,237	0,360	0,015	0,042	0,025
ethylbenzeen	0,120	0,218	0,150	0,002	0,005	0,025
m-xyleen	0,150	0,031	0,030	0,004	0,074	0,010
o-xyleen	0,080	0,019	0,040	0,005	0,004	0,010
p-xyleen	0,180	0,013	0,030	0,004	0,044	0,009

naftaleen 0,308 0

¹ Bron: Suarez, P., 1999

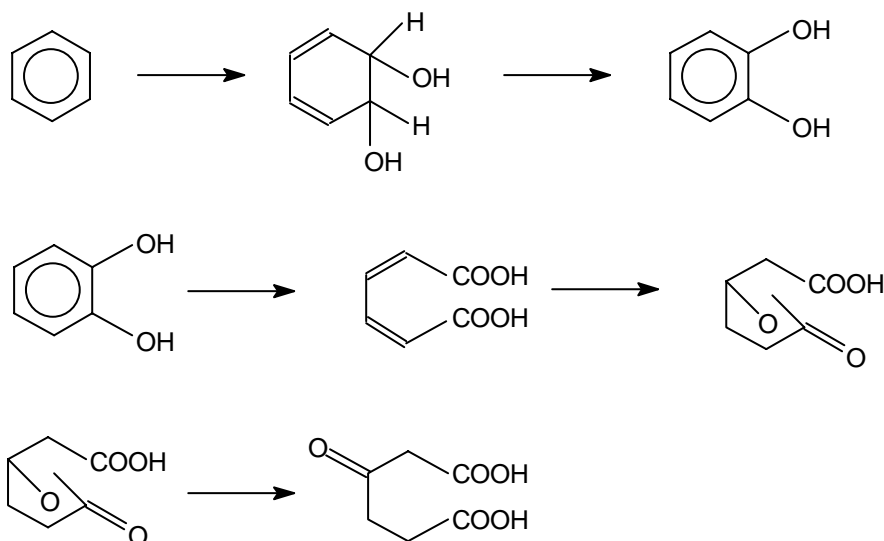
Overigen: Aronson, D., 1999; ; Middeldorp, P., 1999; Aronson, D., 1997.

Er zijn diverse literatuurbronnen geraadpleegd, waarbij verschillende redoxclassificaties gebruikt worden. Sommigen maken onderscheid tussen matig anaëroob en sterk anaëroob, anderen maken verschil tussen sulfaatreducerend en methanogeen. De constanten en gemiddelden uit de diverse bronnen zijn vergeleken. Hierbij is in overweging genomen hoe de constante uit de bron bepaald is (soort studie, aantal sites waaruit een gemiddeld is berekend). Zo is gekozen voor een representatieve constante. Hierna zijn de onderlinge verhoudingen (bv. benzeenaafbraak ten opzichte van toluenaafbraak) bekeken en zijn indien nodig de constanten aangepast binnen de marge van de eerder genoemde bronnen.

De snelheidsconstanten moeten met voorzichtigheid gebruikt worden, aangezien het aantal studies waaruit ze zijn afgeleid sterk varieert. Ook blijkt dat degradatiesnelheden sterk afhankelijk zijn van de locatie. Dit kan o.a. door de bodemopbouw zijn (bv. org. stofgehalte) en door aanwezigheid of afwezigheid van bepaalde bacteriën. Er zijn zelfs studies waarin aangetoond is dat de snelheden op 1 enkele site twee orden van grootte verschillen. (Dobbins et al.).

Uit de conclusie van de bodemkarakterisatie blijkt dat zich in het pilotgebied Feyenoord vooral sterk anaërobe omstandigheden voordoen in de bodem. Voor de modellering van de afbraak van BTEXN zou dus een lage afbraaksnelheid gebruikt moeten worden. Benzeen is het meest mobiel en slechtst afbreekbaar onder methanogene omstandigheden. Daarom wordt de stoftransportmodellering alleen uitgevoerd voor benzeen. Hiervoor wordt de constante 0,003 gebruikt (zie tabel 2).

Uit de tabel blijkt dat benzeen zeer moeilijk is af te breken (biologisch) vergeleken met de andere aromatische verbindingen. Dit komt door het reactiemechanisme, die als volgt is:



Voor het aanhechten van functionele groepen aan de ring zijn elektron-acceptoren nodig. Het openbreken van de ringstructuur kan in anaërobe en aërobe condities plaatsvinden. Bij benzeen is geen aanknopingspunt, zoals een functionele groep, die de elektronische symmetrie van de ringstructuur kan verbreken.

De benzeendegradatie wordt geremd door de aanwezigheid van andere aromatische verbindingen (TEXN). De redoxcondities zijn niet van invloed op de onderlinge snelheden van anaërobe afbraak.

VOCI

De snelheid van dechlorering is sterk afhankelijk van de redoxcondities en de chloreringsgraad. In een sterk reducerend milieu zullen de hoger gechloroerde koolwaterstoffen, zoals PER en TRI, sneller afbreken dan CIS, VC en etheen. Onder ijzer- en nitraatreducerende condities zullen juist de minder gechloroerde koolwaterstoffen sneller afbreken.

Het stoftransportmodel RT3D beschrijft enkele modules voor de modellering van BTEXN- en VOCl-afbraak. In deze modules worden de afbraakparameters per modelcel als constant aangenomen waarbij er geen rekening mee wordt gehouden dat deze kan veranderen indien bv de redoxomstandigheden veranderen. Daarom is besloten om gebruik te maken van de mogelijkheid van RT3D om een eigen module toe te voegen.

De afbraak-snelheidsconstanten die gebruikt worden in het model zijn verzameld uit diverse literatuurbronnen. In tabel 3 staan de geselecteerde snelheidsconstanten, zoals gehanteerd in deze studie.

Tabel 3. Afbraaksnelheidsconstanten VOCl
 (Suarez, P., 1999; Aronson, D., 1999; Middeldorp, P., 1999; Aronson, D., 1997)

Constanten	Aëroob ¹	Nitraatreducerend	Ijzerreducerend	Sulfaatreducerend	Methanogeen
PER	0,000	0,001	0,004	0,002	0,040
TRI	0,005	0,002	0,003	0,006	0,003
CIS	x	x	0,002	0,007	(0,016) ²
VC	0,087	0,001	0,005	0,008	(0,010) ²
etheen	x	x	x	x	x
ethaan	x	x	x	x	x

x geen data bekend

¹ Suarez, P., 1999

² deze constanten zijn afkomstig van een summierende hoeveelheid gegevens

Uit de conclusie van de bodemkarakterisatie blijkt dat zich in het pilotgebied Feyenoord vooral sterk anaërobe omstandigheden voordoen in de bodem. Voor de modellering van de afbraak van PER zou dus een hoge afbraaksnelheid gebruikt moeten worden. In de stoftransportmodellering wordt PER gebruikt om een indicatie te geven van de afbraaksnelheid en eventuele doorbraak in het 1^e watervoerend pakket. De afbraaksnelheidsconstante die hiervoor gebruikt wordt is 0,04 (zie tabel 3). Ook VC wordt gebruikt, omdat deze het meest mobiel is. Hiervoor wordt niet de methanogene constante gebruikt (zie tabel 3), omdat de betrouwbaarheid van deze constante niet duidelijk is (zie de noot bij de tabel). Daarom wordt gebruik gemaakt van de afbraakconstante onder ijzerreducerende omstandigheden, 0,005.

Algemeen

Deze constanten zijn het resultaat van een vergelijking van verschillende studies waarin de afbraakconstanten zijn berekend aan de hand van laboratorium studies (batchproeven en kolomproeven), veldstudies en in situ microcosmos studies. De studies zijn vergeleken met betrekking tot het aantal data dat geraadpleegd is (betrouwbaarheid). Ook is er gelet op de onderlinge verhoudingen van de constanten (PER ten opzichte van TRI). De variatie in deze getallen is zeer groot. Dit is te wijten aan de variatie in bodemsoorten in de verschillende studies. Verschillen in organisch stof-gehalte, bacteriepopulaties, temperatuur, soort en combinatie van verontreinigingen kunnen de bandbreedte in afbraaksnelheden opdrijven.

In het parallelle Welcome/SV600 is eveneens een literatuurstudie gedaan naar diverse afbraakconstanten. De bronnen die voor de studies geraadpleegd zijn kunnen verschillen, wat tot gevolg heeft dat de afbraaksnelheidsconstanten afwijken. Het blijkt dat de constanten die gebruikt zijn in Welcome lager zijn dan bovenstaande constanten.

Daarom is de keuze gemaakt om tijdens de modellering tevens gebruik te maken van de Welcome-constanten. Hierbij zijn de 25-percentiel-waarden van Welcome gebruikt als lage waarden voor de afbraaksnelheid. Hiermee wordt zicht verkregen op de bandbreedte van de constanten en de invloed hiervan op de uitkomsten van het model. De volgende constanten zijn gebruikt:

1. De afbraaksnelheden uit de literatuurstudie voor ABIS.
2. De 25-percentiel-waarden van Welcome, dat houdt in dat lage afbraaksnelheden gebruikt worden.
3. Indien geen afbraak plaatsvindt wordt afbraakconstante 'nul' gebruikt. Ook deze komt regelmatig terug in de literatuur. Omdat de afbraak sterk afhankelijk is van de locale omstandigheden, wordt een 'worst-case' -scenario uitgevoerd.

Om te bepalen welke redox afbraakconstante geldig is, worden de grenswaarden voor de concentraties van de redoxparameters opgesteld. Hierbij geldt dat als de zuurstofconcentratie boven de grenswaarde is, de aërobe afbraakconstante wordt gebruikt. Indien deze lager is, wordt bekeken of de nitraatconcentratie boven de grenswaarde is, etc. Deze grenswaarden worden bepaald aan de hand van de imbitiecoëfficiënten die worden vermeld in de volgende in de volgende paragraaf.

De afbraak van organisch stof wordt gemodelleerd op dezelfde wijze als de benzeenafbraak, waarbij de opgeloste en vaste fase organische stof ieder een eigen afbraakconstante hebben. De stoichiometrische constanten zijn voor beide componenten gelijk en zijn reeds vermeld in tabel 3.

Voor de vergelijkingen die gebruikt zijn in het stoftransportmodel wordt verwezen naar 'Model resultaten' en RT3D (Clement, 1997).



Bijlage III.4 Gebruikte parameterwaarden in stoftransportmodel

Fracties in de verschillende bodemprofieltypes (-)

Fracties	<i>Klei</i>	<i>Veen</i>	<i>Zand</i>	<i>Totaal</i>
Bodemprofieltype 1	0,62	0,13	0,25	1,00
2	0,59	0,02	0,39	1,00
3	0,57	0,08	0,35	1,00
4	0,60	0,38	0,03	1,00
5	0,37	0,18	0,45	1,00

Standaard organisch stofgehalten (%)

	<i>Klei</i>	<i>Veen</i>	<i>Zand</i>
	5	60	2

Organisch stofgehalte in de bodemprofieltypes (%)

	<i>Klei</i>	<i>Veen</i>	<i>Zand</i>	<i>Totaal</i>
Bodemprofieltype 1	3,08	8,08	0,50	11,66
2	2,93	1,41	0,78	5,12
3	2,85	4,66	0,70	8,21
4	3,00	22,50	0,05	25,55
5	1,85	10,79	0,90	13,54

**Standaard bulkdichtheid
(kg/dm³)**

	<i>Klei</i>	<i>Veen</i>	<i>Zand</i>
	1,5	1,1	1,8

**Bulkdichtheid in de bodemprofieltypen
(kg/dm³)**

	<i>Klei</i>	<i>Veen</i>	<i>Zand</i>	<i>Totaal</i>
Bodemprofieltype 1	0,92	0,15	0,45	1,52
2	0,88	0,03	0,70	1,61
3	0,86	0,09	0,63	1,57
4	0,90	0,41	0,05	1,36
5	0,56	0,20	0,81	1,56



Retardatiefactoren

	<i>Benzeen</i>	<i>PER</i>	<i>VC</i>
	<i>log koc</i>	<i>log koc</i>	<i>log koc</i>
	1,42		
	1,50		
	1,58		
	1,64		
	1,69		
	1,70		
	1,73		
	1,73		
	1,74		
	1,81		
	1,92		
	1,96		
	2,00		
	2,05		
	2,10		
	2,15		
	2,28		
	2,30		
	2,38		
	2,40		
	2,40		
	2,48	2,42	
	2,50	2,32	
	2,55	2,25	
	2,65	2,31	
	2,68	2,54	
	2,70	2,63	
	2,78	2,65	0,39
	2,85	2,57	0,34
	2,92	2,94	1,66
	2,95	2,56	0,92
Minimum	1,42	2,25	0,34

Interventiewaarden		
Benzeen	30	ug/l
Ethyleen	150	ug/l
Tolueen	1000	ug/l
Xyleen	70	ug/l
Naftaleen	70	ug/l
PER	40	ug/l
TRI	500	ug/l
CIS	20	ug/l
VC	5	ug/l

Afbraakconstanten	
Benzeen	0,003
PER	0,04
VC	0,005

Porositeit 0,35

Literatuur

Montgomery, J.H., Groundwater chemicals desk reference, 1996.

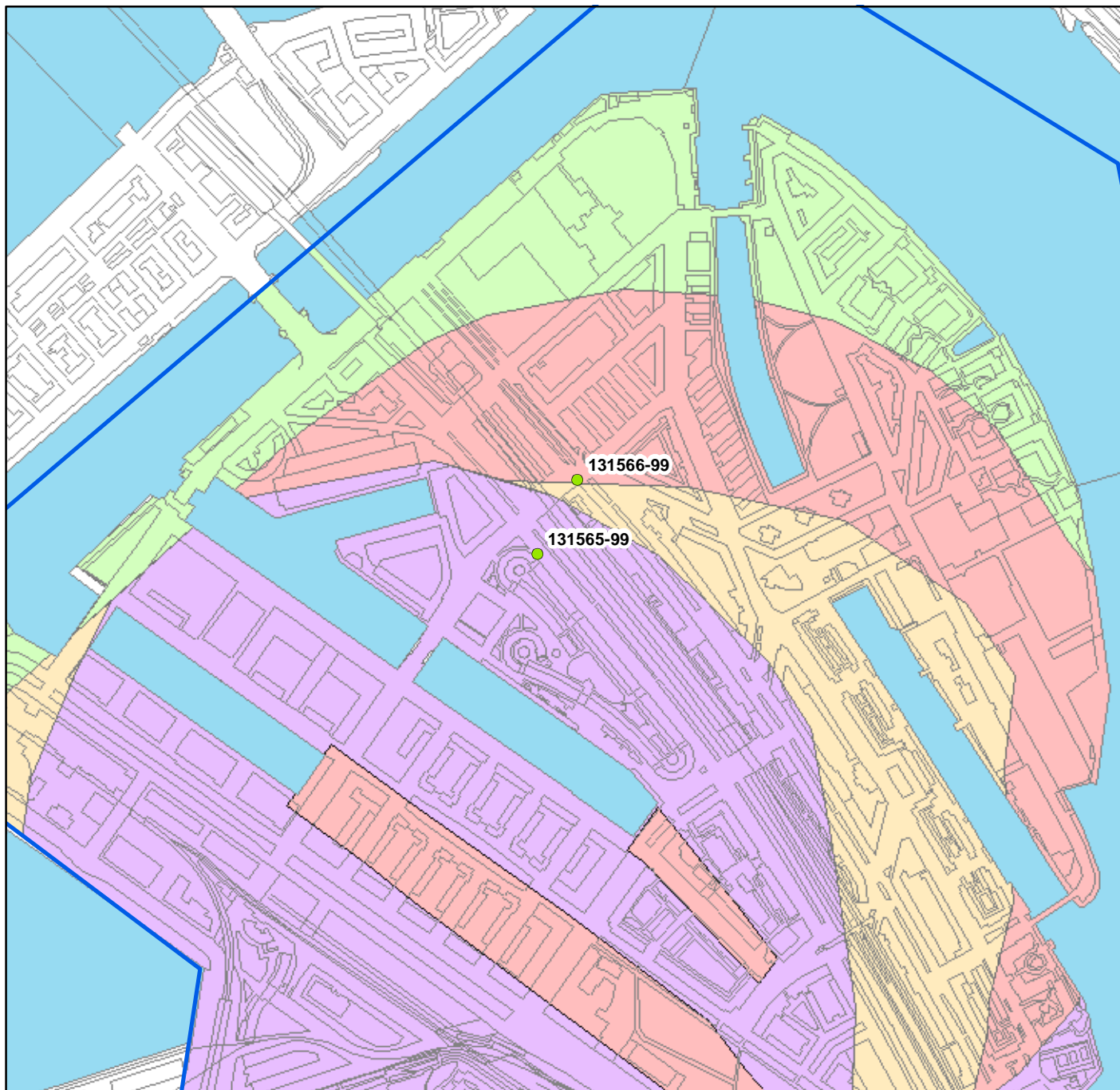
BioClear, Vooronderzoek anaerobe dechlorering van VOCl op locatie 'Schiedamseweg' te Rotterdam, eindrapportage nr: 98,1053, 1999.

van Agteren, M.H., Keuning, S., Janssen, D.B., Environment & Chemistry, Handbook on biodegradation and biological treatment of hazardous organic compounds, 1998.

Appelo, C.A.J., Postma, D., Geochemistry, groundwater and pollution, Balkema (Rotterdam), 1994.

Staatscourant 24 februari 2000, nr. 39 / pag. 8.

Bijlage III.5: Lokaties gemeten peilbuizen BDO









0 250 500 1.000 Meters

ABIS deelproject III; Bijlage III.5

 pilot gebied

bodemprofieltypes

-  type 1: klei/veen met tussenzandlaag bovenin holoceen pakket
-  type 2: klei/veen met tussenzandlaag in het midden van holoceen pakket
-  type 3: klei/veen met tussenzandlaag onderin holoceen pakket
-  type 4: klei/veen zonder tussenzandlagen
-  type 5: gedempte havens
-  BDO-peilbuizen in pilotgebied

