

Title:	Monitoring and management of environmental pollution based on macroparameters measured with sensors (Macrosense)		
(report in Dutch)			
Author:	Drs. N. Walraven	Institute:	TNO-NITG
Author:	Dr. Ir. T.J. Heimovaara	Institute:	Royal Haskoning
Author:	R.P. Römer	Institute:	Royal Haskoning
Author:	Drs. C.C.D.F. van Ree	Institute:	GeoDelft
Author:	Ir. M.P. Harkes	Institute:	GeoDelft
Author:	Dr. Ir. R.E.G. van Hal	Institute:	Schlumbergee
Januari 2003			
Number of pages	:	34	
Keywords (3-5)	:	Sensors, macroparameters, groundwater, monitoring, field tests, soil, pollution	
DC-Publication-number	:	DC1-526-6	
Institute Publication-number (optional)	:	030-2564675	TNO-NITG
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

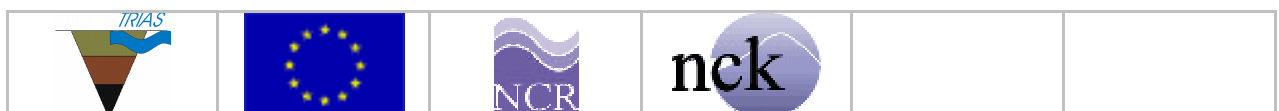
Acknowledgement

Exampeltext: This research has been sponsored by the Dutch Government through the Netherlands Fellowship Programme and the ICES-2 programme and the European Union through the IRMA-SPONGE programme. The research is part of the Research programme of Delft Cluster and the Netherlands Centre for River Research (NCR).

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):



Samenvatting

Chemische sensoren zijn niet meer weg te denken uit het dagelijkse leven. Werden ze enkele jaren geleden voornamelijk nog gebruikt voor wetenschappelijke doeleinden, nu treffen we ze ook aan in wasmachines en nieuwe auto's. Andere toepassingen zullen snel volgen, want chemische sensoren zijn goedkoop, robuust en accuraat. Een belangrijke toepassingsmogelijkheid ligt in het milieu-onderzoek. Chemische sensoren kunnen namelijk voorzien in de meet- en informatiebehoefte binnen dit vakgebied.

Dit Delft Cluster/SKB onderzoek is gericht op:

- Het vergroten van het draagvlak voor het gebruik van sensoren in het bodemonderzoek;
- Het verlagen van de drempel voor het doen van macrochemische analyses om de grondwaterkwaliteit te bepalen binnen de bodemverontreinigingsproblematiek.

De macrochemie van grondwater geeft inzicht in procesomstandigheden, zoals natuurlijke afbraak en verspreiding van verontreinigingen, in de bodem. Met deze kennis kan het gedrag van (rest)verontreinigingen in de bodem beter voorspeld worden.

In het kader van het onderzoek is een meetsysteem gebouwd dat bestaat uit een aantal bestaande sensoren en veldtesten. Laboratorium- en veldonderzoek heeft aangetoond dat de macrosamenstelling van grondwater nauwkeurig en op locatie kan worden bepaald met het meetsysteem. Bovendien levert het 1) meer informatie en 2) kostenbesparing op. Naast een beschrijving van de meetresultaten worden in dit rapport toepassingsmogelijkheden gegeven voor het inzetten van macrosensoren en geeft het consortium een visie over sensorisch meten in de toekomst.

PROJECT NAAM:	Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren	PROJECT CODE:	05.02.06
BASIS PROJECT NAAM:	Integraal regionaal bodembeheer	BASIS PROJECT CODE:	05.02
THEMA NAAM:	Bodembeheer	THEMA CODE:	0.5

Abstract

These days we take chemical sensors for granted. While just a few years ago they were still used mainly for scientific purposes, today they are to be found in washing machines and new racing cars. Other applications will follow quickly because chemical sensors are cheap, robust and accurate. Especially in soil research sensors can be quite valuable.

The Delft Cluster/SKB study 'Monitoring and management of contamination on the basis of macroparameters measured with sensors' was performed to:

- Increase the base of support for the use of sensors in soil research;
- Lower the threshold for the conduction of macrochemical analyses geared to determining the quality of groundwater in the context of the soil contamination issue.

The macrochemistry of groundwater provides insight into process conditions, such as natural degradation and the distribution of contamination in the soil. This will allow more accurate prediction of the behaviour of the (remaining) contamination in the soil.

For this research, a measuring system was created that consists of a number of existing sensors and field tests. Laboratory and field research has revealed that the measuring system enables accurate on-site measurement of the macro-composition of groundwater. Furthermore, it generates more information and cost savings. In addition to a description of the measurement results, this report also indicates utilisation options for macro sensors and gives an impression of sensoric measurement in the future.

PROJECT NAME:	Monitoring and management of environmental pollution based on macroparameters measured with sensors (Macrosense)	PROJECT CODE:	05.02.06
BASEPROJECT NAME:	Integrated regional subsurface management	BASEPROJECT CODE:	05.02
THEME NAME:	Subsurface management	THEME CODE:	0.5

Uitgebreide samenvatting

Dit rapport is het resultaat van het SKB/ Delft Clusterproject 'Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren (MACROSENSE)'. Het bredere doel van dit project is het verlagen van de drempel voor het doen van macrochemische analyses om de grondwaterkwaliteit te bepalen. De macrochemie van grondwater geeft inzicht in procesomstandigheden, zoals natuurlijke afbraak en verspreiding van verontreinigingen, in de bodem. Met deze kennis kan het gedrag van (rest)verontreinigingen in de bodem beter voorspeld worden. Door te demonstreren dat het meten van macroparameters met sensoren 1) meer informatie en 2) kostenbesparing oplevert, wil het consortium draagvlak creëren voor het verrichten van dergelijke on-site analyses.

Huidige situatie

Monitoring van verontreinigingen anno 2002 is met name gebaseerd op de analyse van microparameters in opgepompte grondwatermonsters. De analyses worden uitgevoerd in een geaccrediteerd laboratorium (Q). Slechts enkele macroparameters, waaronder de pH en geleidbaarheid (Ec), worden in het veld gemeten (figuur 1).

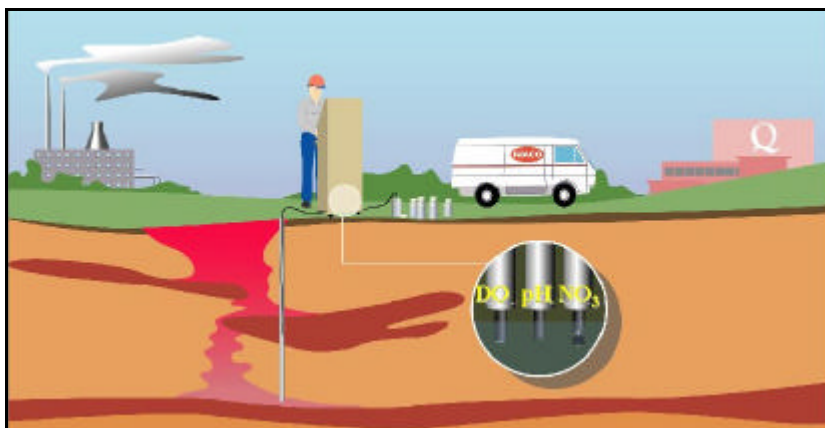


Figuur 1. Monitoring van verontreinigde locaties anno 2002.

Gewenste situatie (Macrosense)

De huidige manier van monitoring is nog niet afgestemd op het nieuwe bodembeleid, waarbij niet zozeer de omvang en de concentraties van verontreinigingen een rol spelen, maar het risico van de verontreinigingen voor de omgeving.

Door met sensoren de macrokwaliteit van (grond)water in het veld te bepalen kunnen bodemprocessen zoals natuurlijke afbraak en mobilisatie van verontreinigingen beter worden begrepen. Op basis van deze gegevens kunnen risico's voor de omgeving worden gecontroleerd. Tevens is er de mogelijkheid dat de macroanalyses dienen als een pre-screening van de grondwatermonsters. Alleen de 'verdachte' (grond)watermonsters zouden in dat geval naar het geaccrediteerde laboratorium (Q) gestuurd hoeven worden voor microanalyses (figuur 2).



Figuur 2. Monitoring van verontreinigde locaties met de Macrosense meetopstelling

Macrosense onderzoeksresultaten

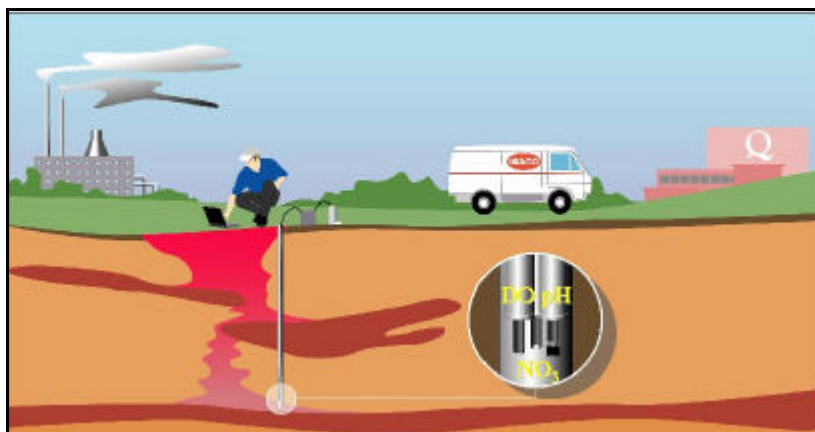
Met de Macrosense meetopstelling kan binnen 1,5 uur de macrosamenstelling (Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , K^+ , Fe_{tot} , Mn_{tot} , Cl , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , pH, Ec en O_2 (DO)) van een (grond)watermonster nauwkeurig bepaald worden. Uit een voorlopige berekening blijkt dat de kosten voor het bepalen van de macrosamenstelling (macroparameters uit tabel 1) met sensoren en veldtesten door een veldwerker in de orde grootte van €100 zullen komen te liggen. Dit is duidelijk goedkoper dan analyse van dezelfde set macroparameters in een gecertificeerd laboratorium tegen gemiddelde kostprijs van €250.

Omdat de macrosamenstelling met sensoren direct in (opgepompt) grondwater geanalyseerd wordt, worden de metingen bovendien niet beïnvloed door verandering van de (grond)watersamenstelling door veranderende chemische evenwichten tijdens transport naar het laboratorium. Met name de parameters Fe^{2+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , pH en DO zijn hier gevoelig voor. Kortom, met sensoren kan de ‘werkelijke’ grondwatersamenstelling gemeten worden. Omdat de sensoranalyses zo snel on-site beschikbaar zijn kunnen ze dienen als pre-screening van grondwatermonsters op verontreinigde locaties. Minder monsters hoeven dan in het laboratorium geanalyseerd te worden. Hiermee kan een additionele kostenbesparing gerealiseerd worden.

Visie sensorisch meten in de toekomst

De visie van de consortiumleden van Macrosense is dat in de toekomst de macrosamenstelling van grondwater continu in-situ gemonitord kan worden met sensoren die in de grond zijn gebracht middels sonderingen of peilbuizen (figuur 3). Hierdoor zal de informatie over de werkelijke omstandigheden in de bodem aanzienlijk toenemen. Niet alleen is de kwaliteit van de gegevens beter, we hebben dan ook inzicht in de veranderingen in de tijd. Het zijn juist veranderingen in de tijd die het meeste inzicht geven in de processen.

In de toekomst zal de toepassing van veldmethoden ook sterk profiteren van de ontwikkelingen in de ICT-sector. Het is nu reeds mogelijk om via deze technologie sensoren op afstand uit te lezen en de gegevens via internet te raadplegen. Dit zal resulteren in kortere lijnen, minder kans op fouten in informatie-overdracht en gerichtere acties. Oftewel een verhoging van de besluitvormingskwaliteit tegen lagere kosten.



Figuur 3. Toekomstige monitoring.

Aanbevelingen voor toekomstige productontwikkeling

In Macrosense is gebruikgemaakt van bestaande sensoren die geïntegreerd zijn in één meetinstrument. Het huidige meetsysteem is groot en zwaar. De transporteerbaarheid dient vergroot te worden middels verkleining van de afmetingen en beperking van het gewicht. In het uitgevoerde onderzoek zijn de pompdebieten en doorstroomtijden van de doorstroomcel nog niet geoptimaliseerd. Door dit te optimaliseren kan het aantal metingen waarschijnlijk verdubbeld worden (naar 10). De gebruikte sensoren beschikken elk over een eigen data-acquisitie en verwerkingssysteem. Dit dient geïntegreerd en gestandaardiseerd te worden. Tot slot dienen uit oogpunt van kwaliteitsborging, voor zover nog niet beschikbaar, meetprotocollen en kalibratieprocedures ontwikkeld te worden.

PROJECT NAAM:	Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren	PROJECT CODE:	05.02.06
BASISPROJECT NAAM:	Integraal regionaal bodembeheer	BASISPROJECT CODE:	05.02
THEMA NAAM:	Bodembeheer	THEMA CODE:	05

Executive Summary

This report is the result of the SKB/ Delft Cluster project 'Monitoring and management of environmental pollution based on macroparameters measured with sensors (MACROSENSE)'. The wider objective of this project is to lower the threshold for carrying out macrochemical analyses to determine the quality of groundwater. The macrochemistry of groundwater affords an insight into process conditions such as the natural degradation and spread of pollutants in the soil. Such knowledge makes it easier to predict the behaviour of pollutants in the soil. By demonstrating that measuring macroparameters with sensors delivers both more information and cost savings, the consortium hopes to create support for carrying out such on-site analyses.

Current situation

At present, the monitoring of polluted sites is usually based on the analysis of microparameters in groundwater samples that have been pumped up. The analyses are carried out in an accredited laboratory (Q). Just a few macroparameters, including the pH and conductivity, are measured in the field (Figure 4).



Figure 4. Monitoring of polluted sites in 2002.

Desired situation (Macrosense)

The current method of monitoring has not yet been geared to the new soil policy, in which it is the risk that pollutants pose to the surrounding area rather than its extent and concentrations that plays a role.

By being able to determine the macroquality of (ground)water in the field by using sensors, soil processes such as natural degradation and the mobility of pollutants can be better understood. The risks to the surrounding area can be examined on the basis of these data. This also raises the possibility of using the macroanalyses to pre-screen groundwater samples. This would make it necessary to send only 'suspect' (ground)water samples to the accredited laboratory (Q) for microanalysis (Figure 5).

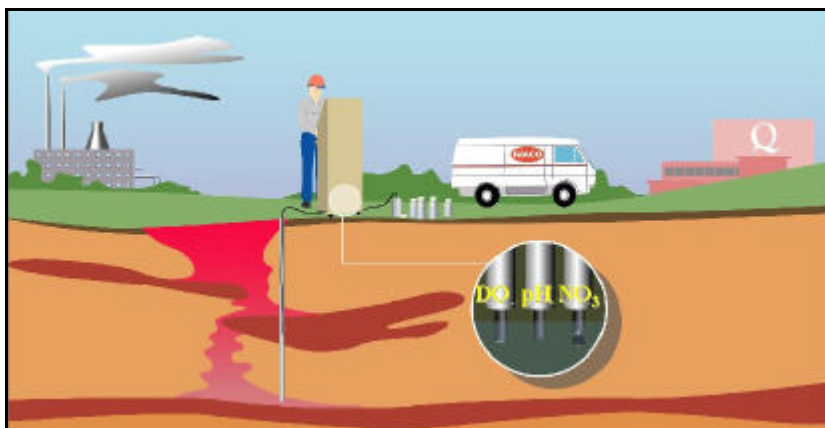


Figure 5. Monitoring polluted sites with the Macrosense measurement set-up

Macrosense research results

With the Macrosense measurement set-up, it takes less than 1 hr 30 mins to accurately determine the macrocomposition (Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , K^+ , Fe_{tot} , Mn_{tot} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , pH, Ec and O_2 (DO)) of a (ground)water sample. A prior calculation has shown that the cost of determining the macrocomposition (macroparameters from table 1) with sensors and field tests by a fieldworker will be in the order of EUR 100. This is clearly cheaper than analysing this same set of macroparameters in a certified laboratory at an average cost of EUR 250.

Moreover, as the macrocomposition is analysed with sensors placed directly in (pumped-up) groundwater, the measurements are not influenced by changes in the composition of (ground)water caused by changing chemical equilibriums during transport to the laboratory. The parameters Fe^{2+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , pH and DO are particularly sensitive to this. In short, sensors can be used to measure ‘actual’ groundwater composition. As mentioned above, the sensor analyses are available on site so quickly that they can serve as pre-screening for groundwater samples at polluted sites. Sending fewer samples to the laboratory for analysis also means further cost savings.

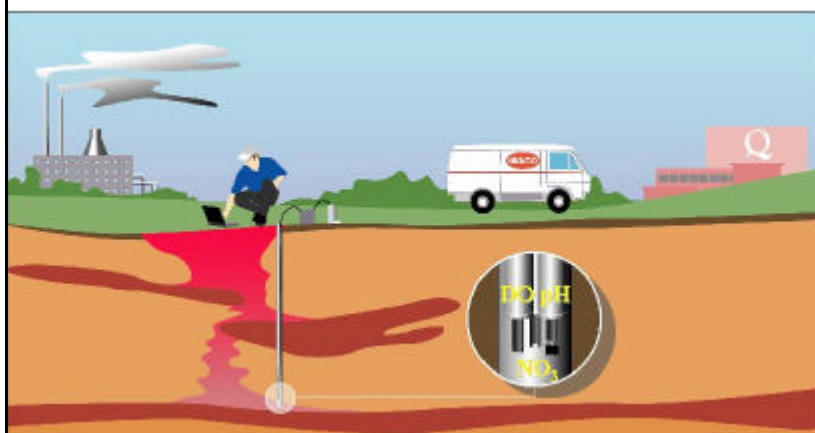


Figure 6. Future monitoring.

Vision of sensory measurement

The Macrosense consortium members foresee a future in which the macrocomposition of groundwater is monitored continually in-situ with sensors placed in the ground using geoprobes or groundwater wells (Figure 6). Such a development would considerably increase information about actual soil conditions. Not only would it improve the quality of the data, it would also give us insight into changes over time. It is precisely these changes that provide the most insight into processes.

In future, the use of field methods will benefit greatly from developments in the ICT sector. It is already possible to use such technology to read sensors remotely and consult the data on the internet. This will result in shorter lines, less chance of error in the transfer of information and more targeted actions. In other words, improved quality of decision-making at reduced cost.

PROJECT NAAM:	Monitoring and management of environmental pollution based on macroparameters measured with sensors (Macrosense)	PROJECT CODE:	05.02.06
BASISPROJECT NAAM:	Integrated regional subsurface management	BASISPROJECT CODE:	05.02
THEMA NAAM:	Subsurface management	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	:	Subsurface management	
Baseproject name	:	Integrated regional subsurface management	
Project name	:	Monitoring and management of contaminations on the basis of macroparameters measured with sensors (Macrosense)	
Projectleader/Institute	:	Prof. Dr. E.F.J. de Mulder	TNO-NITG
Project number	:	05.02.06	
Projectduration	:	01-01-2001	- 31-12-2002
Financial sponsor(s)	:	Delft Cluster	
		SKB	
		TNO-NITG	
		GeoDelft	
		Royal Haskoning	
		Sentron-CMT	
		Lange Group	
		Schlumbergee	
		Thermo Analytical	
		Eijkelkamp Agrisearch Equipment	
		Provincie Zuid-Holland	
		VEWIN	
		Bodemzorg	
		NAM	

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

		Provincie Noord-Brabant
		Milieudienst Amsterdam
		WMO
		GHR
		Provincie Limburg
Projectparticipants	:	TNO-NITG
		GeoDelft
		Royal Haskoning
		Sentron-CMT
		Lange-Group
		Schlumbergee
		Thermo Analytical
Total Project-budget	:	€250.000
Number of involved PhD-students	:	0
Number of involved PostDocs	:	0

Theme Managementteam:

Name	Organisation
Prof. Dr. E. de Mulder	TNO-NITG

Projectgroep

During the execution of the project the researchteam included:

Name	Organisation
1 Drs. N. Walraven	TNO-NITG
2 Dr. J.A. Meima	TNO-NITG
3 Dr. Ir. T.J. Heimovaara	Royal Haskoning
4 R.P. Römer	GeoDelft
5 Ir. F. Boelsma	GeoDelft

6 Drs. C.C.D.F. van Ree	GeoDelft
7 Ir. J.W. de Feijter	GeoDelft
8 Drs. F.A. Westrate	GeoDelft
9 Ir. M.P. Harkes	GeoDelft
10 Dr. Ir. M.H.B. Grote Gansey	Sentron-CMT
11 Ing. Z. Speelman	Lange Group
12 Ing. T. Hultermans	Thermo Analytical
13 Dr. Ir. R.E.G. van Hal	Schlumbergee

Other Involved personnel

The realisation of this report involved:

Name	Organisation
-	-

SV-514

Monitoring en beheer van verontreinigingen
aan de hand van macroparameters
gemeten met sensoren

Macrosense

drs.N. Walraven (TNO-NITG)
dr.ir. T.J. Heimovaara (Royal Haskoning)
R.P. Römer (Royal Haskoning)
ir. M.P. Harkes (GeoDelft)
drs. C.C.D.F. van Ree (GeoDelft)
dr. R.E.G. van Hal (Van Essen Instruments B.V.)

januari 2003

Gouda, SKB

Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem

Auteursrechten

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

Het is toegestaan overeenkomstig artikel 15a Auteurswet 1912 gegevens uit deze uitgave te citeren in artikelen, scripties en boeken mits de bron op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt, "©"Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren (Macrosense)", januari 2003, SKB, Gouda."

Aansprakelijkheid

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

Copyrights

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

It is allowed, in accordance with article 15a Netherlands Copyright Act 1912, to quote data from this publication in order to be used in articles, essays and books, unless the source of the quotation, and, insofar as this has been published, the name of the author, are clearly mentioned, "©"Monitoring and management of contamination on the basis of macroparameters measured with sensors (Macrosense)", January 2003, SKB, Gouda, The Netherlands."

Liability

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

Titel rapport

Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren (Macrosense)

SKB rapportnummer

SV-514

Project rapportnummer

SV-514

Auteur(s)

drs.N. Walraven, dr.ir. T.J. Heimovaara, R.P. Römer,
drs. C.C.D.F. van Ree, ir. M.P. Harkes en dr. R.E.G. van Hal

Aantal bladzijden

Rapport: 24
Bijlagen: 10

Uitvoerende organisatie(s) (Consortium)

TNO-NITG (drs. N. Walraven (030-2564745)
Royal Haskoning (dr. ir. T.J. Heimovaara)
GeoDelft (drs. C.C.D.F. van Ree en ir. M.P. Harkes)
Van Essen Instruments (dr. R.E.G. van Hal)
Eijkkelkamp Agrisearch Equipment, Sentron CMT, Lange Group, Thermo Analytical, WMO, GHR,
Provincie Zuid-Holland, Provincie Noord-Brabant, Provincie Limburg, Milieudienst Amsterdam, NAM,
Bodemzorg, VEWIN

Uitgever

SKB, Gouda

Samenvatting

Dit SKB/Delft Cluster-onderzoek is gericht op:

- het verlagen van de drempel voor het doen van macrochemische analyses om de grondwaterkwaliteit te bepalen binnen de bodemverontreinigingsproblematiek;
- het vergroten van het draagvlak voor het gebruik van sensoren in het bodemonderzoek.

De macrochemie van grondwater geeft inzicht in procesomstandigheden, zoals natuurlijke afbraak en verspreiding van verontreinigingen in de bodem. Met deze kennis kan het gedrag van (rest)verontreinigingen in de bodem beter voorspeld worden.

In het kader van het onderzoek is een meetsysteem gebouwd dat bestaat uit een aantal bestaande sensoren en veldtesten. Laboratorium- en veldonderzoek heeft aangetoond dat de macrosamenstelling van grondwater nauwkeurig en op locatie kan worden bepaald met het meetsysteem. Bovendien levert het meer informatie en een kostenbesparing op. Naast een beschrijving van de meetresultaten worden in dit rapport toepassingsmogelijkheden gegeven voor het inzetten van macrosensoren en geeft het consortium een visie over sensorisch meten in de toekomst.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

beheer, bodemverontreinigingen, grondwater, macroparameters, monitoring, sensoren, veldtesten

Vrije trefwoorden:

on-site, stabiele eindsituatie

Titel project

Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren

Projectleiding

TNO-NITG (drs. N. Walraven, 030-2564745)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:

SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda

Report title

Monitoring and management of contamination on the basis of macroparameters measured with sensors (Macrosense)

SKB report number

SV-514

Project report number

SV-514

Author(s)

drs.N. Walraven, dr.ir. T.J. Heimovaara, R.P. Römer,
drs. C.C.D.F. van Ree, ir. M.P. Harkes en dr. R.E.G. van Hal

Number of pages

Report: 24
Appendices: 10

Executive organisation(s) (Consortium)

TNO-NITG (drs. N. Walraven (030-2564745)
Royal Haskoning (dr. ir. T.J. Heimovaara)
GeoDelft (drs. C.C.D.F. van Ree en ir. M.P. Harkes)
Van Essen Instruments (dr. R.E.G. van Hal)
Eijkelpark Agrisearch Equipment, Sentron CMT, Lange Group, Thermo Analytical, WMO, GHR,
Provincie Zuid-Holland, Provincie Noord-Brabant, Provincie Limburg, Milieudienst Amsterdam, NAM,
Bodemzorg, VEWIN

Publisher

SKB, Gouda

Abstract

This SKB/Delft Cluster study was intended to:

- lower the threshold for the conduction of macrochemical analyses geared to determining the quality of groundwater in the context of the soil contamination issue;
- increase the base of support for the use of sensors in soil research.

The macrochemistry of groundwater provides insight into process conditions, such as natural degradation and the distribution of contamination in the soil. This will allow more accurate prediction of the behaviour of the (remaining) contamination in the soil.

For this research, a measuring system was created that consists of a number of existing sensors and field tests. Laboratory and field research has revealed that the measuring system enables accurate on-site measurement of the macro-composition of groundwater. Furthermore, it generates more information and cost savings. In addition to a description of the measurement results, this report also indicates utilisation options for macro sensors and gives the consortium an impression of sensoric measurement in the future.

Keywords**Controlled terms:**

field tests, groundwater, macroparameters,
management, monitoring, sensors, soil contamination

Uncontrolled terms

on-site, stable final situation

Project title

Monitoring and management of contamination on the basis of macroparameters measured with sensors

Projectmanagement

TNO-NITG
(N. Walraven, 030 2564745)

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

VOORWOORD

De afgelopen jaren zijn tientallen chemische sensoren ontwikkeld en op de markt gebracht. In de voedingsmiddelenindustrie, geneeskunde en land- en tuinbouw zijn ze niet meer weg te denken. Alleen in het milieuonderzoek wil het maar niet vlotten. Hoewel de meerwaarde vanuit technisch oogpunt vaak evident is, wordt er in het bodemonderzoek nog nauwelijks gebruik van gemaakt. Door de introductie van het nieuwe bodembeleid, waaronder het concept 'stabiele eindsituatie', zijn er volop kansen om sensoren eindelijk in te gaan zetten. Sensoren kunnen namelijk voorzien in de nieuwe meet- en informatiebehoefte die voortkomt uit het concept 'stabiele eindsituatie'.

Met financiële steun van SKB en Delft Cluster heeft een breed consortium¹ het project 'Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren (MACROSENSE)' uitgevoerd. In dit project zijn geen nieuwe sensoren ontwikkeld, maar is gebruik gemaakt van bestaande sensoren en veldtesten, afkomstig uit de procestechnologie, de waterzuivering en de land- en tuinbouw. Middels laboratorium- en veldexperimenten is de meerwaarde van sensorisch meten als onderdeel van de bodemonderzoekstrategie aangetoond.

De resultaten van dit onderzoek worden in diverse deelrapporten gepresenteerd (zie referenties). In dit eindrapport zijn de volgende elementen opgenomen:

- De kort samengevatte resultaten van de verschillende onderzoeksfasen;
- De toepassingsmogelijkheden voor het inzetten van macrosensoren;
- Een visie over sensorisch meten in de toekomst;
- Aanbevelingen voor de productontwikkeling van een toekomstig meetinstrument ten behoeve van de analyse van macroparameters in grondwater.

januari 2003

¹ Consortium: TNO-NITG, Royal Haskoning, GeoDelft, Van Essen Instruments, Eijkelpark Agrisearch Equipment, Sentron CMT, Lange Group, Thermo Analytical, WMO, GHR, Provincie Zuid-Holland, Provincie Noord-Brabant, Provincie Limburg, Milieudienst Amsterdam, NAM, Bodemzorg en VEWIN.

INHOUD

		SAMENVATTING.....	VII
		SUMMARY.....	XI
Hoofdstuk	1	INLEIDING	1
Hoofdstuk	2	PROJECTFASEN.....	3
	2.1	Inventarisatie.....	3
	2.2	Ontwerp geïntegreerd meetsysteem en protocolontwikkeling.....	5
	2.3	Testfase	7
	2.4	Implementatiefase.....	9
	2.5	Evaluatie van de behaalde resultaten	11
	2.5.1	Meerwaarde sensorisch meten	11
	2.5.2	Enkele kanttekeningen.....	12
Hoofdstuk	3	TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN VOOR HET INZETTEN VAN SENSOREN EN VELDTESTEN VOOR MONITORINGSDOELEINDEN... 13	13
	3.1	Metten van totaalgehalten voor toetsingsdoeleinden	13
	3.2	Metten van totaalgehalten voor niet-normgebonden toepassingen	13
	3.3	Metten om inzicht te krijgen in bodemprocessen	14
Hoofdstuk	4	VISIE SENSORISCH METEN IN DE TOEKOMST	15
	4.1	Informatiebehoefte	15
	4.2	Huidige praktijk	15
	4.3	Sensorisch meten	16
	4.3.1	Monitoringtechnologie (semi-permanent).....	17
	4.3.2	Karakterisatie en risicobeoordelingtechnologie.....	17
	4.4	Wat er voor nodig is	17
Hoofdstuk	5	AANBEVELINGEN VOOR DE PRODUCTONTWIKKELING VAN EEN COMMERCIEEL MEETINSTRUMENT	19
	5.1	Huidig productaanbod MACROSENSE.....	19
	5.2	Productontwikkeling in relatie tot MACROSENSE	20
Hoofdstuk	6	CONCLUSIES	21
		LITERATUUR	23
Bijlage	A	RELATIE TUSSEN DE MACROSAMENSTELLING VAN GRONDWATER EN BODEMPROCESSEN	
Bijlage	B	SPECIFICATIES VAN DE MACROSENSOREN EN VELDTESTEN	

SAMENVATTING

Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren

Dit rapport is het resultaat van het SKB/Delft Clusterproject 'Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren (MACROSENSE)'. Het bredere doel van dit project is het verlagen van de drempel voor het doen van macrochemische analyses om de grondwaterkwaliteit te bepalen. De macrochemie van grondwater geeft inzicht in de procesomstandigheden, zoals natuurlijke afbraak en verspreiding van verontreinigingen in de bodem. Met deze kennis kan het gedrag van (rest)verontreinigingen in de bodem beter voorspeld worden. Door te demonstreren dat het meten van macroparameters met sensoren meer informatie en een kostenbesparing oplevert, wil het consortium draagvlak creëren voor het uitvoeren van dergelijke on-site analyses.

Huidige situatie

Monitoring van verontreinigingen anno 2002 is voornamelijk gebaseerd op de analyse van microparameters in opgepompte grondwatermonsters. De analyses worden uitgevoerd in een geaccrediteerd laboratorium (Q). Slechts enkele macroparameters, waaronder de pH en geleidbaarheid (Ec), worden in het veld gemeten (zie figuur S1).



Fig. S1. Monitoring van verontreinigde locaties anno 2002.

Gewenste situatie (Macrosense)

De huidige manier van monitoring is nog niet afgestemd op het nieuwe bodembeleid, waarbij niet zozeer de omvang en de concentraties van verontreinigingen een rol spelen, maar het risico van de verontreinigingen voor de omgeving.

Door met sensoren de macrokwaliteit van (grond)water in het veld te bepalen, kunnen bodemprocessen zoals natuurlijke afbraak en mobilisatie van verontreinigingen beter worden begrepen. Op basis van deze gegevens kunnen risico's voor de omgeving worden gecontroleerd. Tevens is er de mogelijkheid dat de macroanalyses dienen als een pre-screening van de grondwatermonsters. Alleen de 'verdachte' (grond-)watermonsters zouden in dat geval voor microanalyses naar het geaccrediteerde laboratorium (Q) gestuurd hoeven te worden (zie figuur S2).

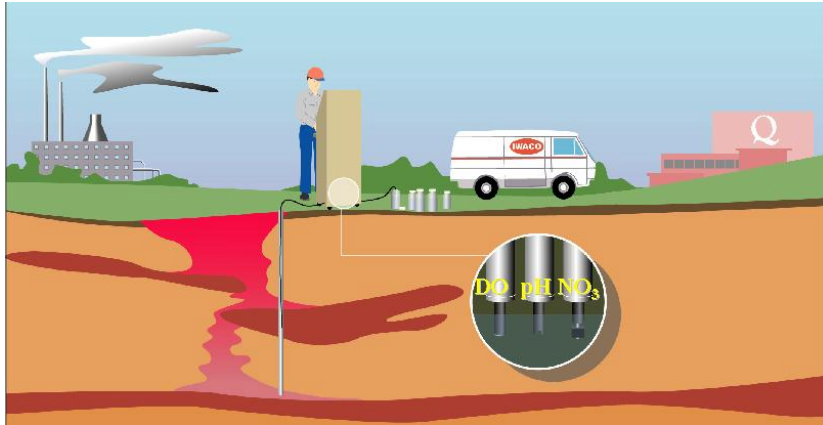


Fig. S2. Monitoring van verontreinigde locaties met de Macrosense meetopstelling.

Macrosense onderzoeksresultaten

Met de Macrosense meetopstelling kan binnen 1,5 uur de macrosamenstelling (Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , K^+ , Fe_{tot} , Mn_{tot} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , pH, Ec en O_2 (DO)) van een (grond-) watermonster nauwkeurig bepaald worden. Uit een voorlopige berekening blijkt dat de kosten voor het bepalen van de macrosamenstelling (macroparameters uit tabel 1) met sensoren en veldtesten door een veldwerker in de orde van grootte van € 100,- zullen komen te liggen. Dit is duidelijk goedkoper dan analyse van dezelfde set macroparameters in een gecertificeerd laboratorium tegen een gemiddelde kostprijs van € 250,-.

Omdat de macrosamenstelling met sensoren direct in (opgepompt) grondwater geanalyseerd wordt, worden de metingen bovendien niet beïnvloed door verandering van de (grond-) watersamenstelling door veranderende chemische evenwichten tijdens transport naar het laboratorium. Vooral de parameters Fe^{2+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , pH en DO zijn hier gevoelig voor. Kortom, met sensoren kan de 'werkelijke' grondwatersamenstelling gemeten worden. Omdat de sensoranalyses zo snel on-site beschikbaar zijn kunnen ze dienen als pre-screening van grondwatermonsters op verontreinigde locaties. Minder monsters hoeven dan in het laboratorium geanalyseerd te worden. Hiermee kan een additionele kostenbesparing gerealiseerd worden.

Visie sensorisch meten in de toekomst

De visie van de consortiumleden van Macrosense is dat in de toekomst de macrosamenstelling van grondwater continu in situ gemonitord kan worden met sensoren die in de grond zijn gebracht middels sonderingen of peilbuizen (zie figuur S3). Hierdoor zal de informatie over de werkelijke omstandigheden in de bodem aanzienlijk toenemen. Niet alleen is de kwaliteit van de gegevens beter, we hebben dan ook inzicht in de veranderingen in de tijd. Het zijn juist veranderingen in de tijd die het meeste inzicht geven in de processen.

In de toekomst zal de toepassing van veldmethoden ook sterk profiteren van de ontwikkelingen in de ICT-sector. Het is nu reeds mogelijk om via deze technologie sensoren op afstand uit te lezen en de gegevens via internet te raadplegen. Dit zal resulteren in kortere lijnen, minder kans op fouten in informatieoverdracht en gerichtere acties. Oftewel een verhoging van de besluitvormingskwaliteit tegen lagere kosten.

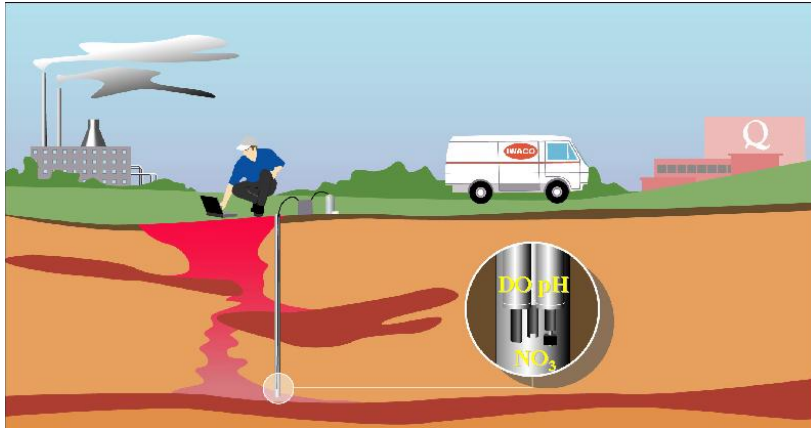


Fig. S3. Toekomstige monitoring.

Aanbevelingen voor toekomstige productontwikkeling

In Macrosense is gebruikgemaakt van bestaande sensoren die geïntegreerd zijn in één meetinstrument. Het huidige meetsysteem is groot en zwaar. De transporteerbaarheid dient vergroot te worden middels verkleining van de afmetingen en beperking van het gewicht. In het uitgevoerde onderzoek zijn de pompdebieten en doorstroomtijden van de doorstroomcel nog niet geoptimaliseerd. Door dit te optimaliseren kan het aantal metingen waarschijnlijk verdubbeld worden (naar 10). De gebruikte sensoren beschikken elk over een eigen data-acquisitie en verwerkingsysteem. Dit dient geïntegreerd en gestandaardiseerd te worden. Tot slot dienen uit oogpunt van kwaliteitsborging, voor zover nog niet beschikbaar, meetprotocollen en kalibratieprocedures ontwikkeld te worden.

SUMMARY

Monitoring and management of environmental pollution based on macroparameters measured with sensors

This report is the result of the SKB/Delft Cluster project 'Monitoring and management of environmental pollution based on macroparameters measured with sensors (MACROSENSE)'. The wider objective of this project is to lower the threshold for carrying out macrochemical analyses to determine the quality of groundwater. The macrochemistry of groundwater affords an insight into process conditions such as the natural degradation and spread of pollutants in the soil. Such knowledge makes it easier to predict the behaviour of pollutants in the soil. By demonstrating that measuring macroparameters with sensors delivers both more information and cost savings, the consortium hopes to create support for carrying out such on-site analyses.

Current situation

At present, the monitoring of polluted sites is usually based on the analysis of microparameters in groundwater samples that have been pumped up. The analyses are carried out in an accredited laboratory (Q). Just a few macroparameters, including the pH and conductivity, are measured in the field (figure S1).

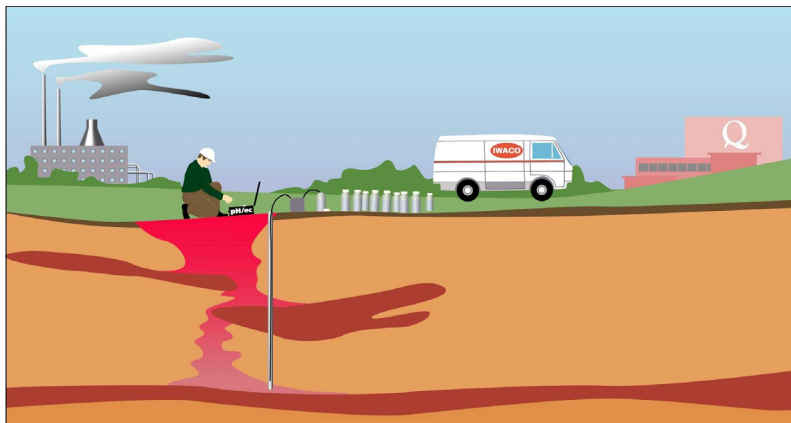


Fig. S1. Monitoring of polluted sites in 2002.

Desired situation (Macrosense)

The current method of monitoring has not yet been geared to the new soil policy, in which it is the risk that pollutants pose to the surrounding area rather than its extent and concentrations that plays a role.

By being able to determine the macroquality of (ground)water in the field by using sensors, soil processes such as natural degradation and the mobility of pollutants can be better understood. The risks to the surrounding area can be examined on the basis of these data. This also raises the possibility of using the macroanalyses to pre-screen groundwater samples. This would make it necessary to send only 'suspect' (ground)water samples to the accredited laboratory (Q) for microanalysis (figure S2).

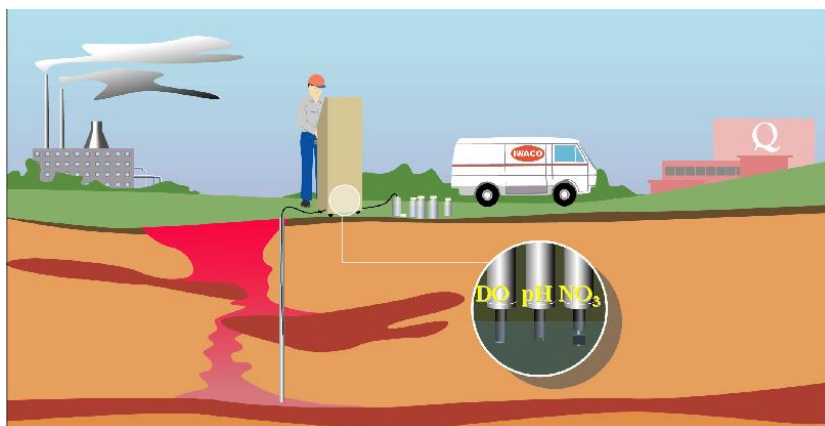


Fig. S2. Monitoring polluted sites with the MacroSense measurement set-up.

MacroSense research results

With the MacroSense measurement set-up, it takes less than 1 hr 30 mins. to accurately determine the macrocomposition (Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , K^+ , Fe_{tot} , Mn_{tot} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , pH, Ec and O_2 (DO)) of a (ground)water sample. A prior calculation has shown that the cost of determining the macrocomposition (macroparameters from table 1) with sensors and field tests by a fieldworker will be in the order of EUR 100.-. This is clearly cheaper than analysing this same set of macroparameters in a certified laboratory at an average cost of EUR 250.-.

Moreover, as the macrocomposition is analysed with sensors placed directly in (pumped-up) groundwater, the measurements are not influenced by changes in the composition of (ground)water caused by changing chemical equilibria during transport to the laboratory. The parameters Fe^{2+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , pH and DO are particularly sensitive to this. In short, sensors can be used to measure 'actual' groundwater composition. As mentioned above, the sensor analyses are available onsite so quickly that they can serve as pre-screening for groundwater samples at polluted sites. Sending fewer samples to the laboratory for analysis also means further cost savings.

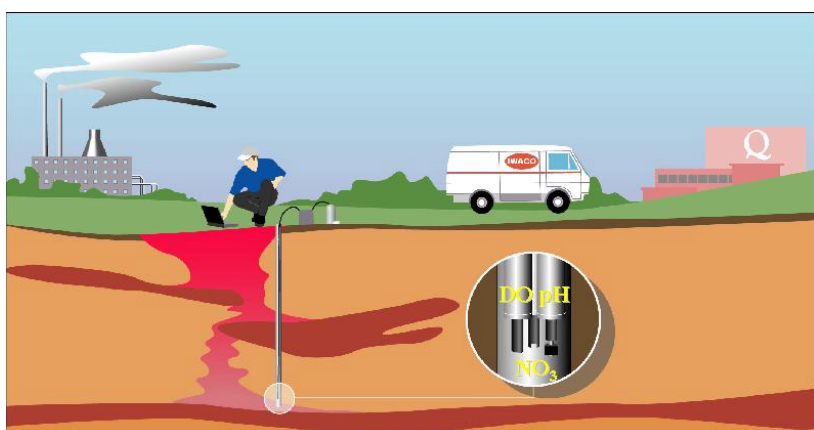


Fig. S3. Future monitoring.

Vision of sensory measurement

The MacroSense consortium members foresee a future in which the macrocomposition of groundwater is monitored continually in situ with sensors, placed in the ground using geoprobes or groundwater wells (figure S3). Such a development would considerably increase information about actual soil conditions. Not only would it improve the quality of the data, it would also give

us insight into changes over time. It is precisely these changes that provide the most insight into processes.

In future, the use of field methods will benefit greatly from developments in the ICT sector. It is already possible to use such technology to read sensors remotely and consult the data on the internet. This will result in shorter lines, less chance of error in the transfer of information and more targeted actions. In other words, improved quality of decision-making at reduced cost.

HOOFDSTUK 1

INLEIDING

Het Ministerie van VROM heeft in 1997 becijferd dat het volledig schoonmaken van de Nederlandse bodem ruim 45 miljard Euro gaat kosten. Uitgaande van de 540 miljoen Euro die in 1998 is uitgegeven aan bodemsanering, gaat het nog zeker 80 jaar duren voordat de Nederlandse bodem schoon is. Dit is niet in overeenstemming met de NMP3-doelstelling, welke stelt dat er gestreefd wordt naar beheersing van de bodemverontreinigingsproblematiek in 2023. Om deze NMP3-doelstelling te kunnen realiseren heeft het kabinet Kok (Paars I) in 1997 maatregelen moeten nemen. Door functiegericht te gaan saneren in plaats van multifunctioneel worden kosten bespaard, waardoor de landelijke saneringsoperatie versneld kan worden.

Bij de nieuwe aanpak van bodemverontreinigingen is het onder strikte voorwaarden toegestaan om (een gedeelte van) de verontreiniging in de bodem te laten zitten. De belangrijkste voorwaarde is dat risico's, zoals blootstelling en verspreiding, worden beheerst. Bij deze nieuwe aanpak zijn we niet meer alleen geïnteresseerd in het totale gehalte van verontreinigingen, maar ook in het gedrag van de verontreinigingen in de bodem. Dit gedrag zal namelijk in veel gevallen de mate van risico bepalen. Zo willen we van sommige verontreinigingen (zoals minerale olie of gechlorooreerde koolwaterstoffen) weten of ze kunnen worden afgebroken in de bodem en met welke snelheid. Met deze kennis kan bepaald worden of de verontreinigingen door Natuurlijke Afbraak (NA), na verloop van tijd, zullen verdwijnen. Uiteraard gaat het hierbij om de mate van afbraak in relatie tot de mate van verspreiding.

Het gedrag van verontreinigingen in de bodem hangt af van de bodemomstandigheden. Voor NA is het van belang om te weten wat de oxidatietoestand van de bodem is; hiervoor is het belangrijk om inzicht te hebben in de concentraties van de redox-gevoelige macrocomponenten zoals zuurstof, nitraat, nitriet, opgelost ijzer, sulfaat, sulfide, methaan, etc. Om te begrijpen hoe de verspreiding van zware metalen optreedt (rekeninghoudend met de speciatie, de oplosbaarheid, complexering en neerslagvorming), is inzicht in alleen de zuurgraad en de redoxomstandigheden van de bodem niet voldoende. De algemene macrosamenstelling van het grondwater bepaalt mede het gedrag van deze zware metalen. In bijlage A wordt in het kort de relatie tussen macroparameters en processen die in de ondergrond plaatsvinden beschreven. Voor meer gedetailleerde informatie wordt verwezen naar "Geochemistry, groundwater and pollution" [Appelo en Postma], "Principles and applications of aquatic chemistry" [Morel en Hering] en "The chemistry of soils" [Sposito].

Het gevolg van deze verschuivingen naar een benadering die meer gericht is op het gedrag van de verontreiniging (oftewel een procesgerichte benadering), is dat naast de bestaande aandacht voor de zogenaamde microverontreinigingen ook informatie over de macrochemie nodig is. Met bestaande methoden (monstername en analyse in het lab) is het niet mogelijk om optimaal (snel en kostenefficiënt) te voorzien in de nieuwe informatiebehoefte. Sensoren kunnen, theoretisch gezien, wel optimaal in deze nieuwe informatiebehoefte voorzien. Met sensoren kan niet alleen ter plekke gemeten worden, maar ze genereren bovendien meer gegevens in een korter tijdsbestek voor minder geld dan de nu gehanteerde laboratoriummethodes. Bovendien kunnen sensoren een prominente rol spelen in de monitoring van saneringen. Door het nieuwe bodembeleid neemt het aantal langlopende saneringsprojecten (≥ 10 jaar) toe. Ook hier kunnen sensoren een rol vervullen ter vervanging van monsterneming en chemische analyse in het laboratorium.

Om aan te tonen dat het meten van de macrokwaliteit (Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , K^+ , Fe_{tot} , Mn_{tot} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HCO_3^- (of CO_3^{2-}), NO_3^- , pH, Ec, redoxpotentiaal en O_2 (DO)) van grondwater met sensoren in het veld leidt tot meer informatie en kostenbesparing, is het SKB/DC project 'Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren (MACROSENSE)' gestart. Het doel van dit project is tweeledig:

1. Het verlagen van de drempel voor het doen van macrochemische analyses om de grondwaterkwaliteit te bepalen binnen de bodemverontreinigingsproblematiek;
2. Het vergroten van het draagvlak voor het gebruik van sensoren in het bodemonderzoek.

Dit eindrapport beschrijft de resultaten van Macrosense (hoofdstuk 2). Bovendien worden in dit rapport toepassingsmogelijkheden gegeven voor sensorisch meten (hoofdstuk 3). Op basis van de visie met betrekking tot sensorisch meten in de toekomst (hoofdstuk 4) worden tevens aanbevelingen gedaan voor de productontwikkeling van een toekomstig meetinstrument voor de analyse van macroparameters in grondwater (hoofdstuk 5).

HOOFDSTUK 2

PROJECTFASEN

Het Macrosense project bestaat uit vier fasen, namelijk:

1. Inventarisatie van:
 - de (technische) specificaties van commercieel beschikbare sensoren en veldtesten;
 - grondwatermonitoringsgegevens in Nederland;
2. Ontwerp geïntegreerd meetinstrument en protocolontwikkeling;
3. Testen van het meetinstrument onder laboratoriumcondities (testfase);
4. Implementatie van het meetinstrument in de praktijk (implementatiefase).

De resultaten per projecttaak worden hieronder kort besproken. In de Macrosense-deelrapporten fase 1 [Walraven et al.], fase 2 [Boelsma et al.], fase 3 [Walraven et al.], fase 4 [Römer et al.] en de aanvulling op deelrapport fase 4 [Walraven et al.] zijn de volledige resultaten van projectfase 1 t/m 4 beschreven.

2.1 Inventarisatie

In de inventarisatiefase is een 'internetsearch' gedaan naar macrosensoren en veldtesten (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Fe_{tot} , Mn_{tot} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HCO_3^- (of CO_3^{2-}), NO_3^- , pH, Ec^- , redoxpotentiaal en O_2 (DO)). Tevens is een overzicht gemaakt van de commercieel beschikbare sensoren en veldtesten. Hierbij is gebruik gemaakt van de ontwikkelingen in andere markten en vakgebieden (waaronder de landbouw en de procesindustrie). Daarnaast zijn grondwatermonitoringsgegevens van Nederlandse onderzoekslocaties (voornamelijk stortplaatsen) verzameld en samengevat. Door de specificaties van de sensoren te koppelen aan de grondwatersamenstelling van de onderzoekslocaties is vastgesteld of de beschikbare sensoren geschikt zijn om de grondwatersamenstelling te analyseren. In tabel 1 is een beknopt overzicht van de beschikbare macrosensoren en de macrosamenstelling van Nederlands grondwater weergegeven. Voor een gedetailleerd overzicht van de technische specificaties van de sensoren en veldtesten wordt verwezen naar bijlage B.

Uit de inventarisatie is gebleken dat binnen de milieutechniek en de aanverwante vakgebieden als procestechiek, land- en tuinbouw en de medische industrie diverse sensoren zijn en worden ontwikkeld voor het meten van macroparameters. Een groot aantal van deze sensoren is momenteel al commercieel beschikbaar.

De parameters Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , NO_3^- , pH, Ec , DO, T en redoxpotentiaal kunnen met de sensoren van de sensorleveranciers die deelnemen aan Macrosense (Sentron CMT, Thermo Analytical² en Van Essen Instruments) gemeten worden. In verband met de beperkte hoeveelheid sensoren die geplaatst kunnen worden op de Minisonde van Thermo Analytical is besloten om de redoxpotentiaal niet mee te nemen.

Uit de technische specificaties blijkt dat grondwatermonsters van verontreinigde locaties met de beschikbare sensoren geanalyseerd kunnen worden. Enkele sensoren hebben echter een relatief hoge kruisgevoeligheid voor andere parameters. Dit is in fase 3 (testfase) nader onderzocht [Walraven et al.].

Voor de parameters Cl^- , NH_4^+ en CO_3^{2-} zijn commercieel ook sensoren verkrijgbaar. De sensorleveranciers die aan Macrosense deelnemen hebben deze sensoren echter niet standaard op de plank liggen. Sentron CMT heeft in opdracht van het consortium een NH_4^+ -sensor ontwikkeld.

Het is Sentron CMT niet gelukt om technisch functionerende sensoren voor de analyse van Cl^- en CO_3^{2-} te maken. Het consortium heeft vervolgens besloten om Cl^- te gaan analyseren met een veldfotometer en CO_3^{2-} niet te analyseren.

Voor de parameters SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Mg^{2+} , Fe_{tot} en Mn_{tot} zijn nog geen commerciële sensoren beschikbaar. Er zijn echter wel fotometrische veldtesten om deze parameters te analyseren. Lange Group verkoopt dergelijke testen (ook voor Cl^-). Het meetbereik van deze testen komt echter slechts gedeeltelijk overeen met de te verwachten grondwatersamenstelling op verontreinigde locaties. Om processen zoals natuurlijke afbraak te kunnen begrijpen en voorspellen is het vaak voldoende om te weten of een ion wel of niet (in hoge of lage gehalten) in het grondwater aanwezig is. Daarom zijn deze veldtesten wel degelijk interessant.

Tabel 1. Een overzicht van het meetbereik, de nauwkeurigheid en de levensduur van de meest geschikte sensoren en overige veldmeettechnieken, en de Nederlandse grondwatersamenstelling van stortplaatsen.

Macro-parameters	Bedrijf	Meetbereik	Grondwatersamenstelling van Nederlandse stortplaatsen	Nauwkeurigheid	Levensduur (jaren)
NO_3^- (mg/l)	Sentron CMT	0,62-6200	0 – 94	10% rel.	> 0,5
K^+ (mg/l)	Sentron CMT	0,39-3900	0 – 540	10% rel.	> 0,5
Ca^{2+} (mg/l)	Sentron CMT	0,4-4000	0 – 1800	10% rel.	> 0,5
Na^+ (mg/l)	Sentron CMT	0,23-2300	0 – 710	10% rel.	> 0,5
NH_4^+ (mg/l)	Sentron CMT	0,18-18000	0 – 1820	10% rel.	? > 0,5
pH	Sentron CMT	0-14	< 10,8	0,1 or 0,01 pH	> 1
DO (O_2) (mg/l)	Thermo Analytical, Van Essen	0-20	0 – 14,5	< 0,2 mg/l	Enkele jaren
Ec (mS/cm)	Thermo Analytical, Van Essen	0-100	-	1% rel.	Enkele jaren
T ($^{\circ}\text{C}$)	Sentron CMT, Thermo Analytical, Van Essen	-5 tot 105	< 24	0,1 $^{\circ}\text{C}$	Enkele jaren
SO_4^{2-} (mg/l)	Lange Group	40-150 en 150-900	0 – 2000	5-9% rel.	Nvt
PO_4^{3-} (mg/l)	Lange Group	5-90	-	1,5-9% rel.	Nvt
Mg^{2+} (mg/l)	Lange Group	0,5-50	0-1000	<2,5%	Nvt
Fe_{tot} , Fe^{2+} , Fe^{3+} (mg/l)	Lange Group	0,2-6	0 – 220	2% rel.	Nvt
Mn_{tot} (mg/l)	Lange Group	0,02-1; 0,2-5	0 – 16	?	Nvt
Cl^- (mg/l)	Fluka	>0,36	0 – 30000	?	?

De snelheid waarmee de analyses verricht kunnen worden varieert van enkele seconden tot 10 minuten (zie bijlage B). De veldtesten van Lange Group zijn tijdrovender dan de sensormetingen. Dit komt doordat het vaak enkele minuten duurt voordat kleurreacties tot stand zijn gekomen. De tijd waarbinnen het totale pakket aan macroparameters geanalyseerd kan worden met het Macrosense meetinstrument wordt geschat op minder dan 1 uur.

² Thermo Analytical heeft ten behoeve van het project een sensorsonde van Hydrolab geleverd. Sinds medio 2002 is Thermo Analytical echter niet meer de vertegenwoordiger (leverancier) van Hydrolab in Nederland. Voor informatie wordt verwezen naar www.hydrolab.com.

De analyse van de set macroparameters (Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , K^+ , Fe_{tot} , Mn_{tot} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , pH, Ec, en DO) in een gecertificeerd laboratorium kost circa 250 Euro. Met het Macrosense meetinstrument kunnen deze kosten naar verwachting gereduceerd worden tot 100 Euro. De mate van kostenreductie hangt sterk af van de toekomstige ontwikkelingskosten voor het marktrijp maken van het meetinstrument en van de hoeveelheid metingen die met het instrument verricht zullen worden [Walraven et al.].

2.2 Ontwerp geïntegreerd meetsysteem en protocolontwikkeling

Bij het opstellen van het projectplan is besloten om nog niet meteen de sensoren³ op diepte te installeren en zo daadwerkelijk in situ te meten, maar om bovengronds te meten in opgepompt water en zo eerst de meerwaarde te demonstreren van sensorisch meten. Het op diepte installeren van alle sensoren is op dit moment nog niet realistisch en leidt tot teleurstellingen en daardoor tot een kleiner draagvlak van sensorisch meten. Daarom is besloten om eerst een kleine stap te zetten en het nut te demonstreren.

In deze fase is een meetsysteem (doorstroomcel) ontwikkeld en gebouwd waarin de verschillende sensoren kunnen worden samengevoegd. Met een pomp wordt (grond)water opgepompt en via de doorstroomcel op de juiste wijze aan de sensoren en de veldtesten⁴ aangeleverd.

In figuur 1 zijn de verschillende sensoren en de veldfotometer weergegeven.

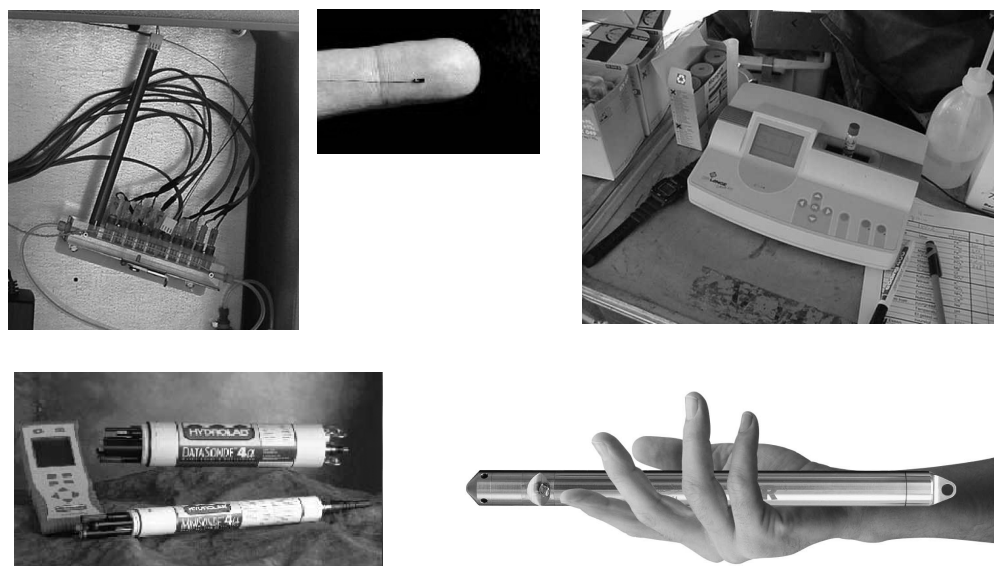


Fig. 1. Sensoren die in het Macrosense project zijn ingezet. Linksboven de sensoren van Sentron-CMT. Rechtsboven de veldfotometer van Lange Group. Linksonder de sensorsondes van Thermo Analytical. Rechtsonder de Diver van Van Essen Instruments.

De gebouwde doorstroomcel met gemonteerde sensoren is afgebeeld in figuur 2.

³ Als in de tekst wordt gesproken over de sensoren in het meetinstrument, dan wordt hiermee bedoeld op de Divers van Van Essen, de CHEMFETS van Sentron CMT en de sensorsondes van Thermo Analytical.

⁴ Als in de tekst wordt gesproken over veldtesten, dan wordt hiermee bedoeld op de kuvettentesten van Lange Group.



Fig. 2. De doorstroomcel met daaraan gekoppeld enkele sensoren (testen van het meetinstrument op voormalige stortplaats De Volgermeerpolder).

In het deelrapport fase 2 [Boelsma et al.] worden de meetprotocollen gedetailleerd beschreven. In de meetprotocollen staat beschreven hoe de afzonderlijke sensoren en veldtesten gekalibreerd moeten worden en hoe de macrosamenstelling van een grondwatermonster bepaald kan worden, inclusief het aanbieden van het grondwater en het reinigen van het meetinstrument na een analyse. Omdat het meten met sensoren nog in de kinderschoenen staat, is het moeilijk om algemene richtlijnen voor het meten met sensoren aan te geven. Bovendien hangen de richtlijnen af van de beoogde toepassing. Hieronder wordt een beknopt overzicht gegeven van de richtlijnen voor het gebruik van de sensoren en veldtesten die in dit onderzoek gebruikt zijn.

- Het gebruik van de sensoren en veldtesten vereist vooralsnog een zeker opleidingsniveau en/of hands-on training. Aangeraden wordt om, alvorens de sensoren en veldtesten in het veld te gebruiken, ervaring op te doen middels testmetingen.
- Om contaminatie te voorkomen is het raadzaam om laboratoriumhandschoenen te dragen bij het uitvoeren van de metingen.
- In het veld dient ervoor gezorgd te worden dat het opgepompte grondwater niet in aanraking komt met de buitenlucht. Dit om te voorkomen dat de chemische samenstelling van het opgepompte grondwater verandert. Alle verbindingstukken (koppelingen) dienen goed aangedraaid te worden.
- Alvorens met de verschillende sensoren gemeten kan worden, dienen deze gekalibreerd te zijn. In het ideale geval wordt gekalibreerd vóór elke nieuwe meting. Voor de sensoren van Thermo Analytical en van Van Essen wordt een voldoende nauwkeurige meting verkregen indien wordt gekalibreerd aan het begin van elke meetdag. Voor aanwijzingen ten aanzien van de kalibratie van deze sensoren wordt verwezen naar het deelrapport fase 2 [Boelsma et al.]. De sensoren van Sentron-CMT worden afhankelijk van de gekozen instelling, geheel geautomatiseerd, na elke drie metingen in het veld gekalibreerd.
- Als de sensoren zijn gekalibreerd en aangesloten op de doorstroomcel kan het beste de meetprocedure worden gevolgd, zoals beschreven in het deelrapport fase 2 [Boelsma et al.].

- De meetwaarden van de Divers en Minisondes kunnen gerapporteerd worden als een aantal opvolgende metingen stabiele waarden vertonen. De volgende richtlijnen kunnen hierbij gehanteerd worden: $\Delta\text{pH}\leq 0,02$; $\Delta\text{Ec}\leq 100\ \mu\text{S}/\text{cm}$; $\Delta\text{DO}\leq 0,2\ \text{mg}/\text{l}$ (uitgaande van vier opeenvolgende metingen).
- Uit het veldonderzoek is gebleken dat de sensoren van Sentron-CMT moeten wennen aan de overgang van monsters met sterk wisselende chemische samenstellingen (zie de aanvulling op deelrapport fase 4 [Walraven et al.]). De meetwaarden van de sensoren van Sentron-CMT kunnen gerapporteerd worden als een aantal opvolgende metingen stabiele waarden vertoont. De volgende richtlijnen kunnen hierbij gehanteerd worden: $\Delta\text{pNa}\leq 0,02$; $\Delta\text{pK}\leq 0,02$; $\Delta\text{pNH}_4\leq 0,02$; $\Delta\text{pCa}\leq 0,02$ en $\Delta\text{pNO}_3\leq 0,02$ (uitgaande van twee opeenvolgende metingen).
- Het meetbereik van de veldtesten is beperkt. Als de meetwaarde in het veld hoger uitvalt dan de hoogste waarde van het meetbereik, dan dient het monster verdund te worden met demi-water en opnieuw te worden geanalyseerd. Als er al eerder metingen zijn verricht op de onderzoekslocatie kunnen deze meetresultaten gebruikt worden voor het berekenen van de verdunningsfactor. Als er nog geen meetgegevens beschikbaar zijn van de onderzoekslocatie, wordt geadviseerd om de volgorde te hanteren zoals beschreven in de meetprotocollen (deelrapport fase 2 [Boelsma et al.]).

Nadat de metingen zijn verricht en alvorens door te gaan naar een nieuwe peilbuis dient het meetsysteem doorgespoeld te worden met demi-water. Voor de gedetailleerde spoelprocedure wordt verwezen naar het deelrapport fase 2 [Boelsma et al.].

2.3 Testfase

In de testfase zijn de sensoren onder goed gecontroleerde laboratoriumcondities getest. De volgende macroparameters zijn met de sensoren geanalyseerd: Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , K^+ , Fe_{tot} , Mn_{tot} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , pH, Ec en DO. De sensormetingen zijn vergeleken met de analyses van macroparameters, gemeten volgens de traditionele analysemethodes op het laboratorium (bij voorkeur volgens de geldende NEN-normen).

Om de sensoren te testen zijn 20 kunstmatige watermonsters gemaakt. De chemische samenstelling van deze watermonsters geeft een representatief beeld van de te verwachten macrosamenstellingen in Nederlands grondwater.

De macroparameters Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , NO_3^- en de pH zijn gemeten met de CHEMFETS van Sentron-CMT. De macroparameters Mg^{2+} , Fe_{tot} , Mn_{tot} , Cl^- , SO_4^{2-} en PO_4^{3-} zijn gemeten met de veldtesten van Lange Group. Met de sensoren van Van Essen Instruments en Thermo Analytical zijn de macroparameters DO, Ec en T gemeten. De pH is behalve met een sensor van Sentron-CMT ook gemeten met een sensor van Thermo Analytical.

De gehalten, gemeten met de sensoren, correleren goed met de gehalten, gemeten met de standaard laboratoriumtechnieken. De correlatie (R^2) varieert van 0,769 voor Ca^{2+} tot 1,0 voor DO. In figuur 3 zijn ter illustratie de resultaten van de natrium- en magnesiumgehalten weergegeven.

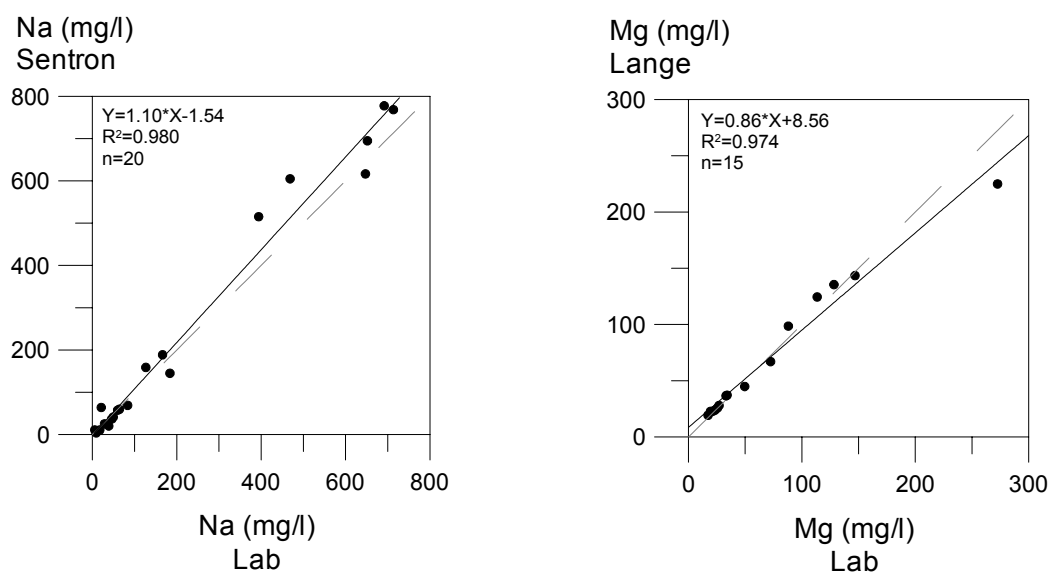


Fig. 3. Na^+ en Mg^{2+} , gemeten met de meetopstelling in het laboratorium versus Na^+ en Mg^{2+} , gemeten volgens standaard laboratoriumvoorschriften.

Uit gepaarde t-testen blijkt dat de gehalten van K^+ , Mg^{2+} , Mn_{tot} , Na^+ en de Ec, gemeten met sensoren, niet significant verschillen van de gehalten, bepaald volgens standaard laboratoriumtechnieken (NEN-normen). Voor de overige macroparameters, Ca^{2+} , Fe_{tot} , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ en pH zijn de verschillen klein, maar wel significant.

Voor de meeste macroparameters kunnen de significante afwijkingen verklaard worden. Zo (ver)storen hoge gehalten van Cl^- en K^+ de sensormeting van NO_3^- en NH_4^+ . Deze storing kan gecorrigeerd worden. Na correctie verschillen de gehalten aan NO_3^- , gemeten met de sensoren, niet meer significant van de laboratoriummetingen. De NH_4^+ metingen zijn sterk verbeterd, maar verschillen nog wel significant.

Fe_{tot} , gemeten met de veldkit van Lange Group, valt lager uit dan de laboratoriummetingen. Dit wordt hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door het verschil in voorbehandeling van beide methodes. Alvorens de Fe_{tot} -analyse wordt uitgevoerd in het laboratorium, worden de monsters aangezuurd om eventuele neerslagen van ijzerverbindingen op te lossen. De monsters die geanalyseerd zijn met de veldtest van Lange Group zijn niet aangezuurd. IJzer in neergeslagen ijzerverbindingen wordt niet geanalyseerd.

Cl^- stoort op de SO_4^{2-} -bepaling met de veldkit van Lange Group. Door de monsters eerst te verdunnen alvorens te meten, kan deze storing vermoedelijk verholpen worden. De monsters moeten zodanig verdund worden dat het chloridegehalte onder de kritische grens van 700 mg/l komt te liggen.

De afwijkende waarden voor Ca^{2+} en Cl^- kunnen niet worden verklaard.

Omdat de doorstroomcel waarin de DO-sensoren geplaatst zijn, niet 'luchtdicht' is, konden er geen goede DO-metingen worden verricht. Na aanpassing van de doorstroomcel zullen de DO-metingen opnieuw verricht worden. Ondanks het technische mankement zijn de eerste meetresultaten veelbelovend (zie figuur 4).

DO (mg/l)
Thermo-Van Essen
Monster 12

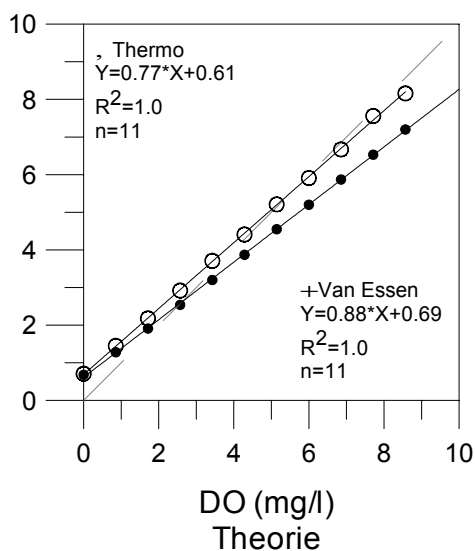


Fig. 4. De DO-gehalten, gecreëerd met een gasmengsysteem in een watermonster, zijn uitgezet tegen de DO-gehalten, bepaald met de sensoren van Van Essen Instruments en van Thermo Analytical. De y-as afsnede is groter dan 0. Dit komt door een lek in de doorstroomcel.

PO_4^{3-} is geanalyseerd met een veldtest van Lange Group. Er bleek echter geen PO_4^{3-} in de monsters aanwezig te zijn. De hoeveelheden PO_4^{3-} in de watermonsters waren laag en zijn vermoedelijk neergeslagen met ijzer en calcium.

Als de macrosamenstelling gebruikt wordt voor het verkrijgen van inzicht in bodemprocessen zijn bovengenoemde kleine verschillen tussen de laboratoriummetingen en de sensor-/veldtestmetingen niet relevant. Het gaat immers om het verkrijgen van proceskennis en niet om kennis van totaalgehalten. Een gedetailleerde beschrijving van de resultaten van de testfase is weergegeven in het deelrapport fase 3 [Walraven et al.].

2.4 Implementatiefase

In deze fase zijn de sensoren in het veld getest. De veldmetingen zijn in 2001 uitgevoerd op de voormalige DOW-terminal te Rotterdam en de Volgermeerpolder (vuilstort) te Amsterdam⁵. De volgende macroparameters zijn met de sensoren geanalyseerd: Ca^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , K^+ , Fe_{tot} , Mn_{tot} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HCO_3^- , NO_3^- , pH, elektrisch geleidend vermogen (Ec) en opgelost zuurstof (DO). De sensormetingen zijn vergeleken met de analyses van macroparameters gemeenten volgens de traditionele analysemethodes in het laboratorium (bij voorkeur volgens de geldende NEN-normen).

⁵ De macrosamenstelling van het grondwater op de Volgermeerpolder en de voormalige DOW-terminal, gemeten met de sensoren en de veldtesten, zijn respectievelijk door Royal Haskoning en TNO-MEP in andere onderzoeken gebruikt om de watertypen en redoxcondities te karakteriseren. Voor meer informatie wordt verwezen naar de rapporten:

- The assessment of the natural attenuation potential at the LBC location [Ter Meer];
- Tussentijdse monitoring Volgermeerpolder 2001 [Oonincx].

De macroparameters Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , NO_3^- zijn gemeten met de CHEMFETS van Sentron-CMT. De macroparameters Mg^{2+} , Fe_{tot} , Mn_{tot} , Cl^- , SO_4^{2-} en PO_4^{3-} zijn gemeten met de veldtesten van Lange Group. Met de sensoren van Van Essen Instruments en Thermo Analytical zijn de macroparameters DO, Ec en T gemeten. De pH is gemeten met een sensor van Thermo Analytical.

De veldmetingen, uitgevoerd met de veldkits van Lange Group, zijn in het algemeen redelijk te vergelijken met de laboratoriumanalyses (R^2 tussen 0,85 en 0,99). De metingen met de opstelling van Sentron vertonen een grote ruis (Sd minimaal 0,5 tot maximaal 3854). In figuur 5 zijn ter illustratie de resultaten van de natrium- en magnesiumgehalten weergegeven.

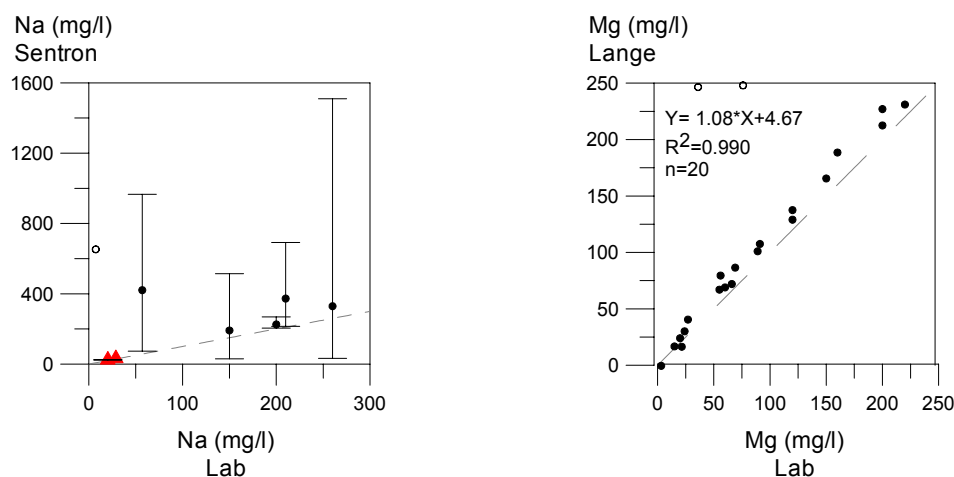


Fig. 5. Na^+ en Mg^{2+} , gemeten met de meetopstelling in het veld versus Na^+ en Mg^{2+} , gemeten volgens standaard laboratoriumvoorschriften. De natriummetingen, gemeten met de sensor van Sentron-CMT, vertonen een grote spreiding. Deze spreiding wordt veroorzaakt doordat de sensoren moeten 'wennen' aan de overgang van monsters (lees kalibratievloeistoffen en watermonsters) met sterk wisselende chemische samenstellingen. Twee monsters (zwarte driehoekjes) zijn gemeten met een aangepast meetprotocol. De spreiding in de meetresultaten van deze twee monsters is klein en valt binnen de symbolgrootte.

Per monster zijn meerdere metingen verricht met de sensoren van Sentron-CMT en hieraan is te zien dat de sensoren een periode nodig hebben om zich in te stellen (lees: te stabiliseren). De oorzaak hiervan is in een aanvullend onderzoek onderzocht (Aanvulling op deelrapport fase 4 [Walraven et al.]). Uit het aanvullende onderzoek blijkt dat de lage herhaalbaarheid van de sensormetingen (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- , NH_4^+) onder veldomstandigheden hoogstwaarschijnlijk wordt veroorzaakt door:

- de tussentijdse automatische kalibraties van de sensoren van Sentron-CMT;
- het achtereenvolgens meten van (grond-)watermonsters met sterk wisselende chemische samenstellingen.

Uit de experimenten blijkt dat de sensoren moeten 'wennen' aan de overgang van monsters (lees kalibratievloeistoffen en watermonsters) met sterk wisselende chemische samenstellingen. Als de sensoren in de toekomst ingezet worden in milieuonderzoek, dient met het opstellen van het meetprotocol rekening te worden gehouden met dit gegeven. Het probleem kan bijvoorbeeld omzeild worden door vier keer te meten en pas de derde en vierde meetwaarde te rapporteren. Dit kost relatief gezien meer tijd, maar deze extra tijd kan goedgemaakt worden door minder vaak

tussentijds te kalibreren. Een meting duurt maximaal 3 minuten, terwijl de kalibratie 20 minuten duurt.

De volgende ervaringen zijn opgedaan in het veld:

- Tijdens het voorpompen is veel grondwater nodig waardoor sommige peilbuizen leeg komen te staan. Dit probleem is tevens aanwezig bij de conventionele meetmethode, maar wordt met deze meetopstelling versterkt omdat de debieten voor de aparte doorstroomcellen ingesteld moeten worden en extra monsters genomen moeten worden.
- Bij een aantal metingen zijn temperatuurschommelingen waargenomen met de Divers. Dit is hoogstwaarschijnlijk te relateren aan een doorbrekende zon en een te laag pompdebiet door de doorstroomcel. De Divers kunnen het best direct in de peilbuis gebruikt worden.
- De gehele opstelling is moeilijk te verplaatsen. Een deel van de opstelling moet zelfs achter blijven in de veldwerkbus waardoor de meetopstelling niet erg flexibel is. Tevens is veel materiaal noodzakelijk. Optimalisatie van de huidige meetopstelling kan zeker leiden tot een beter hanteerbaar systeem.
- De tijdsduur per peilbuis is circa 1,5 tot 2 uur voor het meten van de volledige macroparameterset. Dit is langer dan vooraf was ingeschat (circa 1 uur per peilbuis).

Een gedetailleerde beschrijving van de resultaten van de implementatiefase kan worden gevonden in het Deelrapport fase 4 [Römer et al.].

2.5 Evaluatie van de behaalde resultaten

2.5.1 Meerwaarde sensorisch meten

De meerwaarde van de on-site analyse van grondwater met sensoren wordt bepaald door de lage kosten, de snelheid en het gemak waarmee de analyses verricht kunnen worden. De macrosamenstelling kan immers ook gewoon in een laboratorium bepaald worden.

Uit een voorlopige berekening blijkt dat de kosten voor het bepalen van de macrosamenstelling (macroparameters uit tabel 1) met sensoren en veldtesten door een veldwerker in de orde van grootte van € 100,- zullen komen te liggen. Dit is duidelijk goedkoper dan analyse van dezelfde set macroparameters in een gecertificeerd laboratorium tegen een gemiddelde kostprijs van € 250,-.

De totale macrosamenstelling (tabel 1) van één monster kan met de sensoropstelling binnen 1,5 uur op locatie geanalyseerd worden (incl. kalibratie- en stabilisatietijd). De analyseresultaten van een pakket macroparameters, gemeten in een gecertificeerd laboratorium, worden pas na enkele werkdagen opgeleverd. De kalibratie en stabilisatie van de sensoren vindt plaats tijdens het doorspoelen van de peilbuis. Omdat een peilbuis voor monsternamen toch doorgespoeld moet worden, kost dit geen extra veldwerktijd in vergelijking met de huidige veldwerkzaamheden. Omdat de macrosamenstelling met sensoren direct in (opgepompt) grondwater geanalyseerd wordt, worden de metingen bovendien niet beïnvloed door verandering van de (grond-)watersamenstelling door veranderende chemische evenwichten tijdens transport naar het laboratorium. Vooral de parameters Fe^{2+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , pH en DO zijn hier gevoelig voor. Kortom, met sensoren kan de 'werkelijke' grondwatersamenstelling gemeten worden. Omdat de sensoranalyses zo snel on-site beschikbaar zijn, kunnen ze dienen als pre-screening van grondwatermonsters op verontreinigde locaties. Op grond van wijzigingen in macrosamenstelling en procescondities hoeven alleen verdachte monsters naar het laboratorium te worden gestuurd voor nadere analyse. Zelfs in het geval dat nog steeds één op de twee metingen aanleiding geeft tot een laboratoriumanalyse kan een beperkte kostenbesparing gehaald worden. Als het aantal laboratoriumanalyses verder vermindert, kan zelfs, als de aanschafkosten van de instrumenten meegerekend worden, een aanmerkelijke kostenbesparing gerealiseerd worden.

2.5.2 Enkele kanttekeningen

Het is van belang om te beseffen dat bij het toepassen van veldmethoden het omgaan met de resultaten een andere aanpak zal vergen. Een voor de hand liggende verandering is dat er meer beslissingen direct in het veld zullen moeten worden genomen omdat de gegevens direct beschikbaar komen. Ook zal de informatiestroom groter zijn waardoor de interpretatie gecompliceerder zal worden, niet alleen omdat de informatiedichtheid toeneemt, maar ook omdat er naar andere processen gekeken zal worden. In de adviespraktijk neemt op dit onderwerp de kennis langzaam toe.

SKB stimuleert de ontwikkeling van kennis met betrekking tot processen, zoals verspreiding en afbraak van verontreinigingen, die zich in de bodem afspelen. In 2001 is het SKB-project MAXIMA gestart. Het doel van dit project is het ontwikkelen van een methodiek waarmee aan de hand van de macrosamenstelling van grondwater de verspreiding van verontreinigingen bij stortplaatsen in een zo vroeg mogelijk stadium gedetecteerd kan worden. Ten tijde van het schrijven van dit eindrapport waren hier nog geen resultaten van beschikbaar.

Een andere kanttekening moet worden geplaatst bij de beschikbaarheid en toepasbaarheid van de verschillende veldmeettechnieken. Veelal zijn de methodes ontwikkeld voor andere toepassingen. Hierdoor zijn ze niet direct toepasbaar in het reguliere bodemonderzoek waardoor er op dit moment een aanzienlijke drempel is. Als deze methoden meer en meer worden toegepast zal deze drempel naar onze mening aanzienlijk kleiner worden.

In Macrosense is gebruik gemaakt van bestaande sensoren die geïntegreerd zijn in één meetinstrument. Dit meetinstrument is zwaar en groot. Als er een markt is voor macrosensoren dient het instrument omgebouwd te worden tot een handzaam apparaat. Hetzelfde geldt voor de bediening van het meetinstrument. De analyse van de macrosamenstelling van grondwater met het huidige meetinstrument is nog dermate gecompliceerd dat een 'specialist' mee het veld in moet gaan om de metingen te verrichten. Dit is vooralsnog een kostenverhogende factor. Als er een markt is voor macrosensoren dan dient het meetinstrument gebruiksvriendelijk en 'fool proof' te worden gemaakt.

In het Macrosense project zijn sensoren en veldtesten gebruikt om kwantitatieve analyses te verrichten. De sensor- en veldtestmetingen zijn vergeleken met gecertificeerde laboratoriummetingen. Het is echter de vraag of het voor het beoogde doel –inzicht verkrijgen in bodemprocessen– altijd noodzakelijk is om hoogwaardige kwantitatieve analyses te verrichten. Wellicht is het voldoende om alleen veranderingen in meetsignaal te registreren met de sensoren en veldtesten. Veranderingen in meetsignaal kunnen namelijk gebruikt worden als signalering of waarschuwing van (on)gewenste veranderingen in de bodem. Sensoren en veldtesten met alleen een signaal of waarschuwingfunctie zijn goedkoper en eenvoudiger te maken dan sensoren en veldtesten waarmee hoogwaardige kwantitatieve analyses verricht kunnen worden. Bovendien kunnen sensoren en veldtesten met alleen een signalerings- en waarschuwingfunctie eenvoudiger worden ingezet om in situ de macrosamenstelling van grondwater te meten dan hoogwaardige kwantitatieve sensoren en veldtesten. Bijkomend voordeel is dat ze minder vaak gekalibreerd hoeven te worden. Als voorwaarde geldt wel dat de grondwatertemperatuur min of meer stabiel moet zijn en geen abrupte veranderingen vertoont.

TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN VOOR HET INZETTEN VAN SENSOREN EN VELDTESTEN VOOR MONITORINGSDOELEINDEN

Hoewel in dit project geen onderzoek is gedaan naar de praktische toepassingen van het meten van macroparameters met sensoren en veldtesten, kunnen er al wel vele toekomstige toepassingen genoemd worden. Hierbij kan onderscheid gemaakt worden tussen drie toepassingsgebieden, namelijk:

- Metingen met als doel het bepalen van totaalgehalten voor het toetsen van de chemische waterkwaliteit aan de normen (o.a. grond- en drinkwaterkwaliteit);
- Metingen met als doel het bepalen van totaalgehalten voor 'niet-normgebonden' metingen, zoals bronkartering van verontreinigingen;
- Metingen met als doel inzicht te verkrijgen in bodemprocessen.

De analytische kwaliteit van de sensor- en veldtestmetingen is bepalend voor de mogelijkheid om sensoren in te zetten voor bovengenoemde toepassingsgebieden. Hieronder worden de toepassingsgebieden nader omschreven.

3.1 Meten van totaalgehalten voor toetsingsdoeleinden

Voor het meten van de macrosamenstelling van drink- en grondwater voor toetsingsdoeleinden zijn gecertificeerde richtlijnen opgenomen om de kwaliteit van de metingen te kunnen waarborgen. Omdat er nog geen gecertificeerde richtlijnen voor sensor- en veldtestmetingen bestaan, kunnen deze niet zomaar worden ingezet voor deze doeleinden. Echter als de bestaande richtlijnen niet dwingend zijn voorgeschreven, mogen onder bepaalde voorwaarden andere dan de voorgeschreven meettechnieken (bijvoorbeeld sensoren) worden gebruikt. Een belangrijke voorwaarde hierbij is dat middels een validatieonderzoek dient te worden aangetoond dat de sensor- en veldtestmetingen overeenkomen met de voorgeschreven meetmethode. Het is ook mogelijk om een accreditatietraject in te zetten om een norm op te stellen voor het meten met sensoren en veldtesten voor een beoogde toepassing.

3.2 Meten van totaalgehalten voor niet-normgebonden toepassingen

Sensoren en veldtesten kunnen al wel direct worden ingezet voor niet-normgebonden toepassingen. Enkele voorbeelden hiervan zijn:

1. Het verkrijgen van inzicht in de macrosamenstelling van drink- en grondwater (bijvoorbeeld het chloride- en nitraatgehalte bij de winning van drinkwater);
2. Het opbouwen van een frequente datareeks (bijvoorbeeld trendmetingen) van de drink- en grondwatersamenstelling.
3. Bron- en pluimkartering van verontreinigingen van macroparameters (met name bij stortplaatsen).

In het geval van toepassing 1 en 2 is het uit kostenoverwegingen zinvol om sensoren in te zetten. Sensor- en veldtestmetingen zijn immers goedkoper dan laboratoriummetingen. Voor trendmetingen (toepassing 2) is het niet altijd noodzakelijk dat de sensoren met een zeer hoge nauwkeurigheid meten, maar is vooral de stabiliteit van de sensor of het sensorsysteem van belang. Om optimaal gebruik te maken van trendmetingen is het noodzakelijk dat de instrumenten op een vaste plaats in de bodem worden geïnstalleerd, al of niet in een peilbuis. Het op een vaste plaats installeren van de sensor heeft als voordeel dat iedere keer op dezelfde plaats gemeten wordt, dus geen invloed van locale verschillen, en dat er in de tijd gezien een vloeiende lijn in de trend ontstaat zonder dat deze vertekend wordt door weersverschijnselen zoals regen of tempe-

ratuurvariaties. Het is natuurlijk wel moeilijk om vast te stellen of de positie waar de sensor geplaatst is representatief is voor de omgeving. Het gebruik van meerdere sensoren kan dit (gedeeltelijk) opvangen.

Op bovengenoemde manier kunnen trendmetingen gebruikt worden om langzame veranderingen te volgen zonder dat er extra fouten ontstaan door:

- het meten op afwijkende posities;
- het nemen van een monster;
- weersinvloeden.

Toepassingen kunnen zijn het controleren van vervuilingen, afbraakproducten en hulpstoffen bij biologische in situ saneringen. Een andere toepassingsmogelijkheid van trendmetingen met sensoren is de bewaking van plaatsen waar een doorbraak of snelle verandering dreigt. Voorbeelden hiervan zijn het “bewaken” van bioschermen en vuilstortplaatsen. De kwaliteit van de trendmetingen met sensoren kan gewaarborgd worden door periodiek de macrosamenstelling volgens de gecertificeerde meetmethodes te bepalen en te vergelijken met de sensorresultaten.

In het geval van toepassing 3. kan de snelheid waarmee sensor- en veldtestanalyses verricht worden een bijkomend voordeel zijn. Bij het bepalen van de omvang van een verontreiniging is het mogelijk na het plaatsen van een peilbuis direct een grondwatermonster te analyseren. In het veld is direct te bepalen of er in de kern of in de pluim van de verontreiniging is gemeten en of de rand van de verontreiniging is bereikt. Er kan onmiddellijk in het veld worden besloten of er een peilbuis dient te worden bijgeplaatst of niet. Een onderzoek dat normaliter enkele weken duurt (peilbuizen plaatsen, na één week bemonsteren, na één week analyseresultaten, daarna beslissen of nader onderzoek gewenst is) kan zo in één week worden uitgevoerd. Eventueel kan hierna gekozen worden om ter verificatie enkele grondwatermonsters te laten analyseren in een geaccrediteerd laboratorium. Consequentie van deze methode is wel dat er in het veld mensen met kennis en kunde (adviseur/onderzoeker) aanwezig moeten zijn om direct beslissingen te kunnen nemen.

3.3 Meten om inzicht te krijgen in bodemprocessen

Door het nieuwe Nederlandse bodembeleid zijn er volop kansen om sensoren en veldtesten in te zetten om inzicht te krijgen in bodemprocessen. Enkele mogelijke toepassingen zijn:

- Het verkrijgen van inzicht in het gedrag van verontreinigingen (NA, mobiliteit zware metalen, etc.);
- Het monitoren van het gedrag van verontreinigingen (op de korte en lange termijn);
- Het optimaliseren van een sanering (pump and treat, toediening voedingsstoffen, etc.).

Voor het bepalen van bodemprocessen is het niet noodzakelijk een geaccrediteerde analyse uit te laten voeren. Sensoren en veldtesten kunnen theoretisch gezien dus direct ingezet worden. Het probleem is echter dat de kennis om het gedrag van verontreinigingen vast te stellen aan de hand van de macrochemie nog sterk in ontwikkeling is en bovendien nog slechts bekend is bij enkele vakspecialisten. SKB probeert hier verandering in aan te brengen. Tegelijk met Macro-sense is het SKB-project MAXIMA (2002) gestart. In dit project wordt een methodiek ontwikkeld om aan de hand van macroparameters verspreiding van verontreinigingen in een zo vroeg mogelijk stadium te detecteren. Dit wordt middels een praktijkcase in de Volgermeerpolder onderzocht. Er is reeds aangetoond dat de verandering in de samenstelling van macroparameters een signaal is voor de verspreiding van microparameters. Op deze manier kan op een meer kostenefficiënte wijze verspreiding worden voorspeld.

Om sensoren en veldtesten in te kunnen zetten om het gedrag van verontreinigingen te bepalen is het dus noodzakelijk dat er op korte termijn algemeen toegankelijke en geaccepteerde methodieken worden ontwikkeld en toegepast.

VISIE SENSORISCH METEN IN DE TOEKOMST

In het navolgende beperkt de visie zich tot het meten en monitoren in relatie tot de kwaliteit van de bodem en grondwater vanuit het perspectief: het benutten van de bodem voor ondermeer bouwen op, in en met grond, maar ook om de bodem de bodem te laten. Kortom, een mensgerichte benadering van duurzaam bodembeheer. Met kwaliteit wordt niet alleen de "chemische" kwaliteit bedoeld maar ook de geschiktheid in de context van ruimtelijke ordening.

De aandacht voor dit onderwerp is in het afgelopen decennium sterk toegenomen. Naast bodemsanering voor de aanpak van historische gevallen van bodemverontreiniging is er wet- en regelgeving op het gebied van bodembescherming ontwikkeld, zijn regels gesteld voor het gebruik van bouwstoffen en krijgt de bodem vanuit de thema's verzuring, verdroging e.d. de nodige aandacht.

Verantwoord omgaan met onze geo-ecologische omgeving vereist juiste kennis, inzicht en informatie over wat er zich in de bodem afspeelt en hoe we die bodem geschikt maken of houden voor de beoogde gebruiksdoelen.

4.1 Informatiebehoefte

Als gevolg van de toenemende complexiteit en snelheid van maatschappelijke veranderingsprocessen groeit de behoefte om de actuele situatie en de veranderingen daarin te kunnen meten en monitoren. Een voorbeeld hiervan vormt het bodemsaneringsbeleid.

De nieuwe regelgeving biedt ruimte om oplossingen te kiezen waarvan het strategische doel op langere termijn (tot 25 jaar) wordt bereikt en staat een gefaseerde aanpak via deeloplossingen toe. Met de beleidsvernieuwing bodemsanering (BEVER) is gekozen voor een andere benadering van bodemverontreiniging. Niet zozeer de omvang en concentratie van verontreinigingen spelen de belangrijkste rol, maar het risico ervan voor de omgeving. Dit risico wordt vooral bepaald door het gedrag van verontreinigingen en de mate waarin verontreinigingen beschikbaar zijn en komen voor opname in de biologische kringloop of voor verspreiding in het grondwater.

Dit vraagt om lange-termijnbeheer en meetinspanning om de risico's beheersbaar en controleerbaar te maken. Ook moeten er andere parameters dan tot nu toe gebruikelijk, worden gemeten: parameters die iets zeggen over het optreden van bepaalde bodemprocessen, zoals het chemische milieu, afbraak condities, de redoxcondities, de aanwezigheid van micro-organismen, de toxiciteit voor bepaalde organismen etc.

4.2 Huidige praktijk

De voor besluitvorming en risicobeheersing benodigde informatie over het bodemmilieu wordt tot nu toe vooral verkregen door het nemen van watermonsters en in mindere mate grondmonsters, die in gecertificeerde laboratoria worden geanalyseerd op concentraties van 'verontreinigingen' (veelal organische microparameters met concentraties in het microgrammen-per-litergebied). In het kader van de kwaliteitsverbetering en –borging is vooral veel aandacht besteed aan de kwaliteit in het laboratorium. Dit heeft geleid tot het certificeren van laboratoria en het normeren van analysemethoden.

In de praktijk blijkt echter keer op keer dat ondanks de hoge kwaliteit van de laboratoria, er een grote spreiding kan zijn in de analyseresultaten. Het lange traject van bodemmonster tot ana-

lysegetal blijkt een grote onzekerheid te veroorzaken in het getal (o.a. gebleken uit ringonderzoeken). Bovendien blijkt dat de onzekerheid van een bepaald getal voor het grootste gedeelte wordt veroorzaakt door de natuurlijke heterogeniteit in het veld en veel minder door fouten die optreden in het analysetraject (www.clu-in.org).

Op dit moment wordt ook bij monitoring gebruik gemaakt van peilbuizen. Dit gebeurt veelal discontinu met een frequentie van één per maand, één per kwartaal e.d. Voor zover er een permanent meetinstrument aanwezig is, wordt de meetfrequentie bepaald door de dataopslagcapaciteit en de uitleesfrequentie. In feite is deze meting ook discontinu. Monitoring als functie van de tijd betreft alleen parameters die met de waterfase hebben te maken. De meeste ervaring bestaat op dit moment met het semi-continue in situ meten van de stijghoogte en de temperatuur. Beide zijn fysische parameters, waarvan de bepaling met behulp van sensoren relatief eenvoudig is en reeds lang bekend. Het voordeel hiervan is dat uit het verloop over langere perioden een trend afgeleid kan worden, die als gevolg van variatie en ruis in de meetwaarde, niet af te leiden is uit discontinue metingen. Het in situ meten van grondwaterkwaliteit in een peilbuis is op dit moment nog vrijwel onontgonnen terrein.

Maatschappelijk betekent deze vorm van informatievergaring en besluitvorming dat een 'sanering' overgedimensioneerd (c.q. veilig) uitgevoerd is of dat het gebruiksrisico van een locatie ongemerkt groter is dan maatschappelijk aanvaardbaar is. In beide gevallen worden de kosten door het algemeen collectief gedragen.

4.3 Sensorisch meten

Het verkleinen van de onzekerheden in ons inzicht in de bodem en de bodemprocessen levert een grote maatschappelijke meerwaarde. Hierbij kan men denken aan het voorkomen van stagnatie in bouwprocessen, vergroting van de effectiviteit van de inrichting en bedrijfsvoering van saneringen e.d. Uit onderzoek, uitgevoerd door de Amerikaanse EPA (www.clu-in.org), blijkt dat het uitvoeren van veel goedkope metingen van een lage kwaliteit om de heterogeniteit in kaart te brengen uiteindelijk betere resultaten geeft dan het uitvoeren van enkele dure metingen met een hoge analysekwaliteit. Bovendien zal het rechtstreeks meten aan de bodem en het weten om te gaan met deze gegevens een belangrijke stap zijn om een groot deel van deze meerwaarde te realiseren.

De verschuiving van het bemonsteren en dan analyseren in het lab, naar het ex-situ meten in het veld en tenslotte het in situ sensorisch meten kan leiden tot een gegevensset die meer representatief is en als gevolg daarvan een verbetering van de besluitvormingskwaliteit vormt.

De informatiebehoefte is afhankelijk van de specifieke vraagstelling. Welke, hoeveel en op welke wijze metingen uitgevoerd dienen te worden kan niet in algemene zin aangegeven worden. Op grond van de ontwikkeling en beschikbaarheid van sensoren uit andere wetenschapsgebieden (medische wetenschappen, levensmiddelen- en chemische technologie etc.) is de verwachting dat in de nabije toekomst een sterke verbreding kan worden bereikt van het parameterpakket dat on-site en in situ gemeten kan worden. Hiervoor is echter een op bodem- en grondwater gerichte methode- en apparatuurontwikkeling noodzakelijk.

In de meetstrategie voor het verzamelen van de benodigde informatie voor de besluitvorming kunnen twee bronnen van onzekerheid worden onderscheiden:

- Ruimtelijke onzekerheid als gevolg van bodemheterogeniteit en ligging van de bron;
- Tijdsonzekerheid doordat verzamelde gegevens een momentopname zijn.

Dit leidt tot twee richtingen qua apparatuurontwikkeling:

- Monitoringtechnologie (semi-permanent);
- Karakterisatie en risicobeoordelingtechnologie.

4.3.1 *Monitoringtechnologie (semi-permanent)*

Een ontwikkelingsrichting die binnen sensorisch meten kan worden onderscheiden betreft de ontwikkeling van monitoringtechnologie. Dit betreft dan systemen waarin sensoren geïntegreerd zijn die langere tijd in de bodem gebracht kunnen worden en voorzien zijn van zelfstandige data-opslag. De uitlezing gebeurt periodiek, danwel met een module waarmee gegevens met moderne ICT-technieken online aan een database toegevoegd kunnen worden. Met webgebaseerde technieken kunnen verschillende partijen rechtstreeks toegang krijgen en worden de data op basis van hun specifieke wensen gepresenteerd. Dit is in feite bestaande technologie die door middel van integratie van deelsystemen nog verder ontwikkeld dient te worden. In eerste instantie zullen dergelijke (monitoring-)systemen in peilbuizen gehangen worden, maar ontwikkeling van wegdrubbare systemen ligt hier eveneens voor de hand.

Ontwikkelingen op het gebied van sensoren in de nanotechnologie (onder andere resulterend in miniaturisering van sensoren, de mogelijkheid om met behulp van microkanalen de benodigde hoeveelheid monster sterk terug te brengen en de responstijd sterk te verkorten) kunnen er verder toe leiden dat op veel meer plaatsen dan tot nu toe meetsystemen geïntegreerd kunnen worden met gebouwen en infrastructurele voorzieningen. Dergelijke sensoren dienen eenvoudig en robuust te zijn en zonder onderhoud lange tijd te kunnen functioneren.

4.3.2 *Karakterisatie en risicobeoordelingtechnologie*

De tweede ontwikkelingsrichting vanuit sensorisch meten heeft betrekking op bodemonderzoek voor de karakterisatie en risicobeoordeling van bodemverontreiniging en gegevens verzameling voor toekomstige inrichtingsprocessen.

Met de uitbreiding van het instrumentarium waarmee parameters on-site en in situ gemeten kunnen worden, ontstaat de mogelijkheid tot het dynamisch uitvoeren van bodemonderzoek (strategiebepaling onsite). Zo kunnen tijdens dynamisch veldonderzoek met macrosensoren direct onsite beslissingen worden genomen met betrekking tot (vervolg-)onderzoek en/of te nemen maatregelen. Dit kan resulteren in kostenbesparingen en een kortere doorlooptijd van het project. In vergelijking met traditioneel onderzoek hoeft de veldwerker/adviseur voor additionele monsternamen minder vaak terug te keren naar het veld en hoeven er minder laboratoriumanalyses verricht te worden.

Naast technische ontwikkelingen om te komen tot een bruikbare integratie van sensoren met inbrengtechnologie zoals sondeersystemen zijn organisatorische aanpassingen noodzakelijk. Opdrachtverstrekking voor onderzoek/veldwerk met sensoren en on-site metingen vindt namelijk niet meer plaats op basis van een vastomlijnd pakket met eenheden (aantallen, meters, parameterpakket), maar kent een bandbreedte. Opdrachtgever, adviseur en uitvoerder zullen hierover toetsbare afspraken moeten maken, waarin financiële en technische risico's helder verdeeld zijn.

4.4 **Wat er voor nodig is**

Realiseren van deze visie vraagt een gezamenlijke onderzoeksinspanning van de betrokken marktpartijen/actoren. Het gehele ontwikkeling- en implementatietraject bevat zeer veel aspecten, die daarbij in onderlinge samenhang aangepakt dienen te worden. Om het strategische einddoel effectief en efficiënt te bereiken, bestaat de noodzaak van een programmatische invulling. De technische coördinatie en afstemming van dit programma kan het beste ondergebracht worden bij de kennisinstituten. Hierbij dient wel aansluiting en afstemming plaats te vinden met het bevoegde gezag. Aansturing van afzonderlijke thema's hangt af van het ontwikkelingsstadium en de belangrijkste actoren daarin.

Het programma moet een invulling gaan geven aan de genoemde maatschappelijke trends door concreet te gaan meten en monitoren, door het overdragen van kennis en door vanuit de markt-vraag kennisontwikkeling te benoemen voor meet- en monitoringtechnieken.

Het is echter belangrijk om te realiseren dat de grootste impuls voor implementatie en ontwikkeling zal komen van (markt-)partijen die de ruimte krijgen (of nemen) om te experimenteren met verschillende soorten technologie die al aanwezig zijn. Het is naïef om te veronderstellen dat sensorenfabrikanten een grote ontwikkelingsinspanning zullen doen die specifiek gericht is op de (vanuit hun oogpunt kleine) bodemmarkt. Een verbreding naar een Europees kader draagt bij aan de vergroting van de mogelijkheden.

Op dit moment is al sprake van internationale samenwerking die via gezamenlijke kennisontwikkeling en kennisoverdracht bijdraagt aan het identificeren van kansrijke sensorontwikkelingen en het verwerven van een Europees draagvlak bij de implementatie. Dit gebeurt bijvoorbeeld vanuit de Europese netwerken NICOLE (Network on Industrially Contaminated Land in Europe) and SENSPOL (Sensors for monitoring Water Pollution, from Contaminated Land, Landfills and Sediments) (<http://www.cranfield.ac.uk/biotech/senspol.htm>).

Een vergroting van de mogelijkheden voor gezamenlijke projecten op het gebied van implementatie en demonstratie van technologie voor karakterisatie en monitoring van bodem en grondwater vraagt een gerichte financiering van dit onderzoeksthema.

HOOFDSTUK 5

AANBEVELINGEN VOOR DE PRODUCTONTWIKKELING VAN EEN COMMERCIEEL MEETINSTRUMENT

Ten aanzien van de aanschaf en het gebruik van meetinstrumenten alsmede de ontwikkeling en verkoop geldt het vrije marktmechanisme. Afzonderlijke partijen in de markt hebben hierbij hun eigen doelstellingen en randvoorwaarden. Dit levert ten aanzien van productontwikkeling verschillende gezichtspunten op.

Gebruikers zijn onder te verdelen in drie categorieën die elk hun eigen specifieke behoefte hebben. Zo zijn er de locatiebeheerders en -eigenaren (waaronder bevoegde gezagen), die geconfronteerd worden met een bodemprobleem. Hun behoefte is om zo goedkoop als mogelijk de juiste informatie te krijgen opdat er een duurzame oplossing voor hun probleem kan komen. Het oplossen van een bodemprobleem is namelijk altijd een kostenpost. De adviseur die de oplossing moet bedenken wil informatie die hem inzicht geeft in de grootte van het probleem en de processen die benut of gebruikt moeten worden om het probleem op te lossen. Deze twee categorieën hebben niet zoveel behoefte aan specifieke technologie maar meer aan de resultaten die bereikt worden met deze technologie. De derde groep eindgebruikers is de groep die zorgt dat de informatie wordt verzameld, nl. de veldwerkers, de laboratoria. Zij hebben vooral behoefte aan degelijkheid, duurzaamheid, betrouwbaarheid en juistheid. Bovendien willen zij dit alles hebben voor een redelijke prijs (de huidige kosten worden hierbij als referentieniveau gebruikt).

Dit betekent meer leveranciers van apparaten die in hoofdlijnen voor dezelfde doeleinden toepasbaar zijn en voldoen aan de kwaliteitseisen en normen die daarvoor in de maatschappij gelden. Kortom, behoefte aan concurrentie middels keuze uit verschillende prijs-kwaliteit-verhoudingen. Standaardisering en uitwisselbaarheid van apparatuur bevordert daarbij de keuzevrijheid uit het apparaatruaanbod.

Apparaatuurontwikkelaars en -leveranciers daarentegen willen zich onderscheiden van hun concurrenten en zullen streven naar een, zich voortdurend ontwikkelend, integraal aanbod met unieke kenmerken. Eigen productontwikkeling betekent tevens het bewaken van de terugverdienmogelijkheden van hun investeringen daarin.

De veldwerkers en laboratoria zullen zich vooral richten op de hanteerbaarheid en het gebruiksgemak als onderdeel van de dagelijkse werkzaamheden. Dit betekent tevens dat gegevens uitwisselbaar moeten zijn en dat er bij gebruik naar derden een geschikt referentiekader dient te zijn. Beoordelende instanties, waaronder de overheid, gaan uit van het bestaande kader aan wet- en regelgeving. Bij productinnovaties wordt daarbij de verantwoordelijkheid om aan te tonen dat de kwaliteit gelijkwaardig of hoger is bij de ontwikkelaar/leverancier en/of gebruiker gelegd.

Op het gebied van onsite en in situ metingen voor bodem en grondwater is het productaanbod nog zeer beperkt. Traditioneel wordt er gebruik gemaakt van (hand-)boringen en peilbuizen voor de monsterneming, gevolgd door chemische analyse in het laboratorium. Metingen in het veld bleven beperkt tot grondwaterstand, pH, Ec en temperatuur. Ook in norm- en regelgeving is dit als standaard c.q. referentiekader neergelegd.

5.1 Huidig productaanbod MACROSENSE

Vanuit het bovenstaande bezien kunnen voor wat betreft de bij MACROSENSE ingezette apparatuur de volgende opmerkingen worden gemaakt. In het project is samengewerkt door een vier-tal leveranciers van sensoren en veldkits. Met uitzondering van een kleine groep parameters

(pH, Ec, T, DO) zijn de keuzemogelijkheden qua leverancier en type apparaat vrijwel beperkt tot deze groep. De gekozen apparatuur is niet altijd geoptimaliseerd voor de toepassing in bodem en grondwater, waarbij gebruik gemaakt wordt van peilbuizen die een beperkte capaciteit hebben qua waterleverend vermogen.

De markt voor (veld-)meetapparatuur op het gebied van bodem en grondwater is in vergelijking tot andere markten (medische toepassingen, voedingsmiddelen- en chemische industrie) klein en specialistisch. Dit betekent dat het sensor- en apparatuuraanbod veelal afkomstig is uit andere toepassingsgebieden. Apparatuur, waarmee dezelfde parameter bepaald wordt, levert als gevolg van uitgangspunten en randvoorwaarden in het gebruik, verschillende gevoeligheden voor praktijksituaties, niet vanzelfsprekend hetzelfde getal op. Inzicht in deze bandbreedtes, het effect van overdrachtsmechanismen tussen de ongestoorde bodem en de meetapparatuur, is noodzakelijk voor de verantwoorde inzet ervan. Het belang van inzicht in overdrachtsprocessen geldt overigens ook voor wat betreft de representativiteit van meetwaarden, verkregen via bemonstering van grondwater met peilbuizen. Bodemexpertise op dit gebied is beperkt voorhanden.

5.2 Productontwikkeling in relatie tot MACROSENSE

Een visie op de wijze waarop innovatie en productontwikkeling voor innovatieve bodemonderzoekstechnieken plaatsvindt, is beschreven in het rapport *New technologies and future developments. "Is there a truth in site characterisation and monitoring?"* [Van Ree & Carlon]. Productontwikkeling met een zo groot mogelijke kans op succesvolle introductie en marktimplementatie is niet alleen een kwestie van techniekontwikkeling en optimalisatie, maar ook samenwerking en communicatie spelen hierbij een cruciale rol. Gezamenlijke ontwikkeling in een pre concurrentieel stadium, demonstratie en kennisoverdracht verdienen een meer structurele aanpak die vanuit onderzoek en beleidsontwikkeling/-onderbouwing financieel ondersteund wordt.

Bovendien is er niet alleen sprake van een product in termen van hardware, maar is de strategie waarbij de apparatuur ingezet wordt (dynamisch bodemonderzoek of lange termijn monitoring) sterk bepalend voor de wenselijke productontwikkeling. Hiervoor wordt verwezen naar hoofdstuk 4 waarin een visie op sensorisch meten geschetst wordt.

Indien we ons hier beperken tot de apparatuurkant van de productontwikkeling, dan komen we tot de volgende aanbevelingen:

- Transporteerbaarheid vergroten door middel van verkleining van de afmetingen en beperking van het gewicht;
- Thermische isolatie van de doorstroomcel (afdichting tegen directe zoninstraling);
- Optimalisatie van debieten en doorstroomtijden, benodigd voor de diverse sensoren. Het aantal metingen per dag dient meer dan verdubbeld te worden (streefgetal tien per dag). Naar verwachting resulteert debieto optimalisatie ook in een verkorte responstijd;
- Beter inzicht in wat de sensoren precies meten door onderzoek naar de effecten van overdrachtsprocessen tussen de ongestoorde bodem en het meetinstrument als onderdeel van standaardisatie van meetapparatuur en het opstellen van meetvoorschriften;
- Integratie, standaardisering data-acquisitie en datatransport;
- Ontwikkeling van protocollen en kalibratieprocedures uit oogpunt van kwaliteitsborging.

HOOFDSTUK 6

CONCLUSIES

Tijd, geld en analytische nauwkeurigheid

- Na kalibratie en stabilisatie (duur: circa 0,5 uur) van de sensoren kunnen de volgende macroparameters binnen 1 uur nauwkeurig gekwantificeerd worden (zie tabel 1): nitraat (NO_3^-), sulfaat (SO_4^{2-}), fosfaat (PO_4^{3-}), chloride (Cl^-), kalium (K^+), ammonium (NH_4^+), calcium (Ca^{2+}), natrium (Na^+), magnesium (Mg^{2+}), ijzer (Fe_{tot} , Fe^{2+} en Fe^{3+}), mangaan (Mn^{2+}), zuurgraad (pH), opgelost zuurstof (DO), geleidbaarheid (Ec) en temperatuur (T).
- Uit de laboratorium- en veldexperimenten blijkt dat kalium, magnesium, mangaan, natrium, chloride, ammonium, Ec, pH en DO, gemeten met de sensoren en veldtesten, niet significant verschillen (95% betrouwbaarheidsinterval) van de standaard meetmethodes. Voor de overige macroparameters zijn de verschillen klein, maar wel significant. Als de macrosamenstelling gebruikt wordt voor het verkrijgen van inzicht in bodemprocessen zijn deze kleine verschillen niet relevant. Het gaat immers om het verkrijgen van proceskennis en niet om kennis van totaalgehalten.
- Uit een voorlopige berekening blijkt dat de kosten voor het bepalen van de macrosamenstelling (macroparameters uit tabel 1) met sensoren en veldtesten door een veldwerker in de orde van grootte van € 100,- (inclusief aanschafkosten en afschrijving van apparatuur) zullen komen te liggen. Dit is duidelijk goedkoper dan analyse van dezelfde set macroparameters in een gecertificeerd laboratorium tegen een gemiddelde kostprijs van € 250,-.

Onderzoeksstrategie

- Hoewel in dit project geen onderzoek is gedaan naar de praktische toepassingen van het meten van macroparameters met sensoren en veldtesten, is het van belang om te beseffen dat bij het toepassen van veldmethoden, waaronder sensoren, het omgaan met de resultaten een andere aanpak zal vergen. Een voor de hand liggende verandering is dat er meer beslissingen direct in het veld zullen moeten worden genomen omdat de gegevens direct beschikbaar komen. Ook zal de informatiestroom groter zijn waardoor de interpretatie gecompliceerder zal worden, niet alleen omdat de informatiedichtheid toeneemt, maar ook omdat er naar andere processen gekeken zal worden.
- Het ontwikkelde meetsysteem is opgebouwd uit bestaande sensoren en veldtesten. Het meetsysteem heeft hierdoor het karakter van een demonstratiemodel en is voor productiedoeleinden verre van gebruiksvriendelijk. Om de gebruiksvriendelijkheid te vergroten dient de transporteerbaarheid te worden vergroot middels verkleining van de afmetingen en beperking van het gewicht. In het uitgevoerde onderzoek zijn de pompdebieten en doorstroomtijden van de doorstroomcel nog niet geoptimaliseerd. Door dit te optimaliseren kan het aantal metingen waarschijnlijk verdubbeld worden (naar tien analyses per dag). De gebruikte sensoren beschikken elk nog over een eigen data-acquisitie en verwerkingssysteem. Dit dient geïntegreerd en gestandaardiseerd te worden. Tot slot dienen uit oogpunt van kwaliteitsborging meetprotocollen en kalibratieprocedures ontwikkeld te worden die aansluiten op het uiteindelijke systeem en in generieke zin door verschillende typen gebruikers toepasbaar zijn.
- Voor de haalbaarheid van het project Macrosense is besloten om de macrosamenstelling met sensoren te meten in opgepompt grondwater. Met het meetsysteem wordt dus on-site gemeten, maar nog niet in situ. De verwachting van de consortiumleden van Macrosense is dat in de toekomst (>2005) de macrosamenstelling van grondwater continu in situ gemoni-

toord kan worden met sensoren die in de grond zijn gebracht (middels sonderingen of peilbuizen). Hierdoor zal de informatie over de werkelijke omstandigheden in de bodem aanzienlijk toenemen. Niet alleen is de kwaliteit van de gegevens beter, we hebben dan ook inzicht in de veranderingen in de tijd. Het zijn juist veranderingen in de tijd die het meeste inzicht geven in de processen.

- In de toekomst zal de toepassing van veldmethoden ook sterk profiteren van de ontwikkelingen in de ICT-sector. Het is nu reeds mogelijk om via deze technologie sensoren op afstand uit te lezen en de gegevens via internet te raadplegen. Dit zal resulteren in kortere lijnen, minder kans op fouten in informatieoverdracht en gerichtere acties. Oftewel een verhoging van de besluitvormingskwaliteit tegen lagere kosten.
- Oprichting van een gebruikersplatform voor specifieke innovatieve bodemonderzoekstechnieken kan bijdragen aan de vergroting van het draagvlak voor de technologieontwikkeling en versnelde acceptatie van resultaten door uitwisseling van ervaring. Koppeling aan een onderzoeksprogramma op het gebied van meten en monitoren is een voorwaarde voor het ontstaan van het gebruikersplatform.

LITERATUUR

Appelo C.A.J. en Postma D., *Geochemistry, groundwater and pollution*, 1993.

Boelsma F., Harkes M., Römer R., Walraven N., Heimovaara T., Grote Gansey M., Speelman Z., Hultermans T. en Van Hal R., *Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren. Deelrapport fase 2 'De meetprotocollen'*, 2001.

Christensen, T.H., and Kjeldsen P. 1995. Landfill emissions and environmental impact: an introduction, in *Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, CiISA, Environmental Sanitary Engineering Centre, Cagliari, Italy.* pp 3-12.

Meer J. ter, *The assessment of the natural attenuation potential at the LBC location. TNO-rapport R2002/594*, 2002.

Morel F.M.M. and Hering J.G., *Principles and applications of aquatic chemistry*, 1993.

Oonincx A., *Tussentijdse monitoring Volgermeerpolder 2001. Rapport Royal Haskoning*, 2002.

Ree C.C.D.F. van en Carlon C., *New technologies and future developments. "Is there a truth in site characterisation and monitoring?" NICOLE-workshop: Cost-effective Site Characterisation.* 18, 19 April 2002, Pisa, Italy, 2002.

Römer R., Heimovaara T., Walraven N. en Harkes M., *Deelrapport fase 4 'Implementatie en demonstratie onder veldcondities'*, 2001-E.

SKB-project MAXIMA, SKB-projectnummer SV-503. *Eindrapportage was ten tijde van de druk van dit rapport nog niet gereed. Penvoerder: Royal Haskoning.*

Sposito G., *The chemistry of soils*. 1989.

Walraven N., Meima J., Heimovaara T., Römer R., Boelsma F. en Harkes M., *Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren. Basisprojectplan SV-514*, 2001-A.

Walraven N., Meima J., Heimovaara T., Römer R., Boelsma F. en Harkes M., *Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren. Deelrapport fase 1 'Inventarisatie'*, 2001-B.

Walraven N., Heimovaara T., Römer R., Boelsma F., Harkes M. en Grote Gansey M., *Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren. Deelrapport fase 3 'Testen van de sensoren onder laboratorium omstandigheden'*. 2001-C.

Walraven, N., Römer R., Heimovaara T. en Harkes M., *Monitoring en beheer van verontreinigingen aan de hand van macroparameters gemeten met sensoren. Aanvulling op deelrapport fase 4 'Testen van de sensoren onder veldomstandigheden'*, 2002.

BIJLAGE A

RELATIE TUSSEN DE MACROSAMENSTELLING VAN GRONDWATER EN BODEMPROCESSEN

A.1 Inleiding

Een groot aantal bio- en geochemische reacties vindt plaats terwijl grondwater door de bodem stroomt. De samenstelling van het grondwater wordt bepaald door de omgeving waarin het zich bevindt (bodemtype) en door de reacties die erin plaatsvinden. De laatste jaren is binnen de bodemverontreiniging meer aandacht gekomen voor de reacties die in de bodem optreden, omdat deze bijdragen aan het afbreken, omzetten of vastleggen van de verontreinigingen. Het is daarom steeds belangrijker om een goed beeld te krijgen van de omstandigheden die in het grondwater en in de bodem heersen. Hiervoor worden over het algemeen de macroparameters gebruikt. Informatie waarin we zijn geïnteresseerd is onder meer:

- De redoxstatus van het grondwater en de bodem, omdat dit van belang is voor het beoordelen van een aantal vastleggings (zware metalen) en afbraakcondities (vrijwel alle organische verontreinigingen). Belangrijke parameters hiervoor zijn de redoxpotentiaal (E_h), O_2 , NO_3^- , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , SO_4^{2-} en CH_4 . Omdat Fe^{2+} en Mn^{2+} eigenlijk vrijwel de totaal oplosbare fractie van Fe en Mn vertegenwoordigen, wordt veelal volstaan met het meten van Fe(tot) en Mn(tot) in oplossing;
- De voedingssituatie in de ondergrond i.v.m. de potentiële groei van micro-organismen. Hierbij gaat het vooral om PO_4 in oplossing;
- Algemene karakteristieken van het grondwater, zoals zuurgraad (pH), zoutgehalte (elektrische geleidbaarheid, E_c), de alkaliteit of het gehalte aan carbonaat (HCO_3^- en CO_3^{2-}). Daarnaast is het ook van belang om de basenverzadiging te weten. Dit kan bepaald worden aan de hand van het gehalte aan Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ en Al^{3+} bij zure gronden (pH lager dan 5). Om te bepalen of er sprake is van verzoeting of verzouting is het nodig om het gehalte aan chloride te bepalen (Cl^-).

Als alle macroparameters zijn bepaald op één grondwatermonster, is het ook mogelijk om een aantal kwaliteitscontroles uit te voeren op de analyses. Als de ionenbalans (som van alle kationen en anionen) kleiner is dan 10% zonder daarbij te corrigeren voor opgeloste species, is er sprake van een correcte analyse. De som van de anionen of de som van de kationen kan ook worden vergeleken met de E_c . Hieruit kan dan worden afgeleid of er fouten zijn gemaakt bij het analyseren van de kat- of anionen.

Naast het bepalen van de condities in de ondergrond is het ook mogelijk om effecten die mogelijke verontreinigingen op het grondwater hebben, waar te nemen. Bij stortplaatsen is bijvoorbeeld bekend dat stortpercolaat sterk reducerende eigenschappen heeft. Ruimtelijke verschillen in de redoxsituatie benedenstrooms van een stortplaats zijn daarmee een indicatie voor de aanwezigheid van een percolaatpluim. Bij grote BTEX-verontreinigingen is een vergelijkbaar effect te verwachten. Vooral concentratieverschillen in de sterk redox-actieve stoffen zijn aanwijzingen voor de aanwezigheid van een percolaatpluim.

Als laatste voordeel van het meten van macroparameters kan worden genoemd dat de oorsprong van verschillende watertypen kan worden vastgesteld. Bijvoorbeeld infiltratie van regenwater in een havengebied nabij de zee zal een sterk verzoetend effect hebben. Verzoeting is duidelijk te zien in een afname in het zoutgehalte, maar ook door een verschuiving in het opgeloste basenevenwicht. Het opkwellen van brak water in een zoetwatergebied geeft een tegenovergesteld effect. Het belang voor het inschatten van de processen voor de verontreiniging is

van geval tot geval verschillend. De laatste tijd is in het kader van onderzoek aan stortplaatsen meer aandacht besteed aan het karakteriseren van de macrochemie. De resultaten tonen aan dat inzicht in de optredende processen enorm toeneemt waardoor het eenvoudiger wordt om de aangetroffen verontreinigingsituatie te verklaren en wellicht daardoor beter te beheersen. Ter illustratie is de redoxontwikkeling in en nabij stortplaatsen verder uitgewerkt.

A.2 Voorbeeld: biologische afbraak in en nabij stortplaatsen

A.2.1 Het verloop van biologische afbraak in een stortlichaam

Biologische afbraak speelt een rol bij verontreinigingen die chemisch afbreekbaar zijn, maar waarvoor de activeringsenergie voor afbraak hoog is. Hierdoor verloopt gewone chemische afbraak in veel gevallen niet of bijzonder traag. Bij biologische afbraak produceren micro-organismen enzymen, die de activeringsenergie verlagen. Hierdoor verloopt de afbraak van de verontreiniging gemakkelijker. Biologische afbraak bestaat uit diverse processen die schematisch in vier opeenvolgende fasen kunnen worden ingedeeld. Figuur A1 geeft het verloop van de vier fasen met verschillende omzettingsprocessen weer. In figuur A2 wordt het verloop van enkele karakteristieke gassen in een stortlichaam weergegeven.

fase 1	fase 2	fase 3	fase 4	
Oxidatie	Hydrolyse	Fermentatie	Acetogenese	Methanogenese
Aërobe bacteriën	Fermentatieve bacteriën	Fermentatieve bacteriën	Acetogene bacteriën	Methanogene bacteriën
Gemakkelijk afbreekbare componenten → CO ₂ en H ₂ O	Vaste organische stof → opgeloste organische stof (m.b.v. exo-enzymen)	Opgeloste componenten → vluchtige vetzuren, H ₂ en CO ₂	Fermentatie producten → acetaat, H ₂ en CO ₂	Acetaat, H ₂ en CO ₂ → CH ₄

Fig. A1. Samenhang van de verschillende fasen, processen en bacteriën die een rol spelen bij de afbraak van organische verbindingen (Christensen en Kjeldsen, 1995).

Fase 1. De aërobe fase

Dit is de kortdurende aërobe fase van hooguit enkele weken direct na het storten van het afval. Hierin wordt gemakkelijk afbreekbaar organisch materiaal aëroob afgebroken en ontstaat CO₂ en H₂O. Tegelijkertijd verdwijnt de aanwezige zuurstof zeer snel.

Fase 2. De anaërobe, zuurvormende fase

Deze fase is feitelijk onder te verdelen in twee fasen, namelijk de ijzer (Fe(III))- en mangaan (Mn(IV))-reducerende fase en de sulfaat (SO₄)-reducerende fase.

Fe(III)- en Mn(IV)-reductie

Deze fase ontwikkelt zich direct na de aërobe fase. Fermentatieve en acetogene bacteriën zetten de gemakkelijk afbreekbare organische stof om in vluchtige vetzuren, CO₂ en H₂. Het percolaatwater is zuur door de hoge concentraties aan vetzuren en bevat hoge concentraties aan Ca, Mn, Fe, zware metalen en NH₄. De hoge concentratie aan NH₄ wordt veroorzaakt door hydrolyse en fermentatie van eiwitachtige componenten. De hoge concentraties aan Mn en Fe worden veroorzaakt door Mn- en Fe-reductie. Het relatieve stikstofgehalte in de gasfase neemt af door de vor-

ming van CO₂ en H₂. Gedurende deze fase vindt de grootste verspreiding van vooral zware metalen plaats.

Sulfaatreductie

De aanvankelijk hoge SO₄-concentratie zal langzaam dalen als gevolg van SO₄-reductie. Hierbij ontstaat sulfide dat met Mn, Fe en zware metalen (die in een eerdere fase zijn opgelost) neerslaat. Het DOC-gehalte (= gehalte Dissolved Organic Carbon => opgeloste organische stof) is in deze fase het hoogst.

Fase 3. De anaërobe, niet stabiele methanogene fase

Deze sterk anaërobe fase begint met een langzame groei van methanogene bacteriën. Het CH₄-gehalte in het gas neemt toe terwijl H₂, CO₂ en vluchtige vetzuurconcentraties dalen. De SO₄-concentratie daalt verder door voortzettende SO₄-reductie. De omzetting van de vetzuren zorgt voor een toename van de pH en de alkaliniteit. Hierdoor neemt de oplosbaarheid van Ca, Mn, Fe en zware metalen af. De zware metalen slaan neer als sulfiden. NH₄ wordt nog steeds geproduceerd en wordt in een anaërobe omgeving niet omgezet. Het DOC-gehalte daalt en bestaat uit minder makkelijk afbreekbare organische moleculen.

Fase 4. De anaërobe, stabiele methanogene fase

Het bereiken van deze fase duurt enige jaren, afhankelijk van diverse factoren. De methanogene fase wordt gekarakteriseerd door een vrij stabiele CH₄-productiesnelheid. De CH₄-concentratie in de gasfase bedraagt dan 50 tot 60 volumeprocenten. Door de hoge CH₄-productiesnelheid blijft de concentratie vluchtige vetzuren en H₂ laag.

Zoals al in figuren A1 en A2 is aangegeven verlopen de concentraties van diverse componenten en het redoxpotentiaal gedurende de tijd. Dit wordt veroorzaakt door de verschillende redoxprocessen die in de stort optreden. Al deze processen zijn het gevolg van microbiële activiteit. Inzicht in de veranderingen in de concentraties geeft inzicht in het verloop van het proces.

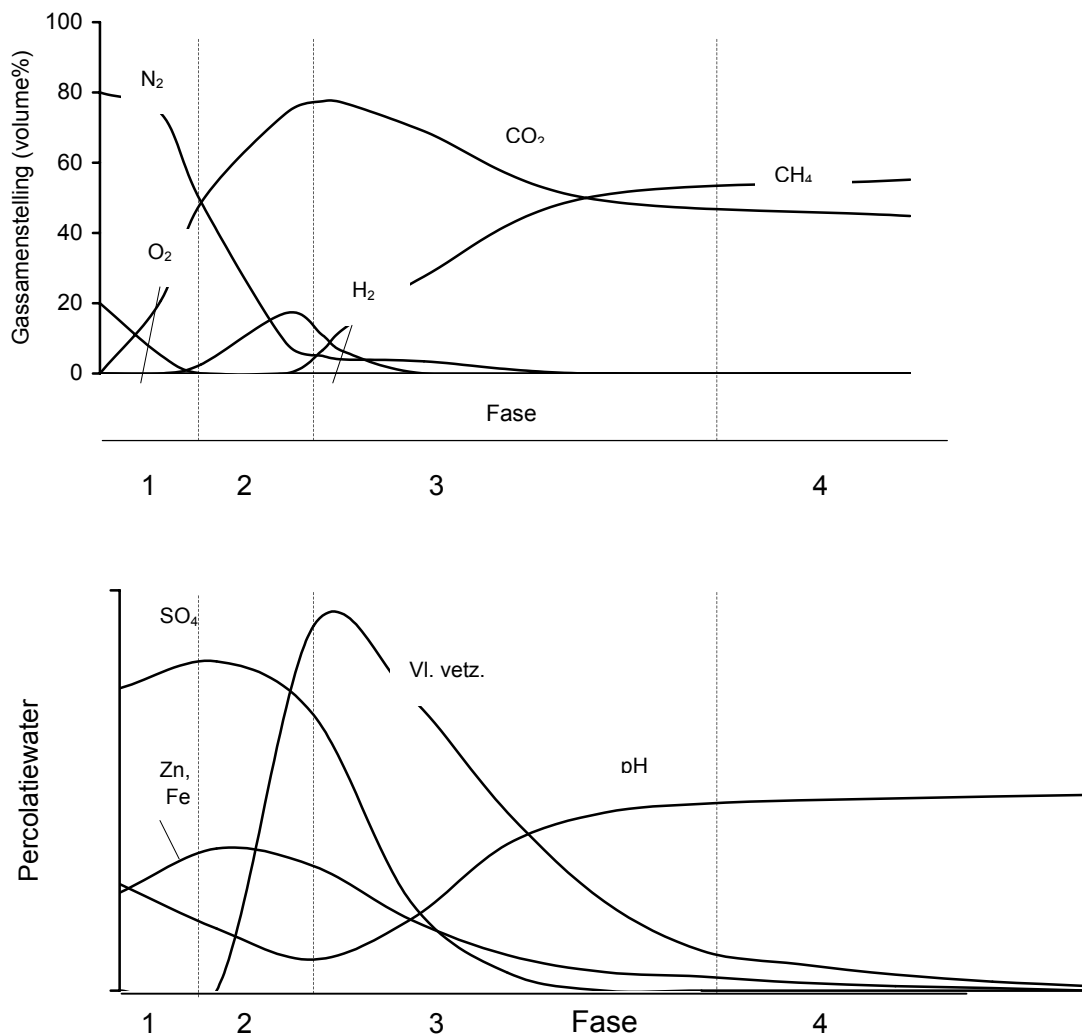


Fig. A2. Verloop van de gas- en percolatiewatersamenstelling in een stortlichaam: 1 = aërobie fase; 2 = anaërobie, zuurvormende fase; 3 = anaërobie, niet stabiele methanogene fase; 4 = anaërobie, stabiele fase (naar Christensen en Kjeldsen, 1955).

A.2.2 Biologische afbraak in de nabijheid van een stortlichaam

Doordat stoffen die in een verontreinigd stortlichaam aanwezig zijn kunnen uitspoelen, zullen deze stoffen invloed hebben op het milieu stroomafwaarts. Het milieu stroomopwaarts wordt nauwelijks beïnvloed door de aanwezige verontreiniging. Figuur A3 geeft een schematisch beeld van de ontwikkeling van redoxsequentie nabij een stortplaats. In de meeste stortplaatsen (en vaak ook andere met organische stoffen verontreinigde gebieden) is het redoxmilieu zeer anaëroob doordat electronenacceptors (zoals zuurstof, Fe(III) en SO_4) bij afbraak van de organische componenten worden verbruikt. Met andere woorden, het percolaat heeft een zeer hoge reductiecapaciteit (RDC; een grote behoefte aan electronenacceptoren). Dit percolaat met een hoge RDC verspreidt naar een omgeving die meestal minder gereduceerd is (een grotere beschikbaarheid van electronenacceptoren). Het gevolg is dat het percolaat deze electronenacceptoren 'verbruikt'.

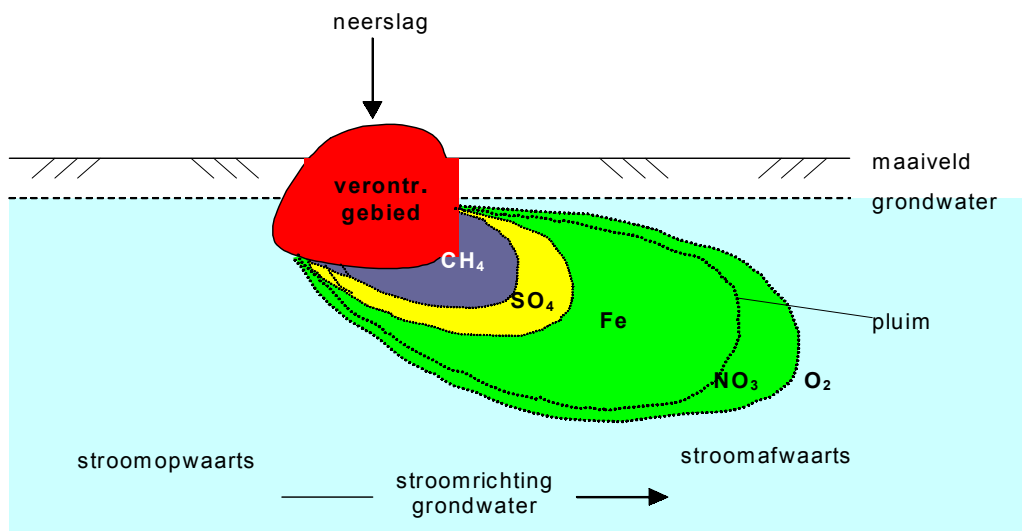


Fig. A3. Redoxmilieus in en om de stort, veroorzaakt door biologische afbraak: CH₄ = methanogeen; SO₄ = sulfaatreductie; Fe = ijzerreductie; NO₃ = nitraatreductie; O₂ = aëroob.

Bij afbraak door micro-organismen onder aërobe omstandigheden dient O₂ als electronenacceptor. Hierbij treden organische componenten (DOC, maar ook organische verontreinigingen als BTEX en minerale olie) als electronendonor op. Bij de overdracht van electronen van electronendonor naar electronenacceptor komt energie vrij. Deze energie gebruiken micro-organismen voor hun metabolisme. Er zijn ook andere electronenacceptors dan O₂ aanwezig die gebruikt kunnen worden door micro-organismen. De energie die vrijkomt bij de afbraak neemt af naarmate het milieu meer gereduceerd is. Hierdoor neemt de energie die vrijkomt bij gebruik van electronenacceptors af volgens: O₂ > NO₃ > Mn(IV) > Fe(III) > SO₄ > CO₂. Micro-organismen zijn slechts in beperkte mate in staat te kiezen tussen verschillende electronenacceptors. De meeste micro-organismen kunnen slechts één soort electronenacceptor benutten. Dit heeft tot gevolg dat de microbiële populatie verandert wanneer er veranderingen optreden in het redoxmilieu.

Wanneer de aanvoer van O₂ kleiner is dan het verbruik door micro-organismen zal het milieu anaëroob worden. Eerst zal nitraat (NO₃) zuurstof (O₂) vervangen als electronenacceptor. Vervolgens zullen, naarmate het milieu meer gereduceerd wordt, Mn(IV), Fe(III) en SO₄ als electronenacceptor dienen. Wanneer het milieu verder gereduceerd wordt zal tenslotte CH₄ gevormd worden uit organische stof of CO₂. In tabel A1 zijn de belangrijkste redoxreacties weergegeven.

Tabel A1. Standaard halfreacties van anorganische electronenacceptors.

Electronenacceptor	Redoxreacties
O ₂	$O_2(g) + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$
NO ₃	$2NO_3^- + 12H^+ + 10e \rightarrow N_2 + 6H_2O$
Mn(IV)	$MnO_2 + HCO_3^- + 3H^+ + 2e \rightarrow MnCO_3 + 4H_2O$
NO ₃	$NO_3^- + 2H^+ + 2e \rightarrow NO_2^- + H_2O$
NO ₃	$NO_3^- + 10H^+ + 8e \rightarrow NH_4^+ + 3H_2O$
Fe(III)	$FeOOH(s) + HCO_3^- + 2H^+ + e \rightarrow FeCO_3(s) + 2H_2O$
SO ₄	$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e \rightarrow H_2S(g) + 4H_2O$
SO ₄	$SO_4^{2-} + 9H^+ + 8e \rightarrow HS^- + 4H_2O$
CO ₂	$CO_2(g) + 8H^+ + 8e \rightarrow CH_4 + 2H_2O$

Het redoxmilieu van een monster kan op verschillende manieren bepaald worden. Eén van deze manieren is het grondwater analyseren op redoxgevoelige componenten, zoals zuurstof (O₂), nitraat (NO₃), nitriet (NO₂), ammonium (NH₄), mangaan (Mn(II)), ijzer (Fe(II)), sulfaat (SO₄), sulfiet (S²⁻) en methaan (CH₄).

Andere manieren zijn onder andere met behulp van een redoxpotentiaalmeting of waterstof (H₂)-metingen. Het meten van de redoxpotentiaal (Eh) met een redoxelectrode geeft slechts een indicatieve waarde en is moeilijk te interpreteren.

A.2.3 Afbraak van organische verontreinigingen

Micro-organismen zijn in staat om een groot aantal (organische) verontreinigingen af te breken. Het redoxmilieu is allesbepalend voor het inschatten van het afbraakpotentieel. Zo is het bekend dat sterk gechloteerde koolwaterstoffen zoals PER (tetrachlooretheen) en HCH (hexachloorhexaan) alleen onder sterk gereduceerde omstandigheden kunnen worden afgebroken. Dit heeft te maken met het feit dat micro-organismen een zodanig grote behoefte aan electronenacceptoren hebben, dat ze bereid zijn PER en HCH te gebruiken. Ze verademen als het ware deze stoffen. Bij dit proces worden deze stoffen stapsgewijs gedechloteerd. De minder gechloteerde (afbraak-) componenten zijn onder sterk gereduceerde omstandigheden minder goed afbreekbaar.

Aëroob breken deze minder gechloteerde stoffen bijzonder goed af. Ze worden dan door micro-organismen benut als electrondonor (substraat).

Uit het bovenstaande kan geconcludeerd worden dat een sequentie (opeenvolging) van redoxzones gunstig is voor de afbraak van een mengsel van een groot aantal verschillende stoffen. In een dergelijke redoxsequentie is er een grote kans dat ergens precies de juiste omstandigheden voor afbraak van een bepaalde stof worden aangetroffen, hetgeen het belang onderstreept van een goed inzicht in de aanwezige processen.

BIJLAGE B

SPECIFICATIES VAN DE MACROSENSOREN EN VELDTESTEN

Overzicht van commercieel beschikbare macrosensoren i.r.t. de macrosamenstelling van grondwater onder stortplaatsen.

Macro-parameters	Eenheid	meetmethode (opm. 7)	Firma	Meetbereik (bandbreedte)mg/l	Resolutie	Nauwkeurigheid	pH-range	storende elementen (incl. concentraties waarbij ze storen)	sensor type	materiaal soort	stabiliteit (langere termijn)	benodigde stroom/snelheid (druk)	meet snelheid	sensor afmetingen	waar bevindt zich het meetgedeelte?	methode data opslag en verwerking	kosten aanschaf (NLG)	kosten per meting (NLG)	huidig toepassingsgebied
Ca ²⁺	mg/l	2	Applikon	0.2 - 40000	27 ± 2 mV/decade (opm. 5)	4 - 50 %	3.0-10	Pb ²⁺ , Hg ²⁺ , Cu ²⁺ en Ni ²⁺	Polymer Membrane mono combination	PVC Glass	9 maanden	8 ± 4 mil/min	0.25 - 15 min.	als Metrohm?	als Metrohm?	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	\$400	???	???
Ca ²⁺	mg/l	2	Metrohm	0.02-40000	???	4 - 50 %	???	Na ⁺ , Pb ²⁺ , Fe ²⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ en Mg ²⁺	Polymer Membrane electrode	Epoxy/PVC	9 maanden	8 ± 4 mil/min	0.25 - 15 min.	???	???	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	als Applikon? ???	???	???
Ca ²⁺	mg/l	1	Lange Group	5-100	< 3.2 %	5%	pH 4-9; Temp. 15-25	geen	kuwettenstest	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	10 min. (incl. reactietijd)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	111.20/25st	4.45	(ongezuiverd) drinkwater, oppervlaktewater, keelwater, procescontrole
Ca ²⁺	mg/l	2	Sentron	0.4-4000	0.1 mV of 0.8 %	10% (praktijk), zie opm. 1 bij hoge pH)	2-13	(NB Ca slaat neer bij hoge pH)	CHEMFET	PVC, PEI	> 6 mnd	0-3 bar (max)	<20 s (99%)	0.8 cm diameter (opm. 4)	zie opm. 4	PC, LabView	< NLG 800 (voorlopij)	ca NLG 1	lunbouw
Hardness (Ca/Mg)	mg/l	2	Applikon	0.4 - 40000 (as 26 ± 2 mV/decade (opm. 5)	4 - 50 %	???	5.0-10	Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , Ni ²⁺ en Fe ²⁺	Polymer membrane mono combination	PVC Glass	9 maanden	8 ± 4 mil/min	0.25 - 15 min.	als Metrohm?	als Metrohm?	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	\$400	???	???
Cl ⁻	mg/l	2	Fluka	> 0.36	sd 0.16 mV	???	4 - 9	Br (0.0), SCN ⁻ (0.2), Sali ⁻ (0.4), ClO ₄ ⁻ (1.8), ...	ISE, ISFET, CWE	???	???	???	9.6 s (90%) < 200 ms, 15 s	???	???	???	ca NLG 800	???	???
Cl ⁻	mg/l	2	Lange Group	1.0-70; 70-1000	1 mg/L	3%	pH 3-10; Temp. 15-25	SO ₄ , NO ₃ > 1000 mg/l, Pb, Zn, Ni, Cu, Cr ³⁺ , Cr ⁶⁺ > 50 mg/l, Cd > 10 mg/l, Co, S ²⁻ > 0.4 mg/l	kuwettenstest	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	10 min. (incl. reactietijd)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	102.9/25st	4.29	afvalwater, drinkwater, oppervlaktewater, keelwater, procescontrole, constructiebeton, zand
Cl ⁻	mg/l	2	Applikon	1.8-35500	56 ± 2 mV/decade (opm. 5)	2 - 25 %	2.0-12	S ²⁻ , I ⁻ , CN ⁻ , Br ⁻ , OH ⁻ , NH ₃ , SO ₃ ²⁻	Solid state-mono combination	Epoxy Glass	enkele jaren	8 ± 4 mil/min	0.25 - 15 min.	als Metrohm?	als Metrohm?	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	\$347	???	???
Cl ⁻	mg/l	2	Metrohm	1.8-35000	???	2 - 25 %	???	Hg ²⁺ , Br ⁻ , I ⁻ , S ²⁻ , CN ⁻ , NH ₃ en SO ₃ ²⁻	Crystal membrane electrode	Epoxy	enkele jaren	8 ± 4 mil/min	0.25 - 15 min.	???	???	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	als Applikon? ???	???	???
Alkaliteit	meq/l	3	Lange Group	10-4000	???	???	???	Gelkourde en toebekele monisters, Cl	titratie	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	5 min.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	35/100st	0.35	water, proceswater
CO ₂ /CO ₃	mg/l	2	Applikon	4.4-440	56 ± 3 mV/decade (opm. 5)	4 - 50 %	4.8-5.2	voliatie week acids	Gas-sensing combination	Epoxy	enkele jaren	8 ± 4 mil/min	0.25 - 15 min.	als Metrohm?	als Metrohm?	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	\$347	???	???
HCO ₃ of CO ₂	mg/l	1	Lange Group	55-550 CO ₂	???	???	pH 4-10; Temp. 15-25	HCO ₃ > 800 mg/l, CH ₃ COO > 500 mg/l, SO ₄ ²⁻ > 60 mg/l, S ²⁻ > 20 mg/l, NO ₃ > 6 mg/l	kuwettenstest of titratie	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	> 60 min. (kuwetten-test)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	165.3/25st	6.61	water
CO ₃	mg/l	2	Fluka	42.5 - 600	???	10% (waarschijnlijk, opm. 1)	buffer 8/5	Br ⁻ (2.1), NO ₃ ⁻ (2.2), SCH ⁻ (2.4), Sali ⁻ (4.8), I ⁻ (0.4), ClO ₄ ⁻ (1.8)	ISE	???	???	???	20 s - enkele minuten	???	???	ca NLG 800	???	???	???
Fe _{tot} (opm. 6)	mg/l	1b	Lange Group	0.2-6	0.15 mg/L of < 1.2%	2%	pH 3 - 9; Temp. 15-25	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ > 1000 mg/l, K ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , NH ₄ ⁺ > 500 mg/l, Ag > 100 mg/l, Cd > 70 mg/l, NO ₃ ⁻ , Co, Zn, Pb, CO ₃ ²⁻ , Hg, Cr ³⁺ , Cr ⁶⁺ > 50 mg/l, Ni > 25 mg/l, Cu > 10 mg/l, Sn > 5 mg/l	kuwettenstest	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	15 min. (incl. reactietijd)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	113.40/25st	4.54	drinkwater, (ongezuiverd) water, zwermbadwater, afvalwater, procescontrole
K ⁺	mg/l	2	Applikon	0.04-39000	56 ± mV/decade (opm. 5)	2 - 25 %	2.0-12	Cs ⁺ en NH ₄ ⁺	Polymer Membrane mono combination	PVC Glass	9 maanden	8 ± 4 mil/min	0.25 - 15 min.	als Metrohm?	als Metrohm?	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	\$400	???	???
K ⁺	mg/l	2	Fluka	0.39 - 3900	sd 0.03 mV	10%	4 - 10	NH ₄ ⁺ (-18)	ISE, ISFET, CWE	???	> 1 maand	???	< 30 s	???	???	???	ca NLG 800	???	???
K ⁺	mg/l	1	Lange Group	8.0-50	1 mg/L of < 3.3 %	5%	pH 3 - 10; Temp. 15-25	NH ₄ ⁺ , Hg, Cs, Rb	kuwettenstest	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	15 min. (incl. reactietijd)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	111.70/24st	4.65	(ongezuiverd) water, drinkwater, grond, substraat, voedingsstof, procescontrole
K ⁺	mg/l	2	Metrohm	0.04-39000	???	2 - 25 %	???	Cs ⁺ , NH ₄ ⁺ , H ⁺ en Na ⁺	Polymer Membrane electrode	Epoxy/PVC	9 maanden	8 ± 4 mil/min	0.25 - 15 min.	???	???	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	als Applikon? ???	???	???
K ⁺	mg/l	2	Sentron	0.38-3900	0.1 mV of 0.4 %	10% (praktijk), zie opm. 1	2 - 13	NH ₄ ⁺ (-15)	CHEMFET	PVC, PEI (Poly Ether imide)	> 6 mnd	0-3 bar (max)	<20 s (99%)	0.8 cm diameter (opm. 4)	zie opm. 4	PC, LabView	< NLG 800 (voorlopij)	ca NLG 1	lunbouw
Mg	mg/l	2	Fluka	2.4 - 2400	???	10%	3.5 - 9.5	Li (-1.4), K (-1.1), NH ₄ ⁺ (-1.2), Ca (1.3), H (1.7), Na (-1.1)	ISE	???	???	???	0.9s (95%), < 5s (90%) < 30s (90%)	???	???	ca NLG 800	???	???	
Mg	mg/l	1b	Lange Group	0.5-50	< 2.5 %	???	pH 4-9; Temp. 15-25	Ca > 100 mg/l	kuwettenstest	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	10 min. (incl. reactietijd)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	114.9/25st	4.6	(ongezuiverd) drinkwater, oppervlakte-water, keelwater, procescontrole, substraten, voedingsstoffen, grond
Mn	mg/l	1(a,b)	Lange Group	0.02-1; 0.2-5	0.01 mg/L	???	pH 3 - 10; Temp. 15-25	Ca, Mg > 300 mg/l	kuwettenstest	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	15 min. (incl. reactietijd)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	119.30/50st	3.99	drinkwater, (ongezuiverd) water, procescontrole

Overzicht van commercieel beschikbare macrosensoren i.r.t. de macrosamenstelling van grondwater onder stortplaatsen.

Macro-parameters	Eenheid	meetmethode (opm. 7)	Firma	Meetbereik (bandbreedte)mg/l	Resolutie	Nauwkeurigheid	pH-range	storende elementen (incl. concentraties waarbij ze storen)	sensor type	materiaal soort	stabiliteit (langere termijn)	benodigde stroomvoorspanning (druk)	meet snelheid	sensor afmetingen	waar bevindt zich het meetgedeelte?	methode data opslag en verwerking	kosten aanschaf (NLG)	kosten per meting (NLG)	huidig toepassingsgebied
Na+	mg/l	2	Applikon	0.02 - 2300 saturated	56 ± 2 mV (opm. 5) 82 0.12 mV	2 - 25 % (waarschijnlijk opm. 1)	5.0-12	H+, K+, Li+, Ag+, Cs+ en Tl+	Glass mono combination	Glass	1 jaar	8 ± 4 mV/min	0.25 - 15 min.	als Metrohm?	als Metrohm?	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	ca NLG 800	ca NLG 800	???
Na+	mg/l	2	Fluka	2.3 - 2300	0.02 - 1 mV of 0.4 % (opm. 1)	10% (waarschijnlijk opm. 1)	???	H (0.1), K (-1.5), Ca (-1.8), Li (-1.2), Cs (-1.6), NH4 (-1.6)	ISE, ISFET, CWE	???	???	< 5 min (90%), < 20s, 5s (90%)	???	???	???	ca NLG 800	ca NLG 800	???	
Na+	mg/l	2	Metrohm	0.22-23000	???	2 - 25 %	pH >= pHa +4	Ag+, Li+ en K+	Glass ion selective electrode	Glass	1 jaar	8 ± 4 mV/min	0.25 - 15 min.	shaft length/diameter 125/?? mm/12mm, min. immersion depth 15 mm	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	als Applikon?	als Applikon?	???	
Na+	mg/l	2	Sentron	0.23-2300	0.1 mV of 0.4 % (opm. 1)	10% (praktijk), zie opm. 1	2 - 13	K (-2.6)	CHEMFET	PVC, PEI	> 6 mnd	0-3 bar (max)	< 20 s (99%)	0.8 cm diameter (opm. 4)	PC, LabView	< NLG 800 (voorlopig)	ca NLG 1	tunbouw	
NH4	mg/l	2	Fluka	0.18 - 18000	???	10% (waarschijnlijk opm. 1)	< 8 buffer 7.2	K (-0.9), Na (-2.0)	ISE, ISFET	???	???	???	???	???	???	ca NLG 800	ca NLG 800	???	
NH4	mg/l	1	Lange Group	0.02-2.5; 1.3-15; 2.5-60; 60-167	0.02 - 1 mg/L of < 1.1 %	10% (praktijk), zie opm. 1	pH 4-9; Temp. 20	Cl SO4 > 1000 mg/l, K, Na, Ca > 600 mg/l, CO3, NO3, Fe, Cr6+, Zn2+, Cu2+, Co2+, Ni2+, Hg2+ > 60 mg/l, Fe > 25 mg/l, Sn > 10 mg/l, Pb > 5 mg/l, Ag > 2 mg/l	kuwvellen test	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	20 min (incl. 15 min. reactietijd)	n.v.t.	n.v.t.	136.20/25st	5.45	afvalwater oppervlaktewater, zwerfafvalwater, bodem, substraat	
NH4+	mg/l	2	Applikon	0.1 - 18000	56 ± 2 mV/decade (opm. 5)	2 - 25 %	4.0-10	K+	Polymer Membrane mono combination	PVC Glass	9 maanden	8 ± 4 mV/min	0.25 - 15 min.	als Metrohm?	als Metrohm?	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	\$401	???	
NO3	mg/l	2	Fluka	> 0.62	2.7% (niet-lineair gebied)	10% (waarschijnlijk opm. 1)	3.5 - 10	Cl (-2.0), Br (-0.7), I (-1.3), HCO3 (-0.2), NO2 (-1.4), Sulf (-1.3), benz (-0.9), SCN (-1.6), CN (-1.5), ClO4 (-0.5), BF4 (-2.1)	ISE, ISFET	???	> 9 dgn. >= 2 maand	???	???	???	???	ca NLG 800	ca NLG 800	???	
NO3	mg/l	1	Lange Group	1-60; 22-155	1 mg/L of < 1.1 %	4%	pH 3-10; Temp. 20-24	K, Na, Cl > 500 mg/l, Ag > 100 mg/l, Temp. 20-24, Pb, Zn, Ni, Fe, Cd, Sn, Cu > 50 mg/l, Co > 10 mg/l, Cr6+ > 5 mg/l	kuwvellen test	n.v.t.	n.v.t.	20 min (incl. 15 min. reactietijd)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	151.4/25st	6.06	afvalwater, drinkwater, ongezuiwend water, oppervlaktewater, grond, substraat, voedingsstof	
NO3	mg/l	2	Sentron	0.62-6200	0.1 mV of 0.4 % (opm. 1)	10% (praktijk), zie opm. 1	2 - 13	Cl (-2.6), overige storende ionen vergelijkbaar met commerciële NO3-sensoren (niet getest)	CHEMFET	PVC, PEI	> 6 mnd	0-3 bar (max)	< 20 s (99%)	0.8 cm diameter (opm. 4)	zie opm. 4	PC, LabView	< NLG 800 (voorlopig)	ca NLG 1	tunbouw
NO3	mg/l	2	Applikon	0.43-62000	57 ± 2 mV/decade (opm. 5)	2 - 25 %	2.5-11	ClO4-, I-, CN- en BF4-	Polymer Membrane mono combination	PVC Glass	9 maanden	8 ± 4 mV/min	0.25 - 15 min.	als Metrohm?	als Metrohm?	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	\$400	???	
NO3	mg/l	2	Metrohm	0.43-62000	???	2 - 25 %	???	Br-, NO2-, Cl- en OAc-	Polymer Membrane electrode	Epoxy/PVC	9 maanden	8 ± 4 mV/min	0.25 - 15 min.	shaft length/diameter 123/12 mm, min. immersion depth 1 mm	zeer gevoelige pH/mV meter, methode afh. van type meter	als Applikon?	als Applikon?	???	
PO4	mg/l	1b	Lange Group	0.15-4.5; 5-90; 6-60	0.1 - 1 mg/L of < 0.6%	1.5-2% (waarschijnlijk opm. 1)	pH 2-10; Temp. 15-25	SO4 > 20 mg/l, Cl < 10 mg/l, K, Na > 4 mg/l, Ca > 1 mg/l, Mg > 400 mg/l, Co, Fe, Zn, Cu, Ni, NO2, Cd, NH4, Mn, Al, CO3 > 200 mg/l, SiO2 > 50 mg/l, Hg > 40 mg/l, Sn > 25 mg/l, Pb > 20 mg/l, Ag, Cr > 10 mg/l, Cr > 1 mg/l	kuwvellen test	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	151.4/25st	6.06	afvalwater, drinkwater, keelwater, oppervlaktewater, procescontrole	
SO4	mg/l	2	Fluka	> 50	sd slope 0.2 mV	10% (waarschijnlijk opm. 1)	4 - 7	???	Potentiometrische bepaling met ISE gebaseerd op Ba ionofoor / met toepassing van Gran's plot liberale	???	???	???	???	???	???	ca NLG 800	ca NLG 800	???	
SO4	mg/l	1a	Lange Group	40-150; 150-900	1 mg/L of < 3.5 %	5-9%	pH 2-10; Temp. 15-25	Na, K > 2000 ppm, Ca, NO3, Cl- > 1000 ppm, Cu, Cr, Fe, Mg, Mn, NH4, Ni, Si, Sn, Zn > 500 ppm, Al, Pb, Hg, PO4, CO3, I, CN, NO2 > 50 ppm, Cr(VI) > 20 ppm, Ag > 2.5 ppm	kuwvellen test	n.v.t.	n.v.t.	10 min (incl. 2 min. reactietijd)	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	121.9/25st	4.88	afvalwater, grond, ongezuiwend drinkwater, constructiebeton, procescontrole	
pH	eenheden	2	Lange Group	0-14	???	0.002	n.v.t.	???	Glas-elektrode	???	???	???	???	???	Docking station RS 232	???	???	water	
pH	eenheden	2	Sentron	0-14	???	0.1 of 0.01 pH	0 - 14	???	ISFET	PVC, PEI	> 1 jr	0-3 bar (max)	0.8 cm diameter (opm. 4)	PC, LabView	< NLG 800 (voorlopig)	ca NLG 1	algemeen		
pH	eenheden	2	Thermo Analytical	0-14	0.01	0.2	0 - 14	???	Glas-elektrode	PVC glas	???	???	continu	Geheugen in sonde / hypeterminal excel	???	1875	0	water	
redox	mV	2	Lange Group	-999 - 999	???	???	???	???	Pt-ring elektrode	???	???	???	???	???	Docking station RS 232	???	???	water	
redox	mV	2	Thermo Group	-999 tot +999	1	20	???	???	Pt-ring elektrode	PVC, glas	???	???	continu	Geheugen in sonde / hypeterminal excel	???	1041	0	water	
ec	mS/cm	5	Lange Group	0-100	???	0.50%	???	???	elektrode	???	???	???	???	???	Docking station RS 232	???	???	water	
ec	mS/cm	5	Thermo Analytical	0 - 100	4 digits	0.001 mS/cm	???	???	graphite	PVC	???	???	continu	Geheugen in sonde / hypeterminal excel	???	1041	0	water	

Overzicht van commercieel beschikbare macrosensoren i.r.t. de macrosamenstelling van grondwater onder stortplaatsen.

Macro-parameters	Eenheid	meet methode (omg.)	Firma	Meeteenheid (bandbreedte/mg/l)	Resolutie	Nauwkeurigheid	pH-range	storende elementen (incl. concentraties waarbij zo storen)	sensor type	materiaal soort	stabiliteit (langere termijn)	benodigde stroomsnelheid (druk)	meet snelheid	sensor afmetingen	waar bevindt zich het meetgedeelte?	methode data opslag en verwerking	kosten aanschaf (NLG)	kosten per meting (NLG)	uidig toepassingsgebied
ec	MS/cm	5	v.Essen/ Eljkelk	0-5	0,001	1%	0-14	geen	4-elektrode	platina op keramiek behuizing RVS 316	1%, per 3 maanden afhankelijk van de omstandigheden	geen	1 per 10 sec tot 1 per 99 uur instelbaar	26 cm lang, diameter 22 cm	Intern geheugen	Intern geheugen	3650	geen	water
DO (O ₂)	mg/l	??	Large Group	0-20	???	1%	???	???	elektrode (Clark cell)	???	???	???	???	???	Docking station RS 232	???	???	water	
DO (O ₂)	mg/l	??	Thermo Analytical	0-20	0,01	0,2	2-12	???	elektrode (Clark cell)	???	???	???	continu	10 cm elektrode	Geheugen in sonde / hyperterminal excel	1875	0	water	
DO (O ₂)	mg/l	6	v.Essen/ Eljkelk	0-20	0,01	0,1	0-11	zeer sterke base (pH 11 of hoger)	Optisch fluorescentie	Polymeer met PU-complex. Behuizing rvs 316.	0,1 mg/l per jaar	geen	1 per 10 sec tot 1 per 99 uur instelbaar	33 cm lang, 22 mm diameter	???	???	7620	geen	water
druk	mm Hg	7	v.Essen/ Eljkelk	diverse bereiken (bv 5 m)	1 mm	1 cm	0-14	geen	keramische druksensor	RVS 316	1 cm per jaar	geen	1 per 10 sec tot 1 per 99 uur instelbaar	diameter 22 cm	intern geheugen	onderdeel van de geleidbaarheidszoorstof	geen	water	
T	°C	4	v.Essen/ Eljkelk	-20 tot 80	0,01	0,1	0-14	geen	halfgeleider	RVS 316	goed	geen	1 per 10 sec tot 1 per 99 uur instelbaar	diameter 22 mm	intern geheugen	onderdeel van de geleidbaarheidszoorstof	geen	water	
T	°C	4	Sentron	-5 tot 105	???	0,1	0 - 14	geen	thermistor	PVC, PEI	> 1 j	0-3 bar (max)	~ ms	0,8 cm diameter (opt. 4)	zile optm. 4	PC, LabView	ca NLG 1	ondersteuning andere sensoren	
troebelheid	NTU	?	Thermo Analytical	0-100 of 0-1000	0,1 of 1	5% van range	???	???	optisch (scatter)	PVC	???	???	continu	10 cm elektrode	Geheugen in sonde / hyperterminal excel	3332	0	water	
Opmerkingen:																			
Opmerking 1: (bij kolom resolutie)																			
Resolutie van de meting is 0,1 mV.																			
Dit vertaalt zich bij een 1-waardig ion naar een meetfout van 0,4% in concentratie.																			
Voor een 2-waardig ion is dit 0,8%.																			
Omdat het tijdens een meting voor kan komen dat de meter niet precies terugkomt (bij meten van dezelfde oplossing) geven we voortop een nauwkeurigheid van 10% op.																			
Dit geldt waarschijnlijk ook voor de sensoren gebaseerd op de Fluka gegevens.																			
Opmerking 2: (bij kolom stroomsnelheid/druk)																			
Omdat drukVERSCHIL invloed kan hebben op de sensor, meten we in ons systeem in stilstandende vloeistoffen.																			
De verwachting is dat drukken tot 3 bar acceptabel zullen zijn.																			
Opmerking 3: (kolom storende elementen)																			
De concentratie waarbij de storende invloed merkbaar wordt, hangt af van de concentratie van het te meten ion.																			
De log-waarde van de gevoeligheid van de sensor voor stoorionen wordt tussen haakjes weergegeven.																			
Voorbeeld: (-2,0) betekent dat de sensor 100x gevoeliger is voor het te meten ion dan voor het stoorion.																			
Dus hoe groter negatief de log-waarde v.d. gevoeligheid, hoe beter de sensor zich gedraagt!																			
Opmerking 4: (kolom sensor afmetingen)																			
Volume doorstroomeel is ongeveer 1 ml, wat meteen de minimale monsterhoeveelheid is.																			
De sensoren zijn zo geconstrueerd dat hij een onderdeel van het kanaal van de doorstroomeel vormt. Dientengevolge ligt de chip direct langs de waterstroom.																			
De sensoren in de doorstroomeel zijn cilindrisch met een diameter van 0,8 cm en een hoogte van 2 cm excl. en 3 cm incl. aansluitbennen.																			
De immersion depth is 0,0.																			
Opmerking 5: (kolom resolutie)																			
Met slope in mV per decade wordt bedoeld de helling per 10-voudige concentratieverandering.																			
Opmerking 6: (kolom Macroparameters)																			
Fe ²⁺ , Fe ³⁺ en Fe ⁴⁺ kunnen ook apart gemeten worden.																			
Opmerking 7: (kolom meetmethode)																			
1a Spectrofotometrisch (neerslag)																			
1b Spectrofotometrisch (kleurreadie)																			
2 Potentiometrische sensor (ISE, CHEMFET)																			
3 Titratie																			
4 Thermometrie																			
5 Geleidbaarheid																			
6 Optische fluorescentie																			
7 Barometrie																			