

PT6423

Demonstratie van een methode voor het vaststellen van snelheid en richting van grondwaterstroming met behulp van de Phrealog-sonde

Eindrapport

ir. J.F. de Kreuk (BioSoil R&D BV)
dr. E. Marnette (TAUW)
ing. M. Coremans (BioSoil R&D BV)
drs. J. Daas (TAUW)
dr. M. Schöttler (Phrealog)

Augustus 2008, 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, **SKB, Gouda**, op duidelijke wijze wordt vermeld, alsmede de aanduiding van de maker, indien deze in de bron voorkomt.”

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 SKB, Gouda, The Netherlands is clearly mentioned.

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

Demonstratie van een methode voor het vaststellen van snelheid en richting van grondwaterstroming met behulp van de Phrealog-sonde.

Eindrapportage

SKB rapportnummer

PT6423

Project rapportnummer

PT6423

Auteur(s)

ir. J.F. de Kreuk (BioSoil R&D BV)
dr. E. Marnette (TAUW)
ing. M. Coremans (BioSoil R&D BV)
ir. J. Daas (TAUW)

Aantal bladzijden

Rapport:
Bijlagen:

Uitvoerende organisaties (consortium)

BioSoil R&D BV (ir. J.F. de Kreuk, ing. M. Coremans)
TAUW (dr. E. Marnette, ir. J. Daas)
Phrealog (dr. M. Schöttler)

Uitgever

SKB, Gouda

Samenvatting

Het kennen van zowel de snelheid als de richting van de grondwaterstroming is van groot belang bij het beoordelen van de risico's van een verontreiniging voor de omgeving. Deze parameters worden normaliter afgeleid uit metingen van de stijghoogte en doorlatendheid. De Phrealog-sonde volgt de beweging van deeltjes direct in de grondwaterstroming en berekent hieruit zowel de snelheid van de grondwaterstroming als de richting. De sonde is nu ingezet op een aantal locaties, waarvan de ruimtelijke verdeling van een verontreiniging bekend is. De meetgegevens zijn vergeleken met de opgetreden verspreiding om zo de voorspellende waarde van de uitkomsten van de meting vast te stellen. Hieruit kon worden afgeleid, dat de methode bruikbare gegevens oplevert, maar dat de geometrie van de peilbuis een belangrijke invloed heeft op de resultaten. Een protocol, waaraan een peilbuis moet voldoen voor het uitvoeren van een betrouwbare meting, is opgesteld.

Trefwoorden**Gecontroleerde termen:**

bodemverontreiniging
verspreiding
halogenen
bodemsanering

Vrije trefwoorden:

Phrealog-sonde
in-situ meetmethode
geohydrologie
kosteneffectief

Titel project

Demonstratie van het gebruik van een methode voor de directe bepaling van de grondwaterstroming (snelheid en richting) met behulp van de Phrealog-sonde voor verbeterd inzicht in geohydrologische processen en de beoordeling van verspreiding van een verontreiniging.

Projectleiding

BioSoil R&D BV
(ir. J.F. de Kreuk,
078-682.01.49)

Dit rapport is verkrijgbaar bij:
SKB, Postbus 420, 2800 AK Gouda.

Report Title

Demonstration of a method for the determination of groundwater flow (both rate and direction) by means of the Phrealog probe

SKB report number

PT6423

Final report

Project report number

PT6423

Author(s)

J.F. de Kreuk MSc. (BioSoil R&D BV)
Dr. E. Marnette (TAUW)
M. Coremans BSc. (BioSoil R&D BV)
J. Daas MSc. (TAUW)

Number of pages

Report:
Annexes:

Executive organisation(s) (Consortium)

BioSoil R&D BV (J.F. de Kreuk MSc, M. Coremans BSc.)
TAUW (Dr. E. Marnette, J. Daas MSc.)
Phrealog (Dr. M. Schöttler)

Publisher

SKB, Gouda

Abstract

Knowledge about both rate and direction of groundwater flow is of great importance for the evaluation of the risk of a contamination for its surroundings. These parameters are normally derived from groundwater levels and soil permeability. The Phrealog probe follows the movement of particles in the groundwater, from which it calculates the flow rate and its direction. The probe has been used on a number of locations, with a known distribution pattern of the contamination. The results of the measurements were compared with these patterns in order to evaluate the predictive value of the measurements.

This research indicated that the geometry of the well has a significant influence on the results. It can be concluded that in future the method may be applicable in Dutch soils, provided that the suggested protocol for well installation and for measuring will be followed.

Keywords**Controlled terms:**

Soil contamination
Distribution
Halogens
Soil remediation

Uncontrolled terms:

Phrealog probe
In-situ measurements
Geohydrology
Cost effective

Project title

Demonstration of the use of a method for the direct measurement of groundwater flow (rate and direction) by means of the Phrealog probe to improve insight in geohydrological processes and the evaluation of the spreading of a contaminant.

Project management

BioSoil R&D BV
(J.F. de Kreuk;
+31(0)78-682.01.49)

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

Om de mogelijke verspreiding van een mobiele verontreiniging te kunnen voorspellen is het van groot belang om de grondwaterstroming zowel wat betreft zijn richting als snelheid te kennen. Het belang van een dergelijke evaluatie is sterk toegenomen door een verschuiving van de saneringsdoelstelling voor een verontreinigingsgeval van concentraties naar risico's. In het laatste geval wordt geaccepteerd, dat een verontreiniging achterblijft mits er geen verdere verspreiding optreedt en er geen risico's bestaan voor mens en milieu (de "stabele eindsituatie").

Een dergelijke benadering vereist een goede kennis van het ruimtelijk transport van de verontreiniging en derhalve van het transportmedium zijnde grondwater. Van de Phrealog-sonde wordt aangenomen, dat deze in staat is zowel de snelheid als de richting van de grondwaterstroming met voldoende nauwkeurigheid te kunnen bepalen. De sonde is ontwikkeld door M. Schöttler op de universiteit van Aken. Het concept is door hem verder uitgewerkt binnen de firma *PHREALOG AG* te Mainz en de sonde is onder verschillende geologische condities over de afgelopen 10 jaar ook toegepast.

Ten einde vast te stellen of de sonde ook in de Nederlandse situatie toepasbaar zou zijn en wat de waarde is voor het voorspellen van de stabele eindsituatie is deze toegepast op een aantal locaties waar de verspreiding van de verontreiniging al bekend was. Deze verspreiding laat immers zien wat de gemiddelde richting van de grondwaterstroming is en het laat ook toe om een schatting te doen van de verwachte snelheid van de grondwaterstroming. Door nu de uitkomsten van de metingen met de Phrealog-sonde te vergelijken met deze verspreiding kan worden vastgesteld in welke mate Phrealog-metingen geschikt zijn voor het voorspellen van de verspreiding van een verontreiniging.

In de Inleiding wordt de werking van de sonde omschreven. In hoofdstuk 2 en 3 worden de gekozen locaties en de meetmethoden gegeven en in hoofdstuk 4 en 5 de resultaten en de evaluatie daarvan. Op basis van de ervaringen wordt ook aangegeven waar de meetomgeving (de peilbuis) aan moet voldoen voor het verkrijgen van betrouwbare gegevens (hoofdstuk 5). De conclusies van het onderzoek zijn samengevat in hoofdstuk 6 en hoofdstuk 7 worden aanbevelingen gedaan voor een verdere ontwikkeling van de sonde en voor het gebruik ervan.

INHOUD

Voorwoord	5
Summary	7
Samenvatting	14
1. Inleiding	21
1.1 Aanleiding en probleemstelling	21
1.2 Doelstelling	21
1.3 Plan van aanpak	22
2. De locaties	23
2.1 Wageningen	23
2.2 Almelo	26
2.3 Ermelo	29
2.4 Europoort	32
3. Methoden	34
3.1 Uitvoering Phrealog metingen	34
3.2 Weergave van de resultaten	34
3.3 Evaluatie van de resultaten	35
4. Resultaten	38
4.1 Wageningen	38
4.2 Almelo	39
4.3 Ermelo	40
4.4 Europoort	40
5. Discussie	42
5.1 Wageningen	42
5.2 Almelo	43
5.3 Ermelo	44
5.4 Europoort	44
5.5 Waarde van de methode voor het begrip van de hydrologie van een locatie	45
5.6 Voorwaarden voor het gebruik van de Phrealog sonde	45
5.7 Economische afwegingen	47
6. Conclusies	48
7. Aanbevelingen	49
Literatuur	50
Bijlagen	51

SUMMARY

Introduction

Knowledge about the flow of groundwater (both rate and direction) is essential for the judgement about the possible risk of a contamination for its surroundings. For evaluating the so called “stable final situation¹” the variations in time are relevant as well.

The direction of the groundwater flow, in general, is determined on the basis of water level measurements in appropriate monitoring wells, which are combined in an isohypsis chart. Isohypsis patterns, however, may be season dependent and may be influenced by e.g. variations in salt content of the groundwater leading to an erroneous picture of the situation.

The permeability of the soil compartment under consideration is generally derived from pumping or slug tests. In combination with the isohypsis chart a groundwater flow rate is then estimated. Locally the permeability may vary significantly and these variations are difficult to determine. A pumping test will show an average permeability for a certain area. For the spreading of a contamination, however, the local permeability is the most important factor. Slug tests may be used for that purpose, they are, however, not very accurate. Consequently the rate and direction of the groundwater flow is difficult to determine accurately.

A direct measurement tool is not available for the geo-hydrologist. TAUW performed measurements with the GeofloTM, which is based on following the distribution of heat in flowing groundwater after a heat pulse, but their experience was not positive. Lowering the Phrealog probe in a well results in a significant disturbance of the flow pattern, which levels off after a relative long period of time (sometimes several hours). Probably the same goes for the GeoflowTM probe. Question is whether enough attention has been paid to give the measurement sufficient time to stabilize.

Aim of the project

The project aims at demonstrating the applicability of the Phrealog probe for the Dutch situation and to validate the method under those circumstances

Validation is done by comparing the Phrealog data with known geo-hydrological data from sites and corresponding contaminant distribution patterns. It is assumed that a distribution pattern of a contamination gives a reliable indication of the actual average groundwater flow over a long period of time.

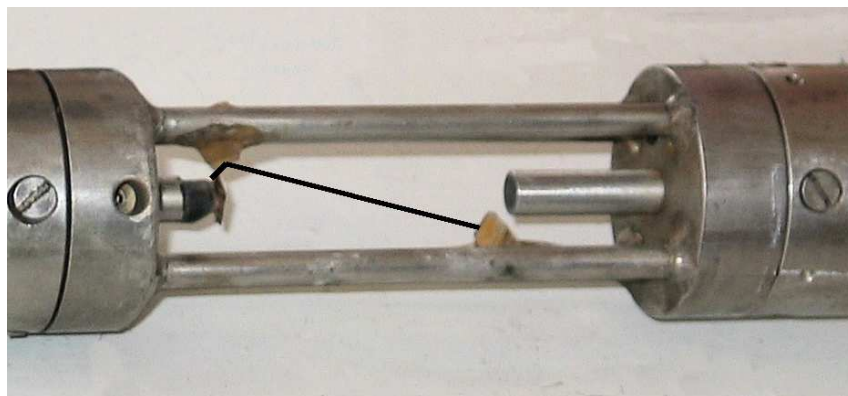
The Phrealog probe

The Phrealog measurements are based on following the movement of small particles in the groundwater flow with the aid of a picture evaluation technique. A light source is present in the probe, which produces a narrow and accurate light path. A camera in the probe observes a small part of the light path. By evaluating successive pictures of particles that are detected in the light path, movement of these particles can be tracked. The flow direction is registered by a compass.

¹ The stable final situation (stabiele eind situatie) is reached when a contamination over a 30 year period shows a clear unequivocal trend in the direction of size reduction and when there will be no risks for men and environment.

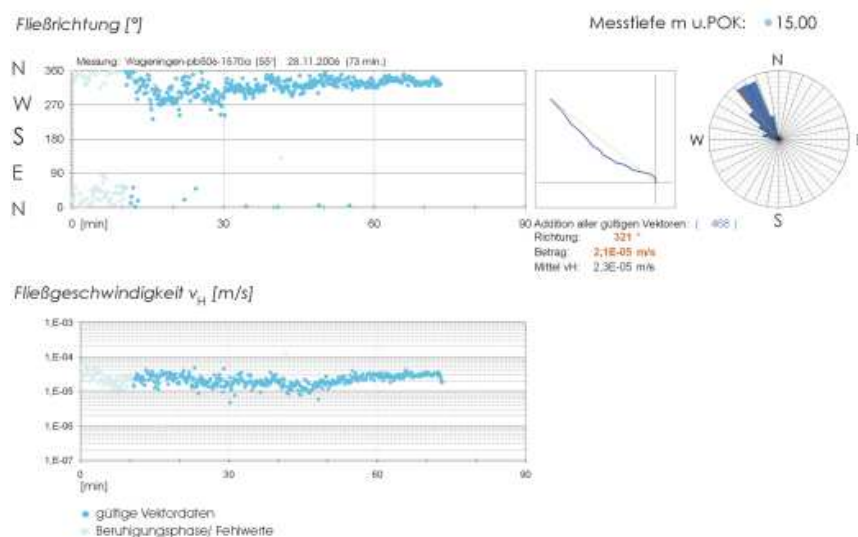
The part of the probe where the actual measurements are carried out is vertically separated from its surroundings by inflatable packers. Lowering the probe in the well disturbs the groundwater flow, which shows by an irregular pattern of the results obtained. When the disturbances disappear the data become more regular and that moment is considered to be the start of the measurement period.

Figur 1: measuring cell of the probe; the light path is indicated



The results are presented as follows. The direction of the groundwater flow is indicated as function of time (Fließrichtung) and the data are summarised on a compass rose. Those data that are not included in the interpretation of the data, because the pattern was not stable yet, are indicated in lighter blue. In the second graph the groundwater flow rate is indicated (Fließgeschwindigkeit).

Figur 2: presentation of the findings



Two values are given: “Betrag” is the average of the vectors in the direction of the groundwater flow and “Mittel vH” is the overall average of all valid vectors. From those data the actual flow rate in the aquifer is calculated. To that end the correction factor α is applied for the presence of the well, because the well and the gravel pack has a higher permeability than the surrounding aquifer material.

The correction factor (α) is dependent on the size of the monitoring well, the borehole and on the permeabilities of the well, the gravel pack and surrounding aquifer according to the following formula:

$$\alpha = \frac{8}{\left(1 + \frac{k_f}{k_2}\right) \times \left\{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]\right\} + \left(1 - \frac{k_f}{k_2}\right) \times \left\{\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 + \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 - \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]\right\}}$$

in which:

- α = convergence factor [-]
- r_1 = inner diameter filter [mm]
- r_2 = outer diameter filter [mm]
- r_3 = borehole diameter [mm]
- k_1 = k-value filter [cm/s]
- k_2 = k-value gravel pack [cm/s]
- k_f = k-value aquifer material around the well [cm/s]

In addition a γ -factor is used, that relates to the disturbances caused by the probe in the well. This factor was determined experimentally and had a value of 4 for the probe used.

The groundwater flow rate according to Darcy can be calculated by dividing the measured rate by the α - and γ -factor:

$$V_{Darcy} = \frac{V_{measured}}{\alpha \cdot \gamma}$$

The linear groundwater flow rate is then calculated by dividing the Darcian flow rate by the porosity (Φ) of the aquifer:

$$V_{linear} = \frac{V_{Darcy}}{\Phi}$$

The sites

Four sites were used to investigate the operation of the Phrealog-probe and to compare the results obtained with the knowledge of the site and the distribution of the contamination.

The sites were located in Wageningen, Almelo, Ermelo and in the Rotterdam harbour area of Europoort.

Wageningen

In Wageningen measurements were carried out on a building location next to the Droevendaalsesteeg and one next to the Costerweg. It appeared that near the Droevendaalsesteeg only one well was available because others were lost by building activities. Near the Costerweg a bioscreen is installed, which was meant to intercept the contamination with tetrachloro-ethene (PCE), that is transported with the groundwater from various locations in the centre of Wageningen around de Hoogstraat. At both sites the groundwater flow is south-west to west. At the depth measured the soil is sandy overlaying a clay layer at about 30 m-gl.

With the aid of tracer tests a groundwater flow rate of about 70 m/year was found for the site at the Costerweg. The average direction of the groundwater flow was derived from the distribution of the contamination. The nearby river Rhine may influence the direction of the groundwater flow. Since the water level in the river is controlled by the down stream weir at Maurik during this period of the year, the level of the river was its normal one.

Almelo

The location is on the former premises of the dry cleaner Palthe. The site is redeveloped. The soil profile consists of medium fine sands with gravel down to 4 – 5 m-gl and coarser sand between 5 and 8 m-gl. Between 8 and 26 m-gl again medium fine sands are found. The direction of the groundwater is north-west with an expected flow rate of 11 to 23 m/year.

Ermelo

Near Ermelo the waste tip the Ullerberg is situated. The tip is in use since 1978 and many measurements were carried out to follow contaminants from the tip (mainly metals like nickel). The soil profile consists of relatively coarse sands down to 10 m-gl underlain by a clay layer of variable thickness. The aquifer below the clay consists of coarse sands. The groundwater flow in the aquifer is North West at a rate of about 25 – 35 m/year.

Europoort

The site in Europoort is in the tidal area of the port of Rotterdam between the Caland- and Hartel Channel. Since it is next to the harbour, it is supposed to be influenced by the tides. The soil profile is very complicated with alternating sand, clay and peat layers. The contamination originates from a tank park and it moves in the direction of the harbour.

Results en discussion

The measurements result in graphs of groundwater flow rates and directions. The directions are presented also in compass roses.

The data obtained are summarized in Table 1 below:

Table 1: overview of the results of the measurements carried out

well nr	depth m-gl	period hr:min	direction**	Rate*** m/s	corrections a.y	V-Darcy m/s	V-Darcy m/d	V-linear m/d
Wageningen – Droevendaalsesteeg								
db4	17,05	1:20	NNE	$5,5 \cdot 10^{-7}$	10	$0,6 \cdot 10^{-8}$	0,00	0,02
db4	17,75	1:10	NNE	$1,9 \cdot 10^{-4}$	10	$1,9 \cdot 10^{-5}$	1,64	5,47
Wageningen – Costerweg								
506 11-6*	15,00	1:00	NW-N	$2,1 \cdot 10^{-5}$	8,8	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,21	0,69
506 11-6	18,20	1:03	NW	$8,0 \cdot 10^{-6}$	8,8	$8,0 \cdot 10^{-7}$	0,07	0,23
506 05-8*	16,90	1:20	SE	$1,2 \cdot 10^{-5}$	8,8	$1,4 \cdot 10^{-6}$	0,12	0,39
506 05-8	17,90	0:55	SW	$1,1 \cdot 10^{-5}$	8,8	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,11	0,36
706 11-6	23,00	1:00	ENE-E	$1,8 \cdot 10^{-4}$	8,8	$2,0 \cdot 10^{-5}$	1,77	1,08
706 11-6	26,00	1:00	ENE	$1,1 \cdot 10^{-4}$	8,8	$1,3 \cdot 10^{-5}$	5,89	3,6
706 05-8	25,45	1:00	NNW-N	$2,9 \cdot 10^{-5}$	8,8	$3,3 \cdot 10^{-6}$	0,28	0,21
706 05-8	25,95	1:00	NE-N	$2,1 \cdot 10^{-5}$	8,8	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,95	0,69
Almelo – Palthe terrein								
P2	4,05	1:00	NNW-N	$1,8 \cdot 10^{-5}$	10	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0,16	0,52
P1	7,00	0:55	SW	$3,8 \cdot 10^{-5}$	10	$3,8 \cdot 10^{-6}$	0,33	1,09
P4	4,10	1:00	SW-W	$2,9 \cdot 10^{-5}$	10	$2,9 \cdot 10^{-6}$	0,25	0,84
P3	7,05	1:00	SW-W	$6,7 \cdot 10^{-6}$	10	$6,7 \cdot 10^{-7}$	0,06	0,19
Ermelo - Ullerberg								
23/2	29,85	0:35	E	$3,2 \cdot 10^{-5}$	10	$3,2 \cdot 10^{-6}$	0,28	0,92
23/2	29,75	0:50	SE-E	$2,7 \cdot 10^{-5}$	10	$2,7 \cdot 10^{-6}$	0,23	0,78
23/3	19,85	0:34	NE	$2,8 \cdot 10^{-5}$	10	$2,8 \cdot 10^{-6}$	0,24	0,81
24/2	29,90	0:40	ESE	$4,1 \cdot 10^{-5}$	10	$4,1 \cdot 10^{-6}$	0,35	1,18
24/2	29,80	0:50	SSE	$3,1 \cdot 10^{-5}$	10	$3,1 \cdot 10^{-6}$	0,27	0,89
24/3	19,85	1:00	NW	$2,2 \cdot 10^{-5}$	10	$2,2 \cdot 10^{-6}$	0,19	0,63
Europoort								
P10.01	6,0	12:20	NE-N	$1,0 \cdot 10^{-3}$	16,25	$1,3 \cdot 10^{-5}$	1,12	3,7
	9,0	22:49	SSW	$8,9 \cdot 10^{-5}$	14,76	$6,0 \cdot 10^{-6}$	0,52	1,7
P13.01	10,2	6:0	W	$5,5 \cdot 10^{-5}$	14,76	$3,7 \cdot 10^{-6}$	0,32	1,1
P16.01	14,2	10:28	NNW	$6,7 \cdot 10^{-6}$	14,76	$4,5 \cdot 10^{-7}$	0,04	0,13

Legend:

- * measurements carried out in November 2006 (11-6) and May 2008 (05-8)
- ** the direction of flow is expressed like a compass rose
- *** flow rate as measured in the well

The data as presented in Table 1 are compared with the knowledge which was available from the sites. This comparison is summarised in the Table below.

Table 2: comparison of Phrealog data with information about the sites.

well nr	depth m-gl	Phrealog		information of the sites		remarks
		direction	V-linear m/d	direction	V-linear m/d	
Wageningen – Droevendaalsesteeg						
db4	17,05	NNE	0,02	SW	?	A temporary extraction north of the site of 60 m ³ /hour
db4	17,75	NNE	5,47	SW	?	
Wageningen – Costerstraat						
506 11-6*	15,00	NW-N	0,69	SW-W	0.25	Significant differences in direction of the groundwater flow as measured by Phrealog between 2006 and 2008
506 11-6	18,20	NW	0,23	SW-W	0.25	
506 05-8*	16,90	SE	0,39	SW-W	0.25	
506 05-8	17,90	SW	0,36	SW-W	0.25	
706 11-6	23,00	ENE-E	1,08	SW-W	0.25	
706 11-6	26,00	ENE	3,6	SW-W	0.25	
706 05-8	25,45	NNW-N	0,21	SW-W	0.25	
706 05-8	25,95	NE-N	0,69	SW-W	0.25	
Almelo – Palthe terrein						
P2	4,05	NNW-N	0,52	NW	0.03 – 0.063	short perforated section – measurements near the top of that section – unclear whether the gravel pack was complete
P1	7,00	SW	1,09	NW	0.03 – 0.063	
P4	4,10	SW-W	0,84	NW	0.03 – 0.063	
P3	7,05	SW-W	0,19	NW	0.03 – 0.063	
Ermelo - Ullerberg						
23/2	29,85	E	0,92	NW	0,08 – 0,11	nested wells
23/2	29,75	SE-E	0,78	NW	0,08 – 0,11	
23/3	19,85	NE	0,81	NW	0,08 – 0,11	
24/2	29,90	ESE	1,18	NW	0,08 – 0,11	
24/2	29,80	SSE	0,89	NW	0,08 – 0,11	
24/3	19,85	NW	0,63	NW	0,08 – 0,11	
Europoort						
P10.01	6,0	NE-N	3,7	N	variable	tidal area
	9,0	SSW	1,7			
P13.01	10,2	W	1,1	N	variable	
P16.01	14,2	NNW	0,13	N	variable	

The measurements as carried out by Phrealog differ significantly from the information obtained from the sites. At the Droevendaalsesteeg in Wageningen it appeared that north of the site a temporary extraction of about 60 m³/hr was in operation, which may explain the deviation in the direction of the groundwater flow as compared to the expected one. The flow however is still quite high. At the Costerweg the flow rate is in the same order as the ones expected in most cases. The reading at 26 m is quite high. Concentrations of the contaminants are however low at this depth, which makes it difficult to estimate both the direction and flow rate at this depth and thus the reality of the Phrealog data. The direction of flow is apart from one measurement not as expected and as indicated by the distribution of the contamination.

At Almelo and Ermelo both the direction of flow and the flow rate are not as expected. A significant problem at the Ermelo site was the fact that the wells were nested. The probe could not be lowered in the deepest wells, because the wells were curved and the probe got stuck (see also general remarks and conclusions).

The data from Europoort were largely as expected. The tidal influence but also the effect of the harbour embankment could be derived from the results.

General remarks and conclusions

Spatial variation: It was found that the well layout is of great importance for performing Phrealog measurements. In the set of nested wells at the site at Ermelo the wells next to the one used for the measurements most likely caused a significant disturbance of the groundwater flow. The same type of disturbances may be caused by irregularities in the soil profile. For that reason generally measurements are carried out in one well at different heights to get an estimate of the variability in the measured groundwater flow. In Germany this is not a problem because monitoring wells generally are fully perforated. In the Netherlands, however, short filter lengths are used to obtain data from a specific soil layer.

Temporal variations: The measurements in Wageningen showed a significant variation of the flow direction between November 2006 and May 2008. So to get a good estimate of the flow direction and its temporal variation, multiple measurements should be carried out.

Wells to be used for Phrealog measurements have to fulfil certain requirements. Special attention has to be paid on the drilling method, gravel pack and well placing. The well screening has to be tuned to the soil profile.

It should be noted that these requirements are the same for all direct in well measurement methods. The advantage of Phrealog is the fact that a large number of data points are available, which show the variability within one measurement.

It now may be concluded that:

1. the Phrealog method has significant potential, when a number of requirements are met with regard to well layout and measurement procedures.
2. The measurements carried out so far showed relatively little resemblance with the information from the site.
3. The conditions at the sites concerning the selected wells were such, that most of the deviations may be explained by field conditions.
4. A setup for the installation of wells, that shall be used for Phrealog measurements, has been indicated.
5. The correction value α is used for translating in well flow rates to aquifer flow rates. This correction value is relatively insensitive for the layout of the well and the surrounding aquifer. A factor of 2.5 was used when little information was available. This however cannot explain the differences between field data and the measurements.
6. The correction value for the presence of the probe (γ) has been determined under laboratory conditions during the development of the system. A recalibration in different aquifer and well conditions is advised.

SAMENVATTING

Inleiding

Het kennen van zowel de snelheid als de richting van de grondwaterstroming is van essentieel belang bij het beoordelen van de mogelijke risico's van een verontreiniging voor de omgeving. Voor het beoordelen van een situatie voor het vaststellen van een stabiele eindsituatie is daarnaast de variatie van deze parameters in de tijd relevant.

Voor het bepalen van de grondwaterstromingsrichting worden stijghoogtes in peilbuizen binnen het betrokken gebied gemeten, met elkaar gecorreleerd en verwerkt tot een grondwater(isohypsen)kaart.

Isohypsenpatronen kunnen echter seizoensafhankelijk zijn en daarnaast kan er onder invloed van dichtheidsverschillen als gevolg van variaties in zoutgehalte en temperatuur een vertekend beeld ontstaan.

De snelheid van de grondwaterstroming wordt in de regel geschat door het uitvoeren van bijvoorbeeld een pompproef ten einde de hydraulische doorlatendheid van het pakket te bepalen, waarna in combinatie met het verschil in stijghoogtes de snelheid wordt berekend. De doorlatendheid kan lokaal behoorlijk variëren. Lokale doorlatendheden zijn echter lastig te meten. Een pompproef leidt bijvoorbeeld tot een globale doorlatendheid van een geohydrologisch pakket. Met name voor het bepalen van de mobiliteit van verontreinigingen is de lokale grondwatersnelheid echter doorslaggevend. Er zijn wel technieken waarmee lokaal de doorlatendheid kan worden bepaald (o.a. slugtesten) maar deze technieken laten vaak een grote bandbreedte zien van de waarden voor de doorlatendheid. Kortom, de grondwatersnelheid en -richting is lastig te bepalen en is tijdsafhankelijk.

Een directe meting van de grondwaterstromingsrichting en -snelheid ontbreekt aan het palet van de geohydroloog. Er zijn door TAUW wel metingen uitgevoerd met de Geoflo™, die is gebaseerd op het volgen van de temperatuurverdeling in het stromend grondwater na een warmtepuls, maar de ervaringen waren daarbij minder positief. Bij de metingen met de Phrealog-sonde is gebleken, dat het neerlaten van de sonde een aanzienlijke verstoring van de grondwaterstroming kan veroorzaken, die afhankelijk van de snelheid van de grondwaterstroming soms pas na uren is verdwenen. De vraag is of daar in voldoende mate rekening mee is gehouden.

Doelstelling

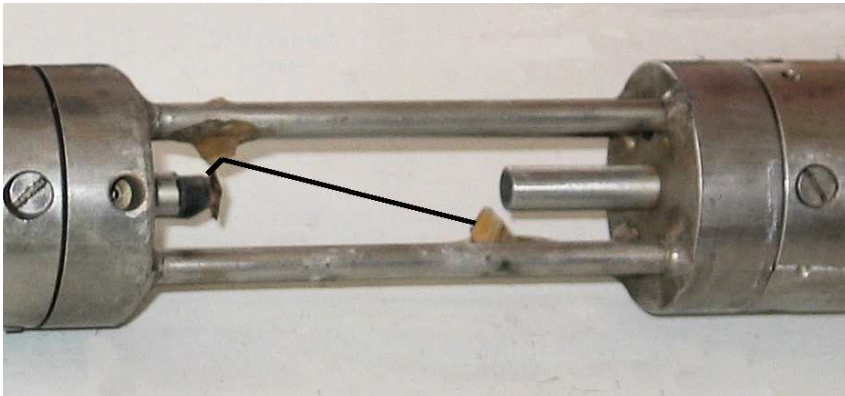
Het doel van het project is het demonstreren van de (on-)bruikbaarheid van het toepassen van de Phrealog-sonde voor de Nederlandse situatie en in feite om de sonde op deze situatie te valideren.

Hiertoe worden de verkregen meetgegevens met behulp van de Phrealog-sonde vergeleken met verdere (hydro)-geologische gegevens en horizontale verspreidingspatronen van verontreinigingen. Deze verspreidingspatronen mogen immers gezien worden als het uiteindelijke resultaat van de werkelijke grondwaterbeweging.

Principe van de sonde

Het principe van de sonde berust op het volgen van deeltjes in de grondwaterstroming door een peilbuis met behulp van een beeldherkenningstechniek. Hiertoe is een lichtbron in de sonde opgenomen, waarmee een nauwkeurig lichtpad wordt gerealiseerd. In de sonde bevindt zich tevens een camera, die een deel van dit lichtpad kan zien. Door opeenvolgende opnamen van de camera te bekijken kunnen deeltjes worden gevolgd. Door patroonherkenning kan de beweging van de "deeltjeswolk" worden gevolgd. In de sonde bevindt zich ook een kompas, zodat de richting van de beweging van deze deeltjes vastligt.

Figuur 3 meetcel van de sonde met lichtpad

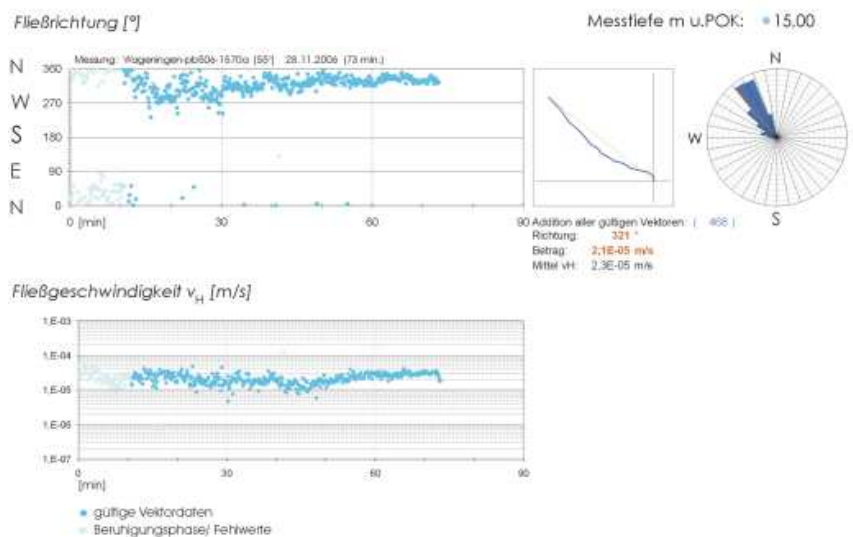


Het gedeelte in de peilbuis, waar wordt gemeten, wordt zo goed mogelijk afgeschermd van de omgeving met opblaasbare packers, die zich onder en boven de meetcel bevinden.

Wanneer de sonde in de peilbuis wordt neergelaten, leidt dit tot een verstoring van de stroming door de peilbuis. Dit uit zich in een warrig meetpatroon. Wanneer de verstoring wegebt wordt de meting eenduidiger. Dit moment wordt als het begin van de meting gezien en de eerdere waarnemingen worden niet meegenomen in de berekening van de grondwaterstroming.

Het resultaat van de metingen worden als volgt gepresenteerd. Er wordt een stromingsrichting aangegeven (Fließrichtung) als functie van de tijd en de punten worden opgenomen in een kompasroos. In lichtblauw zijn de punten gegeven, die niet zijn meegenomen in de meting, omdat het systeem daar nog niet als stabiel werd beschouwd. In de tweede grafiek wordt de grondwaterstromingsnelheid gegeven (Fließgeschwindigkeit)..

Figuur 4: presentatie van de meetgegevens



Er worden twee waarden gegeven. "Betrag" is het gemiddelde van de geldige vectoren in de richting van de stroming en "Mittel vH" is het gemiddelde van alle vectoren. Uit deze grootheden wordt de werkelijke snelheid van de grondwaterstroming in de ondergrond berekend. Hiervoor wordt een correctie toegepast voor de aanwezigheid van de peilbuis, omdat deze met zijn omstorting een lagere weerstand heeft dan het omliggende pakket.

Deze convergentiefactor (α) wordt berekend uit de grootte van de peilbuis, het boorgat, uit de verschillende doorlatendheden van het pakket waarin wordt gemeten, het filtergrind en de peilbuis zelf met de volgende formule:

$$\alpha = \frac{8}{\left(1 + \frac{k_f}{k_2}\right) \times \left\{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]\right\} + \left(1 - \frac{k_f}{k_2}\right) \times \left\{\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 + \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 - \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]\right\}}$$

waarin:

- α = convergentie factor [-]
- r_1 = binnendiameter filter [mm]
- r_2 = buitendiameter filter [mm]
- r_3 = boorgat diameter [mm]
- k_1 = k-waarde voor het filter [cm/s]
- k_2 = k-waarde voor het filter zand [cm/s]
- k_f = k-waarde voor het bodemcompartiment rond de peilbuis [cm/s]

Daarnaast wordt een Y-factor gebruikt, die betrekking heeft op de verstoring door de aanwezigheid van de sonde in de peilbuis. Deze is experimenteel bepaald en bedraagt voor deze sonde 4.

De grondwatersnelheid volgens Darcy wordt nu berekend uit de gemeten snelheid in de peilbuis door deze laatste te delen door de α - en de Y-factor, of:

$$V_{Darcy} = \frac{V_{gemeten}}{\alpha \cdot \gamma}$$

Hieruit kan de lineaire grondwaterstromingsnelheid worden berekend door de De Darcy snelheid te delen door de porositeit (Φ) van de bodem:

$$V_{lineair} = \frac{V_{Darcy}}{\Phi}$$

De locaties

Er zijn vier locaties gebruikt om de werking en resultaten van de Phrealog sonde te toetsen aan de kennis met betrekking tot de stroming van het grondwater and verdeling van de verontreiniging.

De locaties liggen in Wageningen, Almelo, Ermelo en in het Rotterdamse havengebied in Europoort.

Wageningen

In Wageningen zijn metingen uitgevoerd op een bouwlocatie aan de Droevendaalsesteeg en langs de Costerweg. Bij de Droevendaalsesteeg was uiteindelijk een peilbuis beschikbaar, omdat de andere bij het bouwen verloren waren gegaan. Om die reden is ook aan de Costerweg gemeten. Dit is de locatie van een bioscherm, dat is bedoeld om verspreiding van de verontreiniging te verhinderen van plekken rond de Hoogstraat in het centrum van Wageningen. In beide gevallen is de stroming zuid-westelijk. De watervoerende laag is aan de onderkant begrensd door een kleilaag op ca 30m-mv. Met behulp van tracertesten is de snelheid van de grondwaterstroming vastgesteld op ongeveer 70 m/jaar. De gemiddelde richting van de grondwaterstroming is afgeleid uit verspreiding van de verontreiniging. De nabij gelegen Rijn beïnvloedt de richting van de grondwaterstroming. Tijdens de metingen was de rivierstand ongeveer gelijk en geregeld door de stuw bij Maurik.

Almelo

De locatie ligt op het terrein van de voormalige chemische wasserij Palthe. De locatie wordt herontwikkeld. Het bodemprofiel bestaat uit matig fijn zand met grind tot 4-5m-gl and grover zand tussen 5-8m-gl. Tussen 8 en 26m-gl worden weer matig fine zanden aangetroffen. De richting van de grondwaterstroming is noord-west and de snelheid van de stroming zou 11 tot 23m per jaar bedragen.

Ermelo

In de omgeving van Ermelo is de afvalstort de Ullerberg gelegen. De stort wordt sinds 1978 gebruikt en een intensief monitoring programma wordt uitgevoerd om de verspreiding van de verontreiniging te volgen (hoofdzakelijk metalen en vooral nikkel). Het bodemprofiel bestaat uit relatief grof zand tot 10m-mv gevolgd door een kleilaag met een variabele dikte boven een pakket van grover zand. De grondwaterstroming is noord-westelijk met een snelheid van 25 – 35m per jaar.

Europoort

De locatie in Europoort ligt in het getijdengebied van de haven van Rotterdam tussen het Caland- en het Hartelkanaal. Aangezien de locatie dicht bij de haven ligt, wordt aangenomen, dat deze wordt beïnvloed door het tij. Het bodemprofiel is uiterst gecompliceerd en bestaat uit een afwisseling van zand- en klei- en veenlagen. De verontreiniging is afkomstig van het tank park en verspreidt zich in de richting van de haven.

Resultaten en discussie

In de volgende tabel zijn de resultaten van de metingen samengevat.

Tabel 3: overzicht van de resultaten van de uitgevoerde metingen

peilbuis nr	diepte m-mv	duur uur:min	richting	snelheid** m/s	correcties $\alpha \cdot \gamma$	V – Darcy m/s	V-Darcy m/d	V-lineair m/d
Wageningen – Droevendaalsesteeg								
db4	17,05	1:20	N-NO	$5,5 \cdot 10^{-7}$	10	$0,6 \cdot 10^{-8}$	0,00	0,02
db4	17,75	1:10	N-NO	$1,9 \cdot 10^{-4}$	10	$1,9 \cdot 10^{-5}$	1,64	5,47
Wageningen – Costerweg								
506 11-6*	15,00	1:00	NW-N	$2,1 \cdot 10^{-5}$	8,8	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,21	0,69
506 11-6	18,20	1:03	NW	$8,0 \cdot 10^{-6}$	8,8	$8,0 \cdot 10^{-7}$	0,07	0,23
506 05-8	16,90	1:20	ZO	$1,2 \cdot 10^{-5}$	8,8	$1,4 \cdot 10^{-6}$	0,12	0,39
506 05-8	17,90	0:55	ZW	$1,1 \cdot 10^{-5}$	8,8	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,11	0,36
706 11-6	23,00	1:00	ONO-O	$1,8 \cdot 10^{-4}$	8,8	$2,0 \cdot 10^{-5}$	1,77	1,08
706 11-6	26,00	1:00	ONO	$1,1 \cdot 10^{-4}$	8,8	$1,3 \cdot 10^{-5}$	5,89	3,6
706 05-8	25,45	1:00	NNW-N	$2,9 \cdot 10^{-5}$	8,8	$3,3 \cdot 10^{-6}$	0,28	0,21
706 05-8	25,95	1:00	NO-N	$2,1 \cdot 10^{-5}$	8,8	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,95	0,69
Almelo – Palthe terrein								
P2	4,05	1:00	NNW-N	$1,8 \cdot 10^{-5}$	10	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0,16	0,52
P1	7,00	0:55	ZW	$3,8 \cdot 10^{-5}$	10	$3,8 \cdot 10^{-6}$	0,33	1,09
P4	4,10	1:00	ZW-W	$2,9 \cdot 10^{-5}$	10	$2,9 \cdot 10^{-6}$	0,25	0,84
P3	7,05	1:00	ZW-W	$6,7 \cdot 10^{-6}$	10	$6,7 \cdot 10^{-7}$	0,06	0,19
Ermelo - Ullerberg								
23/2	29,85	0:35	O	$3,2 \cdot 10^{-5}$	10	$3,2 \cdot 10^{-6}$	0,28	0,92
23/2	29,75	0:50	ZO-O	$2,7 \cdot 10^{-5}$	10	$2,7 \cdot 10^{-6}$	0,23	0,78
23/3	19,85	0:34	NO	$2,8 \cdot 10^{-5}$	10	$2,8 \cdot 10^{-6}$	0,24	0,81
24/2	29,90	0:40	OZO	$4,1 \cdot 10^{-5}$	10	$4,1 \cdot 10^{-6}$	0,35	1,18
24/2	29,80	0:50	ZZO	$3,1 \cdot 10^{-5}$	10	$3,1 \cdot 10^{-6}$	0,27	0,89
24/3	19,85	1:00	NW	$2,2 \cdot 10^{-5}$	10	$2,2 \cdot 10^{-6}$	0,19	0,63
Europoort								
P10.01	6,0	12:20	NO-N	$1,0 \cdot 10^{-3}$	16,3	$1,3 \cdot 10^{-5}$	1,12	3,7
	9,0	22:49	ZZW	$8,9 \cdot 10^{-5}$	14,8	$6,0 \cdot 10^{-6}$	0,52	1,7
P13.01	10,2	6:0	W	$5,5 \cdot 10^{-5}$	14,8	$3,7 \cdot 10^{-6}$	0,32	1,1
P16.01	14,2	10:28	NNW	$6,7 \cdot 10^{-6}$	14,8	$4,5 \cdot 10^{-7}$	0,04	0,13

Legenda:

- * de metingen zijn uitgevoerd in november 2006 (11-6) en mei 2008 (05-8)
- ** dit is de gemeten snelheid van het grondwater in de peilbuis

De gegevens als neergelegd in Tabel 3 zijn vergeleken met de informatie over de locaties waar werd gemeten. De vergelijking is samengevat in de volgende tabel.

Tabel 4: vergelijking van de Phrealog gegevens met informatie over de locaties

peilbuis nr	diepte m-mv	Phrealog		informatie van de locaties		opmerkingen
		richting	V-lineair m/d	richting	V-lineair m/d	
Wageningen – Droevendaalsesteeg						
db4	17,05	NNO	0,02	SW	?	Tijdelijke onttrekking noord van de locatie van 60 m ³ /uur
db4	17,75	NNO	5,47	SW	?	
Wageningen – Costerstraat						
506 11-6*	15,00	NW-N	0,69	SW-W	0.25	Significant verschil in de richting van de grondwaterstroming als gemeten door Phrealog tussen 2006 en 2008
506 11-6	18,20	NW	0,23	SW-W	0.25	
506 05-8*	16,90	ZO	0,39	SW-W	0.25	
506 05-8	17,90	ZW	0,36	SW-W	0.25	
706 11-6	23,00	ONO-O	1,08	SW-W	0.25	
706 11-6	26,00	ONO	3,6	SW-W	0.25	
706 05-8	25,45	NNW-N	0,21	SW-W	0.25	
706 05-8	25,95	NO-N	0,69	SW-W	0.25	
Almelo – Palthe terrein						
P2	4,05	NNW-N	0,52	NW	0.03 – 0.063	kort filter – metingen dicht aan de bovenkant van de perforatie – onduidelijkheid over de volledigheid grindomstorting
P1	7,00	ZW	1,09	NW	0.03 – 0.063	
P4	4,10	ZW-W	0,84	NW	0.03 – 0.063	
P3	7,05	ZW-W	0,19	NW	0.03 – 0.063	
Ermelo - Ullerberg						
23/2	29,85	O	0,92	NW	0,08 – 0,11	geneste peilbuizen
23/2	29,75	ZO-O	0,78	NW	0,08 – 0,11	
23/3	19,85	NO	0,81	NW	0,08 – 0,11	
24/2	29,90	OZO	1,18	NW	0,08 – 0,11	
24/2	29,80	ZZO	0,89	NW	0,08 – 0,11	
24/3	19,85	NW	0,63	NW	0,08 – 0,11	
Europoort						
P10.01	6,0 9,0	NO-N ZZW	3,7 1,7	N	variabel	getijde gebied
P13.01	10,2	W	1,1	N	variabel	
P16.01	14,2	NNW	0,13	N	variabel	

De metingen als uitgevoerd door Phrealog verschillen duidelijk van de informatie, die over de locaties beschikbaar was. Bij de Droevendaalsesteeg bleek zich ten tijde van de metingen ten noorden van het meetpunt een tijdelijke onttrekking te bevinden van 60m³/uur. Dit zou de afwijking van de richting van de grondwaterstroming kunnen verklaren. De snelheid van de stroming is dan nog vrij hoog. Aan de Costerweg komt de stromingsnelheid ongeveer overeen met de verwachte snelheid. Op 26m-mv is deze vrij hoog, maar de gehalten van de verontreiniging zijn daar laag, waardoor het moeilijk is na te gaan of dit gegeven correct is. De richting van de stroming komt met een uitzondering niet overeen met de richting van de verspreiding van de verontreiniging.

Zowel in Almelo als Ermelo waren de richting en snelheid van de grondwaterstroming niet zoals verwacht. Een belangrijk probleem bij de locatie bij Ermelo waren de geneste peilbuizen. De diepste peilbuis kon niet worden gebruikt, omdat er een bocht in zat die de sonde niet kon passeren (zie ook algemene opmerkingen en conclusies).

De gegevens van Europoort kwamen redelijk overeen met de verwachtingen. De getijdeninvloed, maar ook het effect van de kade van de haven werd teruggevonden.

Algemene opmerkingen en conclusies

Ruimtelijke variaties: Er is vastgesteld, dat de uitvoering van de peilbuizen van groot belang is bij het doen van Phrealog-metingen. Bij de geneste peilbuizen bij Ermelo veroorzaakten de peilbuizen naast die waarin werd gemeten significante verstoringen van het stromingspatroon. Eenzelfde soort verstoring kan ontstaan door onregelmatigheden in het bodemprofiel. Om die reden worden normaliter meerdere metingen in een peilbuis uitgevoerd. In Duitsland, waar de sonde is ontwikkeld, is dat geen probleem omdat peilbuizen daar meestal volledig zijn geperforeerd over de volledige hoogte van het pakket. In Nederland worden echter vaak korte filterstellingen gebruikt om precies een verontreiniging te volgen in een specifieke laag van het pakket. Variaties in de tijd: De metingen in Wageningen lieten ook verschillen zien tussen metingen in november 2006 en mei 2008. Dit zou betekenen, dat ook op verschillende momenten zou moeten worden gemeten.

Peilbuizen die worden gebruikt voor Phrealog-metingen moeten aan specifieke eisen voldoen met betrekking tot de boormethode, plaatsing van de peilbuis en de omstorting. De lengte en diepte van het filter dient te worden afgestemd op de bodemopbouw.

Er moet rekening mee worden gehouden, dat deze beperkingen voor alle methoden gelden waarbij direct in een peilbuis wordt gemeten. Het voordeel van Phrealog is, dat door het groter aantal meetpunten de spreiding in de meting zichtbaar wordt.

Uit het onderzoek kunnen nu de volgende conclusies worden getrokken:

1. De Phrealog methode heeft een significant potentieel wanneer aan aantal voorwaarden wordt voldaan ten aanzien van de peilbuis die wordt gebruikt en de gevolgde procedure.
2. De tot nu toe uitgevoerde metingen laten weinig overeenstemming zien met de informatie die over de locaties bekend was.
3. De omstandigheden op de locaties waren zodanig, dat daarmee een groot deel van de afwijkingen zou kunnen worden verklaard.
4. Er is een protocol opgesteld voor de plaatsing van peilbuizen voor de uitvoering van Phrealog-metingen. Dit protocol dient te worden gevolgd voor het verkrijgen van betrouwbare resultaten.
5. Er wordt een correctiefactor gebruikt (α) om de snelheid in de peilbuis te vertalen naar die in de omgeving ervan. Een factor 2,5 werd gebruikt wanneer er onvoldoende
6. Informatie was om deze goed te berekenen. Dit kan de opgetreden verschillen tussen de metingen en de verwachtingen niet verklaren.
7. De correctiefactor Y voor de aanwezigheid van de sonde is bepaald onder laboratoriumcondities tijdens de ontwikkeling van de sonde. Deze calibratie zou moeten worden herhaald onder de condities van veel voorkomende bodemtypen.

1. INLEIDING

1.1 Aanleiding en probleemstelling

Het kennen van zowel de snelheid als de richting van de grondwaterstroming is van essentieel belang bij het beoordelen van de mogelijke risico's van een verontreiniging voor de omgeving. Voor het beoordelen van een situatie voor het vaststellen van een stabiele eindsituatie is daarnaast de variatie van deze parameters in de tijd relevant.

Voor het bepalen van de grondwaterstromingsrichting worden stijghoogtes in peilbuizen binnen het betrokken gebied gemeten, met elkaar gecorreleerd en verwerkt tot een grondwater(isohypsen)kaart. Isohypsenpatronen kunnen echter seizoensafhankelijk zijn en daarnaast kan er onder invloed van dichtheidsverschillen als gevolg van variaties in zoutgehalte en temperatuur een vertekend beeld ontstaan.

De snelheid van de grondwaterstroming wordt in de regel geschat door het uitvoeren van bijvoorbeeld een pompproef ten einde de hydraulische doorlatendheid van het pakket te bepalen, waarna in combinatie met het verschil in stijghoogtes de snelheid wordt berekend. De doorlatendheid kan lokaal echter behoorlijk variëren. Lokale doorlatendheden zijn echter lastig te meten. Een pompproef leidt bijvoorbeeld tot een globale doorlatendheid van een geohydrologisch pakket. Met name voor het bepalen van de mobiliteit van verontreinigingen is de lokale grondwatersnelheid echter doorslaggevend. Er zijn wel technieken waarmee lokaal de doorlatendheid kan worden bepaald (o.a. slugtest) maar deze technieken laten vaak een grote bandbreedte zien van de waarden voor de doorlatendheid. Kortom, de grondwatersnelheid en richting is lastig te bepalen en is tijdsafhankelijk.

Een directe meting van de grondwaterstromingsrichting en -snelheid ontbreekt, echter aan het palet van de geohydroloog. Er zijn door TAUW wel metingen uitgevoerd met de Geoflo™, die is gebaseerd op het volgen van de temperatuurverdeling in het stromend grondwater na een warmtepuls, maar de ervaringen waren daarbij minder positief. Bij de metingen met de Phrealog-sonde is gebleken, dat het neerlaten van de sonde een aanzienlijke verstoring van de grondwaterstroming kan veroorzaken, die afhankelijk van de snelheid van de grondwaterstroming soms pas na uren is verdwenen. De vraag is of daar bij de Geoflo™ metingen in voldoende mate rekening mee is gehouden.

1.2 Doelstelling

Het doel van het project was het demonstreren van de (on-)bruikbaarheid van het toepassen van de Phrealog-sonde voor de Nederlandse situatie.

Dit hield in, dat er een validatie van de methode moest plaatsvinden. De hiervoor gekozen oplossingrichting bestond uit het vergelijken van de verkregen meetgegevens m.b.v. de Phrealog-sonde met verdere (hydro)-geologische gegevens en vooral door vergelijking van de resultaten van de diverse metingen met de verdeling van de verontreiniging over de te beoordelen locatie, omdat deze verdeling gezien mocht worden als het uiteindelijke resultaat van de werkelijke grondwaterbeweging.

1.3 Plan van aanpak

De demonstratie was gericht op de validatie van de door Phrealog ontwikkelde techniek. Deze werd verkregen door het uitvoeren van metingen op een viertal relevante projecten met een bekende verdeling van de verontreiniging over het bodempakket (bron - pluim) en/of een goed inzicht in de geohydrologische situatie. Door deze en overige geohydrologische informatie, kon de bruikbaarheid van de Phrealog sonde worden geëvalueerd. Ten behoeve van deze evaluatie diende ten minste de geologie bekend te zijn (gelaagdheid, doorlatendheden van de bodem) de hydrologie (verwachte stromingsprofielen, waterpassingen en stijghoogte metingen van voldoende kwaliteit), filterstellingen en het verspreidingspatroon van de verontreiniging. Ontbrekende gegevens werden zoveel mogelijk verzameld of afgeleid uit de lokale omstandigheden.

Het onderzoek (de demonstratie) bestond uit de volgende onderdelen:

- de keuze van de locaties;
- het uitvoeren van de Phrealog-metingen;
- het evalueren en zo mogelijk valideren van de metingen door het vergelijken van de resultaten ervan met de locatiegegevens.

2. DE LOCATIES

Het uitgangspunt bij het project is, dat de Phrealog-metingen voldoende betrouwbaar zijn om de verspreiding van een verontreiniging te kunnen schatten c.q. voorspellen.

In de eerste fase van het project is een keuze gemaakt van de locaties, die gebruikt zouden kunnen worden voor evaluatie van de Phrealog-metingen. Bij voorkeur zijn locaties geselecteerd waar op basis van het verontreinigingspatroon een duidelijke gemiddelde stromingsrichting van het grondwater kan worden afgeleid. Na afloop van de Phrealog-metingen op de locaties is vervolgens gekeken in hoeverre die overeenstemden met het verspreidingspatroon van de verontreinigingen (lees: de gemiddelde grondwaterstromingsrichting). Er is daarbij ook nagegaan of plaatselijke verstoringen de metingen kunnen beïnvloeden en hoe daarmee zou moeten worden omgegaan om tot een betrouwbare schatting te kunnen komen.

De keuze was verder gebaseerd op de volgende uitgangspunten.

1. Er moest voldoende informatie over de locatie beschikbaar zijn om de grondwaterstroming te kunnen schatten.
2. Op de locatie moesten voor de meting geschikte peilbuizen beschikbaar zijn of relatief gemakkelijk kunnen worden geplaatst.
3. De locatie moest voldoende toegankelijk zijn voor de uitvoering van de metingen.
4. De eigenaar van de locatie moest toestemming verlenen voor het gebruik voor dit onderzoek

Op grond hiervan zijn de volgende locaties geselecteerd:

- in Wageningen een locatie aan de Droevendaalsesteeg en aan de Costerweg
- in Almelo een locatie op het voormalige Palthe terrein
- in Ermelo de stortplaats Ullerberg
- in Europoort een locatie in het getijdengebied.

2.1 Wageningen

In Wageningen zijn een tweetal locaties gebruikt voor het onderzoek met de Phrealog sonde:

1. De bouwlocatie bij de Droevendaalsesteeg ter plaatse van het Atlasgebouw;
2. Een tweetal peilbuizen aan de Costerweg in de afstroom van het daar aanwezige bioscherm.

2.1.1 Omschrijving van de locaties

De Droevendaalsesteeg (figuur 5)

De locatie was gelegen aan de zuidkant van de Droevendaalsesteeg ongeveer halverwege schuin tegenover het Alterra gebouw op de locatie voor het Atlasgebouw. Van de aangegeven peilbuizen was hier alleen peilbuis db4 nog beschikbaar. De andere peilbuizen waren vernield of door bouwwerkzaamheden beschadigd (fig ..).

Figuur 5: overzicht van de locatie en de ligging van de peilbuizen



De Costerweg

Langs de Costerweg te Wageningen is een bioscherm aangelegd om de in-situ sanering van het VADA-terrein af te schermen van de instromende verontreinigingen met PER uit het centrum van Wageningen. Wanneer geen maatregelen werden getroffen zou hercontaminatie optreden (zie ook SKB-project PT04.111). Het gedeelte van het scherm, waar de metingen zijn uitgevoerd was al langere tijd buiten bedrijf, omdat dit scherm gedeelte was overgenomen door een uitbreiding van de maatregel aan de Walstraat.

2.1.2 Geology and hydrology

De Droevendaalsesteeg

De bodemopbouw is weergegeven in tabel 5. Er heerst een zuidwestelijke stroming in het eerste, tweede en derde wvp. Er is een kwelstroming van het tweede wvp naar het eerste wvp. Op ca. 200m ten noordwesten van de locatie bevond zich een tijdelijke grondwateronttrekking met een capaciteit van ongeveer 60 m³/uur

Tabel 5: bodemopbouw locatie Droevendaalsesteeg

Diepte (m-mv)	Samenstelling	Geohydrologische eenheid	kD (m ² /dag)	c (dag)
0 - 8	Fijn zand, klei en veen	Deklaag		200
8 - 30>	Matig grof tot uiterst grof zand	Watervoerend pakket 1B	450	
30 - 40<	Leem en zeer fijn zand	Scheidende laag 1B		1000 - 1800
40 - 60	Matig fijn tot uiterst grof zand	Watervoerend pakket 2A	720	
60 - 62>	Matig grof sterk leemhoudend zand Scheidende laag 2A		10 - 50	
<62 - 75	Matig grof tot uiterst grof zand	Watervoerend pakket 2B	560	
75 - 77	Klei, leem en grof zand	Scheidende laag 2B		100
77 - 90	Matig grof tot uiterst grof zand	Watervoerend pakket 2C3	10	

De Costerweg

De bodem bestaat uit fijne zanden op een kleilaag op 30m-mv. Het pakket wordt als redelijk homogeen aangemerkt. De grondwaterstromingsrichting wordt enigszins beïnvloed door de stand van de rivier. De afstand tot de rivier is weliswaar ongeveer 1 km, maar de afstand tot de haven is maar 250m. De invloed hiervan wordt wellicht gedempt door kades en dichtslibben van de bodem, maar enige invloed zal dit toch wel hebben.

De gemiddelde grondwaterstroming is op basis van de verspreiding van de verontreiniging redelijk bekend. De breedte van de pluim is bij de aanleg van de schermen vastgesteld en de bronlocaties liggen in of net naast de Hoogstraat in het centrum van Wageningen. De hieruit afgeleide gemiddelde stromingsrichting is west-zuidwestelijk. M.b.v. proeven met een bromide tracer is vastgesteld, dat de grondwaterstromingsnelheid ongeveer 70m per jaar bedraagt.

2.1.3 Verdeling van de verontreiniging

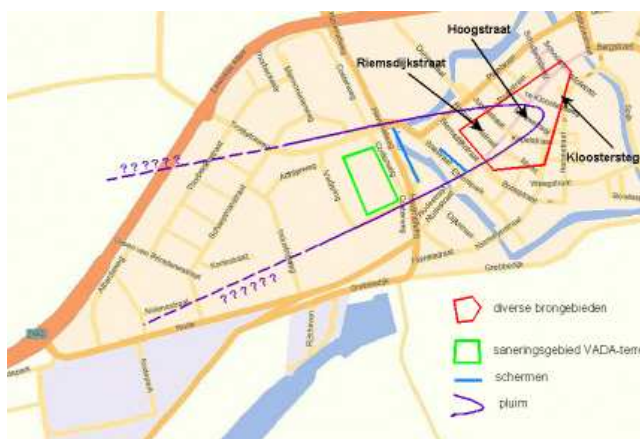
De Droevendaalsesteeg

Er is hier geen sprake van een verontreiniging, maar zowel de geologie als de hydrologie waren goed in kaart gebracht en om die reden is ervoor gekozen deze locatie toch mee te nemen in het onderzoek.

De Costerweg

Er is een sanering uitgevoerd op het VADA-terrein aan de Vadaring. Bij de uitvoering van de sanering bleek echter, dat er verontreinigd grondwater naar het terrein stroomde vanuit het centrum van Wageningen. Een tweetal locaties aan de Hoogstraat zijn waarschijnlijk de belangrijkste bronnen hiervoor (Fig. 6). Om nu te voorkomen, dat het VADA terrein zou worden herverontreinigd is een bioscherm aangelegd langs de Costerweg en later ook langs de Walstraat. Door het onderzoek aan deze schermen is de gemiddelde richting van de verspreiding bekend en loopt van de Hoogstraat over het VADA terrein verder in west-zuidwestelijke richting.

Figuur 6: overzicht ligging bronnen en de waargenomen pluim



2.2 Almelo

2.2.1 Beschrijving van de locatie

De locatie betreft het terrein van de voormalige Palthe stomerij aan de Sluiskade Noordzijde in Almelo. Op het terrein is vanaf 1873 ongeveer een eeuw lang een chemische wasserij in gebruik geweest. Bij het chemisch wassen werden stoffen als terpentijn, wasbenzine en verschillende chloorhoudende oplosmiddelen gebruikt. Deze stoffen worden momenteel ook in de bodem teruggevonden. Het Palthe-terrein te Almelo is gelegen ten noordwesten van het centrum aan de rand van een oud industrieterrein. Aanliggende terreinen zijn onder andere het voormalige Koninklijke ten Cate (textiel industrie), Texas Instruments en de gemeentelijke rioolwaterzuivering. Ten zuidwesten stroomt het Overijsselsch Kanaal dat naar het oosten overgaat in het Almelo-Nordhorn kanaal. In figuur 7 is de regionale ligging van de locatie weergegeven.

Het terrein van Palthe is niet meer in gebruik en wordt evenals het naastgelegen ten Cate terrein herontwikkeld. Zowel het Palthe terrein als het ten Cate terrein moeten eerst worden gesaneerd.



Figuur 7: ligging gebied

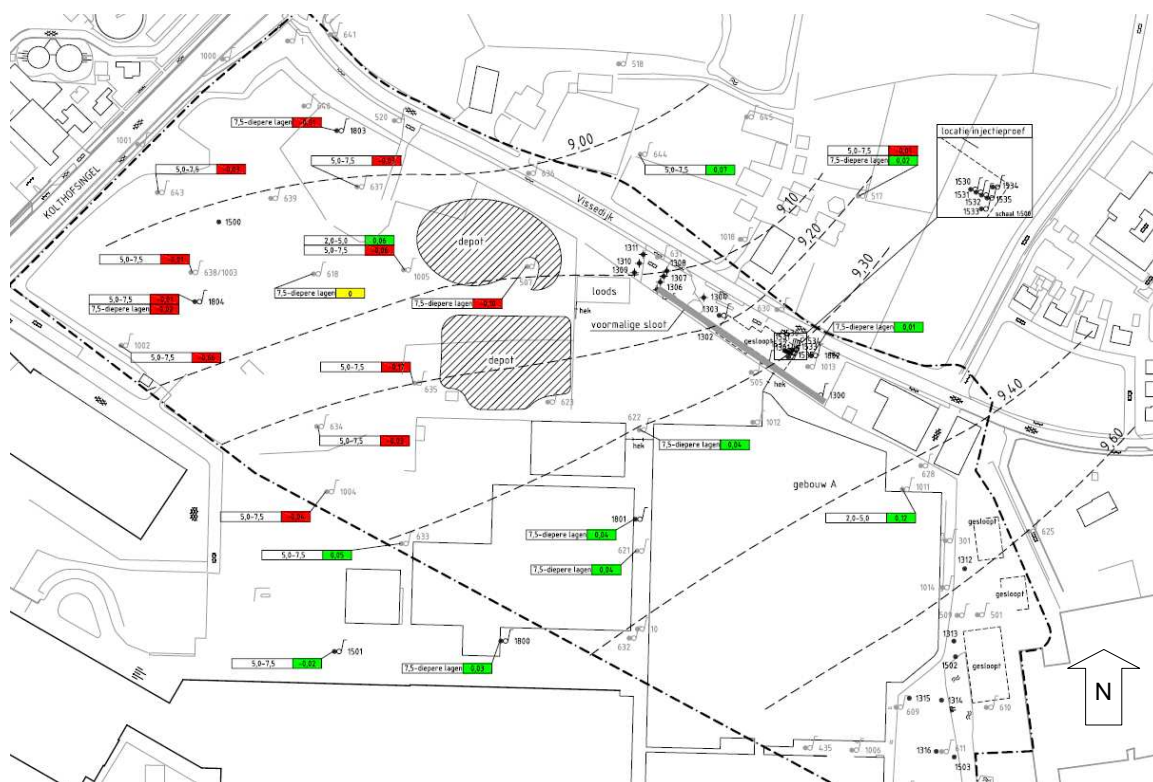
2.2.2 Geologie en geohydrologie

De regionale en lokale opbouw van de bodem zoals vastgesteld aan de hand van literatuurgegevens en verrichte boringen, is in tabel 6 schematisch aangegeven.

Tabel 6: regionale en lokale bodemopbouw

Traject (m–mv)	Beschrijving
0 – 2 à 4	Toplaag zand (matig fijn lemig) en veel grof puin
2 à 4 – 5	Zand (matig fijn) en grindhoudend
5 – 8	Zand (grof) en grindhoudend
8 – 26	Zand (matig fijn lemig)
26 – 53	Zand (fijn tot matig fijn kleihoudend) en leem (zwak tot matig zandig)
53 – 70	Klei (potklei)

De grondwaterstand varieert tussen de 1,2 en 2,3m. Er is sprake van afnemende stijghoogten van circa NAP 9,50 m op het oostelijk deel van het bedrijfsterrein tot circa NAP 9,00 m bij de Kolthofsingel (Figuur 8). Dit betekent, dat er sprake is van een grondwaterstroming in noordwestelijk richting (circa 27° westelijk van noord). Het verhang bedraagt circa 0,0015 m/m.



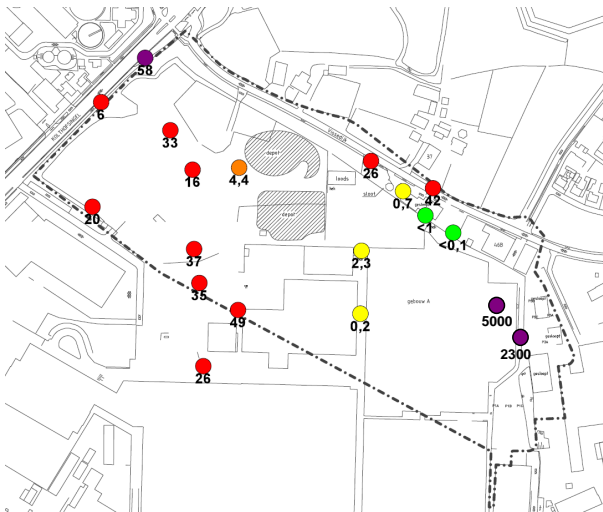
Figuur 8: stijghoogtemetingen en daaruit afgeleide isohypsen

Mede op basis van een infiltratieproef uitgevoerd in 2005 en eerder uitgevoerd onderzoek² wordt de doorlaatfactor niet groter geschat dan 7,5 à 15 m/dag. Bij het gegeven verhang gaat het dan om een stroomsnelheid van het grondwater van maximaal 11 à 23m per jaar. Er is geen duidelijk verschil waarneembaar tussen het oostelijk en het westelijk deel van het terrein.

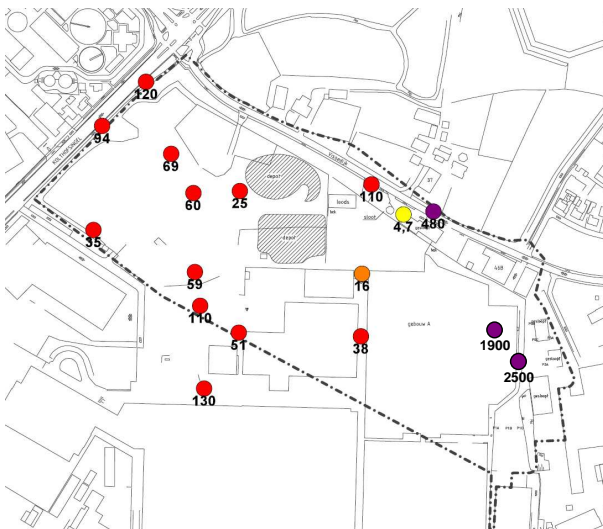
² Saneringsplan Sluiskade Noordzijde te Almelo, DHV, reg.nr. SB-MN20030601, 23 maart 2003 en Eindrapport acceptatie-onderzoek Grond- en grondwatersanering Palthe-terrein Almelo. A&G Milieutechniek, 512/20610/285/FP/eb. 1 maart 2005.

2.2.3 Verontreinigingsituatie

Het terrein is opgedeeld in verschillende deelgebieden. In het deelgebied waar de peilbuizen zijn geplaatst ten behoeve van de phrealog-metingen is een grondwaterpluim aanwezig van 1,2-cisdichlooretheen (CIS) en vinylchloride (VC). Deze pluim strekt zich uit naar noordwesten van het brongebied. In figuur 7 is een overzicht gegeven van de verontreinigingsituatie van het ondiepe grondwater met van CIS en VC. In september 2008 is de sanering van onder andere dit deelgebied opgestart. De afbraak van CIS en VC wordt gestimuleerd door bioschermen. Verontreinigd grondwater dat het scherm instroomt, wordt gevoed met de juiste bacteriën en substraat, waardoor CIS verder afbreekt naar etheen. Een belangrijke parameter voor deze wijze van behandelen is de grondwaterstromingssnelheid- en richting. Daarom is besloten om op deze locatie tevens phrealog-metingen uit te voeren.



Figuur 9: verontreiniging-situatie met CIS

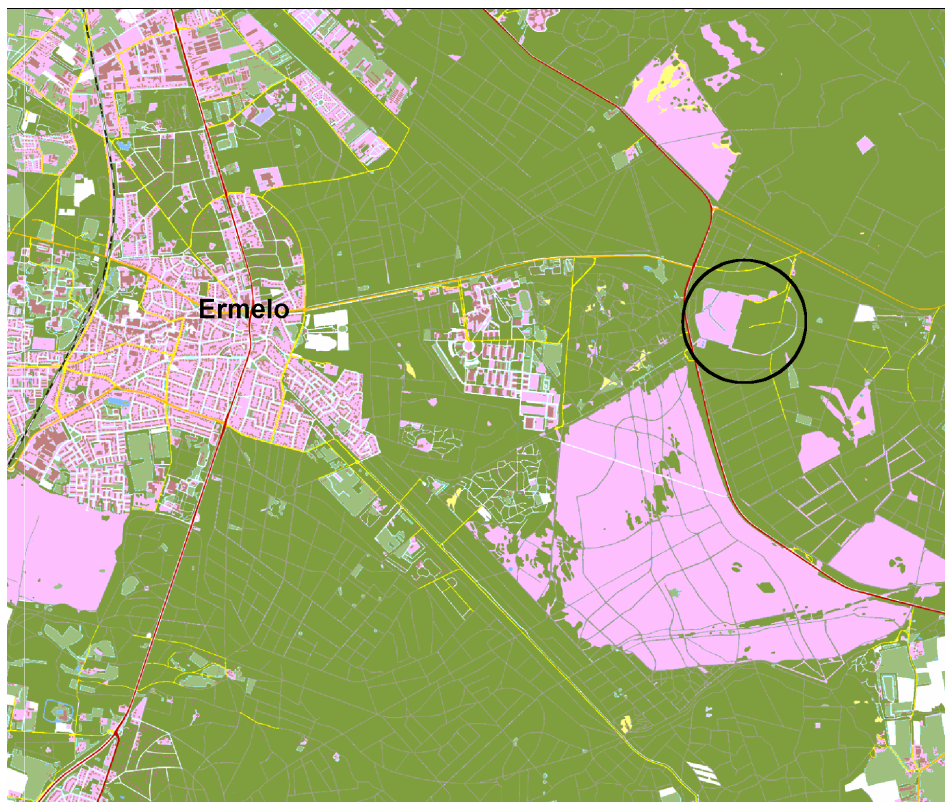


Figuur 10: verontreiniging-situatie met VC

2.3 Ermelo

2.3.1 Omschrijving van de locatie

De locatie in Ermelo is sinds 1978 in gebruik als stortplaats. De regionale ligging van de stortplaats Ullerberg is weergegeven in onderstaande figuur 11.



Figuur 11. Regionale ligging van de stortplaats

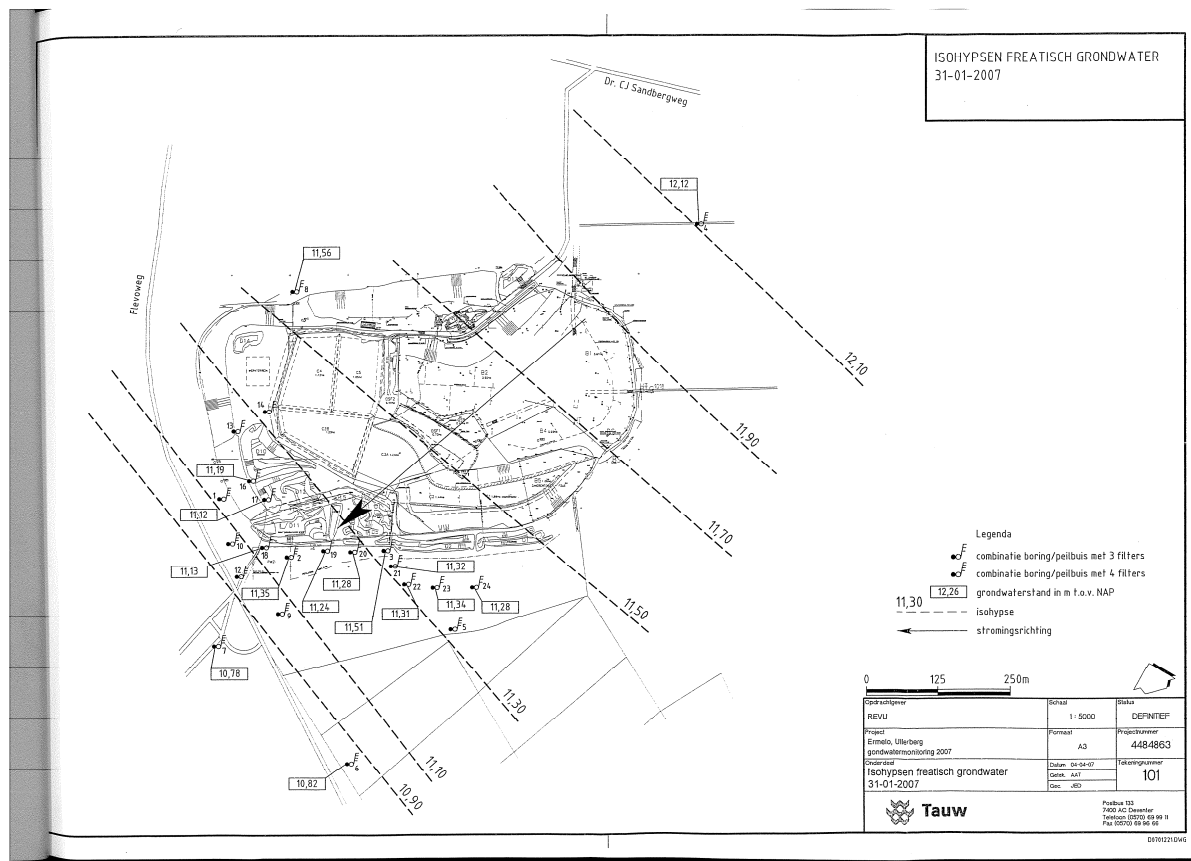
In het grondwater heeft zich een verontreinigingspluim ontwikkeld die voornamelijk bestaat uit de zware metalen nikkel, barium en arseen. Tevens zijn, in lagere concentraties, aromaten in het grondwater stroomafwaarts van de stort aangetoond.

De mogelijke verspreiding van verontreiniging afkomstig van de stortplaats wordt al gedurende langere tijd gevolgd. Vanaf juli 1992 vindt rondom stortplaats Ullerberg te Ermelo periodiek een grondwatermonitoring plaats waarbij tevens de grondwatersromingsrichting is bepaald. Om die reden is het een relevante locatie voor de validatie van de Phrelag-metingen, omdat de grondwaterstroming en verontreinigingssituatie goed in beeld zijn gebracht.

2.3.2 Geologie and hydrologie

Het maaiveld bevindt zich op NAP 30m tot NAP 20m. De bodemopbouw bestaat uit een homogeen pakket bestaande uit matig grof zand en grind tot circa NAP -10m. Op NAP -10m komt een leemlaag met variabele dikte voor. Hieronder ligt een watervoerende pakket bestaande uit matig grof tot grof zand en grind aanwezig.

In het watervoerend pakket boven de leemlaag op NAP -10m is de grondwaterstroming zuidwestelijk gericht. De stroomsnelheid bedraagt circa 30 à 40m per jaar. In het watervoerend pakket onder de leemlaag is de grondwaterstroming noordwestelijk gericht en de grondwaterstroomsnelheid bedraagt 25 à 35m per jaar. Er heerst een infiltratiesituatie van het pakket boven de leemlaag naar het pakket onder de leemlaag.

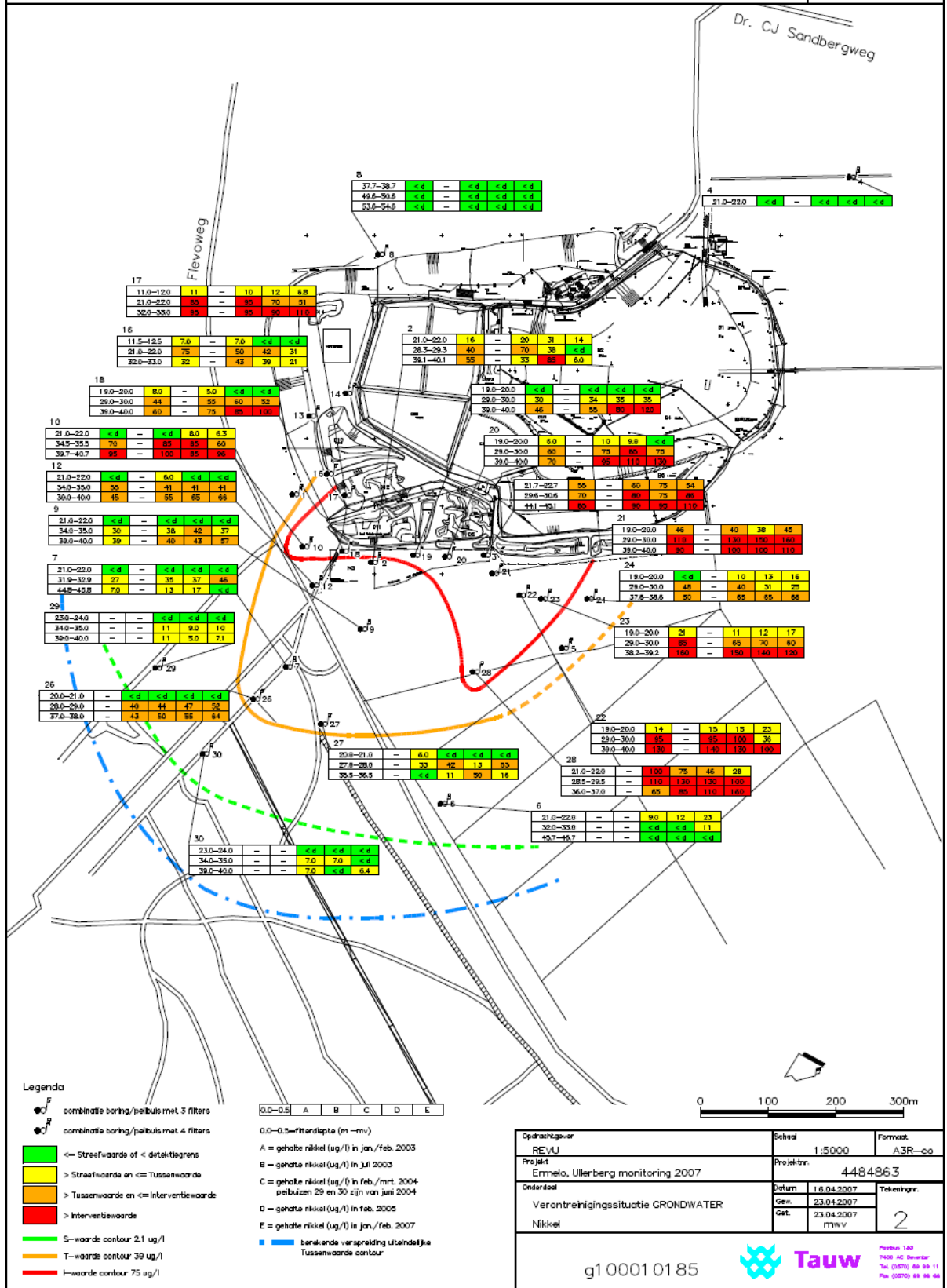


Figuur 12: ligging van de peilbuizen en stromingsrichting freatisch grondwater

2.3.3 Verspreiding van de verontreiniging

Stroomafwaarts aan de zuidwestzijde van de stortplaats heeft zich een verontreinigingspluim in het grondwater ontwikkeld met voornamelijk zware metalen. Nikkel is maatgevend voor de verontreinigingspluim. In figuur 2.3 is de verontreinigingssituatie van nikkel weergegeven in het grondwater. Uit de figuur 13 blijkt dat de zich een duidelijke pluim heeft ontwikkeld in zuidwestelijke richting ten opzichte van de stortplaats. Dit is in overeenstemming met de vastgestelde stromingsrichting in het freatische pakket.

Verontreinigingssituatie GRONDWATER
Nikkel



Figuur 13: verontreiniging met nikkel in het grondwater

2.4 Europoort

2.4.1 Omschrijving van de locatie

Het terrein ligt in een getijdengebied. Hoewel het is opgesloten tussen het Calandkanaal en het Hartelkanaal wordt verwacht, dat er zeker in de buurt van de haven een grondwaterstroming zal bestaan, die sterk kan worden beïnvloed door het tij. Kennis over een dergelijke beïnvloeding is relevant om saneringsmaatregelen daarop af te kunnen stemmen zoals de dosering van nutriënten en de zuurstofvoorziening bij de uitvoering van een aërobe in-situ sanering in de vorm van een o.a. een bioscherm. Het voordeel is, dat de grondwaterstromingsrichting op deze locatie zo dicht bij een kade goed is gedefinieerd. Er zijn een aantal metingen uitgevoerd, waarbij “over het tij” is gemeten om de variaties in de grondwaterstroming als gevolg van het tij te bepalen.

Figuur 14: locatie in Europoort



2.4.2 Geologie and hydrologie

Het bodemprofiel is uiterst gecompliceerd; er is een Begeman boring uitgevoerd, waardoor een goed omschreven profiel beschikbaar is. Er dient wel rekening mee te worden gehouden, dat een dergelijk lokaal profiel niet zondermeer vertaald kan worden naar een groter gebied. Er is een duidelijke afwisseling tussen meer en minder doorlatende veen- en kleilaagjes zichtbaar. Het grondwater staat gemiddeld op 4,5m-mv.

Figuur15: Begemanboring (de segmenten zijn 1m lang)



2.4.3 Verspreiding van de verontreiniging

De verontreiniging is ontstaan op een tankpark. De mobiele fractie van de verontreiniging verspreidt zich in de richting van de haven (zie figuur14).

3. METHODEN

3.1 Uitvoering Phrealog metingen

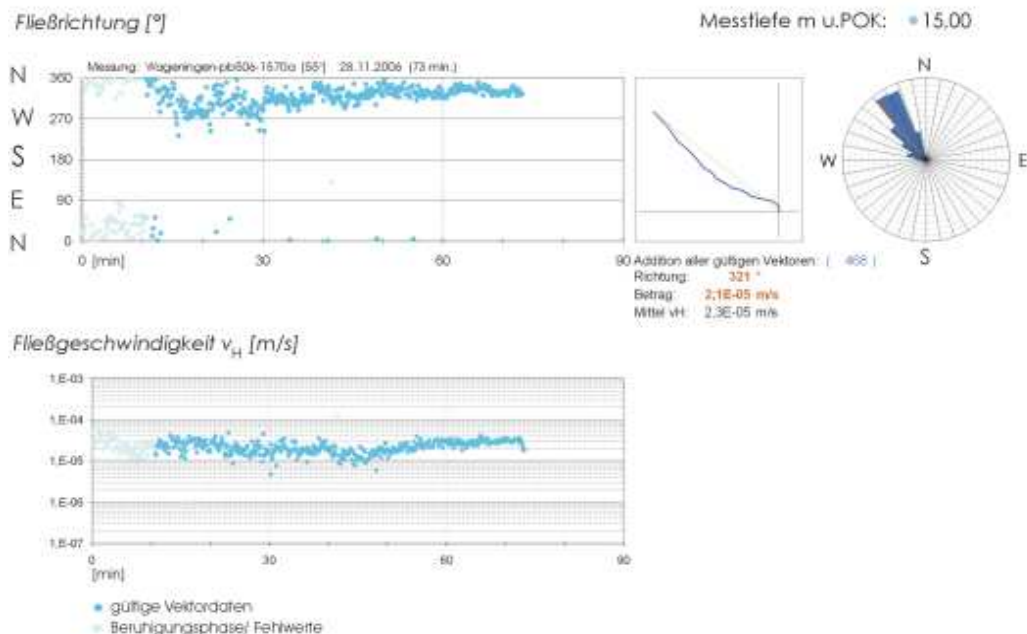
Bij de uitvoering van Phrealog-metingen wordt als volgt te werk gegaan.

1. Een bestaande peilbuis wordt gecontroleerd op diameter (minmaal 50 mm inwendig) en op plaatsing (de peilbuis moet recht zijn om vastlopen van de sonde te voorkomen). Tevens wordt de peilbuis grondig schoongepompt.
2. Voorafgaand aan de meting wordt m.b.v de camera in de sonde de richting (verticale of horizontale) en de toestand van de sleufjes in het geperforeerde gedeelte gecontroleerd op vervuiling en aangroei.
3. De sonde wordt in de peilbuis neergelaten tot op de gewenste diepte.
4. De meting wordt gestart en alle waarden worden direct vanaf het begin van de meting geregistreerd.
5. Afhankelijk van de snelheid van de grondwaterstroming dient een bepaalde tijd te worden gewacht tot de stroming stabiel wordt; het neerlaten van de sonde veroorzaakt een sterke verstoring in de peilbuis zelf en in de directe omgeving.
6. Na een zichtbare stabilisatie wordt verder gemeten tot er voldoende meetpunten zijn verzameld.
7. In verband met onregelmatigheden in de bodemstructuur rond een peilbuis worden metingen op meerdere niveaus in de peilbuis uitgevoerd om zo beeld te verkrijgen van de variatie in stroomsnelheden over een verticaal profiel.

Aan de peilbuis worden een aantal eisen gesteld m.b.t. plaatsing, omstorting en omgeving. Deze eisen zijn neergelegd in § 5.6.

3.2 Weergave van de resultaten

Het resultaat van de metingen worden als volgt gepresenteerd (Figuur16).



Figuur 16: presentatie van de meetgegevens

Er wordt een stromingsrichting aangegeven (Fließrichtung) als functie van de tijd en de punten worden opgenomen in een kompasroos. In lichtblauw zijn de punten gegeven, die niet zijn meegenomen in de meting, omdat het systeem daar nog niet als stabiel werd beschouwd (Beruhigungsphase). Tevens worden punten, die als onjuist worden beschouwd handmatig verwijderd en ook als lichtblauw weergegeven in het verdere verloop van de grafieken. Uitbijters kunnen ontstaan, doordat een deeltje uit de lichtweg verdwijnt door een verticale stromingscomponent en het systeem dan een nabij gelegen deeltje meeneemt in de verdere beeldherkenning.

In de tweede grafiek wordt de grondwaterstromingsnelheid gegeven (Fließgeschwindigkeit). Ieder meetpunt is overigens een vector en deze wordt als zodanig verder verwerkt.

Voor de snelheid van de grondwaterstroming worden twee waarden gegeven. Bij "Betrag" is het gemiddelde van de geldige vectoren in de richting van de stroming gegeven en bij "Mittel vH" is dit het gemiddelde van alle vectoren. Wisselingen in de richting van de stroming komen hierin naar voren. Wanneer de waarden dicht bij elkaar liggen is de stroming redelijk constant wat betreft de richting ervan. Naarmate de waarden verder uit elkaar liggen treedt er meer variatie in de stromingsrichting op en is de meting minder betrouwbaar.

Uit deze beide grootheden ("Betrag" en "Mittel vH") wordt de werkelijke snelheid van de grondwaterstroming in de ondergrond berekend. Bij de verdere berekeningen in dit rapport is steeds de eerste waarde als vermeld bij "Betrag" genomen. Hiervoor wordt een correctie toegepast voor de aanwezigheid van de peilbuis, omdat deze met zijn omstorting een lagere weerstand heeft dan het omliggende pakket (de α -factor) en een correctie voor de aanwezigheid van sonde in de peilbuis (de Y-factor). De berekening van deze factoren is aangegeven in de volgende paragraaf.

3.3 Evaluatie van de resultaten

De resultaten van de metingen in de peilbuis moeten worden vertaald naar de omgeving ervan – de bodem. Hiervoor dienen twee correctiefactoren te worden bepaald te weten:

1. de α -factor of convergentie factor. Deze correctiefactor wordt bepaald door de peilbuis en de directe omgeving daarvan. Deze factor is bedoeld om te compenseren voor het feit, dat de stromingsnelheid in de peilbuis hoger wordt door zijn lagere weerstand ten opzichte van zijn omgeving;
2. de Y-factor. Deze correctiefactor compenseert de aanwezigheid van de sonde en is experimenteel onder laboratorium omstandigheden bepaald. De waarde voor deze factor is 4.

De α -factor wordt afgeleid uit de volgende formule (Klotz 1978 en 1990):

$$\alpha = \frac{8}{\left(1 + \frac{k_f}{k_2}\right) \times \left\{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]\right\} + \left(1 - \frac{k_f}{k_2}\right) \times \left\{\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 + \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 - \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]\right\}}$$

waarin:

- α = convergentie factor [-]
- r_1 = binnendiameter filter [mm]
- r_2 = buitendiameter filter [mm]
- r_3 = boorgat diameter [mm]
- k_1 = k-waarde voor het filter [cm/s]
- k_2 = k-waarde voor het filter zand [cm/s]
- k_f = k-waarde voor het bodemcompartiment rond de peilbuis [cm/s]

De grondwatersnelheid volgens Darcy wordt nu berekend uit de gemeten snelheid in de peilbuis door deze laatste te delen door de α - en de γ -factor, of:

$$V_{Darcy} = \frac{V_{gemeten}}{\alpha \cdot \gamma}$$

Hieruit kan de lineaire grondwaterstromingsnelheid worden berekend door de De Darcy snelheid te delen door de porositeit (Φ) van de bodem:

$$V_{lineair} = \frac{V_{Darcy}}{\phi}$$

De richting van de grondwaterstroming wordt direct afgeleid uit de richting van de beweging van de deeltjes in vergelijking met de uitlezing van een kompas, dat zich eveneens in de sonde bevindt.

De α -factor heeft meestal een waarde tussen 2 en 3. De gevoeligheid voor variaties in de K-waarden voor het filter, de omstorting en het omliggende bodempakket is relatief gering.

In de volgende grafieken is het verband tussen de α -factor en de doorlatendheid van het filtergrind en de omringende bodem weergegeven. Tevens is gekeken naar de invloed van de diameter van het boorgat en die van het filter. De invloed van deze parameters is in dezelfde orde van grootte als die voor de K-waarden. Om die reden is een waarde van 2,5 gebruikt in die gevallen, dat er onvoldoende gegevens waren voor de berekening van α .

Fig 17
Invloed filtergrind

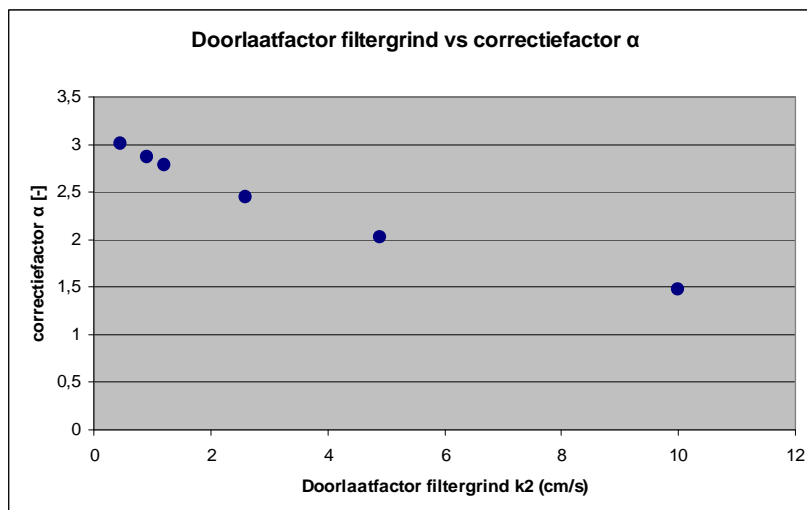
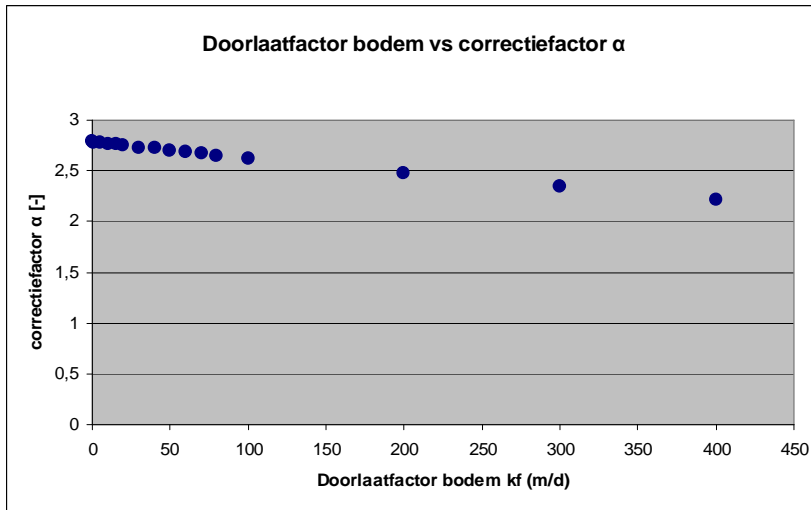
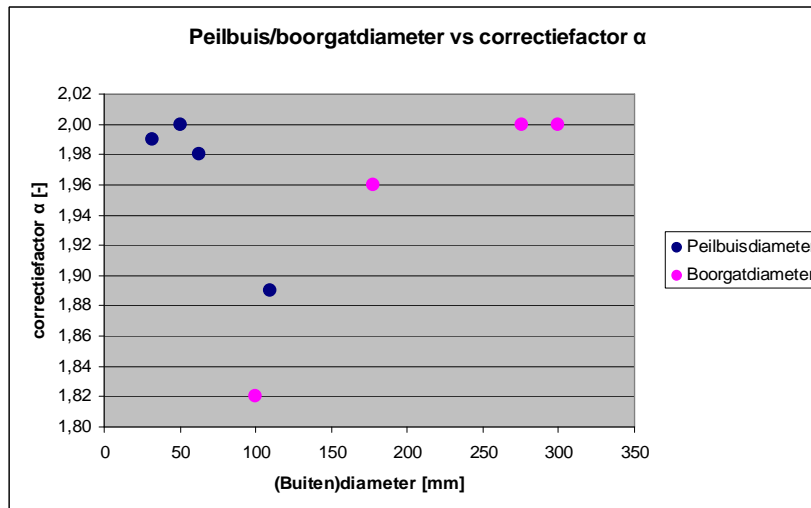


Fig 18. Invloed bodemmateriaal



Figuur19: invloed diameter peilbuis en boorgat



De α - en Y-factor leveren samen een correctiefactor van ongeveer 10 t.o.v. de gemeten grondwaterstroming in de peilbuis op. Beide factoren kunnen alleen onder gecontroleerde laboratoriumcondities worden geverifieerd. Er dient een bekende grondwaterstroming te worden aangelegd en ook de verschillende K-waarden en diameters moeten nauwkeurig kunnen worden ingesteld. Naar aanleiding van de resultaten van het onderzoek is de firma Phrelog geadviseerd deze aspecten nog eens onder de loep te nemen.

Behalve de α -factor is ook de verstoring van belang die wordt veroorzaakt door het inbrengen van de sonde. Weliswaar wordt de "Beruhigungsphase" in acht genomen, maar de verstoring kan groter zijn doordat bij het inbrengen van de sonde op een grotere diepte in een net passende peilbuis een aanzienlijke hoeveelheid grondwater wordt weggeperst naar de omgeving. In het geval van een geringe snelheid van de grondwaterstroming en een niet homogeen pakket zou die verstoring nog enige tijd kunnen aanhouden. Bij meerdere metingen is waargenomen, dat over de meetperiode de snelheid van de meting terugloopt. Doordat de gegevens op een logaritmische schaal zijn weergegeven, kunnen deze verschillen significant zijn (hoofdstuk 5)

4. RESULTATEN

De resultaten van de metingen zijn neergelegd in grafieken en een kompasroos. De grafieken geven zowel de richting als de snelheid van de grondwaterstroming weer. Ieder meetpunt is weergegeven. Aangezien het enige tijd duurt voordat de verstoring van het inbrengen van de sonde is verdwenen, wordt het hierdoor beïnvloede deel van de meetperiode niet meegenomen in de verdere berekeningen. Dit deel van de metingen is in lichtblauw weergegeven. De metingen zijn gebaseerd op beeldherkenning, waarbij het verschuiven van een patroon aan deeltjes wordt gevolgd. Het is mogelijk dat een relevant deeltje net uit het lichtpad verdwijnt en daardoor niet meer wordt waargenomen. Wanneer het systeem dan een ander deeltje in het patroon opneemt ontstaat een plotseling sterk afwijkende waarneming. Ook deze wordt dan bij de evaluatie niet meegenomen en wordt in de grafiek eveneens in licht blauw gegeven.

Uit de beschouwde meetpunten worden de richting en snelheid van de grondwaterstroming in de peilbuis afgeleid. Op basis van de verdere gegevens van de peilbuis kunnen de correctiefactoren worden berekend teneinde de snelheid in het beschouwde pakket te berekenen. Voor de richting van de stroming hoeft in principe geen correctie te worden uitgevoerd, omdat deze in het midden van de peilbuis gelijk is aan die in de omgeving ervan.

Voorafgaand aan de metingen wordt m.b.v. een ingebouwde camera de peilbuis geïnspecteerd om na te gaan of deze niet verstopt is en om de precieze dieptes van de geperforeerde sectie vast te stellen.

In de volgende paragrafen worden de gegevens per locatie gepresenteerd. Voor de overzichtelijkheid zijn de grafieken van de metingen in de bijlage opgenomen.

4.1 Wageningen

In Wageningen zijn een tweetal locaties onderzocht:

1. De omgeving van het Atlasgebouw
2. Het bioscherm.

4.1.1 Het Atlasgebouw

In de omgeving van het Atlasgebouw bleek van de verwachte peilbuizen alleen peilbuis db4 nog aanwezig en toegankelijk. Er zijn op twee dieptes metingen uitgevoerd te weten op 17,50 en op 18,20m onder de bovenzijde van de peilbuis. De bovenzijde van de peilbuis bevindt zich op 0.45m bovenmaaiveld. De meetdieptes komen overeen met 17,05 en 17,75m-mv.

De meting op 17,05m-mv vertoont wat betreft de richting een aanzienlijke spreiding. De schaalverdeling van de puntengrafiek loopt van 0 tot 360°, waardoor bij een noordelijke richting van de stroming de bijbehorende punten juist boven de basis en juist onder de bovenzijde van de grafiek liggen. Bij de meting op 17,75m-mv is dit duidelijker te zien, omdat daar de richting van de grondwaterstroming eenduidiger is. De snelheid van de grondwaterstroming is op 17,05m-mv laag. Op 17,75m-mv werd een hogere snelheid gemeten (Tabel 7).

Tabel 7: resultaten van de metingen aan de Droevendaalse steeg

peilbuis nr	diepte m-mv	duur uur:min	richting	snelheid m/s	correcties $\alpha \cdot \gamma$	V – Darcy m/s	V-Darcy m/d	V-lineair m/d
db4	17,05	1:20	N-NO	$5,5 \cdot 10^{-7}$	10	$0,6 \cdot 10^{-8}$	0,00	0,02
db4	17,75	1:10	N-NO	$1,9 \cdot 10^{-4}$	10	$1,9 \cdot 10^{-5}$	1,64	5,47

4.1.2 Het bioscherm

Het bioscherm is gelegen langs de Costerweg. Er zijn twee peilbuizen onderzocht, die op twee verschillende dieptes zijn geplaatst (pb506 en 706). De peilbuizen staan in de afstroom van het bioscherm (SKB-project PT04.111) en zijn bedoeld voor de monitoring van de effectiviteit van het scherm.

Er zijn zowel eind november 2006 als in mei 2008 metingen uitgevoerd (Tabel 8).

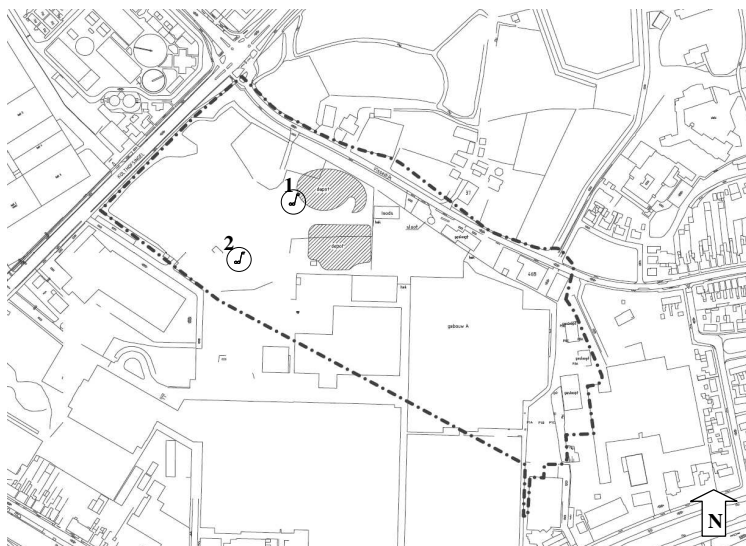
Tabel 8: resultaten van de metingen aan de Costerweg

peilbuis nr	Datum meting	diepte m-mv	duur uur:min	richting	snelheid m/s	correcties α, γ	V – Darcy m/s	V-Darcy m/d	V-lineair m/d
506 *	nov 2006	15,00	1:00	NW-N	$2,1 \cdot 10^{-5}$	8,8	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,21	0,69
506	nov 2006	18,20	1:03	NW	$8,0 \cdot 10^{-6}$	8,8	$8,0 \cdot 10^{-7}$	0,07	0,23
506	mei 2008	16,90	1:20	ZO	$1,2 \cdot 10^{-5}$	8,8	$1,4 \cdot 10^{-6}$	0,12	0,39
506	mei 2008	17,90	0:55	ZW	$1,1 \cdot 10^{-5}$	8,8	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0,11	0,36
706	nov 2006	23,00	1:00	ONO-O	$1,8 \cdot 10^{-4}$	8,8	$2,0 \cdot 10^{-5}$	1,77	1,08
706	nov 2006	26,00	1:00	ONO	$1,1 \cdot 10^{-4}$	8,8	$1,3 \cdot 10^{-5}$	5,89	3,6
706	mei 2008	25,45	1:00	NNW-N	$2,9 \cdot 10^{-5}$	8,8	$3,3 \cdot 10^{-6}$	0,28	0,21
706	mei 2008	25,95	1:00	NO-N	$2,1 \cdot 10^{-5}$	8,8	$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,95	0,69

4.2 Almelo

De peilbuizen ten behoeve van de phrealogmetingen zijn op twee locaties op 4-5 en 7-8m–mv geplaatst (figuur 20). De phrealogmetingen zijn in mei 2008 uitgevoerd. De twee peilbuisfilters op 4-5 m–mv bevinden zich in een bodemlaag met iets fijnere textuur dan die op 7-8 m –mv. De bodem wordt naar de diepte toe grover en meer puinhoudend. In Tabel 9 zijn de resultaten van de metingen samengevat. De meetresultaten zelf zijn gegeven in de bijlage.

Figuur 20: locaties van de peilbuizen ten behoeve van de phrealogmetingen



Tabel 9: resultaten van de metingen in Almelo

peilbuis nr	locatie	diepte m-mv	duur uur:min	richting	snelheid** m/s	correcties a.y	V – Darcy m/s	V-Darcy m/d	V-lineair m/d
P4	1	4,10	1:00	ZW-W	$2,9 \cdot 10^{-5}$	10	$2,9 \cdot 10^{-6}$	0,25	0,84
P3	1	7,05	1:00	ZW-W	$6,7 \cdot 10^{-6}$	10	$6,7 \cdot 10^{-7}$	0,06	0,19
P2	2	4,05	1:00	NNW-N	$1,8 \cdot 10^{-5}$	10	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0,16	0,52
P1	2	7,00	0:55	ZW	$3,8 \cdot 10^{-5}$	10	$3,8 \cdot 10^{-6}$	0,33	1,09

De snelheid in het diepe filter op locatie 2 is circa 10 keer zo hoog als die op locatie 1. Daarom is met de camera in de sonde de binnenzijde van de peilbuizen geïnspecteerd om te zien of er versmering of dichtslibbing was ontstaan in het diepe filter op locatie 1. Dit was niet het geval.

4.3 Ermelo

De peilbuizen zijn in mei 2008 gemeten. Alle peilbuisfilters bevinden zich boven de leemlaag in het ondiepe watervoerend pakket. In Tabel 10 zijn de resultaten van de metingen samengevat. De meetresultaten zelf zijn gegeven in de bijlage.

De resultaten van de snelheid zijn met behulp van de correctiemethode omgerekend naar de daadwerkelijke grondwaterstromingsnelheden.

Tabel 10: resultaten van de metingen ter plaatse van stortplaats De Ullerberg te Ermelo

peilbuis nr	diepte m-mv	duur uur:min	richting	snelheid** m/s	correcties a.y	V – Darcy m/s	V-Darcy m/d	V-lineair m/d
23/2	29,85	0:35	O	$3,2 \cdot 10^{-5}$	10	$3,2 \cdot 10^{-6}$	0,28	0,92
23/2	29,75	0:50	ZO-O	$2,7 \cdot 10^{-5}$	10	$2,7 \cdot 10^{-6}$	0,23	0,78
23/3	19,85	0:34	NO	$2,8 \cdot 10^{-5}$	10	$2,8 \cdot 10^{-6}$	0,24	0,81
24/2	29,90	0:40	OZO	$4,1 \cdot 10^{-5}$	10	$4,1 \cdot 10^{-6}$	0,35	1,18
24/2	29,80	0:50	ZZO	$3,1 \cdot 10^{-5}$	10	$3,1 \cdot 10^{-6}$	0,27	0,89
24/3	19,85	1:00	NW	$2,2 \cdot 10^{-5}$	10	$2,2 \cdot 10^{-6}$	0,19	0,63

Uit de tabel blijkt dat metingen resulteren in extreem hoge grondwaterstromingsnelheden van 230 tot 430 meter per jaar.

Overigens namen gedurende de metingen de snelheden van het grondwater in vrijwel alle gevallen nog af (zie Bijlage). Weliswaar was de afname onvoldoende voor het verklaren van de verschillen, maar het kan een van de oorzaken zijn, dat de metingen hoog uitvallen.

4.4 Europoort

Er zijn metingen uitgevoerd in 3 peilbuizen met de nr's 10.1, 13.1 en 16.1. De nummers van de peilbuizen geven tevens de einddiepte van de boringen weer.

Er zijn metingen uitgevoerd op 6,0 en 9,0 m-mv in peilbuis 10.1 en op 10,2 en 14,2 m-mv in respectievelijk de peilbuizen 13.1 en 16.1.

Tabel 11: resultaten van de metingen in Europoort

peilbuis nr	diepte m-mv	duur uur:min	richting (°)	snelheid	correcties a.y	V – Darcy m/s	= m/d	V-lineair m/d
P10.01	6,0	12:20	32	10 E-4	16,25	$1,3 \text{ E-}5$	1,12	3,7
	9,0	22:49	200	8,9 E-5	14,76	$6,0 \text{ E-}6$	0,52	1,7
P13.01	10,2	6:0	275	5,5 E-5	14,76	$3,7 \text{ E-}6$	0,32	1,1
P16.01	14,2	10:28	334	6,7 E-6	14,76	$4,5 \text{ E-}7$	0,04	0,13

Bij de interpretatie van de gegevens is tevens gekeken naar de resultaten van de Begemann boring en uiteraard de waterstanden gedurende de getijdenwisselingen.

Uit de metingen kunnen de volgende resultaten worden afgeleid.

- De meting op 6m-mv is ter hoogte van de kleilaag uitgevoerd (laag nr. 3 van de Begemann boring). De stroming is ongelijkmatig maar met een lichte voorkeur voor noord-oost. Er is geen duidelijke invloed van getijdenwerking. De stroomsnelheid is hoog. Dit komt niet overeen met de verwachte doorlatendheid van de klei. Zeer waarschijnlijk staat de meting onder invloed van de zandlagen eronder en boven. Met name de laag er net boven is redelijk grof (zandfractie mediaan [ZM]: 0,42mm).
- De meting op 9m-mv laat een constante stroming zuidwaarts zien. Gedurende een periode van ca. 2 uur voor het laagste punt van het tij, is de stromingssnelheid laag en zijn de metingen van de stromingsrichting onstabiel. Met opkomende tij is de stromingsrichting onveranderd zuidelijk. Dit komt overeen met de aanname dat gedurende hoogwater infiltratie optreedt. Helaas is het aantal meetbare deeltjes zo sterk afgenomen na een meetperiode van 8 uur dat metingen gedurende de 15 uur daarna niet betrouwbaar genoeg meer zijn.
- De meting op 10,2m-mv is gedurende bijna een gehele getijdencyclus uitgevoerd. De metingen geven aan dat er een toenemende stromingssnelheid is tijdens hoogwater. Oorspronkelijk en tijdens het opkomende water is de stromingsrichting West met een snelheid van 0,3m/d (DARCY). Na het bereiken van het hoogste waterstand verandert de richting naar Zuid met een stromingssnelheid van 4,1m/d (DARCY). Gaande weg het afgaande tij, neemt de snelheid af en wordt uiteindelijk lager dan 0,3m/d. Na het bereiken van het laagwaterpeil is de stromingssnelheid 0,1 m/d. Deze snelheid blijft onveranderd gedurende het opkomende tij. Gedurende deze periode is de richting onstabiel, maar blijft netto gezien in zuidelijke richting. Na het bereiken van het hoogwater punt is er zeker sprake van een situatie waarin infiltratie plaats vindt en vertoont een vertraagde reactie op het opkomende tij. Over het algemeen is de stromingsrichting Zuid en vertoont geen 180° verandering als gevolg van tijcyclus. Op 40, 70 en 220 min na opstart van de metingen worden pieken waargenomen in de stromingssnelheid. Hoogst waarschijnlijk worden deze pieken veroorzaakt door passerend vrachtwagens (trillingen).
- De meting op 14,2 m-mv is ook uitgevoerd gedurende bijna een gehele getijdencyclus. De meetperiode laat duidelijk zien dat er sterk variërende stromingsnelheden in de orde grootte van 1×10^{-5} tot 1×10^{-3} m/s in de peilbuis worden waargenomen. De stromingsrichting gedurende het afgaande tij is continu draaiende met een zwaartepunt richting NNW en NNO. Dit komt overeen met de aanname dat er drainerende werking is van het kanaal tijdens laagwater condities, alhoewel een richtingsverandering als gevolg van tijverschil niet bewezen lijkt. De onstabiele stroming kan veroorzaakt worden door de diepte waarop gemeten wordt. De diepte van de meting bevindt zich in een overgangszone van zand naar kleilagen. Helaas is het aantal meetbare deeltjes na 4 uur sterk afgenomen, zodat de veranderingen van stromingsrichting en snelheid de resterende 6 uur niet waargenomen konden worden. Omdat stromingsrichting en snelheid in de peilbuis voortdurend variëren hebben de uitgevoerde metingen slechts een beperkte waarde.

Gedurende metingen heeft zich een technische storing voorgedaan in het kompas. Dit heeft echter de resultaten zoals hierboven beschreven niet beïnvloed doordat het mogelijk was de sonde zo te positioneren, dat het kompas noorden overeenkwam met het werkelijke noorden.

5. DISCUSSIE

5.1 Wageningen

5.1.1 Het Atlasgebouw

De metingen in peilbuis db4 vertonen een sterk verschillend beeld op de beide diepten. Op 17,05m-mv is het beeld warrig. Hierbij moet er rekening mee worden gehouden, dat de snelheid van de stroming erg laag was. De verstoring door het plaatsen van de sonde sterft dan maar langzaam uit. Het is de vraag of dit beeld niet het gevolg is van het nog niet zijn uitgedempt van deze verstoring. Uit de gegevens werd een noordelijke richting van de stroming afgeleid. De gegevens over de wijze van plaatsen van de peilbuis ontbreken. Om de snelheid van de grondwaterstroming als gemeten in de peilbuis om te rekenen naar de lineaire snelheid in het pakket wordt uitgegaan van een gemiddelde praktijkwaarde voor $\alpha=2,5$ en $\gamma=4$. De gemeten stromingsnelheid van $2,4 \cdot 10^{-6}$ vertaalt zich dan in een lineaire snelheid in het omringende pakket van ca 2 cm/dag of 7,5m/jaar.

De meting op 17,75m-mv laat een veel eenduidiger beeld zien. De snelheid van de grondwaterstroming is hier ook significant hoger, waardoor de verstoring van het plaatsen van de sonde ook veel sneller uitsterft. Op basis van dezelfde berekening wordt uit de gemeten snelheid van $1,9 \cdot 10^{-4}$ een lineaire snelheid in het pakket van 2000m per jaar berekend.

Het grote verschil tussen beide metingen suggereert, dat hier in een specifieke watervoerende laag in het pakket zou zijn gemeten. Daarnaast was in eerste instantie de noordelijke richting van de stroming merkwaardig, omdat de verwachte richting zuidelijk zou zijn naar de Rijn. Ten behoeve van de bouwwerken in de omgeving was echter er een tijdelijke onttrekking van grondwater geplaatst met een capaciteit van ca 60 m³/uur globaal ten noordwesten van de locatie, hetgeen de meting zal hebben beïnvloed.

5.1.2 De Costerweg (het bioscherm)

Bij de Costerweg zijn in twee peilbuizen tweemaal metingen uitgevoerd. Het scherm was voorafgaand aan de metingen uitgezet.

Peilbuis 506 heeft een filterstelling van 15 – 19m-mv. De metingen van november 2006 zijn dus uitgevoerd vrij dicht aan de bovenkant van het geperforeerd gedeelte van het filter (15 m –mv) en vrijwel onderin (18,2m –mv, het meetgedeelte van de sonde bevindt zich op 70 cm van de onderzijde van de sonde). De resultaten van de metingen komen redelijk overeen. De richting van de grondwaterstroming is zuidoostelijk tot noordwestelijk en het gemiddelde van de snelheid van de grondwaterstroming is $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Dit komt overeen met een lineaire snelheid van 85 m/jaar. Met bromide als tracer is in het scherm een stromingssnelheid van ongeveer 70 m/jaar gevonden en DHV ging steeds uit van een waarde van ruim 70m per jaar. De gemeten richting van de stroming is nogal variabel. In november 2006 is deze noordwestelijk gericht en in mei 2008 juist gemiddeld zuidelijk.

Voor peilbuis 706 met een filterstelling van 23 – 27m-mv zijn de verschillen tussen de twee meet rondes groter. De snelheid van de grondwaterstroming in deze laag is in november 2006 bijna een factor 10 hoger dan in peilbuis 506 en de richting is oostelijk in plaats van zuidelijk. In mei 2008 is dit verschil een factor 2 tot 3 hoger met betrekking tot de snelheid en is de richting noordelijk in plaats van zuidelijk voor peilbuis 506.

Gezien de verdeling van de verontreiniging over het gebied is er sprake van een gemiddeld westelijke tot zuidwestelijke stroming. Deze richting kan niet worden afgeleid uit de metingen ook niet, wanneer de richtingen ongeveer zouden worden gemiddeld.

5.2 Almelo

Metingen in de filters op locatie 1 en in het ondiepe filter op locatie 2 laten ongeveer eenzelfde, zuidwestelijke stromingsrichting zien. In het ondiepe filter op locatie 2 is er sprake van een grote spreiding in de metingen van de stromingsrichting. De meting is in het freatische grondwater uitgevoerd en de ervaring leert dat metingen relatief dicht aan het maaiveld gevoelig zijn voor storingen van buiten af. Voorbij komend verkeer was de oorzaak van de storingen tijdens de ondiepe meting op locatie 2. De diepe meting op locatie 2 geeft een noordwestelijke stromingsrichting, een richting die significant afwijkt van die is gemeten in de andere drie filters. De richting voldoet echter wel aan de verwachtingen op basis van eerdere stijghoogtemetingen. Het is zeer onwaarschijnlijk dat de grondwaterstromingsrichting op 7m diepte zo significant verschilt van die op 4m diepte, terwijl beide filters in hetzelfde watervoerende pakket staan.

Wat betreft de lineaire stromingssnelheden in de bodem valt als eerste op dat zij hoog zijn voor Nederlandse begrippen. De correctiefactoren α en γ zullen daarom nader beschouwd moeten worden. Ook in filters in Ermelo zijn met Phrealog snelheden gemeten in een dergelijke orde van grootte

De grondwaterstromingssnelheden in de ondiepe filters komen sterk overeen. De stromingssnelheden in het diepe pakket zou bij eenzelfde verhang op basis van de grovere bodemopbouw enigszins hoger kunnen zijn dan in het ondiepe pakket. Dit nemen we alleen waar in het diepe filter op locatie 2. In het diepe filter op locatie 1 is een beduidend lagere stromingssnelheid gemeten (69m per jaar). De gemeten lineaire snelheden in de bodem wijken sterk af van die zijn afgeleid uit stijghoogtemetingen en doorlaatfactoren. De verschillen lopen uiteen van minimaal een factor 3 tot bijna 20. Overigens liepen de stromingssnelheden in 3 van de 4 gevallen nog terug gedurende de metingen. Alleen het diepe filter op locatie 1 liet dit niet in duidelijke mate zien. Dit is ook de peilbuis met de beste overeenkomst tussen de meting en de verwachte stromingssnelheid.

In tabel 12 zijn de discrepanties en overeenkomsten samengevat tussen de grondwaterrichting- en snelheden gemeten met Phrealog en berekend op basis van stijghoogten en doorlaatfactoren. In 7 van de 8 metingen (richting + snelheid) komt het beeld dat met Phrealog wordt verkregen niet overeen met dat berekend op basis van stijghoogten en doorlaatfactoren.

Tabel 12: overeenkomsten en verschillen tussen resultaten van Phrealogmetingen en schattingen op basis van stijghoogten en doorlaatfactoren

	Locatie 1 4,10 m -mv		Locatie1 7,05 m -mv		Locatie 2 4,05 m -mv		Locatie 2 7,00 m -mv	
	Richting	Snelheid (m/jaar)	Richting	Snelheid (m/jaar)	Richting	Snelheid (m/jaar)	Richting	Snelheid (m/jaar)
Phrealog	ZW	306	ZW	69	ZW	190	NW	398
Stijghoogten en doorlaatfactoren	NW	11-23	NW	11-23	Nw	11-23	NW	11-23

5.3 Ermelo

De resultaten van de individuele metingen laten een consistent beeld zien. Er is weinig ruis in de meetdata in zowel de stromingsrichting als in de stroomsnelheid. Tussen de metingen op twee verschillende dieptes in peilbuizen 23/2 en 24/2 varieert de stromingsrichting van oost tot zuidoost.

In de meting in de peilbuisfilters 23/3 en 24/3 met een meetdiepte van circa 20 m –mv varieert de stromingsrichting van noordoost tot noordwest.

Opvallend is dat geen enkele meting een zuidwestelijke stromingsrichting constateert. Op basis van jaarlijkse peilgegevens en op basis van de verontreinigingssituatie blijkt dat in het pakket waarin de metingen zijn verricht een zuidwestelijke stromingsrichting overheerst.

Uit de Phrealog-metingen worden, na correctie, extreem hoge snelheden van 230 tot 430 meter per jaar berekend. Uit de gegevens van het verhang, de grondwaterstand en de doorlaatfactoren, zoals ingeschat uit de boorgegevens, worden grondwaterstroomsnelheden berekend van 30 tot 40 meter per jaar. Dit is ruim een factor 10 lager dan de Phrealog-waarden. Ook hier is zichtbaar, dat de stroomsnelheid van het grondwater vooral in peilbuis 23 nog terugliep gedurende meting, waardoor de uiteindelijke waarde een factor 2 tot 3 lager zou uitvallen. Waarschijnlijk is de verstoring bij het inbrengen van de sonde veel groter dan aangenomen door Phrealog. Dit is een belangrijk aandachtspunt bij het gebruik van de methode.

De individuele metingen laten wel een consistent beeld zien en lijken correcte waarden te geven. Een probleem was dat er meerdere peilbuizen in een boorgat waren geplaatst. Dit betekent, dat de peilbuis waarin werden gemeten niet in het midden van het boorgat staat en dat er door de andere peilbuizen ook verstoringen van het stromingspatroon kunnen zijn opgetreden. Wanneer hier nog het teruglopen van de stromingsnelheid gedurende de meting wordt gevoegd, zouden de verschillen kleiner worden dan hiervoor aangegeven. Oorspronkelijk was het de bedoeling om ook in de diepste peilbuizen een meting uit te voeren, omdat deze niet-geneste peilbuizen betreffen. De sonde liep daar echter steeds vast op een kromming, die vermoedelijk werd veroorzaakt door het plaatsen van de ondiepere peilbuizen in hetzelfde boorgat.

5.4 Europoort

Uit de metingen van de grondwaterstromingsrichting en –snelheid blijkt dat op 6 m-mv de richting hoofdzakelijk noord(-oost) gericht is (naar de haven) en dat er weinig invloed van de getijdenwerking merkbaar is. Dit kan verband houden met de oeverbescherming die zeker tot die diepte aanwezig is. Verder is de stroming hoger dan verwacht mag worden in de kleilaag. De vraag is of er door de zandlagen boven en onder de kleilaag en de omstorting van de peilbuis een soort kortsluitstroming ontstaat, die de metingen op deze wijze beïnvloedt.

Op 9 m-mv is een zuidwaartse stroming te zien. Gedurende opkomend tij treedt infiltratie van uit de haven op. Dit effect werd ook verwacht. De meting kon niet over een volledige cyclus worden uitgevoerd, omdat later in de meting de aantallen deeltjes in het water te laag werden voor de uitvoering van een betrouwbare meting. Gezien de verspreiding van de verontreiniging is het wel aannemelijk, dat er ook stroming richting de haven optreedt. De tijdstippen voor hoog- en laagwater zijn uit de tabel voor Maassluis genomen als dichtstbijzijnde punt. Hoek van Holland kent twee momenten van hoogwater ongeveer een uur na elkaar, daarnaast zijn ook windinvloeden van belang voor het langer of korter doorzetten van de getijdenbeweging. De waarnemingen zijn wel redelijk in overeenstemming met de verwachte grondwaterstroming

Op ca. 10m-mv wordt een toenemende stromingsnelheid gemeten tijdens hoogwater. Netto gezien blijft de stromingsrichting zuidelijk en is er dus sprake van infiltratie van water uit de haven. Op ca. 14m-mv verandert de stromingsrichting continu tussen noordnoordwest en noordnoordoost en verloopt dus in de richting van de haven. Dit beeld is ook in overeenstemming met de verspreiding van de verontreiniging, die met name op deze diepte mobiele componenten bevat. De metingen, die zijn uitgevoerd op deze locatie leveren een beeld op, dat overeenstemt met de verwachtingen zowel wat betreft de richting en de snelheid van de waargenomen grondwaterstromingen..De getijdenbeweging heeft een duidelijke invloed, waarbij de stromingsnelheid wordt beïnvloed door de waterstand in de aanliggende haven. Bij het uitvoeren van de metingen moet wel rekening worden gehouden met het bodemprofiel. De meting op 6m-mv laat onverwachte resultaten zien, maar gezien de kleilaag, die op die hoogte aanwezig is, is dat ook niet zo verwonderlijk. Het betekent in feite, dat het niet zo zinvol is een dergelijk meting uit te voeren, omdat weliswaar de peilbuis met packers wordt afgesloten, maar de omstorting nog steeds een transportroute blijft. Door deze kortsluitstroming kan een verhoogde doorstroming in de meetcel optreden.

5.5 Waarde van de methode voor het begrip van de hydrologie van een locatie

De met Phrealog verkregen resultaten komen maar zeer ten dele overeen met het op basis van andere gegevens verkregen beeld. De indruk bestaat, dat de methode potentie heeft, maar dat de uitvoering voor de Nederlandse situatie nog duidelijk verbetering en standaardisering behoeft. In de volgende paragrafen wordt hier nader op ingegaan.

5.6 Voorwaarden voor het gebruik van de Phrealog sonde

Voor het gebruik van de Phrealog sonde moet aan een aantal voorwaarden worden voldaan, waarbij de plaatsing van de peilbuis, waarin de meting gaat worden uitgevoerd, van groot belang is. Daarnaast dient ook informatie beschikbaar te zijn over de geologische opbouw van het bodemprofiel, waarin de metingen worden uitgevoerd. Deze beïnvloeden de α - en wellicht ook de γ -factor voor de meting en derhalve ook de berekende snelheid van de grondwaterstroming.

5.6.1 Plaatsing peilbuis

Een peilbuis moet aan een aantal voorwaarden voldoen:

- De peilbuis zelf moet recht zijn en voor de huidige sonde een binnendiameter van tenminste 50mm hebben (de sonde heeft een buitendiameter van 48mm).
- De lengte van de sonde onder het meetpunt is ongeveer 0,7m. Om die reden is het verstandig om onder het geperforeerde deel van de peilbuis nog een stuk blinde buis van ongeveer 0,5 m te hebben, zodat het volledige geperforeerde gedeelte beschikbaar is voor het uitvoeren van een meting. De metingen mogen niet te dicht op het einde van het geperforeerde gedeelte van de peilbuis worden uitgevoerd, omdat ook dit verstoring van het stromingsbeeld tot gevolg kan hebben. In Duitsland, waar het systeem is ontwikkeld wordt vaak gewerkt met peilbuizen, die over de volle hoogte van het te onderzoeken compartiment zijn geperforeerd. Op die manier kan relatief gemakkelijk een stromingsprofiel over de verticaal worden opgesteld. Een belangrijk nadeel hiervan is, dat dan ook diverse, mogelijk verontreinigde pakketten worden kortgesloten. Hier moet een middenweg tussen het uitvoeringsgemak van de metingen en het milieurisico worden gezocht.

- Voor het berekenen van de α -factor wordt gebruikgemaakt van de K-waarden voor het filter, het filtergrind en de ongestoorde omgeving van het filter. Een uitgangspunt daarbij is, dat de overgang van het filtergrind naar de omgeving regelmatig is; de diameter van het boorgat is immers ook een parameter voor de berekening. Een tweede uitgangspunt is dan ook, dat het boorgat zelf geen onregelmatigheden vertoont ten aanzien van de doorlatendheid in de overgang grond/grind. De gekozen boormethode is dus van belang bij het plaatsen van de peilbuis.
Het gebruik van bijv. een holle avegaar is dan minder gewenst, omdat hierbij versmering van het boorgat optreedt. Dit is vooral van belang bij een peilbuis, die in een gelaagd pakket wordt geplaatst. Een tweede nadeel van het gebruik van een holle avegaar zou zijn, dat het aanbrengen van grind rond het filter minder nauwkeurig is, wanneer dit niet wordt gepeild tijdens de plaatsing. Dit kan betekenen, dat het bovenste deel van het filter omgeven is door de ingevallen oorspronkelijke bodem of zelfs de bentonietprop.
- Waarschijnlijk is ook de plaatsing van de peilbuis in het midden van het boorgat relevant. In dat geval zou bij plaatsing gebruik gemaakt moeten worden van "spacers".
- Er mag niet meer dan 1 peilbuis in een boring staan, omdat meerdere peilbuizen in een boring elkaars stromingsprofiel beïnvloeden (zowel wat betreft de richting als de snelheid). Grotere obstakels in de directe omgeving van de peilbuis zoals een kei of een klei-insluiting zullen ook invloed hebben op de richting van de grondwaterstroming. Dit kan worden geconstateerd door het uitvoeren van meerdere metingen over de hoogte van de peilbuis, maar deze moet daar dan wel op zijn ingericht.

5.6.2 Bodemprofiel

Kennis van het bodemprofiel is van belang voor het uitvoeren van de metingen en voor de keuze van de diepte waarop wordt gemeten. Bij een gelaagde bodem kunnen kleilagen voorkomen, die een uitgesproken effect hebben op de uitgevoerde metingen. Wanneer er een afwisseling is van goed en minder goed doorlatende lagen, kan ervoor worden gekozen om de metingen juist uit te voeren in de meer doorlatende lagen. Dit zijn in principe ook de lagen, waarin het transport van een verontreiniging primair plaatsvindt. Wanneer een meting in een slecht doorlatende laag wordt uitgevoerd kunnen kortsluitstromen via het filtergrind optreden. Wanneer een dergelijke laag wel relevant is, dient voor het uitvoeren van een meting daarin een specifieke peilbuis worden geplaatst, waarbij rekening wordt gehouden met de lengte van de sonde.

5.6.3 Metingen

De metingen moeten in ieder geval een periode in beslag nemen, die lang genoeg is om de verstoring door het inbrengen van de sonde te laten uitdoven. De duur van deze verstoring is afhankelijk van de snelheid van de grondwaterstroming (hoe hoger hoe korter). Door het inbrengen van de sonde kan ook fijn sediment worden opgewoeld. Het is daarom van belang, dat een peilbuis goed wordt schoon gepompt enige tijd voor het uitvoeren van de meting, omdat bij een te hoog gehalte aan fijn materiaal in het meetgebied het licht te vroeg uitdooft of de beeldherkenningstechniek geen individuele deeltjes meer herkent. De indruk is verkregen, dat naast de direct zichtbare verstoring door een warrig meetbeeld er in minder doorlatende pakketten ook een langduriger verstoring kan optreden, die leidt tot een langzaam afnemende snelheid van de gemeten grondwaterstromingsnelheid. Dit lijkt typisch voor de Nederlandse situatie, waar vaak finzandige pakketten voorkomen.

De richting van de grondwaterstroming wordt bepaald in vergelijking met een magnetisch kompas. In situaties waar het aardmagnetisme wordt verstoord, kan deze richting dus niet zondermeer worden bepaald. Een methode, waarbij de sonde met zijn merkteken naar het noorden wordt gericht voordat deze zo gecontroleerd mogelijk in de peilbuis wordt neergelaten levert dan nog een redelijke benadering, maar is verre van optimaal.

Langere metingen geven in principe een beter beeld van de grondwaterstroming. Dit is met name van belang in gebieden, waar variaties worden verwacht door wisselende waterstanden, grondwateronttrekkingen e.d.

Over het algemeen is het beter, zo niet noodzakelijk, om meerdere metingen in een peilbuis uit te voeren om zo te compenseren voor onregelmatigheden in het bodemprofiel of in de installatie van de peilbuis.

5.6.4 Interpretatie

De Phrealog-metingen zijn in feite puntmetingen op een bepaald tijdstip. Om een goed beeld te krijgen van de grondwaterstromingssnelheid – en richting in een bepaald gebied moet rekening gehouden worden met de ruimtelijke variabiliteit in het horizontale en verticale vlak. Daarom is het aan te bevelen om meerdere metingen op verschillende diepte te voeren (in één peilbuisfilter of in meerdere peilbuizen op verschillende dieptes) en ook meerdere metingen op verschillende locaties in het gebied. Op die manier wordt een beter beeld verkregen van de horizontale en verticale ruimtelijke variatie in de metingen.

Wanneer er tevens sprake is van temporele variaties, zoals bijv. in het Nederlands rivieren – en getijdengebied, is het belangrijk om ook verspreid over een bepaalde periode meerdere metingen uit te voeren.

De hier geschetste problemen gelden voor alle metingen, die direct in een peilbuis worden uitgevoerd. Een belangrijk voordeel van de Phrealog-metingen in dit project was de directe zichtbaarheid van omgevingsfactoren, de kwaliteit van peilbuizen, etc. Er zal in de meeste gevallen moeten worden uitgegaan van de veronderstelling, dat de geplaatste peilbuizen niet geschikt zijn voor de uitvoering van dit type metingen. Bij nieuwe projecten of bij nieuw te plaatsen monitoring peilbuizen zou met voorgaande punten rekening gehouden moeten worden.

De verschillen in stromingssnelheid, die over de verticaal in een peilbuis worden gemeten zijn reëel. In een pakket zullen er preferente stroombanen aanwezig zijn. Deze zijn juist van belang voor de verspreiding van een verontreiniging. Bij de gebruikelijke stijghoogte-metingen in combinatie met doorlatendheden worden dit type effecten niet beschouwd.

5.7 Economische afwegingen

Voor het verkrijgen van een goede inschatting van de stromingssnelheid- of richting in een gebied dient een meetprogramma worden uitgevoerd dat bestaat uit meerdere metingen in de verticaal en horizontaal, eventueel enkele malen herhaald vanwege verwachte temporele variaties. Ook dienen voor een Phrealogmeting nieuwe peilbuizen geplaatst worden om metingen van voldoende kwaliteit te waarborgen. Dit betekent dat de Phrealogmetingen duurder zullen zijn dan de conventionele stijghoogtemetingen.

Echter voor projecten als bijv. warmte- koudeopslag, plaatsing van een bioscherm of studie naar het ontstaan van een stabiele eindsituatie voor een mobiele verontreiniging, kan kennis over de grondwaterstroming van essentieel belang zijn. In deze gevallen loont het om een geavanceerde meetmethode te gebruiken zelfs als deze aan de hiervoor aangegeven voorwaarden moet voldoen.

De sonde wordt in de periode eind 2008 en 2009 verder ontwikkeld. Hierbij wordt de sonde verkort, waardoor deze beter geschikt wordt voor de Nederlandse situatie en er wordt gewerkt aan een systeem, waardoor met meerdere sondes tegelijkertijd in een peilbuis kan worden gemeten, waardoor de totale meettijd wordt verkort en de betrouwbaarheid van de verkregen resultaten zou toenemen.

6. CONCLUSIES

De conclusies, die uit het onderzoek kunnen worden getrokken zijn de volgende:

1. De Phrealogsonde heeft grote potentie, echter de kwaliteit van de meting is naast die van de sonde, ook sterk afhankelijk van de kwaliteit van de peilbuis waarin gemeten wordt.
2. Het is essentieel voor het uitvoeren van een goede meting om gebruik te maken van een peilbuis die voldoet aan bepaalde voorwaarden ten aanzien van boormethode, filterlengte, filteromstorting e.d. Aanbevolen wordt om ten behoeve van een Phrealogmeting nieuwe peilbuizen te plaatsen conform een vooraf vastgesteld protocol.
3. De meting is gevoelig voor obstakels in de directe omgeving van de peilbuis zoals keien of klei-insluitingen.
4. De richting van de grondwaterstroming wordt bepaald met behulp van een magnetisch kompas in de sonde zelf. Plaatselijke verstoringen van het aardmagnetisme verstoren dus ook dit deel van de meting.
5. Ten einde te verhinderen dat lokale afwijkingen van het grondwaterstromingspatroon een onjuist beeld van de situatie opleveren moeten in een peilbuis bij voorkeur meerdere metingen worden uitgevoerd. Hetzelfde geldt ook voor metingen in het horizontale vlak.
6. Wanneer gemeten wordt in een gebied met een wisselende grondwaterstand (getijdgebieden bijvoorbeeld) moet over een volledige cyclus worden gemeten.
7. Wanneer mag worden verwacht, dat er seizoensafhankelijke invloeden kunnen zijn door regenval of rivierstanden moeten metingen eigenlijk enige keren per jaar worden uitgevoerd.
8. Wanneer gedurende de metingen een verloop in de snelheid van het grondwater wordt gezien, moet de meting worden doorgezet totdat deze stabiel is geworden.
9. De grondwaterstromingsnelheden, die in Nederland gebruikelijk zijn liggen dicht bij de ondergrens van de meetmethode.
10. Er wordt gebruik gemaakt van correctiefactoren om de gemeten snelheid in de peilbuis te vertalen naar een Darcy-snelheid in het pakket. Om deze factoren juist te kunnen bepalen zijn bij bestaande peilbuizen vaak aannames nodig. Bij peilbuizen, die worden geplaatst voor het uitvoeren van Phrealog-metingen, moeten de uitgangspunten hiervoor direct worden vastgesteld.
11. Genoemde beperkingen gelden voor alle meetmethoden, die direct in een peilbuis worden uitgevoerd. Het voordeel van de Phrealog-sonde daarbij is, dat de metingen een voldoende grote serie meetpunten opleveren om de problemen die optreden door bijvoorbeeld het inbrengen van de sonde ook zichtbaar te maken.

7. AANBEVELINGEN

Het project heeft duidelijkheid geschapen met betrekking tot de mogelijkheden voor toepassing van de Phrealog-sonde in de Nederlandse situatie. Het is duidelijk, dat de meeste bestaande peilbuizen niet zondermeer voor de metingen kunnen worden gebruikt, omdat over de plaatsing en de wijze van installeren onvoldoende kennis aanwezig is, waardoor verkeerde informatie kan ontstaan. Aanbevolen wordt om ten behoeve van Phrealog-metingen peilbuizen te plaatsen die volgens een standaard protocol zijn geplaatst.

Phrealog wordt beschouwd als een middel om met name in de wat grotere projecten in te zetten zoals WKO, waarbij geohydrologische informatie een essentieel onderdeel vormt,

Tot slot wordt aanbevolen om de sonde in te zetten in de bovengenoemde projecten waardoor op deze wijze meer ervaring in Nederland kan worden opgedaan.

Phrealog wordt aangeraden de correctie van de meting voor de aanwezigheid van de peilbuis en de sonde in het licht van de verkregen resultaten opnieuw te evalueren.

LITERATUUR

DROST, W., & KLOTZ, D., KOCH, H., MOSER, H., NEUMAIER, F. & RAUERT, W. (1968): Point dilution method measuring ground water flow by means of radioisotopes
Water Resources Res. 4; S. 125-147; Washington.

BERGMANN, H. (1970): Über die Grundwasserbewegung im Filterrohr.- Diss. tech.
Hochschule Graz 1968 - GSF_Bericht R 24: 211S.; GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, München.

KLOTZ, D. (1971): Untersuchung von Grundwasserströmungen durch Modellversuche im Maßstab 1:1.- Geologia Bavarica 64: 75-119, 33 Abb., 7 Tab.; München.

KLOTZ, D. (1978): α -Werte ausgebaute Bohrungen.- GSF- Bericht R 176: 119S., 12Abb., 100Tab.; GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, München.

KLOTZ, D. (1990): Berechnete Durchlässigkeiten handelsüblicher Brunnenfilterrohre und Kunststoff- Kiesbelagfilter (Stand 1990).- GSF-Bericht R 35/90: 55 S., 21 Abb., 14 Tab.; GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, München.

RECH, M. (2000): Untersuchungen zur horizontalen Strömung in Brunnenfilterrohren nach DIN 4925.- Dipl. Arb. Univ. zu Köln [unveröff.]; 81S., 43 Abb., 41 Tab.; Köln.

SCHÖTTLER, M. (1997): Meßbarkeit der Grundwasserbewegung durch Visualisierung der Strömung in Bohrbrunnen.- Diss. Univ. Köln; 119 S.; Shaker Verlag, Aachen.

SCHÖTTLER, M. (1999): Ein neues Meßsystem zur Erfassung der Grundwasserströmung in Bohrbrunnen.- In: BECKER-HAUMANN, R. & FRECHEN, M. (Hrsg.)(1999): Terrestrische Quartärgeologie.-376-393; Köln (Logabook).

SCHÖTTLER, M. (2004): Erfassung der Grundwasserströmung mittels des GFV-Messsystems.- geotechnik 27 (2004) Nr.1; Deutsche Ges. f. Geotechnik; S.41-45; 8 Abb.; Verlag Glückauf, Essen.

German Industrial Standards:

DIN 4925-1; 4925-2; 4925-3 (1999): Well screens and casings of unplasticized polyvinylchloride (PVC-U) for tube wells - Part 1: DN 35 to DN 100 with Whitworth-pipe thread; - Part 2: DN 100 to DN 200 with trapezoidal thread; Part 3: DN 250 to DN 400 with trapezoidal thread. Deutsches Institut für Normung e.V. (Publ.); Berlin.

BIJLAGEN