

Document Version

Final published version

Citation (APA)

Koulidis, A., van der Schans, M., Vardon, P. J., & Bloemendal, M. (2026). *Drilling Report: Monitoring Borehole DEL-HTO-P01*. Delft University of Technology. <https://doi.org/10.4233/uuid:0dcb270c-35b9-492c-9d55-0186c9d95e5a>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

In case the licence states "Dutch Copyright Act (Article 25fa)", this publication was made available Green Open Access via the TU Delft Institutional Repository pursuant to Dutch Copyright Act (Article 25fa, the Taverne amendment). This provision does not affect copyright ownership.
Unless copyright is transferred by contract or statute, it remains with the copyright holder.

Sharing and reuse

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Drilling Report

DEL-HTO-P01 Monitoring Borehole

November 2024



**Drilling Report
Monitoring Borehole
DEL-HTO-P01**

Authors

Alexis Koulidis

Martin van der Schans

Philip J. Vardon

Martin Bloemendal

Contents

1	Introduction	5
2	Scientific Objectives	6
3	Activities	7
4	Drilling Procedure and Lessons Learned	12
5	Completion	15
6	Drill Cuttings Analysis	17
7	Coring and Core Analysis	20
8	Well logging	22
9	Pumping Test	24
	References	25
	Appendix 1: Haitjema report	26
	Appendix 2: IF Technology report	35

1 Introduction

This document describes the drilling, completion and testing of the pilot borehole (DEL-HTO-P01), which will later be utilized as a monitoring well for High Temperature Aquifer Thermal Energy Storage (HT-ATES). The work includes all materials, components, tools, and services that are related to the preparation, delivery, installation, measurement, and completion of the components belonging to the test drilling and monitoring well. The following analysis combines various data sources to characterize the subsurface for the Delft Demonstration site (WP1). The location of the DEL-HTO-P01 is demonstrated in Figure 1, which is located at RD-coordinates $X = 85,257$ m, $Y = 445,757$ m.

All data presented in this report have been published via TU Delft institutional data repository 4TU.ResearchData under the CC BY 4.0 license. The initial borehole dataset and the CT scan data can be found via <https://doi.org/10.4121/1694ba82-db41-4017-8d1c-9de3ce1a785e> and <https://doi.org/10.4121/9902ebc7-dbd6-43b1-a3c3-85ff9ab645a9>.

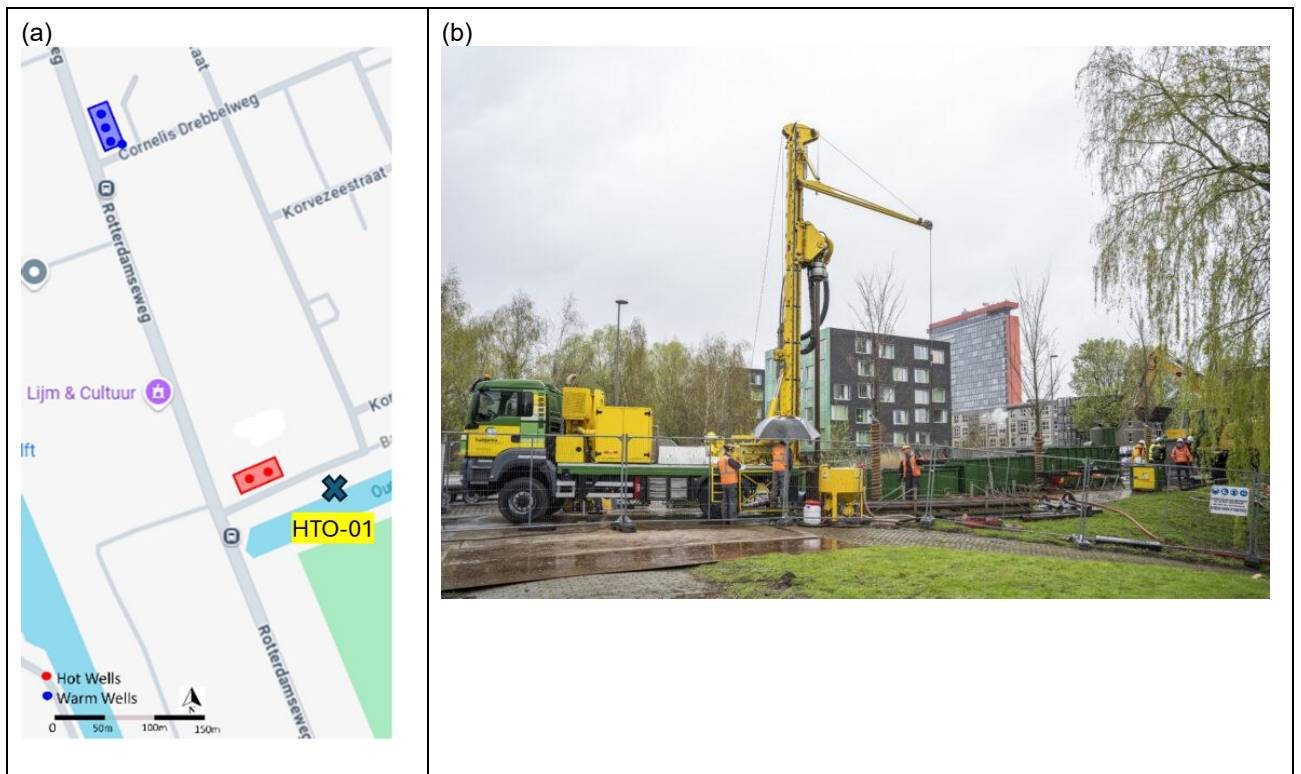


Figure 1: Location of DEL-HTO-P01, (a) map of DEL-HTO-P01 on the TU Delft campus, (b) view of the site during drilling.

2 Scientific Objectives

The borehole was drilled to enhance the understanding about the subsurface and will be utilised later as a monitoring well since it is in proximity to the planned HT-ATES (High-Temperature Aquifer Thermal Energy Storage) hot wells. The scientific objectives are:

- Characterization of the drilled formations, including lithology, and mechanical, thermal, chemical and hydraulic properties via laboratory experiments and wireline logs
- Monitoring of groundwater chemistry, including collecting water quality samples from various depths
- Investigation of microbial activity influenced by the chemistry of the drilling fluid and its potential impact on water quality and properties
- Assessment of wellbore stability under varying stress conditions (using cored samples)
- Evaluation and monitoring of the thermal plume associated with the HT-ATES operation

The following activities were conducted:

- Describing the lithology and gather geological information
- Retrieving core samples from the following depths:
 - 75-76 meters
 - 105-106 meters
 - 126-127 meters
 - 127-128 meters
 - 128-129 meters
 - 131-132 meters
 - 133-134 meters
 - 138-139 meters
 - 142-143 meters
 - 158-159 meters
 - 170-171 meters
 - 235-236 meters
- Wireline logging across the entire borehole
 - Gamma-Ray
 - Resistivity
 - Spontaneous Potential
- Pumping tests to evaluate the hydraulic conductivity of different layers
- Installing fibre optics to monitor the thermal plume from the HT-ATES wells

3 Activities

Table 1 describes the entire set of activities. Several parties are integrated for different purposes.

Table 1: Number of activities for DEL-HTO-P01.

Activity	Company	Chapter	Appendix
Drilling	Haitjema	Chapter 4	Appendix 1
Open hole logging	Deltares	Chapter 8	Appendix 2
Mudlogging and cuttings collection, labelling and storage	Haitjema and TU Delft	Chapter 6	Appendix 1-2
Fibre optics installation	Haitjema and TU Delft	Chapter 5	Appendix 2
Core sampling	Haitjema and TU Delft	Chapters 4-7	
Core sampling for microbial analysis	BRGM and TU Delft	Chapter 7	
Core transfer and storage, and labelling	TU Delft	Chapter 7	
Core scanning	TU Delft	Chapter 7	

3.1 Drilling

Activity Drilling DEL-HTO-P01	Date April 2024
Brief description of the activity Preparation of the drill location Drilling Method: Reverse circulation drilling Drilling of one borehole: DEL-HTO-P01 (230m)	
Output Borehole Drilling lessons learned	Detailed information Chapter 4 Appendix 1

3.2 Open hole logging

Activity Open hole logging by Deltares DEL-HTO-P01 (230m)	Date April 2024
Brief description of the activity The following measurements have been acquired <ul style="list-style-type: none"> • Electrical resistivity (RES) • Gamma Radiation (GR) • Single point resistance (SPR) 	
Output Logging measurements and interpretation	Detailed information Chapter 8 Appendix 1-2

3.3 Mudlogging and cuttings collection, and labelling

Activity Mudlogging and cuttings collection DEL-HTO-P01 (230m)	Date April 2024
Brief description of the activity Mudlogging description during the drilling of the borehole. Initially, a description of the subsurface is conducted based on the cuttings. The cuttings descriptions are coupled to the borehole loggings, coring and later analysis. Cuttings were collected every meter until a depth of 230 meters. The cuttings were labelled as follows: <ul style="list-style-type: none"> • location ID • depth (mMD) • sample state • date 	

Labels are added to the outside the sampling bottle.	
Output Lithological description. 230 samples stored in the TU Delft core storage room.	Detailed information Chapter 6 Appendix 1-2

3.4 Core sampling

Activity Coring DEL-HTO-P01 (230m)	Date April 2024
Brief description of the activity In total 12 cores were retrieved from the following depths: <ul style="list-style-type: none"> • 75-76 meters • 105-106 meters • 126-127 meters • 127-128 meters • 128-129 meters • 131-132 meters • 133-134 meters • 138-139 meters • 142-143 meters • 158-159 meters • 170-171 meters • 235-236 meters 	
Output Cores to be utilized for a future experimental framework to evaluate the subsurface	Detailed information

3.5 Core sampling for microbial analysis

Activity Core sampling for microbial analysis DEL-HTO-P01 (230m)	Date April 2024
Brief description of the activity After the retrieval of each core, a sample was acquired from the cores for microbial analysis. Two cores were reserved for microbial analysis	
Output Evaluate the initial status of the cores and conduct tests for bacterial growth	Detailed information

3.6 Core transfer, storage and labelling

Activity Core transfer and storage DEL-HTO-P01 (230m)	Date April 2024
Brief description of the activity Once the core was retrieved, we removed the barrel ends, applied epoxy to both ends of the core to seal them, and capped the ends. Each sample was then enclosed in an aluminium vacuum bag and stored at 5°C to preserve its integrity from the perspective of bacterial growth and water evaporation. The cores were labelled as follows: <ul style="list-style-type: none">• location ID• depth (mMD)• sample state• date	
Output All cores were labelled and sealed.	Detailed information

3.7 Core scanning

Activity Core scanning DEL-HTO-P01 (230m)	Date April 2024
Brief description of the activity The one-meter cores were scanned at TU Delft using a medical CT scanner. The cores were scanned in one go using a slice resolution of 0.6mm with approximately 1700 slices. A reconstruction of the raw data was conducted for each core to obtain the initial images.	
Output The data will be available to the public	Detailed information

3.8 Data management

Activity	Data type	Data format
Drilling	Drilling report	pdf
Borehole logging	Logging report	pdf
	Resistivity	asc
	Gamma ray Single point resistance	
Cuttings	Particle size distribution	csv
Core CT scans	Medical CT images	jpg
Core	Physical samples	
Cuttings	Physical samples	

4 Drilling Procedure and Lessons Learned

A key point while drilling the observation well was to evaluate the overall drilling process, identify challenges and implement improvements for the upcoming wells. The well was drilled using reverse circulation drilling with a 600 mm drill bit. A water-based drilling fluid was used, with PAC as the primary additive to increase viscosity (Appendix 2). For conventional water wells and LT-ATES, drilling in high-permeability layers using current methods provides a cost-effective and reliable approach. HT-ATES are often targeting deeper aquifers, corresponding to lower permeability, over-consolidated soil and complex lithologies. In addition, for HT-ATES, due to the high temperatures, the technologies (including completion materials and drilling fluid chemistry) move towards deep geothermal technologies and as a result a significant cost increase. Therefore, it is essential to improve and combine technologies from (shallow) water wells with (deep) geothermal wells. To ensure safe, reliable and cost-effective drilling applications the following observations and potential improvements are listed below:

Drilling fluid, cuttings separation and mixing units:

- The drilling process for ATES wells is commonly not 24/7, and is stopped at early evening; hence, the drilling fluid (DF) is static during the night for more than 12 hours. A reliable field method to evaluate the drill fluid's viscosity is the Marsh funnel, and for a more detailed analysis, the Fann 35 viscometer. The drilling fluid sampling in the morning (prior to drilling) indicated that the Marsh funnel viscosity and gel strength (obtained from the Fann 35 viscometer) were almost always higher.

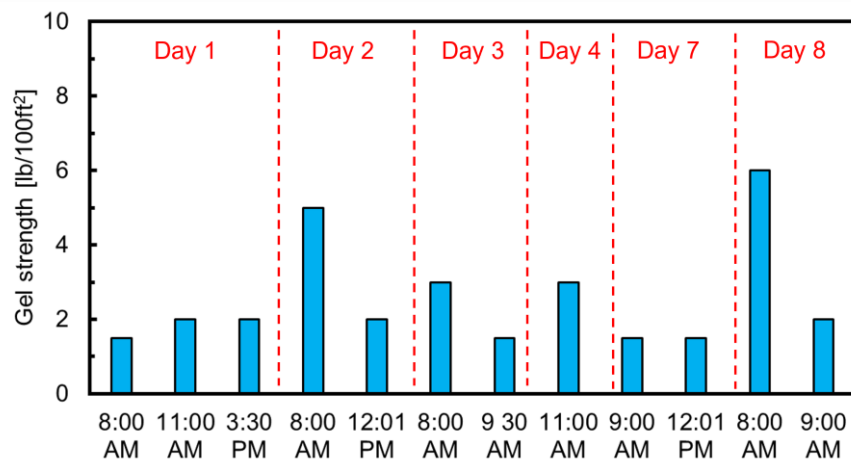


Figure 2: Gel strength as a function of different times.

- The drill cuttings are separated by settling in three different settling basins by gravity. The separation of the drill cuttings from the drilling fluid in the last setting basin, where the fine particles mainly settle, was generally poor. Even though the fluid properties are maintained, in the most downstream tank there is a lot of cuttings accumulation. The poor solid control is an indication of non-solid-free drilling fluid and has negative implications in the drilling process, as drilling cuttings remain in suspension and result in undesired DF-properties. For future drillings we will reconsider the mixing and separation unit.
- The DF was poorly mixed, with lumps of additives floating in the fluid. A better mixing machine will be required in case more additives are added during future drillings for the production wells.

Coring:

- 12 core samples were obtained. The first core barrel was retrieved half-empty and the Polyvinyl chloride (PVC) core holder got stuck because it was too long compared to the length of the coring machine. The cores therefore had to be hammered loose, which caused damage to the cores. After shortening the length of the core barrel by a few centimeters, we obtained ten full barrel cores with a length of 1 m and an average core recovery of 92% (Figure 3).

Measurements and challenges:

- The rate of penetration (speed of drilling) was controlled and steady at ~10 m/hr. The drilling rig was not instrumented, but from observations the teams were able to identify differences in the drilling behaviour (vibrations of the drill string) due to differences in formation at the drill bit, even in a resolution of 30 cm. This also assists in identifying formation tops, which can assist in depth correlation.
- The reverse circulation technique allows cuttings to be pumped up to the surface through the drill pipe. At approximately 176 to 180 mBGS, the team observed severe vibrations. An unexpected event occurred when large rock segments plugged the inner part (Figure 3) of the drill bit (since there is empty space for reverse circulation). To unplug the drill bit, a steel rod was lowered through the drill pipe and initiated hammering to break the rock. This occurred three times in an interval of 4 m, as a result it took almost all day to drill 4 m.

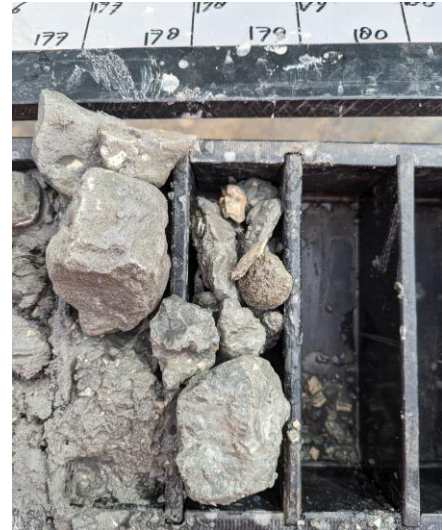


Figure 3: Core barrel and cutting obtained until 179 m.

- Fluid losses were measured in the third tank near the borehole to estimate downhole losses. Figure 4 provides a correlation between the fluid loss, marsh funnel viscosity, and the sections of the cores we obtained. At approximately 160 m, a low viscosity of the drilling fluid was observed, resulting in fluid losses of approximately 20 m³.

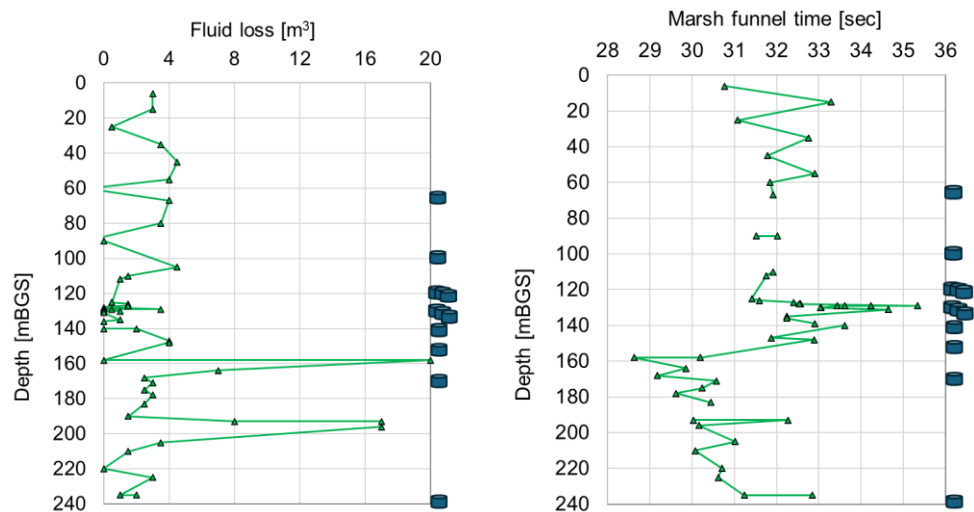


Figure 4: Fluid loss and marsh funnel viscosity as a function of depth. The blue cylinders represent the coring intervals.

5 Completion

The final depth of the borehole was determined at 230 mBGS. As the main function of the well is a pilot drilling and observation well, the completion design had to serve multiple purposes including pumping tests, fibre optics installation and to incorporate piezometers at various intervals. Distributed Temperature Sensing (DTS) was installed to capture and monitor the thermal plume behaviour across the aquifer during the operation of the HT-ATES. The DTS cable is placed at monitoring screen 9 to 194 mBGS and the sealing clay layer above the target formation was approximately from 75 to 123 mBGS. In addition, the lower part of the borehole, from 184 mBGS to the final depth of the borehole, was mainly clay (Figure 5).

Characterization of the drill cuttings and analysis of borehole measurements in the open borehole were utilized to determine the optimum filter count, which corresponds to the number of filter sections. It was decided during the filter count to set as much well screen as possible in the sandy sections from 120 to 184 mBGS, so that information could be gathered about the geohydrological properties of the sand layers at different depths within the Maassluis formation. The drill cuttings analysis and borehole logs indicate thin clay layers in the target aquifer, in which well screens were not placed. According to the cuttings samples, a clear layer of clay was not always identifiable between these sections, the borehole measurement did show higher gamma ray (GR) values and therefore clay pellets were used as a backfill material at those depths: this clearly separated the three well screen sections within the borehole from each other and this made packer isolated pumping tests possible.

The main completion of the well for the pumping test was done with PVC, which was backfilled with clay pellets after to secure integrity once the hot HT-ATES wells are operational. In addition to the main completion, 9 piezometers have been placed. The screens of the piezometers were placed in the target aquifer to be used for pumping tests as well as during HT-ATES operation. The piezometers are only used for the pumping test analysis and were backfilled with clay after. Figure 5 presents an overview of the well design with respect to depth and the corresponding placements of the piezometers (MP-F1 to 9).

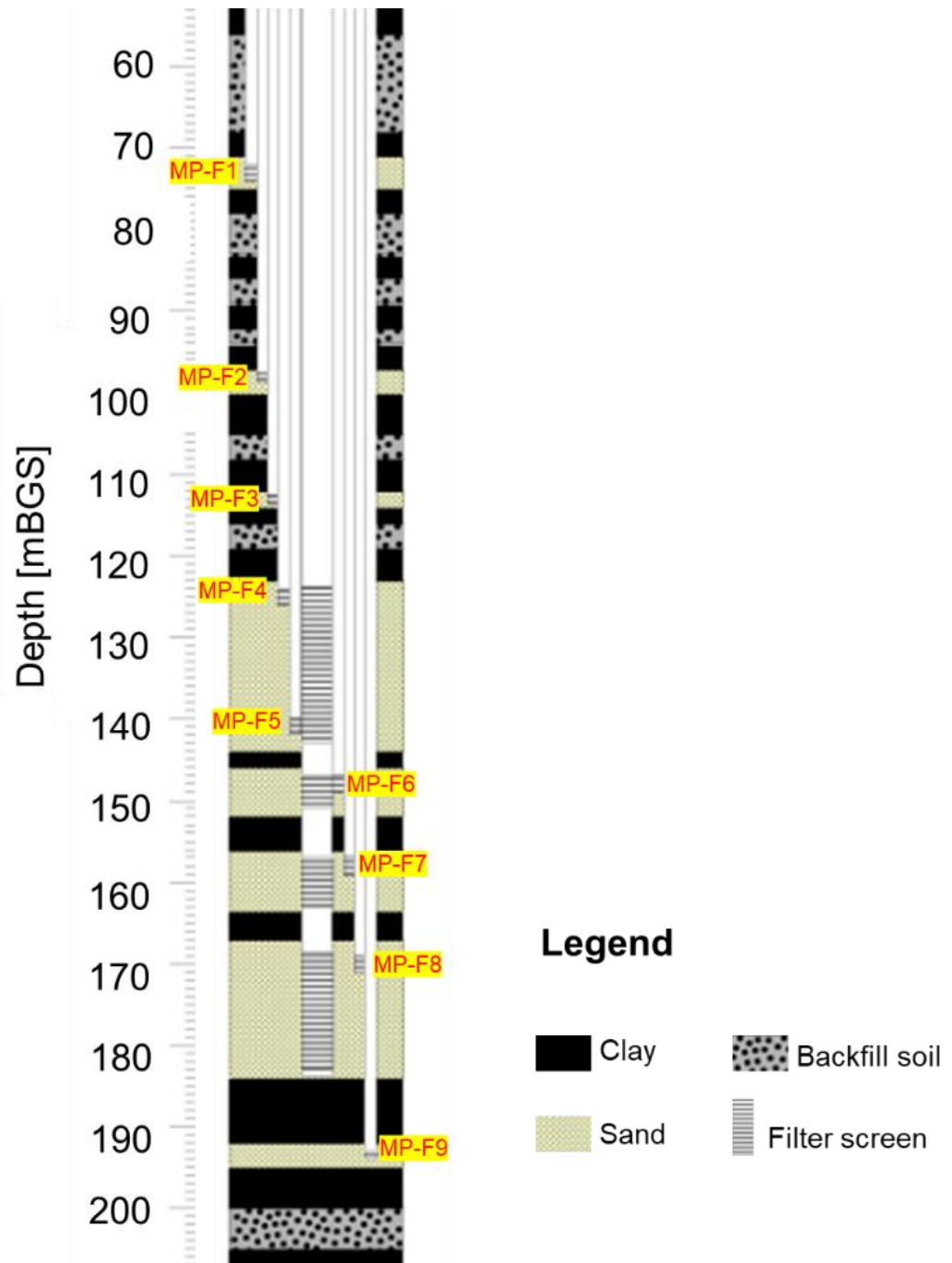
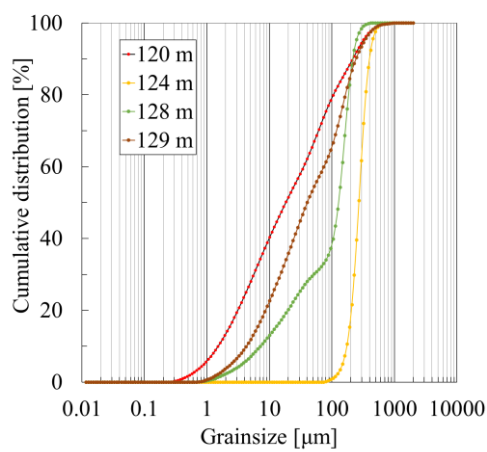


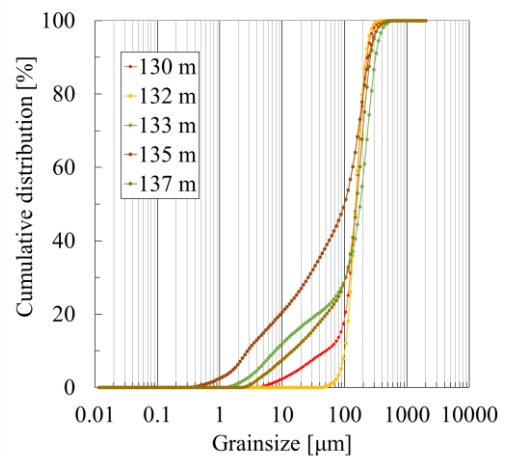
Figure 5: Well completion.

6 Drill Cuttings Analysis

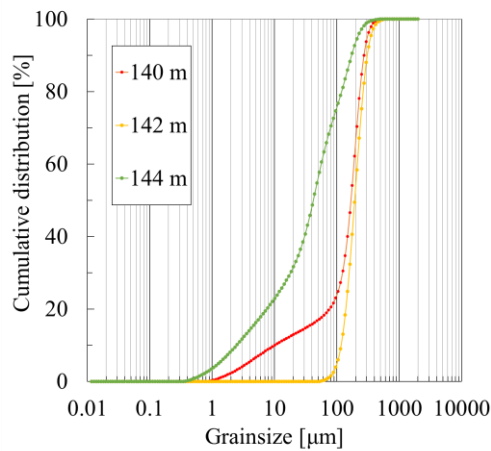
While drilling the observation well, drill cuttings were collected and labelled onsite for further analysis. Due to the small volume and uniformity of the cuttings, the main analysis was to evaluate the particle size distribution. The interval of interest is between 120 and 180 mBGS, with cores obtained from specific zones. Thus, the drill cutting analysis was conducted at depth intervals similar to the core samples. The particle size fraction is utilized to classify the intervals. Figure 6 shows that the particle size distribution can differ even within a distance of 1 m, highlighting the formation heterogeneity. The formation can be classified by following the classification chart presented in Figure 7. We plan to conduct additional grain size analysis if and when we open the remaining cores.



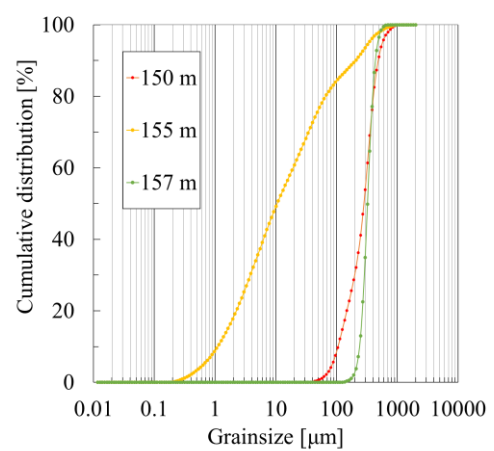
(a)



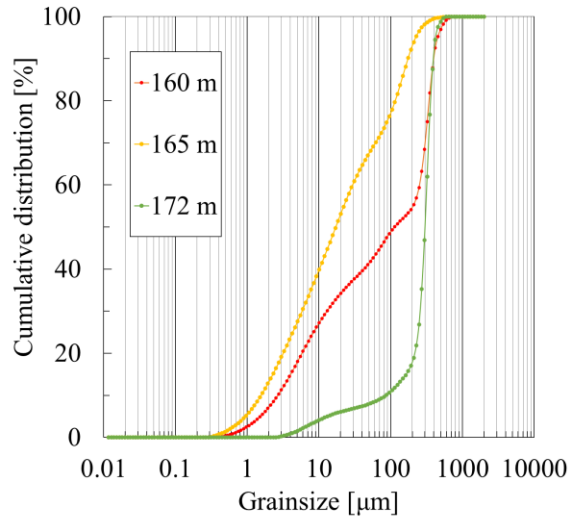
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure 6: Particle size distribution analysis from several depths.



Figure 7: Soil classification according to ISO 14688-1.

The identification procedure allows the unconsolidated samples to be categorized based on the percentage of silt, clay, and sand. According to the ISO standard (ISO 14688-1), sand ranges from 0.05 to 2 mm, silt is from 0.002 to 0.05 mm, and clay is below 0.002 mm.

Table 2: Soil classification, median size and coefficient of uniformity.

Depth [mBGS]	Percent Clay [%]	Percent Silt [%]	Percent Sand [%]	Classification	d50 [µm]	Coef. Uniformity
120	13.07	52.31	34.62	Silt loam	18.50	23.65
124	0.00	0.00	100.00	Sand	271.40	1.68
128	2.18	27.27	70.55	Sandy loam	130.10	19.02
129	3.56	49.52	46.92	Loam	40.35	17.45
130	0.00	9.79	90.21	Sand	148.00	3.32
132	0.00	0.15	99.85	Sand	148.00	1.60
133	1.08	20.46	78.46	Loamy sand	176.00	26.90
135	6.25	31.53	62.22	Sandy loam	100.30	49.34
137	0.00	19.41	80.59	Loamy sand	154.70	11.31
140	2.21	14.53	83.26	Loamy sand	168.70	18.23
142	0.00	0.00	100	Sand	191.90	1.84
144	8.05	46.69	45.26	Loam	45.99	22.62
150	0.00	0.55	99.45	Sand	283.70	3.08
155	17.73	57.82	24.45	Silt loam	10.54	18.20
157	0.00	0.00	100.00	Sand	322.80	1.47
160	6.89	34.18	58.93	Sandy loam	114.10	90.50
165	12.79	54.22	32.99	Silt loam	16.69	19.85
172	0.00	7.84	92.16	Sand	296.00	3.36

7 Coring and Core Analysis

Drill cores of 1 m length were retrieved from several intervals for further characterization of the subsurface, based on lithological description from nearby wells. The cores were obtained to allow characterization of the subsurface formations, including lithological description as well as mechanical, thermal, chemical, and hydraulic properties testing in the laboratory. A further objective was to investigate microbial activity and to evaluate its potential implications for water quality. The core is retrieved with a core barrel made of a thin PVC pipe. Once the core was retrieved, we removed the barrel ends, applied epoxy to both ends of the core to seal them, and capped the ends. Each sample was then enclosed in an aluminium vacuum bag and stored at 5°C to preserve its integrity from the perspective of bacterial growth and water evaporation.

Initially, the core was scanned with a medical CT scanner, obtaining snapshots of a specific resolution (0.6mm). As the next step, the raw files are utilized to reslice the snapshots in different orientations. The following figures show the steps to obtain a 3D reconstruction of the core using FIJI ImageJ. Figure 8 illustrates the process from 2D to 3D reconstruction and Figure 9 illustrates a reconstructed core sample for different depths. Some images show that there is layering, which may cause anisotropy (=lower vertical than horizontal hydraulic conductivity).

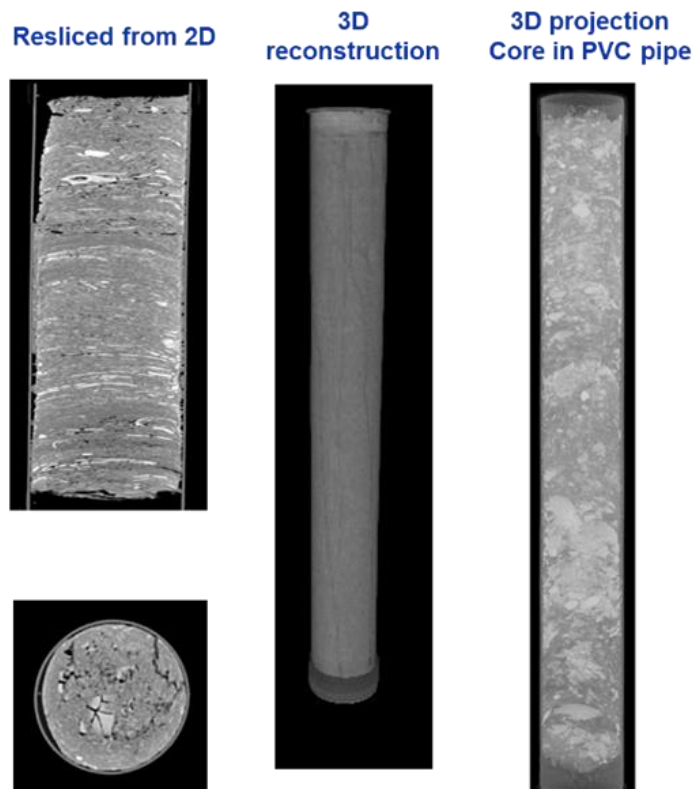


Figure 8: The 2D images (slices) obtained from the medical CT are processed to reconstruct the sample in 3D.

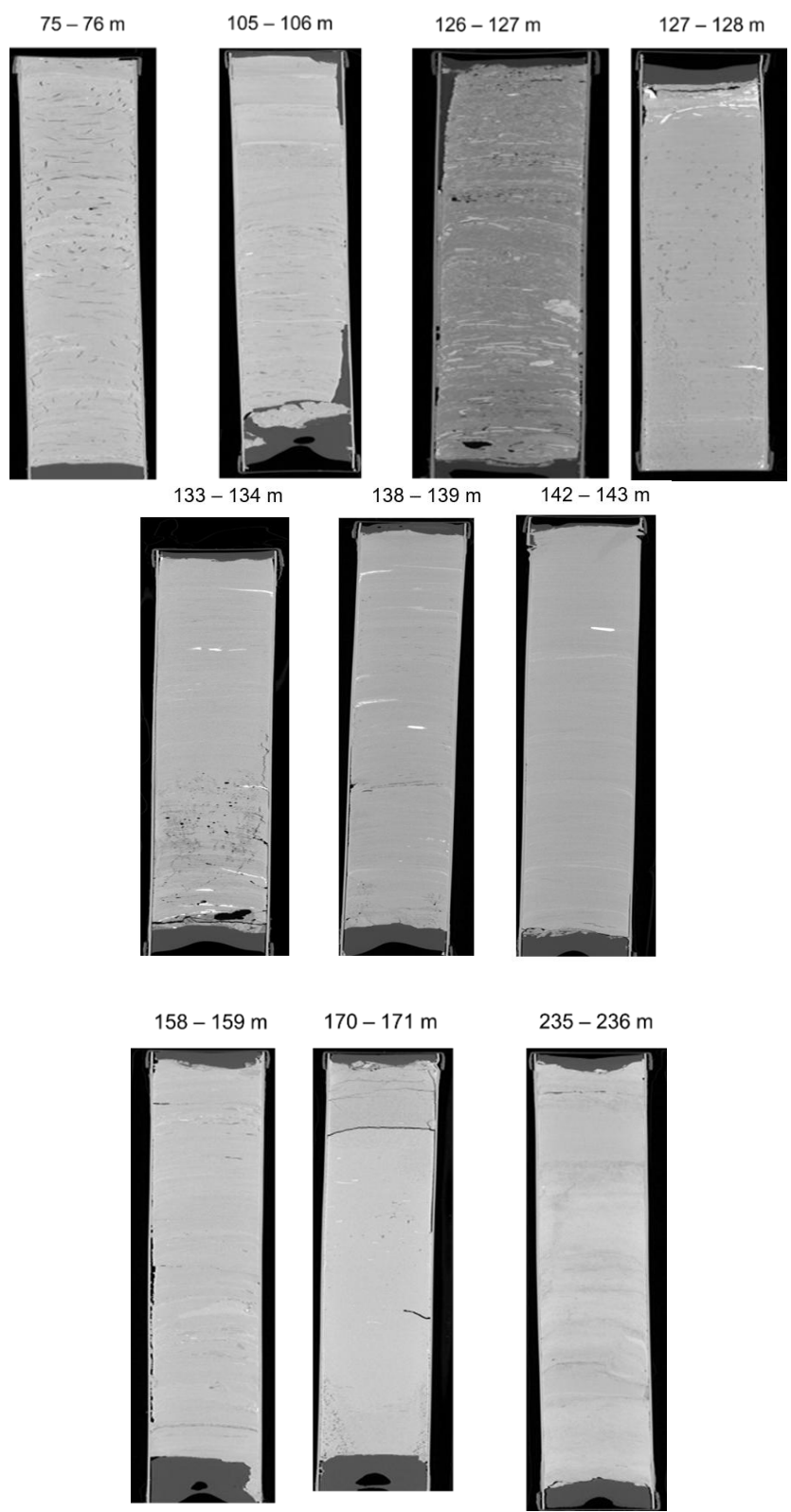


Figure 9: Retrieved core samples after reconstruction using a medical CT scanner.

8 Well logging

Well logs provide information about the geological units and properties by applying geophysical logging devices down a borehole. Well logs were carried out at a speed of about 7.5 m/minute and reported with a resolution of 0.05 m.

In principle, clean sand intervals with fresh water are characterized by low gamma ray rates (<8 count/sec) and high resistivity values ranging from 20 to 200 Ohm-m. For sand in saline formations a similar threshold (<8 count/sec) was used for gamma ray rates while resistivity values are <10 Ohm-m. On the other hand, for clays in both fresh and saline water high gamma ray rates (>17 count/sec) and low resistivity values (<10 Ohm-m) are utilized. For layers containing sand and clay gamma ray rates are ranging between 8 – 17 counts/s and resistivity values between 10 and 20 Ohm-m (Milzow et al., 2009). In general, resistivity values can be influenced from various formation properties including porosity, salinity, clay content and permeability (Matsui et al., 2000). In addition to the thresholds that were mentioned above, clean saturated sand resistivity values have been reported between 5 to 15 Ohm-m (Hudson, 1996).

For this pilot well clean sand intervals with fresh water are considered to be represented by low gamma ray rates (<10 count/sec) and resistivity values ranging from 20 to 200 Ohm-m. For sand in saline formations a similar threshold (<10 count/sec) was used for gamma ray while resistivity is <20 Ohm-m. On the other hand, for clays in both fresh and saline water, high gamma ray rates (>17 count/sec) and low resistivity values (<20 Ohm-m) are utilized. The ranges of resistivity overlap and were used to differentiate primarily the water composition. For example, saline aquifers have similar gamma ray rates but significantly lower resistivity values. In our case, gamma ray rates below 10 count/sec is the initial indication of sandy layer, and then the distinction between fresh or salty water is obtained from the resistivity measurements (<20 Ohm-m is salty). In addition, interlayers of sand and clay have moderate gamma ray rates and resistivity values. Figure 10 provides an overview of the subsurface based on gamma ray rates and resistivity values (right), alongside the corresponding drill cuttings analysis (left). The drilling cuttings analysis was conducted using a PSD (particle size distribution) laser diffraction meter to determine the grain-size distribution. It allows an accurate differentiation between sand-silt-clay and enables the classification of each sample.

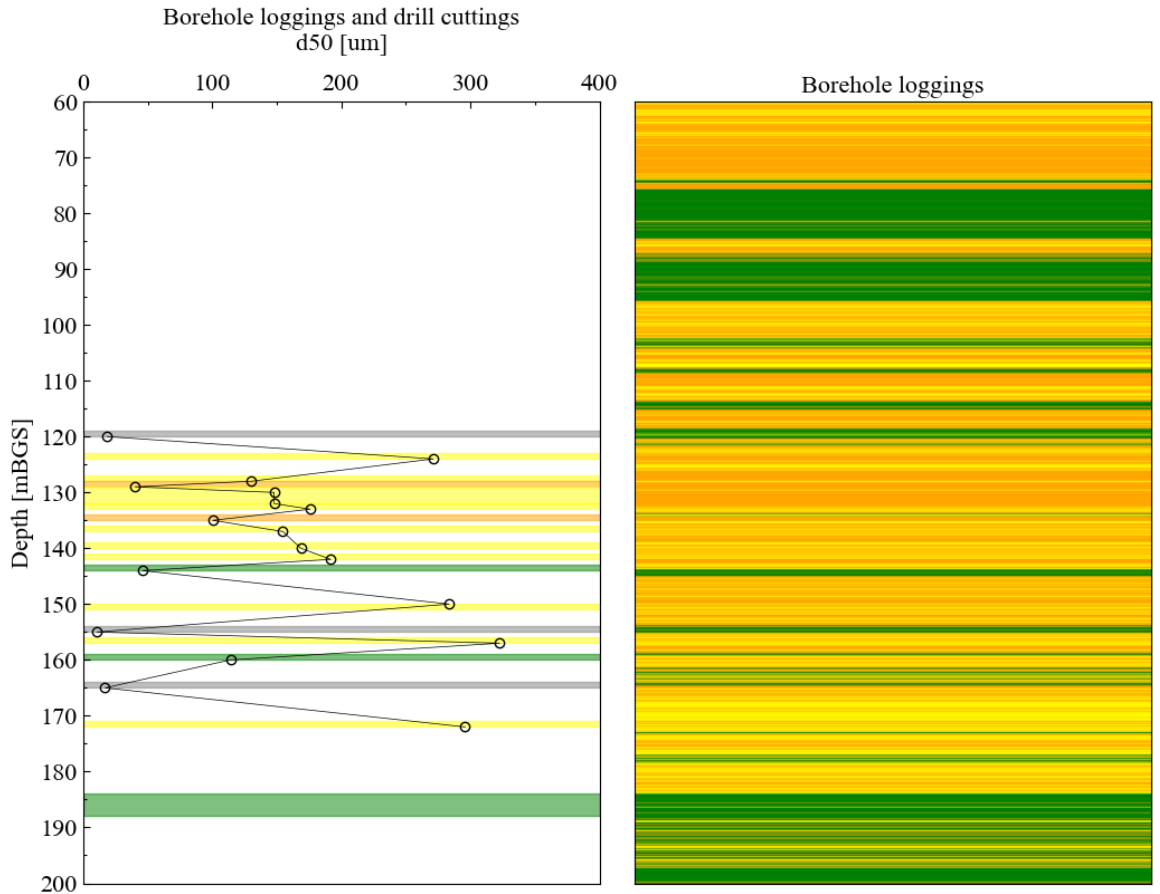


Figure 10: Correlation of drilling cuttings analysis and borehole log combined interpretation. Green is clay, yellow is sand, orange is a mixture of sand/clay/silt and grey is silt.

A key advantage of the drill cuttings analysis compared to the borehole loggings is the ability to provide more detailed differentiation between clay and silt formations. For example, at 155 mBGS the soil is classified as silt (grey colour) from the drill cuttings compared to clay from the borehole loggings. However, the logging provides a better depth of the layers, as travel time (including settlements, etc) does not need to be interpreted.

The drilling crew reported grain size according to observations with the naked eye and a “sand ruler” (which contains calibrated grains of a certain size for visual reference). We found that the grain size found through particle size distribution using the laser scanner (PSD laser diffraction meter) resulted in slightly different (both larger and smaller) grain size than those reported by the drilling company

9 Pumping Test

The observation well was completed with a temporary production screen in the aquifer that we will target for HT-ATES to test the permeability. The production screen is temporary as it was made from PVC, and will be backfilled before taking the HT-ATES into production because the heat will cause a loss of structural strength of the PVC. The temporary PVC screen allowed for performing a pumping test and a screen flow measurement in the observation well. In between different pumping tests we installed packers between the four screens and backfilled the bottom two screens with grout in order to also test a subset of the aquifer and the vertical hydraulic resistance of Table 3 indicates that the aquifer has ample hydraulic conductivity to allow injection and extraction of hot water. Immediately above and below the target aquifer both have good hydraulic resistance to limit heat losses to the confining layers.

Table 3: Hydraulic properties of the target aquifer found during pumping tests in the observation well (IF-technology, 2024).

Section	Top	Bottom	D	k	kD	c
	[mBGS]	[mBGS]	[m]	[m/d]	[m ² /d]	[d]
Screen 1	123	144	21	10.500	22	
clay				0.050		40
Screen 2	146	154	8	11.600	93	
clay				0.044		45
Screen 3	156	164	8	17.700	141	
clay				0.057		35
Screen 4	166	185	18	12.300	221	

mBGS = meter below ground surface; D = Thickness; k = horizontal / vertical conductivity; kD = horizontal hydraulic transmissivity, c= vertical hydraulic resistance.

A screen flow measurement was carried out to evaluate the contribution of different aquifers to the total flow rate of the well. We found that these were in line with the findings of the pumping test, meaning that screens with the highest estimated transmissivity contributed most to the total flow rate of the well (Figure 11).

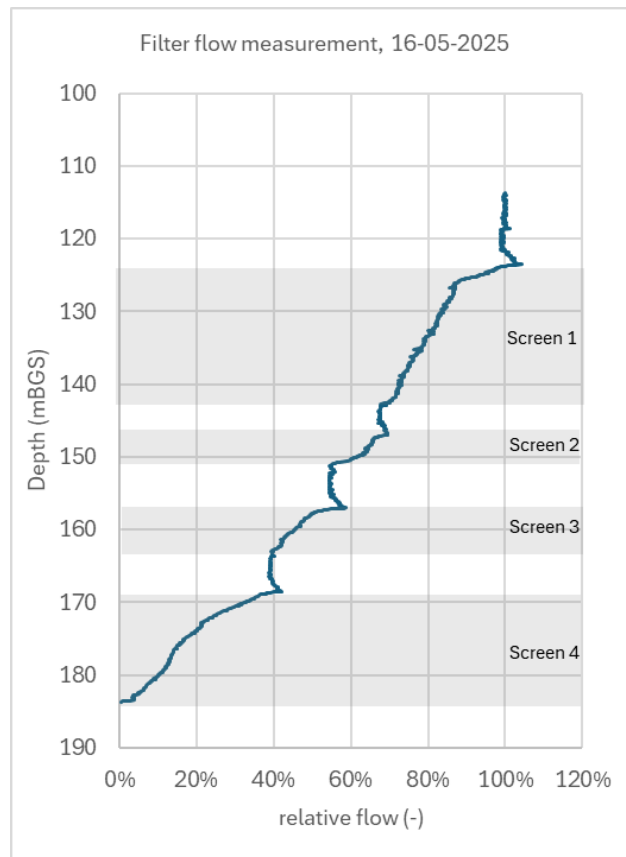


Figure 11: Distribution of the cumulative flow rate in the production screen (x-axis) as a function of depth (y-axis). The increase of flow at the top of each screen is a measurement artefact caused by a change of the flow pattern within the vertical pipe due to a change of the pipe material (from a perforated screen with horizontal inflow to a smooth watertight pipe).

References

Hudson (1996). Use of geophysical logs to estimate the quality of ground water and the permeability of aquifers. U.S. Geological survey, Water-Resources Investigations Report

International Standard ISO 14688-1 (2017). Geotechnical investigation and testing — Identification and classification of soil — Part 1: Identification and description.

Matsui, T., Park, S. G., Park, M. K., & Matsuura, S. (2000). Relationship between electrical resistivity and physical properties of rocks. In ISRM International Symposium (pp. ISRM-IS)

Milzow, C., Kgotlhang, L., Bauer-Gottwein, P., Meier, P., & Kinzelbach, W. (2009). Regional review: the hydrology of the Okavango Delta, Botswana-processes, data and modelling. Hydrogeology journal, 17(6), 1297-1328.

Appendix 1: Haitjema report

Drilling



Grondboorbedrijf Haitjema B.V.

Wisseling 10
7701 GS Dedemsvaart
Tel: 0523-612061

info@haitjema.nl
www.haitjema.nl

Boorprofiel

Conform BRL 2100

Boring : Proefboring HTO **Werkorder** : 20230111
Locatie : Delft **Objectcode** : WKOBRN00270
Projectnaam : Proefboring HTO TU Delft

diepte in meters - maaiveld		omschrijving grondlagen volgens NEN 5104	M50-waarde (µm)
0,00	1,00	ZAND, matig fijn, lichtbruin, kleibrokjes	200
1,00	2,00	ZAND, matig fijn, lichtbruin, kleibrokjes, enkel grindje	200
2,00	3,00	ZAND, matig fijn, grijs, kleibrokjes, enkel grindje	200
3,00	4,00	KLEI, matig vast, grijs	
4,00	5,00	KLEI, matig vast, grijs	
5,00	6,00	KLEI, slap, bruin	
6,00	7,00	KLEI, slap, bruin	
7,00	8,00	KLEI, slap, bruin	
8,00	9,00	KLEI, slap, grijs	
9,00	10,00	KLEI, slap, grijs, zwak zandig	
10,00	11,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokjes	220
11,00	12,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokjes	220
12,00	13,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokjes	220
13,00	14,00	KLEI, matig vast, grijs, zwak zandig	
14,00	15,00	KLEI, matig vast, grijs	
15,00	16,00	KLEI, matig vast, grijs	
16,00	17,00	KLEI, matig vast, grijs	
17,00	18,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokjes	240
18,00	19,00	ZAND, matig grof, grijs, zwak grindig	240
19,00	20,00	ZAND, matig grof, grijs, zwak grindig	240
20,00	21,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
21,00	22,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
22,00	23,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
23,00	24,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
24,00	25,00	ZAND, zeer grof, grijs	360
25,00	26,00	ZAND, zeer grof, grijs, kleibrokjes	360
26,00	27,00	ZAND, uiterst grof, grijs, matig grindig	650
27,00	28,00	ZAND, uiterst grof, grijs, matig grindig	650
28,00	29,00	ZAND, uiterst grof, grijs, matig grindig	650
29,00	30,00	GRIND	800
30,00	31,00	ZAND, uiterst grof, grijs, matig grindig	460
31,00	32,00	ZAND, uiterst grof, grijs	420
32,00	33,00	ZAND, uiterst grof, grijs	420
33,00	34,00	ZAND, uiterst grof, grijs	420
34,00	35,00	ZAND, uiterst grof, grijs	420
35,00	36,00	ZAND, uiterst grof, grijs	420
36,00	37,00	KLEI, matig vast, grijs	
37,00	38,00	KLEI, matig vast, groen	



Grondboorbedrijf Haltjema B.V.

Wisseling 10
7701 GS Dedemsvaart
Tel: 0523-612061

info@haitjema.nl
www.haitjema.nl

Boring : Proefboring HTO **Werkorder** : 20230111
Locatie : Delft **Objectcode** : WKOBRN00270
Projectnaam : Proefboring HTO TU Delft

diepte in meters - maaiveld		omschrijving grondlagen volgens NEN 5104	M50-waarde (µm)
38,00	39,00	KLEI, matig vast, groen	
39,00	40,00	KLEI, matig vast, groen	
40,00	41,00	ZAND, matig grof, grijs	240
41,00	42,00	ZAND, matig grof, grijs	240
42,00	43,00	ZAND, matig grof, grijs	240
43,00	44,00	ZAND, matig grof, grijs	240
44,00	45,00	ZAND, matig grof, grijs	240
45,00	46,00	ZAND, matig grof, grijs	240
46,00	47,00	ZAND, matig fijn, grijs	200
47,00	48,00	ZAND, matig grof, grijs	240
48,00	49,00	ZAND, matig grof, grijs	220
49,00	50,00	ZAND, matig grof, grijs	220
50,00	51,00	ZAND, matig grof, grijs	280
51,00	52,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
52,00	53,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
53,00	54,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
54,00	55,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
55,00	56,00	ZAND, matig grof, grijs	240
56,00	57,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
57,00	58,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
58,00	59,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
59,00	60,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
60,00	61,00	ZAND, zeer grof, grijs	320
61,00	62,00	ZAND, zeer grof, grijs	340
62,00	63,00	ZAND, zeer grof, grijs	340
63,00	64,00	ZAND, zeer grof, grijs	340
64,00	65,00	ZAND, zeer grof, grijs	340
65,00	66,00	ZAND, zeer grof, grijs	340
66,00	67,00	ZAND, zeer grof, grijs	340
67,00	68,00	ZAND, zeer grof, grijs, verkitte klei, enkel grindje, kleibrokjes	340
68,00	69,00	ZAND, zeer grof, grijs, verkitte klei, enkel grindje, kleibrokjes	340
69,00	70,00	KLEI, slap, grijs, zwak grindig	
70,00	71,00	ZAND, matig grof, grijs	260
71,00	72,00	ZAND, matig grof, grijs	260
72,00	73,00	ZAND, matig grof, grijs	260
73,00	74,00	ZAND, matig grof, grijs	260
74,00	75,00	ZAND, matig grof, grijs	260
75,00	76,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokjes	260
76,00	77,00	KLEI, matig vast, grijs	
77,00	78,00	KLEI, matig vast, grijs	
78,00	79,00	KLEI, matig vast, grijs	
79,00	80,00	KLEI, matig vast, grijs	



Grondboorbedrijf Haitjema B.V.

Wisseling 10
7701 GS Dedemsvaart
Tel: 0523-612061

info@haitjema.nl
www.haitjema.nl

Boring : **Proefboring HTO** **Werkorder** : **20230111**
Locatie : **Delft** **Objectcode** : **WKOBRN00270**
Projectnaam : **Proefboring HTO TU Delft**

diepte in meters - maaiveld		omschrijving grondlagen volgens NEN 5104	M50-waarde (µm)
80,00	81,00	KLEI, matig vast, grijs	
81,00	82,00	KLEI, matig vast, grijs	
82,00	83,00	KLEI, matig vast, grijs	
83,00	84,00	KLEI, vast, grijs	
84,00	85,00	KLEI, matig vast, grijs	
85,00	86,00	KLEI, matig vast, grijs	
86,00	87,00	ZAND, matig grof, grijs	260
87,00	88,00	ZAND, matig grof, grijs, verkitte klei	220
88,00	89,00	ZAND, matig grof, grijs	220
89,00	90,00	KLEI, vast, grijs	
90,00	91,00	KLEI, vast, grijs	
91,00	92,00	KLEI, vast, grijs	
92,00	93,00	KLEI, vast, grijs	
93,00	94,00	KLEI, vast, grijs	
94,00	95,00	KLEI, vast, grijs	
95,00	96,00	KLEI, vast, grijs	
96,00	97,00	KLEI, vast, grijs	
97,00	98,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokjes	220
98,00	99,00	ZAND, matig grof, grijs	220
99,00	100,00	KLEI, matig vast, grijs, zwak zandig	
100,00	101,00	KLEI, slap, grijs, zwak zandig	
101,00	102,00	KLEI, slap, grijs, zwak zandig	
102,00	103,00	KLEI, matig vast, grijs, zwak zandig	
103,00	104,00	KLEI, matig vast, grijs	
104,00	105,00	KLEI, vast, grijs	
105,00	106,00	KLEI, vast, grijs	
106,00	107,00	KLEI, vast, grijs, matig zandig	
107,00	108,00	KLEI, vast, grijs, matig zandig, matig schelpengruis	
108,00	109,00	KLEI, matig vast, grijs, matig schelpengruis	
109,00	110,00	KLEI, vast, grijs	
110,00	111,00	KLEI, slap, grijs	
111,00	112,00	KLEI, slap, grijs, matig schelpengruis	
112,00	113,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokjes	220
113,00	114,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokjes	220
114,00	115,00	KLEI, matig vast, grijs	
115,00	116,00	KLEI, matig vast, grijs, matig schelpengruis	
116,00	117,00	KLEI, matig vast, grijs, verkitte klei	
117,00	118,00	KLEI, matig vast, grijs	
118,00	119,00	KLEI, slap, grijs	
119,00	120,00	KLEI, slap, grijs, zwak zandig	
120,00	121,00	KLEI, matig vast, grijs, zwak zandig	
121,00	122,00	KLEI, matig vast, grijs, weinig schelpengruis	
122,00	123,00	KLEI, slap, grijs, zwak zandig, verkitte klei, weinig schelpengruis	
123,00	124,00	ZAND, matig grof, grijs	220



Grondboorbedrijf Haltjema B.V.

Wisseling 10
7701 GS Dedemsvaart
Tel: 0523-612061

info@haitjema.nl
www.haitjema.nl

Boring : Proefboring HTO **Werkorder** : 20230111
Locatie : Delft **Objectcode** : WKOBRN00270
Projectnaam : Proefboring HTO TU Delft

diepte in meters - maaiveld		omschrijving grondlagen volgens NEN 5104	M50-waarde (μm)
124,00	125,00	ZAND, matig grof, grijs, matig schelpengruis	220
125,00	126,00	ZAND, matig fijn, grijs, matig schelpengruis	200
126,00	127,00	ZAND, matig fijn, grijs, veel schelpengruis	200
127,00	128,00	ZAND, matig fijn, grijs, weinig schelpengruis	200
128,00	129,00	ZAND, matig fijn, grijs, kleibrokjes	200
129,00	130,00	ZAND, matig fijn, bruin/grijs, veen-/kleibrokjes	200
130,00	131,00	ZAND, matig fijn, grijs, verkitte klei	180
131,00	132,00	ZAND, matig fijn, grijs, kleibrokjes	180
132,00	133,00	ZAND, matig fijn, grijs, kleibrokjes	180
133,00	134,00	ZAND, matig fijn, grijs, kleibrokjes	180
134,00	135,00	ZAND, matig fijn, grijs, sterk kleiig	180
135,00	136,00	ZAND, matig fijn, grijs, sterk kleiig	180
136,00	137,00	ZAND, matig fijn, grijs, matig kleiig	180
137,00	138,00	ZAND, matig fijn, grijs, zwak kleiig	180
138,00	139,00	ZAND, matig fijn, grijs, verkitte klei	180
139,00	140,00	ZAND, matig fijn, grijs, verkitte klei	200
140,00	141,00	ZAND, matig grof, grijs, verkitte klei	220
141,00	142,00	ZAND, matig grof, grijs	220
142,00	143,00	ZAND, matig grof, grijs, verkitte klei	220
143,00	144,00	ZAND, matig grof, grijs, verkitte klei	220
144,00	145,00	ZAND, matig grof, grijs, veel kleibrokken	220
145,00	146,00	ZAND, matig grof, grijs, enkele kleibrok, weinig schelpresten, verkitte klei	220
146,00	147,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokken	220
147,00	148,00	ZAND, matig grof, grijs	220
148,00	149,00	ZAND, matig grof, grijs	220
149,00	150,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokken	220
150,00	151,00	ZAND, matig fijn, grijs, kleibrokken	200
151,00	152,00	ZAND, matig grof, grijs, weinig schelpresten	220
152,00	153,00	ZAND, matig grof, grijs, sterk kleiig	220
153,00	154,00	KLEI, matig vast, grijs, zwak zandig	
154,00	155,00	ZAND, matig grof, grijs, sterk kleiig, weinig schelpenresten	220
155,00	156,00	KLEI, vast, grijs, zwak zandig	
156,00	157,00	ZAND, zeer grof, grijs, enkele kleibrokjes	320
157,00	158,00	ZAND, matig grof, grijs	280
158,00	159,00	ZAND, matig grof, grijs, veel kleibrokken	280
159,00	160,00	ZAND, matig grof, grijs	280
160,00	161,00	ZAND, matig grof, grijs, weinig kleibrokken	240
161,00	162,00	ZAND, matig grof, grijs, veel kleibrokken	240
162,00	163,00	ZAND, matig grof, grijs, sterk kleiig	240
163,00	164,00	ZAND, matig grof, grijs, sterk kleiig, verkitte klei	240
164,00	165,00	KLEI, matig vast, grijs, sterk zandig	
165,00	166,00	KLEI, matig vast, grijs, sterk zandig, verkitte klei	
166,00	167,00	ZAND, matig grof, grijs, verkitte klei	220
167,00	168,00	ZAND, matig grof, grijs, matig kleibrokken	240
168,00	169,00	ZAND, matig grof, grijs, enkel kleibrokje, verkitte klei	240



Grondboorbedrijf Haltjema B.V.

Wisseling 10
7701 GS Dedemsvaart
Tel: 0523-612061

info@haltjema.nl
www.haltjema.nl

Boring : Proefboring HTO **Werkorder** : 20230111
Locatie : Delft **Objectcode** : WKOBRN00270
Projectnaam : Proefboring HTO TU Delft

diepte in meters - maaiveld		omschrijving grondlagen volgens NEN 5104	M50-waarde (µm)
169,00	170,00	ZAND, matig grof, grijs, verkitte klei	220
170,00	171,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokjes, weinig schelpenresten	220
171,00	172,00	ZAND, matig grof, grijs, verkitte klei	220
172,00	173,00	ZAND, matig grof, grijs, enkele kleibrokken, verkitte klei	240
173,00	174,00	ZAND, matig grof, grijs, veel kleibrokken, verkitte klei	240
174,00	175,00	ZAND, matig grof, grijs, veel kleibrokken, verkitte klei	220
175,00	176,00	ZAND, matig grof, grijs, schelpresten, veel kleibrokken, verkitte klei	220
176,00	177,00	ZAND, matig grof, grijs, schelpresten, veel kleibrokken, kleisteen	220
177,00	178,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokjes, kleisteen	220
178,00	179,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokjes, kleisteen	220
179,00	180,00	ZAND, matig grof, grijs, enkele schelpen, sterk kleilig	220
180,00	181,00	ZAND, matig grof, grijs, veel schelpen, kleibrokjes, enkele steen	240
181,00	182,00	ZAND, matig grof, grijs, verkitte klei, matig schelpen	240
182,00	183,00	ZAND, matig fijn, grijs, verkitte klei, matig schelpen, kleibrokjes	200
183,00	184,00	ZAND, matig fijn, grijs, zwak kleilig, enkele schelp, enkele steen	200
184,00	185,00	KLEI, matig vast, grijs, kleisteen	
185,00	186,00	KLEI, vast, grijs, verkitte klei	
186,00	187,00	KLEI, vast, grijs, verkitte klei	
187,00	188,00	KLEI, vast, grijs, verkitte klei	
188,00	189,00	KLEI, vast, grijs	
189,00	190,00	KLEI, vast, grijs, weinig schelpengruis	
190,00	191,00	STENEN, grijs, enkel kleibrokje	
191,00	192,00	ZAND, matig fijn, grijs, sterk kleilig	200
192,00	193,00	ZAND, matig fijn, grijs, sterk kleilig	200
193,00	194,00	ZAND, matig grof, grijs	220
194,00	195,00	ZAND, matig grof, grijs, sterk kleilig	220
195,00	196,00	ZAND, matig grof, grijs, sterk kleilig	220
196,00	197,00	ZAND, matig grof, grijs, sterk kleilig	220
197,00	198,00	ZAND, matig grof, grijs, kleibrokken	220
198,00	199,00	KLEI, matig vast, grijs, zwak zandig	
199,00	200,00	KLEI, vast, grijs	
200,00	201,00	KLEI, vast, grijs	
201,00	202,00	KLEI, vast, grijs	
202,00	203,00	KLEI, vast, grijs	
203,00	204,00	KLEI, vast, grijs	
204,00	205,00	KLEI, vast, grijs	
205,00	206,00	KLEI, vast, grijs	
206,00	207,00	KLEI, vast, grijs	
207,00	208,00	KLEI, vast, grijs	
208,00	209,00	KLEI, vast, grijs	
209,00	210,00	ZAND, matig fijn, grijs, weinig schelpresten	200
210,00	211,00	ZAND, matig fijn, grijs, sterk kleilig	200
211,00	212,00	ZAND, matig fijn, grijs, zwak kleilig, verkitte klei	200
212,00	213,00	KLEI, slap, grijs, zwak zandig	
213,00	214,00	KLEI, matig vast, grijs	



Grondboorbedrijf Haitjema B.V.

Wisseling 10
7701 GS Dedemsvaart
Tel: 0523-612061

info@haitjema.nl
www.haitjema.nl

Boring : Proefboring HTO **Werkorder** : 20230111
Locatie : Delft **Objectcode** : WKOBRN00270
Projectnaam : Proefboring HTO TU Delft

diepte in meters - maaiveld		omschrijving grondlagen volgens NEN 5104	M50-waarde (μm)
214,00	215,00	KLEI, matig vast, grijs	
215,00	216,00	KLEI, matig vast, grijs	
216,00	217,00	KLEI, matig vast, grijs	
217,00	218,00	KLEI, matig vast, grijs	
218,00	219,00	KLEI, matig vast, grijs	
219,00	220,00	KLEI, matig vast, grijs	
220,00	221,00	KLEI, vast, grijs	
221,00	222,00	KLEI, vast, grijs	
222,00	223,00	KLEI, vast, grijs	
223,00	224,00	KLEI, vast, grijs	
224,00	225,00	KLEI, vast, grijs	
225,00	226,00	KLEI, vast, grijs	
226,00	227,00	KLEI, vast, grijs	
227,00	228,00	KLEI, vast, grijs	
228,00	229,00	KLEI, vast, grijs	
229,00	230,00	KLEI, vast, grijs	
230,00	231,00	KLEI, vast, grijs	
231,00	232,00	KLEI, vast, grijs	
232,00	233,00	KLEI, vast, grijs	
233,00	234,00	KLEI, matig vast, grijs	

Completion



Grondboorbedrijf Haitjema B.V.

Wisseling 10
7701 GS Dedemsvaart
Tel: 0523-612061

info@haitjema.nl
www.haitjema.nl

Afwerkingsstaat

Boring : Proefboring HTO **Werkorder** : 20230111
Locatie : Delft **Objectcode** : WKOBRN00270
Projectnaam : Proefboring HTO TU Delft

CONSTRUCTIE

	diepte m-m.v.		lengte	materiaal	diameter mm	perf mm	filterzand
Pompkamer	+0,80	48,05	48,85	pvc	315 / 285		
Stijgbuis	48,05	123,64	75,59	pvc	160 / 144,6		
Filter	123,64	143,00	19,36	pvc	160 / 144,6	0,4	0,6-1,0
Blind	143,00	147,00	4,00	pvc	160 / 144,6		
Filter	147,00	151,00	4,00	pvc	160 / 144,6	0,4	0,6-1,0
Blind	151,00	157,00	6,00	pvc	160 / 144,6		
Filter	157,00	163,00	6,00	pvc	160 / 144,6	0,4	0,6-1,0
Blind	163,00	168,48	5,48	pvc	160 / 144,6		
Filter	168,48	183,00	14,52	pvc	160 / 144,6	0,4	0,6-1,0
Zandvang	183,00	183,74	0,74	pvc	160 / 144,6		

PEILBUISCONSTRUCTIE

stijgbuis m-m.v.		diam mm	materiaal	nummer	filter m-m.v.		materiaal	perf mm	diam mm
+0,85	50,00	63/55,4	pvc	1					
50,00	72,00	32/28	pvc	1	72,00	74,00	pvc	0,5	32/28
+0,80	50,00	63/55,4	pvc	2					
50,00	97,50	32/28	pvc	2	97,50	98,50	pvc	0,5	32/28
+0,75	50,00	63/55,4	pvc	3					
50,00	112,50	32/28	pvc	3	112,50	113,50	pvc	0,5	32/28
+0,70	50,00	76,1x2,0	rvs	4					
50,00	124,00	33,4x2,77	rvs	4	124,00	126,00	rvs	0,4	33,7x2,77
+0,65	50,00	76,1x2,0	rvs	5					
50,00	140,00	33,4x2,77	rvs	5	140,00	142,00	rvs	0,4	33,7x2,77
+0,60	50,00	76,1x2,0	rvs	6					
50,00	147,00	33,4x2,77	rvs	6	147,00	149,00	rvs	0,4	33,7x2,77
+0,55	50,00	76,1x2,0	rvs	7					
50,00	157,00	33,4x2,77	rvs	7	157,00	159,00	rvs	0,4	33,7x2,77
+0,50	50,00	76,1x2,0	rvs	8					
50,00	169,00	33,4x2,77	rvs	8	169,00	171,00	rvs	0,4	33,7x2,77
+0,45	50,00	63/55,4	pvc	9					
50,00	193,00	32/28	pvc	9	193,00	194,00	pvc	0,5	32/28

Verbindingen	Lijm/tromp
Afwerking	Bron: Stalen kap 315 mm
	Peilbuizen: PVC: Puntstuk ø 63 mm en doorboorde kap
	RVS: T-stuk met kogelkraan 2,5" met dop

Opmerkingen **DTS-kabel wordt mee ingebouwd aan de peilfilter 9, tot 194m -mv**

Bovengenoemde hoogte stijgbuis van de peilbuizen is een indicatieve waarde.

Voor extra hoogtes t.o.v. maaiveld zie capaciteitsproef.



Grondboorbedrijf Haitjema B.V.

Wisseling 10
7701 GS Dedemsvaart
Tel: 0523-612061

info@haitjema.nl
www.haitjema.nl

Aanvulstaat

Conform BRL 2100

Boring : Proefboring HTO **Werkorder** : 20230111
Locatie : Delft **Objectcode** : WKOBRN00270
Projectnaam : Proefboring HTO TU Delft

Afwijking BRL2100 : nee

diepte in meters - maaiveld		aanvulmateriaal	diepte in meters - maaiveld		aanvulmateriaal
0,00	3,00	Aanvulgrind 2-8	184,00	192,00	Mikoliet 00
3,00	5,00	Mikoliet 00	192,00	195,00	Filterzand 0,6-1,0
5,00	8,00	Aanvulgrind 2-8	195,00	200,00	Mikoliet 00
8,00	10,00	Mikoliet 00	200,00	205,00	Aanvulgrind 2-8
10,00	12,00	Aanvulgrind 2-8	205,00	209,00	Mikoliet 00
12,00	18,00	Mikoliet 00	209,00	212,00	Aanvulgrind 2-8
18,00	35,00	Aanvulgrind 2-8	212,00	214,00	Mikoliet 00
35,00	41,00	Mikoliet 00	214,00	222,00	Aanvulgrind 2-8
41,00	52,00	Aanvulgrind 2-8	222,00	224,00	Mikoliet 00
52,00	56,00	Mikoliet 00	224,00	232,00	Aanvulgrind 2-8
56,00	68,00	Aanvulgrind 2-8	232,00	234,00	Mikoliet 00
68,00	71,00	Mikoliet 00			
71,00	75,00	Filterzand 0,6-1,0			
75,00	78,00	Mikoliet 00			
78,00	83,00	Aanvulgrind 2-8			
83,00	86,00	Mikoliet 00			
86,00	89,00	Aanvulgrind 2-8			
89,00	92,00	Mikoliet 00			
92,00	94,00	Aanvulgrind 2-8			
94,00	97,00	Mikoliet 00			
97,00	100,00	Filterzand 0,6-1,0			
100,00	105,00	Mikoliet 00			
105,00	108,00	Aanvulgrind 2-8			
108,00	112,00	Mikoliet 00			
112,00	114,00	Filterzand 0,6-1,0			
114,00	116,00	Mikoliet 00			
116,00	119,00	Aanvulgrind 2-8			
119,00	123,00	Mikoliet 300			
123,00	144,00	Filterzand 0,6-1,0			
144,00	146,00	Mikoliet 00			
146,00	152,00	Filterzand 0,6-1,0			
152,00	156,00	Mikoliet 00			
156,00	163,50	Filterzand 0,6-1,0			
163,50	167,00	Mikoliet 00			
167,00	184,00	Filterzand 0,6-1,0			

Appendix 2: IF Technology report

Hoge Temperatuur Opslag op de TU Delft
Rapportage proefboring





Datum 11 oktober 2024

Referentie PR09968/RDx/20241011

Betreft Rapportage Proefboring HTO TU Delft

Behandeld door Peter Oerlemans

Benno Drijver

Jelle van Veen

Gecontroleerd door Frederik Jansen, Benno Drijver, Peter Oerlemans

Versienummer Eindversie

UITGEVOERD DOOR

IF Technology B.V.
Velperweg 37
Postbus 605
6800 AP Arnhem
www.iftechnology.nl



OPDRACHTGEVERS

TU Delft
t.a.v. Bart Simons
Stevinweg 1
Postbus 5048
E: j.g.simons@tudelft.nl



Energie Beheer Nederland
Daalsesingel 1
3511 SV Utrecht
www.ebn.nl



Shell Geothermal B.V.
Carel van Bylandtlaan 30
2596 HR 's-Gravenhage
www.shell.com



1 Inleiding

1.1 Hoge temperatuuropslag in Delft

De rol van HTO in de warmtetransitie Delft

Op de campus van de TU Delft wordt een geothermiesysteem gerealiseerd die duurzame warmte gaat leveren aan het warmtenet van de Campus en aan het Open Warmtenet Delft (OWD). In de zomer is meer warmte uit de geothermiebron beschikbaar dan vanuit de warmtenetten gevraagd wordt, waardoor een warmte-overschot bestaat in de zomer. Tegelijkertijd is het vermogen van de geothermiebron in de winter niet toereikend voor de warmtevraag die dan heerst, waardoor fossiele centrales worden ingezet om in de warmtevraag te voorzien. Het aanleggen van een HTO kan hier een oplossing bieden, omdat het de rol van seizoensopslag kan vervullen. In de HTO wordt overtollige warmte uit de geothermiebron op grote schaal opgeslagen gedurende de zomer, om het in de winter terug te kunnen leveren en de inzet van fossiele centrales terug te dringen. Daarmee wordt op jaarbasis meer duurzame geothermische warmte geproduceerd en aan het warmtenet geleverd ten opzichte van de situatie zonder HTO-systeem. Het resultaat is een reductie van de CO₂-uitstoot van de warmtevoorziening in Delft. Vanwege de positieve bijdrage die HTO kan leveren aan de warmtetransitie is de potentie ervan in Delft de afgelopen jaren uitgebreid onderzocht, in verschillende studies en onderzoeksprogramma's.

Onderzoeksprogramma's HTO Delft

De onderzoeksprogramma's 'WINDOW' (2019-2020) en 'WarmingUP' (2020-2022) hebben bijgedragen aan de ontwikkeling van de ondergrondse warmteopslagtechniek 'Hoge Temperatuur Opslag' (HTO) in Nederland. In de programma's zijn Quickscans uitgevoerd voor verschillende locaties door heel Nederland en de projecten met de hoogste potenties zijn geselecteerd voor nader onderzoek middels uitgebreide haalbaarheidsstudies ('Verkenningen'). Delft is één van de geselecteerde locaties. De Verkenning van Delft (2020, zie website WarmingUP of [deze link](#)) liet zien dat er meerdere geologische formaties in de Delftse bodem aanwezig zijn die kansen bieden voor HTO. Na deze Verkenning is in 2022 een boring uitgevoerd bij de Delftse Hout, circa 2km ten noorden van de projectlocatie, om informatie te vergaren over de dieper gelegen formaties van Oosterhout en Ommelanden. Daarna is begin 2023 een proefboring voor een WKO-project (Kabeldistrict) uitgevoerd op circa 500 m ten westen van de campus, die meer locatie-specifieke bodeminformatie verschaft. Het beeld dat naar voren kwam uit deze onderzoeken is dat de potentie voor HTO het grootst is in de Formatie van Maassluis, in zandlagen tussen circa 100 en 180 m diepte. Op basis van deze resultaten en via deelname aan de (inter)nationale onderzoeksprogramma's WarmingUP GOO en 'PUSH-IT' kon de volgende stap worden genomen in de ontwikkeling van een HTO-systeem in Delft: het uitvoeren van een proefboring op de projectlocatie. Deze proefboring heeft plaatsgevonden in 2024 en de opzet en resultaten ervan zijn in deze rapportage beschreven.

1.2 Leeswijzer

De voorliggende rapportage doet verslag van de uitgevoerde proefboring voor het HTO-systeem in Delft. In het vervolg van hoofdstuk 1 zijn de betrokken partijen, het doel van de proefboring, de vervolgstappen voor na de proefboring en de projectlocatie beschreven. Hoofdstuk 2 geeft in chronologische volgorde weer welke activiteiten er zijn uitgevoerd met betrekking tot realisatie en testen van de proefboring. In hoofdstuk 3 is de inbouw en afwerking van de proefboring beschreven. Hoofdstuk 4 gaat in op de uitgevoerde testen en de resultaten daarvan. In hoofdstuk 5 zijn de aangetroffen bodemopbouw en bodemeigenschappen beschreven. Uiteindelijk worden in hoofdstuk 6 de belangrijkste conclusies en aanbevelingen gedeeld.

Dit rapport bevat niet de vertaling van de aangetroffen bodemeigenschappen naar een advies voor het aantal benodigde bronnen en de optimale filterstelling van toekomstige HTO-bronnen, omdat er voor die bronconfiguratie behalve geologische aspecten ook energetische en financieel-economische aspecten en andere keuzes op systeemniveau bij komen kijken.

1.3 Betrokken partijen

De TU Delft, EBN en Shell zijn de opdrachtgevers van de proefboring. De boring is uitgevoerd door de boorfirma Haitjema. IF Technology heeft als adviseur, en in samenwerking met de opdrachtgevers en de boorpartij, de boring voorbereid, de uitvoering begeleid en de resultaten geïnterpreteerd en gerapporteerd. Daarnaast zijn een aantal derden betrokken voor uitvoering van specifieke metingen en/of analyses, zoals Deltares voor de boorgatmeting en verschillende laboratoria voor de grondwateranalyses.

1.4 Doel proefboring

Het doel van de proefboring is om de bodemeigenschappen in het opslagpakket van Maassluis, en de kleilagen die daarboven, daaronder en daarbinnen aanwezig zijn, nauwkeuriger in kaart te brengen. Door middel van een proefboring tot 234 m-mv zijn de bodemopbouw en bodemeigenschappen onderzocht. De proefboring heeft inzicht gegeven in:

- Dikte, doorlatendheid en samenstelling van de potentiële opslagpakketten;
- Dikte en afsluitende werking van de kleilagen boven, onder en in het opslagpakket;
- Stijghoogte en watersamenstelling van verschillende watervoerende pakketten;
- Temperatuurverloop van de ondergrond over de diepte van de put.

Het document 'Meetprogramma voor proefboring HTO op de TU Delft' (referentie PR09968/RK/20230724) beschrijft in groter detail wat de vooraf verwachte bodemeigenschappen waren, welke strategische keuzes zijn gemaakt voor de proefboring, welke onderzoeksvragen daaruit voortvloeien en met welke meetactiviteiten de benodigde data wordt vergaard. Dit document is uitgebreid besproken met TU Delft en haar partners (EBN, Shell) en vastgesteld, zodat de proefboring op basis daarvan kon worden voorbereid en uitgevoerd.

De voorliggende Rapportage Proefboring beantwoordt in hoofdstuk 5 ('Eigenschappen ondergrond') de onderzoeksvragen over de bodem die zijn gesteld in het Meetprogramma.

1.5 Vooruitblik na proefboring

Met de informatie over de ondergrond uit dit rapport kan de potentie van de aangetroffen bodemlagen voor HTO in de toekomst inzichtelijk worden gemaakt en kan worden toegewerkt naar een Go/No-go besluit voor het ontwerp en de realisatie van het HTO-systeem. Om daar invulling aan te geven adviseert IF Technology om de volgende onderdelen verder uit te werken:

1. De filterstelling-opties die mogelijk zijn voor de HTO-bronnen
2. Per filterstelling-optie bepalen wat het maximaal debiet is dat een HTO-bron kan leveren, waarbij het risico van deeltjesproductie en bijbehorende putverstopping acceptabel blijft;
3. Per filterstelling-optie berekenen welk terugwinrendement verwacht mag worden;
4. Per filterstelling-optie beoordelen wat de risico's zijn voor verstoppingen gerelateerd aan de (verschillende) grondwatersamenstelling in het pakket;
5. Keuze maken van de voorkeursfilterstelling, op basis van resultaten van bovenstaande stappen;
6. Updaten van het systeemconcept en energiestromen;
7. Berekenen hernieuwde businesscase;
8. Opstellen van een risicoanalyse;
9. Keuze maken in de uitgangspunten voor het HTO-systeem en besluit tot ontwerp en realisatie.

De proefboring levert niet alleen cruciale informatie op voor het bepalen van de haalbaarheid van HTO. De detailgegevens die zijn verkregen en inzichten in risico's die daaruit kunnen worden afgeleid zijn van groot belang voor het HTO-ontwerp en de realisatie van het HTO-systeem. Bovendien is de proefboring zodanig ingestoken dat een monitoringsput wordt gerealiseerd die tijdens de exploitatiefase kan worden gebruikt als monitoringsput voor het HTO-systeem. Mogelijk wordt de proefbron ook gebruikt als werkwaterbron tijdens realisatie van de hete HTO-bronnen, om schone bronnen met weinig skin te kunnen realiseren. Vanwege een aantal problemen die met de proefbron zijn opgetreden na het afdichten van de diepe filtersecties met beton, dient te worden gekeken in hoeverre aanvullende acties nodig zijn om de functie van monitoringsput goed te kunnen vervullen, en of het nog mogelijk is de bron als werkwaterbron te gebruiken (zie ook de aanbevelingen in hoofdstuk 6).

1.6 Locatie

Bij het kiezen van de locatie van de proefbron is rekening gehouden met verschillende factoren. Allereerst moet de bodem die is aangetroffen representatief zijn voor de bodem bij de hete HTO-bronnen. Daarnaast wordt de proefbron afgewerkt als monitoringsput om metingen aan de hete bel uit te voeren en dient daarom op de juiste afstand van de bronnen gerealiseerd te worden. Om die reden is de proefboring geplaatst dichtbij de beoogde locaties voor de hete HTO-bronnen. Daarom is eerst een besluit genomen over de locatie van de lauwe en hete bronnen van het HTO-systeem, rekening houdend met de volgende uitgangspunten voor de ruimtelijke inpassing van de bronnen:

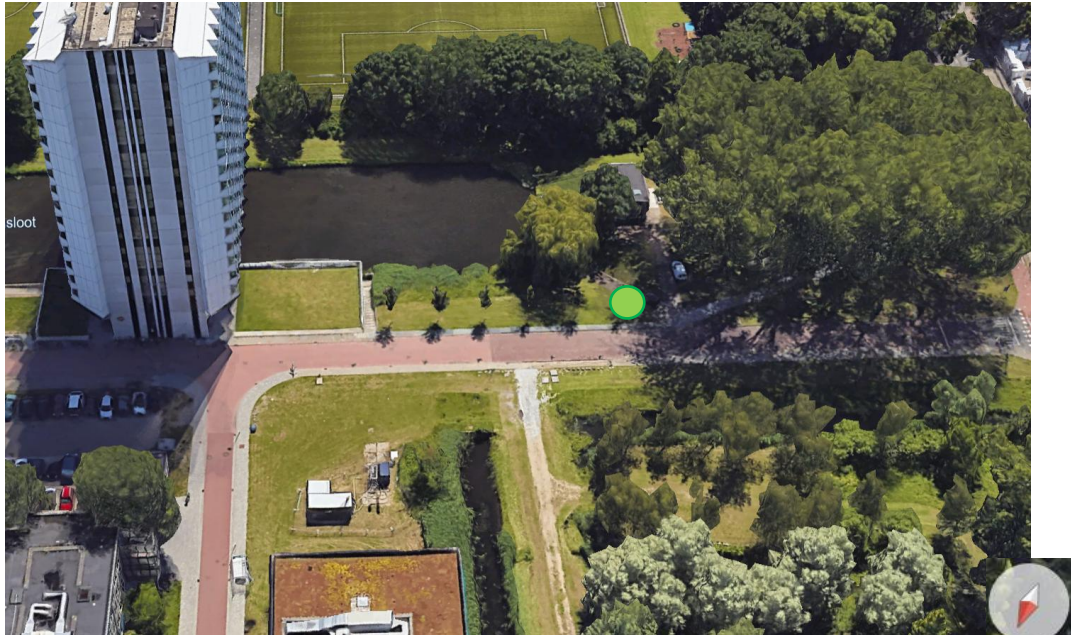
- Het systeem bestaat uit één of meerdere hete bronnen en één of meerdere lauwe bronnen;
- De hete bronnen worden in de groenstrook ten noordoosten van de kruising tussen de Balthasar van der Polweg en de Rotterdamseweg geplaatst.
- De lauwe bronnen worden ten noordoosten van de kruising van de Cornelis Drebbelweg en de Rotterdamseweg geplaatst.
- De bronnen komen op een locatie waar het verbindend leidingwerk naar de technische ruimte realiseerbaar is.

Om de monitoringsfunctie goed in te kunnen vullen is de proefbron op zo'n 30 meter van de hete bronzone geplaatst. Zie Figuur 1.1.



Figuur 1.1 | Zoekgebieden voor de HTO-bronnen (blauw: lauwe bronnen, rood: hete bronnen) en de locatie van de proefboring (zwarte kruis).

In Figuur 1.2 is de projectlocatie en de positie van de proefbron weergegeven met satellietbeeld.



Figuur 1.2 | Locatie proefboring aan de Balthasar van der Polweg (RD-coördinaten (m): $X = 65297$, $Y = 445757$).

2 Werkzaamheden

In onderstaande tabel zijn in chronologische volgorde de belangrijkste werkzaamheden opgesomd. De uitgevoerde werkzaamheden zijn in meer detail uitgewerkt in Bijlage 2.

Werkzaamheden	Datum uitgevoerd
Inrichten werkerrein	di 25 maart - vr 28 maart
Boren en nemen steekmonsters	di 2 april - di 9 april
Boorgatmeting en filterstelling	wo 10 april
Inbouwen en omstorten	do 11 april - ma 22 april
Booropstelling ombouwen voor schoonpompen	di 23 april - wo 24 april
Schoonpompen en testen beide filterdelen	vr 26 april - di 21 mei
Tussentijds bemonsteren	wo 22 mei - do 23 mei
Schoonpompen en testen diepe filterdelen m.b.v. een packer	ma 27 mei - di 4 juni
Afdichten bronfilter secties 3 en 4	di 4 juni - vr 7 juni
Test op bovenste filterdelen	di 11 juni
Opnieuw schoonpompen peilbuizen	wo 12 juni
Camera-inspectie in de bron	do 13 juni
Opruimen	do 13 juni - vr 14 juni
Putafwerking	do 1 juli
Oplevering controle 1	wo 7 augustus
Bemonsteren	wo 22 mei (ronde 1, dag 1) do 23 mei (ronde 1, dag 2) wo 7 aug. (ronde 2, dag 1) wo 28 aug. (ronde 2, dag 2)
Putafwerking - resterende acties ¹	xx
Oplevering controlemoment 2 ¹	xx

¹de putafwerking en oplevering zijn nog niet geheel afgerond

Tabel 2.1 | Samenvatting uitgevoerde werkzaamheden

3 Filterstelling en bronconstructie

In dit hoofdstuk staat beschreven hoe de eigenschappen van de bron tot stand zijn gekomen. De filterstelling, bronconstructie en putafwerking komen aan de orde.

3.1 Filterstelling

De filterstelling is uitgevoerd op het moment dat de boring op einddiepte was en de boorgatmeting is uitgevoerd. Op basis van de bodemonsters en de logs van de boorgatmeting is bepaald op welke dieptes de bron- en peilfilters worden gesteld. Hieronder staat de filterstelling nader omschreven.

De boor-, inbouw- en aanvulstaat zijn weergegeven in Bijlage 3. In Bijlage 4 zijn foto's opgenomen van de monsterbakken. De resultaten van de boorgatmeting zijn weergegeven in Bijlage 5.

Criteria filterstelling

De opgave was om de filterstelling (i.e. de dieptes van proefbron en peilbuizen) zodanig te kiezen dat de gestelde onderzoeksdoelen uit hoofdstuk 1.4 van dit rapport en het meetprogramma (referentie PR09968/RK/20230724) konden worden behaald. De focus lag daarbij op het inzichtelijk maken van bodemparameters die de ondergrondse potentie van HTO bepalen, zoals de dikte en doorlatendheid van het beoogde opslagpakketten en de dikte en weerstand van de kleilagen boven, onder en in dat pakket. Daarnaast moest de filterstelling van de peilbuizen zodanig worden gekozen dat de grondwatereigenschappen op verschillende dieptes in kaart kon worden gebracht.

Proces van de filterstelling

Het toewerken naar de definitieve filterstelling vond plaats via de volgende stappen:

- De einddiepte van de boring is op basis van het vooronderzoek vastgesteld op 230 m-mv. Nadat deze diepte bereikt werd, is overlegd of het voor het onderzoek nuttig was om tot 250 m-mv door te boren. Dit zou alleen gebeuren als er mogelijk potentieel voor HTO rond deze diepte zou zitten. Dit potentieel is op basis van de boormonsters niet aangetroffen, waardoor de einddiepte van het boorgat van de proefbron uiteindelijk is uitgekomen op 234 m-mv.
- Vervolgens heeft Deltares een boorgatmeting in het open boorgat uitgevoerd. De bodemonsters en boorgatmeting zijn op locatie geanalyseerd en via videoverbinding besproken door Deltares, Haitjema, TU Delft, EBN en IF Technology. Op basis van de bodemsituatie is vervolgens een filterstelling geformuleerd en vastgesteld. Bij verschil tussen de bodemonsters en boorgatmeting is de boorgatmeting als leidend genomen voor de verwachte bodemopbouw, en voor de bepaling van de aanvulstaat, op verzoek van de opdrachtgever.
- IF Technology en Haitjema hebben de filterstelling technisch verder uitwerkt en daarna is Haitjema begonnen met het inbouwen van de proefbron en peilbuizen.

Aangetroffen bodemopbouw

Op basis van de beschikbare informatie voorafgaand aan de proefboring werd de formatie van Maassluis als meest kansrijk opslagpakket voor HTO gezien, in het dieptetraject 95 - 230 m-mv. De

proefboring heeft daarom gefocust op het nader in kaart brengen van de eigenschappen van dat opslagpakket en de kleilagen die erboven, eronder en erin aanwezig zijn.

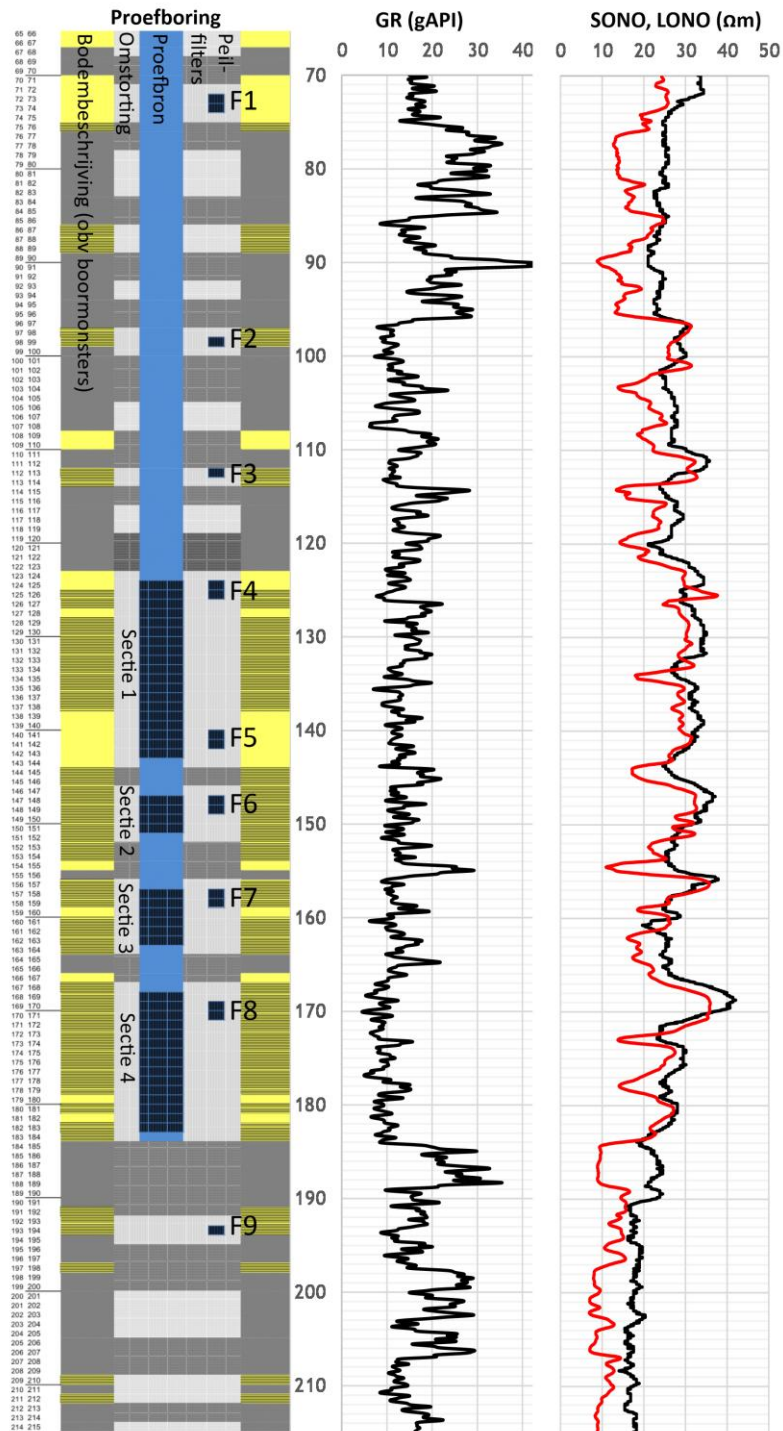
Na de boring zijn de geroerde monsters uit de monsterbakken per meter beschreven en is de boorgatmeting uitgevoerd en geïnterpreteerd. Op basis van die data is na de boring en voorafgaand aan de filterstelling het volgende beeld van de ondergrond ontstaan:

- Het opslagpakket in de formatie van Maassluis bestaat voornamelijk uit zand. Het bevindt zich tussen circa 123 - 184 m-mv en bevat ook kleiige laagjes. In dit dieptetraject kan bronfilter worden gesteld voor de proefbron, eventueel in verschillende secties.
- De afsluitende kleilaag boven het opslagpakket is aangetroffen tussen circa 75 - 123 m-mv. Dit was een positief resultaat want deze dikke kleilaag leek op basis van de boorgatmeting en monsterbakken een goede afsluitende werking te hebben. Een dikke kleilaag verhindert stroming van het opslagpakket naar ondiepere lagen (en vice versa).
- Vanaf de onderkant van het opslagpakket (ca. 184 m-mv) tot aan de einddiepte van de boring (234 m-mv) is voornamelijk klei aangetroffen. Dat betekent in de eerste plaats dat deze kleilaag voorkomt dat het opslagpakket grondwater kan uitwisselen met diepere zandlagen. Tegelijkertijd laat het zien dat er tussen 184 - 234 m-mv geen zandlagen aanwezig zijn die eventueel als opslagpakket kunnen worden gebruikt. Op basis van de boring bij Kabeldistrict was het vermoeden dat hier nog wel dunne zandlagen aanwezig konden zijn, maar die zijn dus niet aangetroffen.

Op basis van de aangetroffen bodemopbouw is tijdens de filterstelling besloten om zoveel mogelijk filter te stellen in het opslagpakket, zodat middels de geplande testen informatie kon worden vergaard over de geohydrologische eigenschappen van de zandlagen op verschillende dieptes binnen de formatie van Maassluis. Op drie dieptes binnen het opslagpakket zijn kleilagen of sterk kleiige zandlagen gevonden waar geen bronfilter kon worden gesteld. De filterstelling die is overeengekomen bevat daarom vier verschillende bronfiltersecties, tussen 123 en 183 m-mv. Ondanks dat tussen deze secties volgens de boormonsters niet altijd een duidelijke kleilaag naar voren kwam, liet de boorgatmeting wel duidelijk hogere GR-waardes zien en daarom is op die dieptes wel mikoliet als aanvulmateriaal gebruikt: daardoor werden de drie bronfilterstsecties binnen het boorgat duidelijk van elkaar gescheiden en dit maakte packertesten mogelijk. Tijdens het opstellen van het monitoringsplan voor de proefboring kwam het risico op de aanwezigheid van een redoxgrensvlak in het opslagpakket naar voren. Dit aspect was aanleiding om meerdere peilbuizen op verschillende dieptes in het opslagpakket te plaatsen zodat dit grensvlak gelokaliseerd kon worden. Bronfilters van de proefbron zijn wel bewust over dit grensvlak geplaatst om de eigenschappen van alle zandlagen in de formatie te kunnen testen.

Figuur 3.1 bevat een visualisatie van de bodemopbouw tussen 65 - 215 m-mv met daarin de bronfilters van de proefbron en de geïnstalleerde peilfilters. Op basis van de bodemmonsters en boorgatmeting is geconstateerd dat er een goed afsluitende kleilaag boven zandlaag 1 aanwezig is. Deze kleilaag kan als deksel van de HTO dienen. Het is niet zeker of deze laag voldoende capaciteit kan leveren, daarom is ook filter geplaatst in de zandlagen 2,3 en 4.

Detailinformatie over de bronconstructie is opgenomen in hoofdstuk 3.2. De precieze bodemopbouw en bodemeigenschappen zoals die zijn afgeleid uit alle informatie en de testen zijn weergegeven in Figuur 5.1.



Figuur 3.1 | Bodemopbouw en constructie van bron en peilbuizen in dieptetraject 65 – 215 m-mv. Links: Aangetroffen bodemopbouw volgens de boormonsters (grijs: klei, geel: matig grof- matig fijn zand, gestreept: zand met klei in bijmenging). Ook de bronconstructie (blauw: blinde buis, zwart: bronfilter) en de omstorting (donker: klei, licht: zand) zijn weergegeven. Rechts: Het resultaat van de boorgatmeting (GR links, en SONO (rood) en LONO (zwart) rechts).

3.2 Bronconstructie

In onderstaande Tabel 3.1 is de constructie van de proefbron en de peilbuizen weergegeven. De boor-, inbouw-, en aanvulstaat staan in Bijlage 3.

Tabel 3.1 | constructie van proefbron en peilbuizen.

Onderdeel bronconstructie	specificatie	
Proefbron in kansrijk HTO-opslagpakket	Materiaal	PVC
	Filtertrajecten	van 123,64 tot 143 m-mv (19,36m) van 147 tot 151 m-mv (4m) van 157 tot 163 m-mv (6m) van 168,48 tot 183 m-mv (14,52m)
	Pompkamerlengte	48,05 m
	Zandvanglengte	0,74 m
Peilbuizen	Materiaal	PVC: 1, 2, 3, 9 RVS: 4, 5, 6, 7, 8
	Filterdiepte	Peilbuis 1: 72 - 74 m-mv De peilbuis staat onderin het 2e WVP. Peilbuis 2: 97,5 - 98,5 m-mv De peilbuis staat in een dunne zandlaag midden in de scheidende laag van 76 - 123 m-mv. Peilbuis 3: 112,5 - 113,5 m-mv De peilbuis staat in een dunne zandlaag direct boven de afsluitende kleilaag van het filtertraject. Peilbuis 4: 124 - 126 m-mv De peilbuis staat bovenin het filtertraject van filtersectie 1. Peilbuis 5: 140 - 142 m-mv De peilbuis staat onderin het filtertraject van filtersectie 1. Peilbuis 6: 147 - 149 m-mv De peilbuis staat aan de bovenkant van filtersectie 2. Peilbuis 7: 157 - 159 m-mv De peilbuis staat aan de bovenkant van filtersectie 3. Peilbuis 8: 169 - 171 m-mv De peilbuis staat aan de bovenkant van filtersectie 4. Peilbuis 9: 193 - 194 m-mv De peilbuis staat in een dunne zandlaag onder de afsluitende kleilaag van het filtertraject.
	Pompkamers	Alle peilbuizen hebben een pompkamer tot 50 m-mv.
DTS kabel	Diepte	DTS kabel is ingebouwd aan peilfilter 9 tot 194 m-mv.

Omstorting	-	Zie Bijlage 3
------------	---	---------------

3.3 Putafwerking

De proefbron (buis met grootste diameter) is in het midden van het boorgat geplaatst, zie Figuur 3.2. In de overgebleven ruimte van het boorgat zijn vier blauwe PVC peilbuizen en vijf grijze RVS peilbuizen geplaatst. Van de RVS peilbuizen zijn de filters in of nabij het opslagpakket geplaatst. Deze peilbuizen zijn geschikt voor de hoge temperaturen die kunnen optreden wanneer de HTO in bedrijf wordt genomen. De proefbron van PVC en peilbuis worden afgedicht voordat de HTO in gebruik wordt genomen, aangezien het PVC niet bestand is tegen de hoge temperaturen van de HTO.

Voor de putafwerking is rekening gehouden met artesische stijghoogten (stijghoogten die boven het maaiveld uit komen). Door opwarming van het opslagpakket neemt de dichtheid van het water af en kan de stijghoogte toenemen, vooral wanneer de temperatuur over de volledige lengte van de peilbuis hoog is. In rustsituatie is dat bij een monitoringsput echter niet het geval, omdat het water in de peilbuis de omgevingstemperatuur aanneemt die (grotendeels) veel lager is. Maar tijdens bemonsteren wordt het warme water uit het opslagpakket omhoog gepompt via de peilbuis, waardoor de temperatuur oploopt en de dichtheid van het water in de peilbuis afneemt. Daardoor neemt de stijghoogte toe en kan de situatie ontstaan dat de stijghoogte na het stopzetten van de pomp boven de rand van de peilbuis uit komt. Dan stroomt er voor geruime tijd water uit de peilbuis, totdat de temperatuur van het water voldoende is gezakt. Om te voorkomen dat de peilbuis na een bemonstering en tijdens de exploitatiefase van HTO kan overlopen wordt er nog een kogelkraan aangebracht, waarmee de peilbuis eenvoudig kan worden afgesloten. Verder wordt er ook een demontabel T-stuk met manometer geleverd. Eén uiteinde kan worden gebruikt om artesisch water af te laten stromen, terwijl in het andere uiteinde bemonsteringen uitgevoerd kunnen worden. Bovendien wordt op het T-stuk een manometer gemonteerd, waarmee bepaald kan worden hoeveel druk er op de peilbuizen staat.

Onderstaande foto's geven weer hoe de proefbron momenteel is afgewerkt. In Bijlage 1 is een technische detailtekening opgenomen van de putafwerking.



Figuur 3.2 | Putafwerking

4 Testen proefbron

Na het inbouwen en omstorten is de proefbron schoon gepompt en getest. Door het schoonpompen is de boorspoeling uit het boorgat verwijderd. Daarnaast worden de meest fijne deeltjes uit de formatie in de directe nabijheid van de bronfilters verwijderd. Vervolgens is de bron getest op kwaliteit. Eerst is dit gedaan in het complete filtertraject. Vervolgens is met behulp van een packer in de bron getest op afzonderlijke filterdelen.

4.1 Noodzaak ontwikkelen

Boorspoeling en filterkoek

Tijdens het boren is gebruik gemaakt van een boorspoeling om de kans op instorting van het boorgat te minimaliseren. De spoeling bestond uit water afkomstig uit een drinkwaterhydrant met vrijgekomen natuurlijk boorgruis (slib/fijn zand) en het toegevoegde additief Antisol. Het gebruik van een boorspoeling in combinatie met een verhoogd waterniveau in het boorgat creëert een overdruk in het boorgat ten opzichte van de stijghoogtes in de formaties waardoor het boorgat stabiel wordt gehouden.

De resten boorspoeling dienen na het inbouwen van de proefbron weer uit het boorgat te worden gepompt. Een deel van de boorspoeling heeft zich aan de boorgatwand gehecht. Deze zogeheten filterkoek of skin is hardnekkig en moet zo veel mogelijk verwijderd worden om de capaciteit van de bron te herstellen. In Bijlage 2 is vermeld welke acties uitgevoerd zijn om de filterkoek ter hoogte van het filtertraject van de proefbron te verwijderen. Er zijn verschillende testen (capaciteitstest en flowmeting) uitgevoerd om na te gaan in hoeverre de filterkoek goed is verwijderd na het schoonpompen. Dit geeft inzicht in welke mate de HTO bronnen goed schoon gepompt kunnen worden.

Deeltjesproductie

In de zandlagen van de gekozen formatie zijn vaak fijne deeltjes aanwezig. Als deze deeltjes worden meegevoerd met het onttrokken water dan kunnen ze voor verstopping zorgen, zowel bij de onttrekkingsbron als bij de infiltratiebron. Om dit risico zoveel mogelijk te beperken is het bronfilter niet in de fijnste zandlagen geplaatst en is het filter bovendien omstort met een specifiek gekozen fijnere filterzandfractie (0,5- 0,8 mm). Daarnaast is het belangrijk om de fijne deeltjes in de formatie rond het boorgat na de realisatiefase zo veel mogelijk te verwijderen. Dit gebeurt tijdens het schoonpompen en ontwikkelen van de bron.

Na het schoonpompen zijn verschillende testen uitgevoerd en is het onttrokken water onderzocht op zand- en slibhoudendheid om te bepalen in hoeverre de bron deeltjes blijft produceren. Daarbij is in eerste instantie een laag debiet toegepast, waarbij de standaard WKO-ontwerpnormen zijn aangehouden. Hierbij wordt berekend welke stroomsnelheid op de boorgatwand maximaal toelaatbaar is. Aanvullend is de bron ook op hogere debieten schoon gepompt en getest om na te gaan of de zandlevering en deeltjesproductie bij deze hogere stroomsnelheden acceptabel is. Als dat het geval is dan kan namelijk overwogen worden om hogere debieten toe te passen dan de bestaande ontwerprichtlijnen aangeven, zoals ook bij de HTO in Middenmeer wordt gedaan. In

Middenmeer zijn de ervaringen na ruim drie jaar in bedrijf positief en vanwege deze resultaten ligt het voor de hand om dit ook bij Delft te onderzoeken.

4.2 Uitgevoerde testen

Het volgende testplan is vooraf opgesteld. In de loop van het proces was het mogelijk om het testplan bij te stellen.

Tabel 4.1 | Testplan

Nr (#)	Debiet (m ³ /h)	filtertrajecten	Schoon/vuil	Zand- en slibmetingen	Pomp-stopproef met diverdata
1	60	Hele bron	Vuil	x	x
2	60	Hele bron	Schoon	x	x
3	80	Hele bron	Schoon	x	x
4	100	Hele bron	Schoon	x	x
5	60	Secties 3 + 4	Schoon		x
6	60	Sectie 4	Schoon		x
	dempen secties 3 + 4	-	-	-	-
7	60	Secties 1 + 2	Schoon	x	x
8	30	Sectie 2	Schoon		x

De testen op de hele bron zijn uitgevoerd conform het bovenstaande plan. Wegens problemen met de packer en met de groutaanvulling in de diepe secties 3 + 4 zijn uiteindelijk de volgende tests uitgevoerd, waarbij afwijkingen ten opzichte van het plan in het **rood** zijn aangegeven.

Tabel 4.2 | Uitgevoerde tests

Nr (#)	Debiet (m ³ /h)	Filtertrajecten	Schoon/vuil	Zand- en slibmetingen	Pomp-stopproef met diverdata
1	60	Hele bron	Vuil	x	x
2	60	Hele bron	Schoon	x	x
3	80	Hele bron	Schoon	x	x
4	104 ¹	Hele bron	Schoon	x	x
5	60 ²	Secties 3 + 4	Schoon		x
6	60 ³	Hele bron	Schoon		x
7	60 ⁴	Secties 3 + 4	Schoon		x
8	60 ⁵	Secties 3 + 4	Schoon		x
9	56,5 ⁶	Sectie 4	Schoon		x
	Dempen secties 3+4	-	-	-	-
10	6,5 ⁷	Secties 1 + 2	groutverstopping		x
11	8 ⁸	Sectise 1 + 2	groutverstopping		x

¹ Het debiet is 4 m³/h hoger uitgevallen wegens een kleine afwijking na instellingen van de druk

² Resultaten bleken niet representatief vanwege lek in packer

³ Packer geplaatst boven sectie 1 om de werking van de packer te testen, resultaten waren positief

⁴ Resultaten bleken wederom niet representatief vanwege lek in packer

⁵ Test geslaagd

⁶ Het debiet bleek iets lager dan 60 m³/h, wat voor het uitwerken van de resultaten geen negatieve gevolgen heeft.

⁷ Deze test was bedoeld als controle na het afdichten van filtersecties 3+4 met grout. De verlaging bleek dusdanig groot dat testen op hoger debiet geen optie was. Dit bleek met name te komen doordat het grout in het weekend 7 meter omhoog is gekomen om onbekende rede. Uiteindelijk bleek uit camera inspectie dat er ook delen van filtersecties 1 en 2 verstopt zijn geraakt.

⁸ Deze test is uitgevoerd om de peilbuizen te testen nadat deze waren opgeschoond.

Testen 7 en 8 uit het originele testplan (Tabel 4.1) konden niet worden uitgevoerd vanwege de verplaatsing van het groutmengsel, met bijbehorende filterverstopping. De resultaten die wel verzameld konden worden, zijn in dit hoofdstuk uitgewerkt.

4.3 Resultaten testen complete filtertraject

De testen op het complete filtertraject bestaan uit:

- Zandhoudendheidstest
- Slibhoudendheidstest (MFI)
- Deeltjestellingen door KWR
- Specifiek debiet
- Flowmeting

De zandhoudendheid, slibhoudendheid en het specifiek debiet zijn op verschillende momenten en bij verschillende debieten gemeten. Voor de testen is de proefbron ontwikkeld conform standaard protocollen. In hoofdlijnen houdt dat in:

- Kort schoonpompen op laag debiet;
- Jutten;
- Sectiegewijs jutten;
- Intermitterend pompen met een debiet van 130% ten opzichte van het debiet van de daaropvolgende test.

Enkel bij de test op 104 m³/h is er is niet extra ontwikkeld ten opzichte van de ontwikkelacties die voorafgingen aan de tests op 80m³/h. Dit omdat de stijghoogteverlaging te veel zou toenemen als er op hoger debiet intermitterend gepompt zou worden. Dan zou de pomp droog komen te hangen. Bij de testen op 80m³/h en 104 m³/h zijn stroomsnelheden op de boorgatwand behaald die de richtlijnen uit de ontwerpnormen overschrijden.

De meetmomenten zijn weergegeven in Tabel 4.3.

Debiet van de Test	Factor t.o.v. onttrekkingsnorm	Na verversing van de broninhoud	30 minuten na start pompen	60 minuten na start pompen	115 minuten na start pompen
60 m ³ /h	1,04	X	X	X	X
80 m ³ /h	1,38	X	X	X	X
104 m ³ /h	1,80	X	X	X	X

Tabel 4.3 | Meetmomenten zandhoudendheid en slib (MFI) zijn aangegeven met een 'X'.

De resultaten van de testen zijn hieronder beschreven. Achtereenvolgend zijn de testen voor zandhoudendheid, slibhoudendheid, specifiek debiet en flowmeting uitgewerkt.



Figuur 4.1 | Toegestane hoeveelheid zand in

4.3.1 Zandhoudendheid

De zandhoudendheid geeft weer hoeveel vaste deeltjes gemobiliseerd worden tijdens het pompen. Dit wordt gemeten door het onttrokken water over een planktonnet met een maaswijdte van 70 micron te leiden. Doorgaans wordt in WKO projecten als criterium aangehouden dat 10 m³ water maximaal 0,1 gram zand mag bevatten (zie Figuur 4.1 voor referentie).

Resultaten bij 60 m³/h

Tijdens de pomp-stopproef op 60 m³/uur is onderstaand resultaat behaald (zie Figuur 4.2). In de potjes is de hoeveelheid zand dat in 10 m³ water aanwezig is zichtbaar. Na het verversen van de bron is de hoeveelheid aanwezig zand vergelijkbaar met de standaard norm van 0,1 gram van 10 m³, zoals weergegeven in figuur 4.1. Na een half uur is de zandhoudendheid al sterk afgenomen. Na een uur leverde de proefbron al vrijwel geen zand meer. De resultaten van de zandhoudendheid komen overeen met wat je kunt verwachten van een goed ontwikkelde bron.

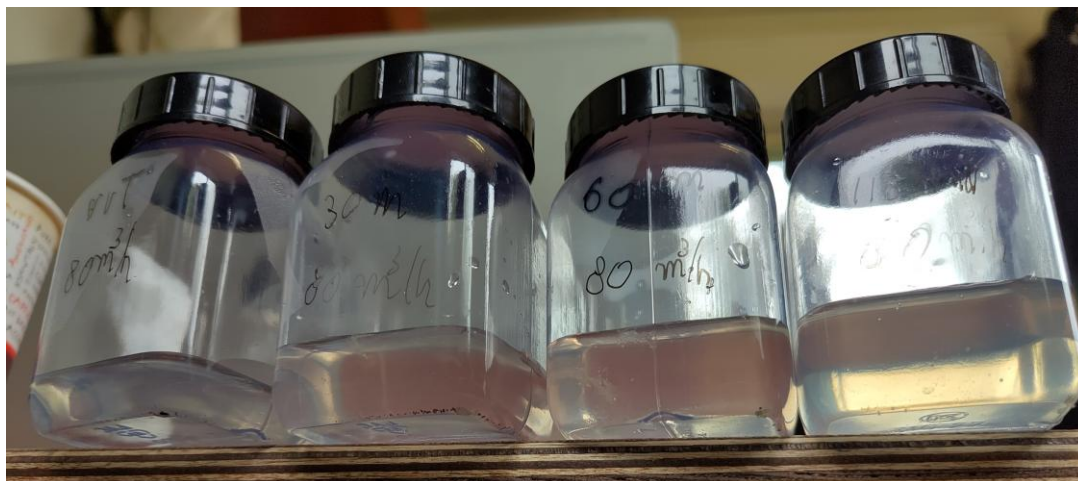


Figuur 4.2 | Zandhoudendheid van 10 m³ water bij een debiet van 60 m³/uur. Van links naar rechts: 1) direct na verversen, 2) na een half uur pompen, 3) na één uur pompen en 4) na twee uur pompen.

Resultaten bij 80 m³/h

Tijdens de pomp-stopproef op 80 m³/uur is onderstaand resultaat behaald (zie Figuur 4.3). Na iedere meting is er zeer weinig zand aangetroffen.

Figuur 4.3 | Zandhoudendheid van 10 m³ water bij een debiet van 80 m³/uur. Van links naar rechts:



1) direct na verversen, 2) na een half uur pompen, 3) na één uur pompen en 4) na twee uur pompen.

Resultaten bij 104 m³/h

Tijdens de pomp-stopproef op 104 m³/uur is onderstaand resultaat behaald (zie Figuur 4.4). ondanks het feit dat er niet intermitterend is gepompt op een hoger debiet dan 104 m³/h is de zandlevering laag. Na verversingstijd wordt de standaard WKO-norm ongeveer behaald. Na 30 en 60 minuten levert de proefbron wat minder zand. Na 2 uur is er vrijwel geen zand meer aanwezig in 10 m³ grondwater. Mogelijk zou de zandlevering nog lager zijn als voorafgaand aan de test intermitterend gepompt kon worden op een hoger debiet, wat in dit geval niet mogelijk was.



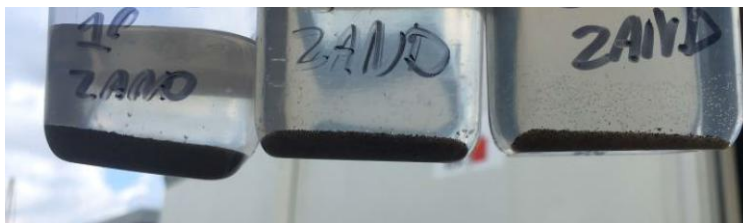
Figuur 4.4 | Zandhoudendheid van 10 m³ water bij een debiet van 104 m³/uur. Van links naar rechts: 1) direct na verversen, 2) na een half uur pompen, 3) na één uur pompen en 4) na twee uur pompen.

Vergelijking met het HTO-project Middenmeer

Het HTO-project in Middenmeer is het enige HTO-systeem in Nederland dat momenteel actief is. In 2021 is het systeem in gebruik genomen. Sinds aanvang wordt bij dit systeem een overschrijdingsfactor van de NVOE-onttrekkingsnorm van maximaal 3,8 toegepast. Na drie laad-ontlaadcycli (2021-2024) is gebleken dat de HTO-bronnen goed functioneren en er geen signalen voor bronverstopping zijn. De mate van deeltjesproductie is zeer beperkt, op basis van de visuele inspecties van de bovengrondse filters. Om een eerste gevoel te geven bij de mate van deeltjesproductie die in Delft gevonden is, is het nuttig om de resultaten van deze proefboring te vergelijken met de resultaten van proefbron Middenmeer.

In de proefbron in Middenmeer zijn vergelijkbare testen uitgevoerd op verhoogde debieten. Eén van die testen in Middenmeer is uitgevoerd op 50 m³/h. Hierbij wordt de onttrekkingsnorm 1,8x overschreden, wat vergelijkbaar is met de test van 104 m³/h op de proefbron in Delft (zie paragraaf 5.4).

De zandproductie was bij de proefbron in Middenmeer beduidend hoger dan in Delft (zie Figuur 4.5). De resultaten van de proefbron in Middenmeer gaven voldoende vertrouwen om de HTO-bronnen te ontwerpen op een hoger debiet dan de norm voorschrijft. Op basis van de vergelijking met de HTO in Middenmeer kan in Delft mogelijk ook de norm worden overschreden. Echter, de maximale mate van overschrijding waarbij het risico op deeltjesproductie in Delft nog acceptabel blijft, en andere overwegingen die een rol spelen bij de keuze om dit als ontwerpuitgangspunt te nemen, dient nader te worden uitgewerkt en besproken met TU Delft en partners.



Figuur 4.5 | Zandproductie bij 50 m³/h uit het 4^e wvp van de proefbron van het HTO-project Middenmeer.

Conclusie zandhoudendheid

De testresultaten in Delft laten zien dat de zandproductie uit de proefbron op verschillende debieten zeer beperkt is. Nadat langere tijd gepompt wordt, zakt de zandhoudendheid terug tot onder de BRL-norm. Daarnaast is de zandproductie lager dan het project in Middenmeer. Dit geldt ook voor de testen op hogere debieten. Dit suggereert dat de HTO-bronnen een hoger debiet kunnen leveren dan op basis van de onttrekkingsnorm wordt berekend gelet op de zandhoudendheid.

4.3.2 Slibhoudendheid (MFI)

De Membraan Filter Index (MFI) is een maat voor de slibhoudendheid van het water en geeft aan in welke mate het grondwater een verstoppende werking heeft. Een hoge MFI betekent veel fijn verstoppend slib of andere deeltjes in het grondwater (tot 0,45 µm) welke poriën in de bodem kunnen verstoppen. De BRL hanteert een maximale MFI waarde van 2 s/l².

De MFI is gemeten via twee methoden:

- 1 Door middel van de handmatige filterspuittest waarbij een halve liter water over een 0,45 micron filter is geleid. De buitenste ring van het filter is steeds volledig schoon doordat hier een rubberen ring heeft gezeten tijdens de test. Binnen deze ring is de mate van vervuiling te zien nadat er een 0,5 liter water doorheen is geperst.
- 2 Door middel van de MFI/SDI Inspector. Hierbij wordt met een constante druk water door een filter van 0,45 micron gestuwd. Naarmate het filter verstopt neemt de flow af. Deze verstoppingsnelheid wordt omgerekend naar een MFI-waarde. De MFI-waarde moet bij WKO-bronnen volgens de SIKB BRL 11001 onder de 2 zijn om als 'goed ontwikkeld' te worden beschouwd.

De metingen zijn uitgevoerd op dezelfde momenten en bij dezelfde debieten als de zandhoudendheid metingen uit voorgaande paragraaf.

Resultaten bij 60 m³/h

De resultaten van de handmatige MFI-test laat een duidelijke vervuiling zien. Echter is deze vervuiling groen uitgeslagen, dat duidt niet op slibdeeltjes. Waarschijnlijk is er nadat de bron stil heeft gestaan ergens in het leidingstelsel wat organisch materiaal ontstaan wat mee is gekomen tijdens de test. De weerstand nam tijdens de test nauwelijks toe. De MFI is gelet op zowel de handmatige testen als de testen met de Convergence Inspector in alle gevallen ruim onder de 2.



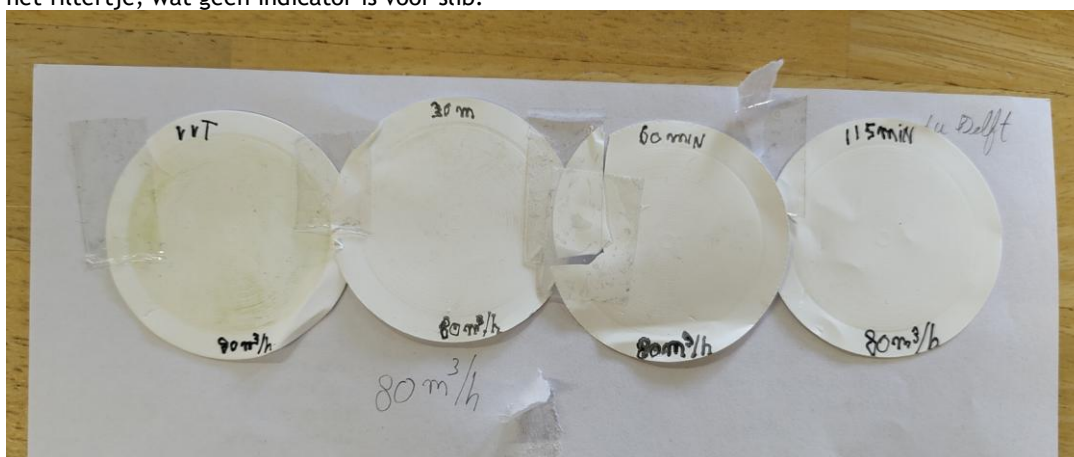
Figuur 4.6 | MFI-filters na het uitvoeren van de handmatige test bij 60 m³/h. Van links naar rechts 1) direct na het verversen van de bron, 2) na een half uur pompen, 3) na één uur pompen en 4) na twee uur pompen

60 m ³ /h	vvt	30 min	60 min	115 min
resultaat	0,54	0,39	0,53	0,63

Tabel 4.4 | Resultaat MFI Convergence Inspector op hele bron bij debiet van 60 m³/h.

Resultaten bij 80 m³/h

De resultaten van de MFI-testen op 80 m³/h is zeer vergelijkbaar met de MFI-testen op 60 m³/h. De MFI is gelet op zowel de handmatige testen als de testen met de Convergence Inspector wederom in alle gevallen ruim onder de 2. Ook resulteerde de handmatige meting in een groene uitslag op het filtertje, wat geen indicator is voor slib.



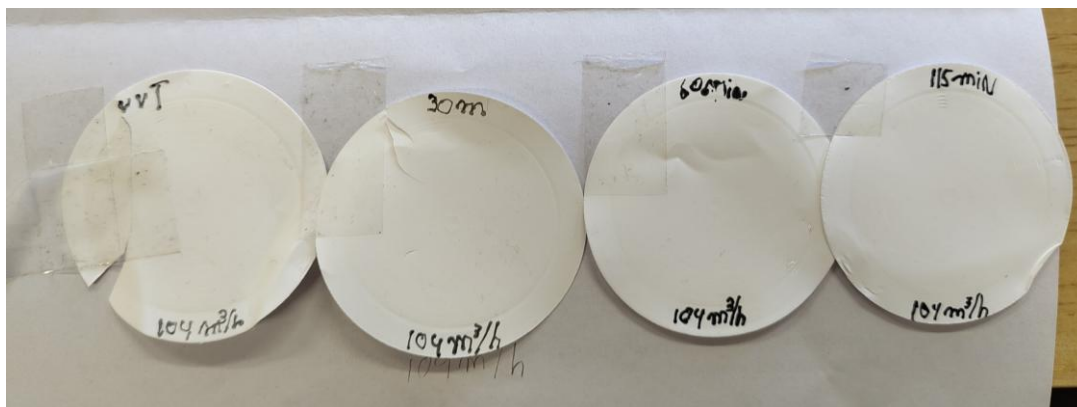
Figuur 4.7 | MFI-filters na het uitvoeren van de handmatige test bij 80 m³/h. Van links naar rechts 1) direct na het verversen van de bron, 2) na een half uur pompen, 3) na één uur pompen en 4) na twee uur pompen

80 m ³ /h	vvt	30 min	60 min	115 min
resultaat	0,59	0,42	0,47	0,48

Tabel 4.5 | Resultaat MFI Convergence Inspector op hele bron bij debiet van 80 m³/h.

Resultaten bij 100 m³/h

Ook bij alle testen op 104 m³/h is er zeer weinig slib vrijgekomen. Dit is opvallend, aangezien het intermitterend pompen niet op een hoger debiet kon plaatsvinden. Ondanks dat de bron niet helemaal volgens de normale methode ontwikkeld kon worden én ondanks de overschrijding van het ontwerpdebiet (ca. 60 m³/u) is de sliblevering toch zeer laag gebleven.



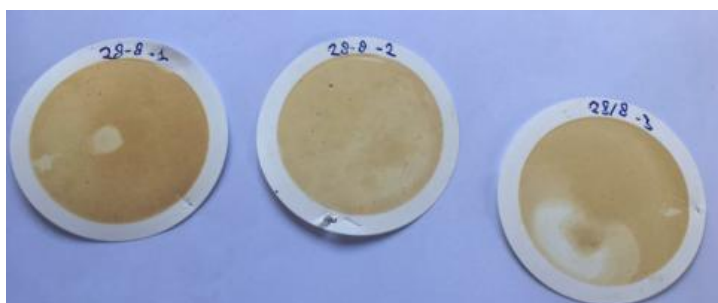
Figuur 4.8 | MFI-filters na het uitvoeren van de handmatige test bij 104 m³/h. Van links naar rechts 1) direct na het verversen van de bron, 2) na een half uur pompen, 3) na één uur pompen en 4) na twee uur pompen.

100 m ³ /h	vvt	30 min	60 min	115 min
resultaat	0,61	0,70	0,43	0,65

Tabel 4.6 | Resultaat MFI Convergence Inspector op hele bron bij debiet van 104 m³/h

Vergelijking met het HTO-project in Middenmeer

In de proefbron van het HTO-project in Middenmeer zijn ook MFI-metingen uitgevoerd. In Figuur 4.9 is het resultaat te zien bij 50 m³/h, met een factor 1,8 t.o.v. de ontwerpnormen vergelijkbaar met 104 m³/h. De MFI-filters waren in Middenmeer duidelijker sterker vervuild dan in Delft. Desondanks zijn tijdens de bedrijfsvoering en monitoring van de HTO-bronnen in Middenmeer geen signalen opgemerkt die wijzen op putverstopping.



Figuur 4.9 | MFI-filters in Middenmeer na het uitvoeren van de handmatige test bij debiet van 50 m³/h

Conclusie MFI

Uit de MFI-testen blijkt dat de slibhoudendheid van het water laag is bij alle testen. Vergeleken met de resultaten van de proefboring van het project in Middenmeer is de MFI in Delft zeer laag.

Deze resultaten suggereren dat de HTO-bronnen hogere debieten kunnen leveren dan op basis van de onttrekkingsnorm wordt berekend. Dit suggereert dat de HTO-bronnen een hoger debiet kunnen leveren dan op basis van de onttrekkingsnorm wordt berekend gelet op MFI. Een nadere analyse van het risico op putverstopping door deeltjesproductie en het formuleren van adviezen voor mitigerende maatregelen om het risico in de hand te houden gegeven de maximale debieten per bron, dient nog te worden uitgevoerd. Dan kan ook een gedegen afweging worden gemaakt welke overschrijdingsfactor acceptabel is. Die werkzaamheden zijn onderdeel van de vervolgstappen (zie hoofdstuk 1.5). Immers, dat hangt niet alleen van de bodemresultaten af, maar ook van het gekozen risicoprofiel en de bijbehorende businesscase.

4.3.3 Deeltjestellingen KWR 22 en 23 mei

Op 22 en 23 mei heeft KWR deeltjestellingen uitgevoerd op het water dat uit de proefbron werd geproduceerd, terwijl IF Technology die dagen grondwaterbemonsteringen nam.

De resultaten van de deeltjesmetingen op 23 mei zijn bruikbaar en door KWR beschreven. Het KWR-rapport met de details is opgenomen in Bijlage 6. De belangrijkste resultaten zijn hieronder benoemd.

Test 1: Onttrekking op 30 m³/uur met deeltjestelling en MFI-meting

Op 23 mei tussen circa 10.00 en 15.00 uur heeft een onttrekking uit de proefbron plaatsgevonden op 30 m³/uur. Bij de aanvang van de onttrekking werd een hoge concentratie aan deeltjes gedetecteerd, welke in de loop van de dag afnam. MFI-metingen zijn in duplo uitgevoerd en laten zien dat de waarden laag zijn (<1) en afnemen in de tijd. Deze metingen zijn in lijn met de verwachting dat de hoeveelheid geproduceerde deeltjes afnemen in de tijd. Eén datapunt van de tweede MFI-meting liet een hogere MFI-waarde zien, wat aangeeft dat MFI-metingen met name robuust zijn als indicatie voor verstoppingspotentieel wanneer er substantiële verschillen worden gevonden, doorgaans in de orde van >1 eenheid.

Test 2: Optoeren onttrekking naar 100 m³/uur na 30 min rust, met deeltjestelling en MFI-metingen

Na een rustperiode van circa een half uur is de pomp aangezet op een hoog debiet van 100 m³/uur. Gedurende die periode is de deeltjesconcentratie continu gemonitord en zijn op regelmatige tijdstippen troebelheidsmetingen verricht. De resultaten toonden aan dat het aantal gemeten kleine deeltjes (1, 2 en 4 µm) significant toenam na het verhogen van het debiet, maar na 10 minuten weer terugkeerde naar het niveau van voor de test. Deze waarden waren bovendien aanzienlijk lager dan de initiële concentraties aan het begin van de dag, toen de pomp een nacht had stilgestaan. De troebelheidsmetingen volgden een vergelijkbaar trendpatroon.

Deze resultaten van de deeltjesteller geven aan dat metingen die in de vroege fase van de dag worden uitgevoerd, intrinsiek een hogere verstoppingspotentie vertonen in vergelijking met metingen aan het einde van de dag. Dit betekent dat de MFI-waarden, die gerelateerd zijn hieraan, ook bepaald worden door het tijdstip van bemonsteren. Deze observaties van KWR zijn in lijn met de deeltjestesten (zand- en slibhoudendheid) die IF Technology heeft uitgevoerd tijdens de pompproeven bij verschillende debieten. De resultaten van KWR onderschrijven de waarde van het uitvoeren van meerdere metingen vanaf het opstarten van de pomp, zoals IF heeft gedaan, om een gedegen beoordeling te kunnen maken van de gevoeligheid van een put voor deeltjesproductie.

4.3.4 Specifiek debiet

Het specifiek debiet is het debiet waarbij de stijghoogte in de bron één meter verlaagt. Deze parameter geeft informatie over de capaciteit van de bron en de mate waarop deze is ontwikkeld. Een goed ontwikkelde bron en/of een bron in goed doorlatende lagen geeft relatief weinig verlaging van de stijghoogte (het waterniveau in de bron) in relatie tot het toegepaste debiet. Een slecht ontwikkelde bron en/of een bron in slecht doorlatende lagen geeft een grotere verlaging bij hetzelfde debiet.

Tijdens het pompen wordt de veroorzaakte verlaging gemeten en daaruit wordt vervolgens het specifiek debiet berekend. Daarnaast volgt uit de interpretatie van de pomp- en stopproef wat de doorlatendheid van de gebruikte zandlagen is en welk specifiek debiet maximaal haalbaar moet zijn op basis van de bodemeigenschappen (ervan uitgaande dat er geen restverstopping meer aanwezig is). Doorgaans wordt voor een goed ontwikkelde bron aangehouden dat het specifiek debiet minimaal 80% van het maximaal haalbare specifieke debiet is.

Er zijn verschillende pomp- en stopproeven uitgevoerd in Delft, namelijk op:

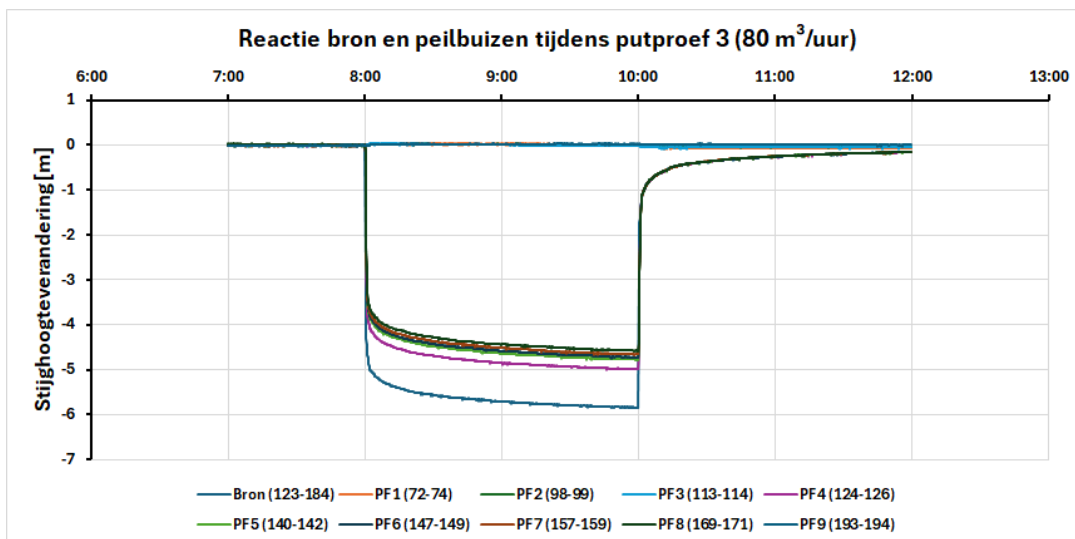
- 60 m³/uur (voor ontwikkelen)
- 60 m³/uur (na meerdere ontwikkelacties inclusief intermitterend pompen op 80 m³/h)
- 80 m³/uur (na intermitterend pompen op 100 m³/h)
- 104 m³/uur (zonder extra ontwikkelactie)

Tabel 4.5 geeft een overzicht van de resultaten van alle uitgevoerde capaciteitsproeven, die in de vorm van pomp-/stopproeven zijn uitgevoerd. In de tabel is per proef het debiet, de duur, de gemeten verlaging en het specifieke debiet aangegeven voor zowel de bron als peilbuis 7. Peilbuis 7 is het peilfilter in de omstorting ter hoogte van het bronfilter dat het beste mee reageert tijdens de proeven. In de meest rechtse kolom is aangegeven hoe het specifiek debiet in peilbuis 7 (SD PF-7) zich verhoudt tot het maximaal haalbare specifieke debiet (SD max) dat is afgeleid uit de pomp-/stopproef. Het behaalde specifiek debiet ligt vrij hoog ten opzichte van de SD max, wat een indicatie is dat er weinig skin op de boorgatwand aanwezig is. De bron is dus voldoende schoon en goed ontwikkeld. Opvallend is dat de skin zelfs bij de test vóór ontwikkelen (01-05-2024) al laag is.

Datum	Debiet [m ³ /h]	Duur [min]	Verlaging bron[m]	Verlaging PB-7 [m]	SD bron [m ³ /uur/m]	SD PB-7 [m ³ /uur/m]	SD PB-7 / SD max
01-05-2024	60	120	4,89	4,05	12,3	14,8	0,81
15-05-2024	60	122	4,22	3,52	14,2	17,0	0,86
21-05-2024	80	120	5,84	4,66	13,7	17,2	0,85
21-05-2024	104	123	7,91	6,01	13,2	17,3	0,93

Tabel 4.7 | Resultaten uitgevoerde capaciteitsproeven op het complete filtertraject

De proef die is uitgevoerd op 80 m³/uur is als meest betrouwbaar beoordeeld en gebruikt voor het bepalen van de eigenschappen van de gebruikte zandlagen. De verlagingen die zijn afgeleid uit de metingen tijdens putproef 3, zijn weergegeven in Figuur 4.10.



Figuur 4.10 | Verlaging op basis van de metingen tijdens putproef 3, uitgevoerd op 21-03-2024.

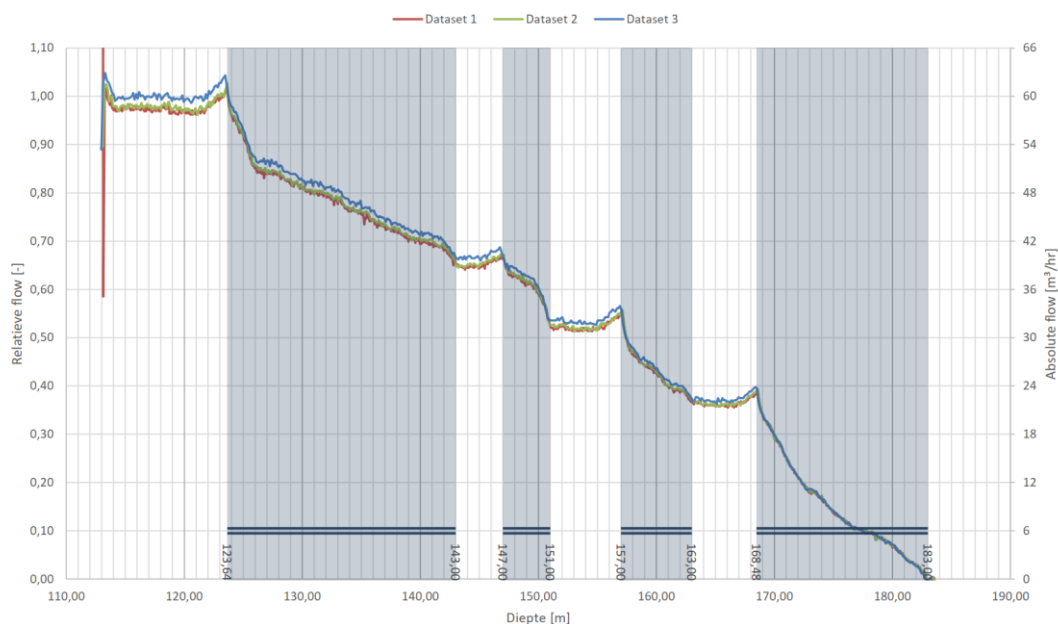
Uit de meetgegevens blijkt dat de verlaging in de bron ongeveer 1 meter groter is dan in de peilfilters die zich ter hoogte van het filtertraject bevinden (PF4 t/m PF8) en dat de verlagingen in de diepste peilfilters wat kleiner zijn dan in de ondiepere peilfilters. Dit fenomeen is het gevolg van de drukverliezen die optreden in de stijgbuizen en de filterbuizen in de bron, waarbij de verlagingen in de richting van de diepte van de pomp steeds groter worden (het water stroomt immers van een hogere stijghoogte naar een lagere stijghoogte). Het feit dat het verschil ongeveer 1 meter betreft heeft ook te maken met de kleine diameter van de buizen van deze proefput. De verlagingen in de overige peilfilters (PF1-3 en PF9) zijn zeer gering of zelfs negatief.

4.3.5 Flowmeting

De flowmeting geeft weer in welke mate de verschillende stukken bronfilter bijdragen aan het totale debiet van de bron. De bijdrage van elk afzonderlijk gedeelte van het bronfilter is afhankelijk van de doorlatendheid van de formatie en de hoeveelheid achtergebleven boorspeling (filterkoek/restverstopping) op de betreffende diepte. De bron is goed ontwikkeld als alle filterdelen naar rato bijdragen aan de totale flow, in verhouding tot de doorlatendheid van de bodemlagen op de betreffende diepte. Het is bekend dat de uiteinden van bronfilterdelen naar verhouding meer water leveren wanneer er ook sprake is van enige verticale toestroming.

In Tabel 4.8 en zijn de resultaten van de flowmeting weergegeven. In hoofdstuk 5.2.3 worden deze resultaten nader besproken en vertaald naar bodemeigenschappen.

16-5-2024, TU Delft / Campus Real Estate & Facility Management, Delft, HTO TU Proefboring, gecombineerd



Figuur 4.11 | Flowverdeling over de filtersecties.

Tabel 4.8 | Flowverdeling over de filtersecties

Sectie	Filtersectie (#)	Diepte (m-mv)	Lengte (m)	Toestroom per meter (m ³ /h/m)	Bijdrage sectie van totaal (%)
A	Blind	103 - 123,6	20,6	0	0
B	1	123,6 - 126	2,4	3,5	14
C	1	126-143	17	0,7	20
D	Blind	143 - 147	4	0	0
E	2	147 - 151	4	2,0	13
F	Blind	151 - 157	6	0	0
G	3	157 - 163	6	1,50	15
H	Blind	163 - 168,5	5,5	0	0
I	4	168,5 - 183	14,5	1,6	38
J	blind	183-190	7	0	0

Uit Tabel 4.8 valt op te maken dat de bovenste meters van sectie B verreweg de grootste flow per meter levert. Dit is deels te verklaren doordat de bovenste bronfilterdelen naar verhouding altijd meer water levert bij verticale toestrooming. De korrels zijn volgens de monsterbakken niet aanzienlijk grover dan de rest van de zandlagen. De grote bijdrage van sectie B uit Tabel 4.6 lijkt dus niet veroorzaakt door van nature grovere zandlagen. Sectie C blijft juist wat achter qua toestroom per meter. De verwachting is dat dit wordt veroorzaakt door de kleinere korrelgroottes in de naastgelegen zandlaag en door verticale toestrooming. Secties B en C uit Tabel 4.8 leveren gezamenlijk wel een vergelijkbare toestroom per meter met de andere filtersecties. In grote lijnen lijken alle filtersecties ongeveer naar rato van de verdeling in doorlaatvermogen van de bodem (zie paragraaf 5.2) bij te dragen aan de totale flow. In combinatie met voorgaande resultaten van zandhoudendheid, slibhoudendheid en specifiek debiet lijkt het erop dat alle bronfilterdelen gelijkwaardig en goed ontwikkeld zijn.

4.4 Resultaten testen op filtersecties

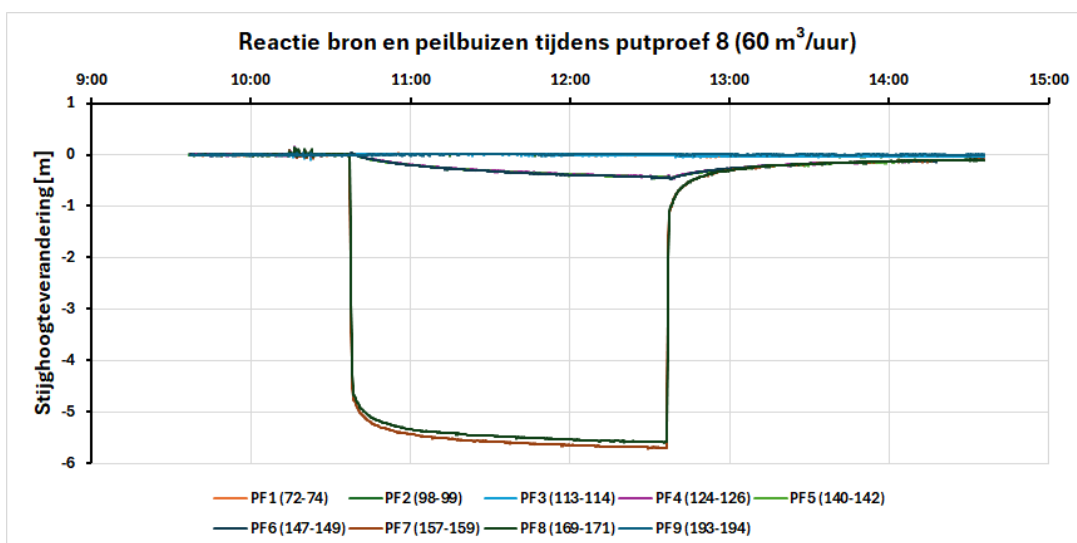
Wegens het uitgebreide veldwerk dat nodig zou zijn en een aantal praktische overwegingen zijn de zandhoudendheid en de slibhoudendheid niet getest op de losse filtersecties. Wegens het plaatsen van packers konden de debieten niet dusdanig hoog worden opgevoerd om een hogere stroomsnelheid te achterhalen dan wat al getest is op de hele bron. Deze paragraaf beschrijft dus alleen de resultaten van pomp-stopproeven die zijn uitgevoerd op specifieke (combinaties van) filtersecties. De bodemeigenschappen die voortvloeien uit deze pomp-stopproeven zijn uitgewerkt in Hoofdstuk 5.

Onderzoeksplan packer en afdichting

Nadat de testen op de hele proefbron waren afgerond, is het plan uit Tabel 4.1 opgesteld. Door een packer te plaatsen was het mogelijk om de filterdelen onder de packer te testen, terwijl er dan niet onttrokken werd uit de filterdelen boven de packer. Daarnaast is besloten om de filterdelen van secties 3 en 4 af te dichten met een groutmengsel zodat secties 1 en 2 ook apart getest konden worden. Dit zijn immers lagen waar het meest voor de hand ligt om bronfilters te plaatsen voor de HTO-bronnen, en waar mogelijk overschrijding van de norm wordt toegepast.

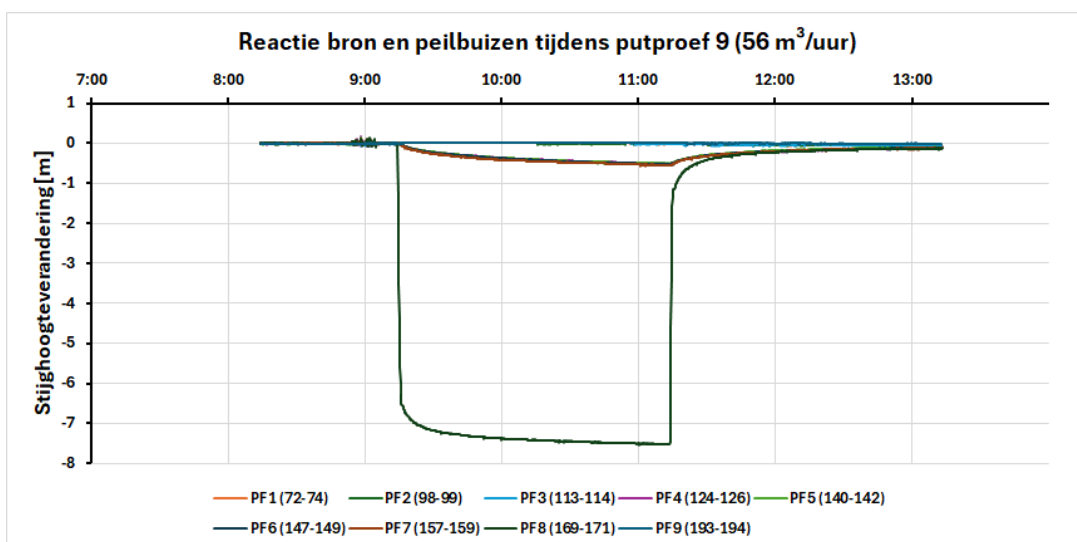
Testen secties 3+4 en sectie 4

Na het uitvoeren van de eerste packertesten van 27 en 30 mei geconstateerd dat er sprake was van (enige) lekkage van de packer, waardoor de resultaten van de testen niet bruikbaar waren voor interpretatie. Tijdens de packertesten van 3 en 4 juni lijkt de packer wel goed te hebben afgesloten, hoewel een kleine lekstroom niet volledig uit te sluiten is. De verlagingen die zijn gemeten bij de test op sectie 3+4 is weergegeven in Figuur 4.12 en die van sectie 4 in Figuur 4.13. De peilbuizen die gelegen zijn direct naast de secties waaruit onttrokken is laten de sterkste stijghoogtereactie zien tijdens de test, de overige peilbuizen laten een kleinere reactie zien.



Figuur 4.12 | Stijghoogteveranderingen op basis van de metingen tijdens putproef 8 (03-06-2024).

Testen sectie 4



Figuur 4.13 | Stijghoogteveranderingen op basis van de metingen tijdens putproef 9 (04-06-2024).

Testen secties 1+2

Om verschillende pompproeven uit te kunnen voeren op secties 1 en 2, met verhoogde debieten ten opzichte van de norm, is besloten om de diepe secties 3 en 4 af te dichten met een groutmengsel. Door vergelijkbare debieten toe te passen op de kortere bronfilters kon daarmee de NVOE-onttrekkingsnorm van de proefbron met een factor van meer dan 3 worden overschreden. Daarmee kon worden onderzocht of dit veilig kan, en zou kunnen worden bespaard op het aantal benodigde bronnen. Op hoge debieten zou de deeltjesproductie ook gemonitord worden. Daarmee kon waardevolle informatie worden vergaard over de mate van deeltjesproductie die optreedt bij een overschrijdingsfactor die hoger ligt dan de factor 1,8 die al getest was op de gehele put (alle bronfilters gecombineerd).

Verstopping ondiepe filters door grouten

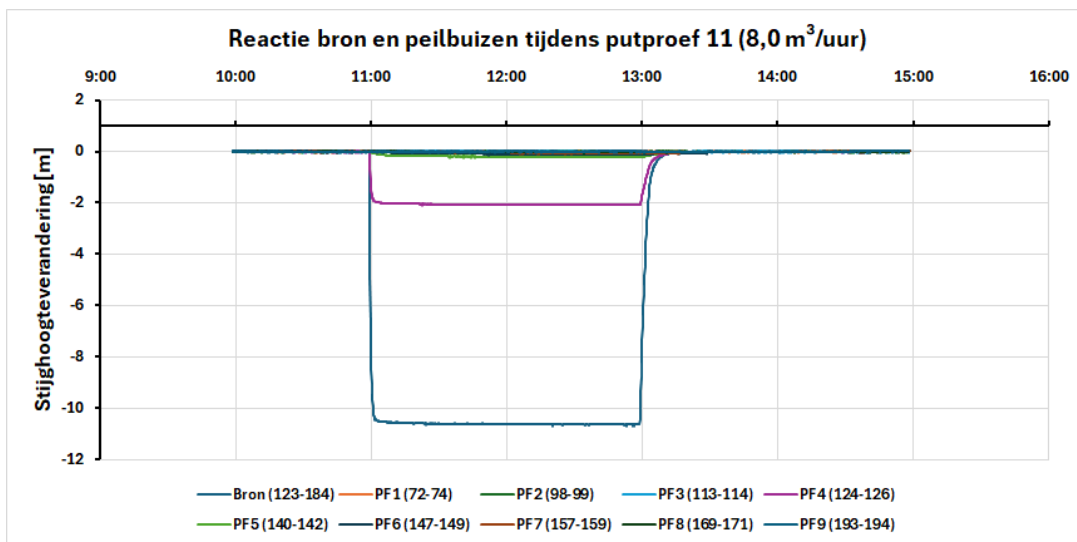
Het groutmengsel is aangebracht op donderdag 6 juni. Op vrijdag 7 juni is de diepte van de groutprop gepeild op de juiste diepte. Op dezelfde dag is 2m mikoliet en 1 m filterzand gestort bovenop de afdichting, als extra afsluiting. Na het weekend, op 10 juni, is de diepte van de afdichting opnieuw gepeild en bleek deze 7 meter ondieper zijn komen te liggen dan vóór het weekend. Dat betekent dat bronfiltersectie 2 bijna volledig is afgedicht door de omhoog gekomen afdichting. Het is niet bekend wat de oorzaak is van het verplaatsen van de afdichting. Voorafgaand aan het plaatsen van de afdichting is wel uitgebreid gekeken naar het gewicht dat de cohesieve afdichting zou moeten hebben om op zijn plek te blijven tijdens onttrekking uit de ondiepe filters. Bij zo'n onttrekking wordt de druk boven de afdichting lager dan onder de afdichting en daarom is het relevant dat het gewicht voldoende groot is om dit drukverschil aan te kunnen. Als het gewicht van de afdichting te klein zou zijn, zou deze omhoog worden verplaatst tijdens de onttrekking. De betrokkenen hebben samen uitvoerig gesproken over de samenstelling van de afdichting. In Bijlage 7 zijn een aantal besproken zaken, de berekeningen van IF Technology en haar advies nader toegelicht.

Dinsdag 11 juni is een onttrekking uitgevoerd en daarbij bleek het specifiek debiet te zijn afgenomen naar 1,3 m³/uur/m (ten opzichte van 12 m³/u/m die verwacht werd) en de weerstand tussen de bron en peilbuizen was ook hoger. Dit deed vermoeden dat er afdichtingsmateriaal terecht was gekomen op de bronfilterspletten van secties 1 en 2. Een camera-inspectie heeft dit bevestigd. De ondiepe bronfilters (secties 1 en 2) waren dusdanig verstopt geraakt dat het niet langer mogelijk was om de onttrekkingsproeven op hogere debieten uit te voeren. Het testprogramma van de proefbron kon dus niet volledig worden afgemaakt en is voortijdig beëindigd.

Wel zijn pomp-stopproeven uitgevoerd op secties 1+2 met lage debieten en die zijn hieronder uitgewerkt.

- 1) 11-06-2024 Onttrekking 6,5 m³/uur op secties 1+2
- 2) 12-06-2024 Onttrekking 8,0 m³/uur op secties 1+2

Aangezien bij een klein debiet al een grote verlaging optrad, was slechts een beperkt debiet mogelijk. Na test 10 (6,5 m³/u) zijn de peilbuizen nog een keer extra schoongepompt en is vervolgens test 11 uitgevoerd met een debiet van 8 m³/h. De verlagingen die zijn afgeleid uit de metingen van test 11 zijn weergegeven in Figuur 4.14.



Figuur 4.14 | Stijghoogteveranderingen op basis van de metingen tijdens putproef 11 (12-06-2024).

5 Eigenschappen ondergrond

5.1 Bodemopbouw en bodemeigenschappen

In Figuur 5.1 zijn de bodemopbouw en de bodemeigenschappen per (sub)laag weergegeven. De bodemopbouw is de classificatie van de aangetroffen bodemlagen in de categorieën zand of klei zoals afgeleid uit zowel de opgeboorde geroerde monsters uit de monsterbakken (zoals beschreven in de boorbeschrijving, zie **Error! Reference source not found.**) als de boorgatmeting (zie **Error! Reference source not found.**). De bodemeigenschappen in deze figuur betreffen de hydraulische eigenschappen van de lagen, zoals de horizontale doorlatendheid van de zandlagen (m/d) en de verticale weerstand van de kleilagen (in d) die zijn afgeleid van de uitgevoerde testen, interpretaties en/of beschikbaar waren uit publieke databases en interne informatie van IF Technology. In de paragrafen 5.2 en 5.3 is in meer detail beschreven welke proeven en interpretaties ten grondslag liggen aan deze waardes. Informatie over de stijghoogtes, grondwaterkwaliteit en bodemtemperaturen op verschillende dieptes is opgenomen in respectievelijk secties 5.4, 5.5 en 5.6.

Vergelijking met de verwachting vóór de proefboring

Vergeleken met de bodemopbouw zoals die voorafgaand aan de proefboring werd verwacht, valt het volgende op. Daarbij is vooral de vergelijking gemaakt met de boring bij Kabeldistrict (uitgevoerd begin 2023, circa 280m ten WZW van proefboring HTO).

- **Afsluitende kleilaag:** De HTO proefboring laat zien dat de kleilaag boven het HTO-pakket aanwezig is tussen 75 en 123 m-mv. Bij de proefboring van Kabeldistrict is op een vergelijkbaar dieptebereik ook veel klei gevonden tussen 69 - 120 m-mv, maar bij die boring wordt een zandlaag vermeld tussen 106-118 m-mv (matig fijn tot matig grof zand) die wordt aangemerkt als Watervoerend pakket 2B. Die zandige laag wordt in zijn geheel niet teruggevonden bij de HTO-proefboring (boormonsters en boorgatmeting). Ook de metingen bij peilbuizen F2 en F3 van de HTO boring (op resp. 97 en 112 m-mv) reageerden niet mee bij de onttrekkingstesten, wat aangeeft dat de bodem rond die diepte een goede afsluitende werking heeft en dat van een doorlatende zandlaag dus geen sprake is. Op basis daarvan lijkt de kleilaag hier meer klei te bevatten, een betere afsluitende werking te hebben en dieper te eindigen dan bij Kabeldistrict.
- **Opslagpakket:** Bij de HTO proefboring ligt het 3^e watervoerende pakket (het opslagpakket) op een diepte van 123 - 184 m-mv. Dit opslagpakket begint op vergelijkbare diepte als bij Kabeldistrict (120 - 185 m-mv).
- **Kleilagen binnen opslagpakket:** een belangrijk doel van de proefboring was om de eigenschappen van de kleiige lagen binnen het opslagpakket scherper inzichtelijk te maken, omdat die van grote invloed zijn op het rendement van het HTO-systeem. Bij Kabeldistrict wordt geen kleiig materiaal vermeld binnen de zandlaag (ook niet in de bijmenging). De boorgatmeting laat wel iets verhoogde waarden zien, met name rond 144 m-mv. Rond die diepte wordt bij de HTO-boring ook kleiig materiaal aangetroffen. De kleiige laagjes die bij de HTO boring rond 154 en 164 m-mv aangetroffen zijn, komen niet duidelijk naar voren als je kijkt naar de boorgatmeting van Kabeldistrict.

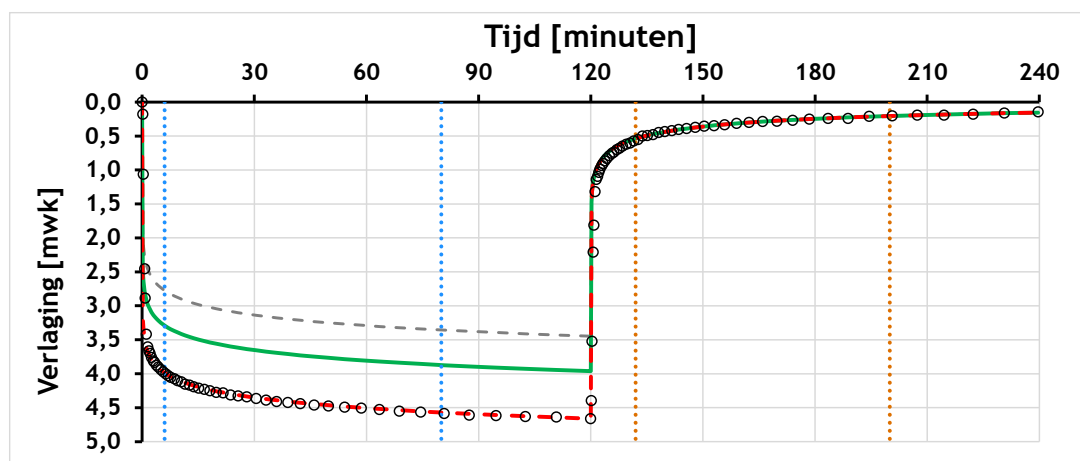
Naam geohydrologische eenheid [-]	Diepte [m-mv]		Dikte [m]	Geologie		Geohydrologische eigenschappen			
	top	basis		Lithologie	Formatienaam	KD [m ² /d]	K _h [m/d]	c [d]	K _v [m/d]
Deklaag	0	17	17	Klei (slap tot matig vast) en fijn tot matig grof zand	Holoceen			1.700	0.01
1e Watervoerende Pakket	17	36	19	Zeer grof tot uiterst grof zand	Fm van Kreftenheye		50		
1e Scheidende laag	36	40	4	Matig vaste klei	Fm van Peize/Waalre			400	0.01
2e Watervoerende pakket	40	76	36	Matig grof tot zeer grof zand	Fm van Peize Waalre		20		
2e Scheidende laag	76	123	47	Klei (matig vast tot vast, lokaal slap), lokaal dun zandlaagje (97 en 106 m-mv)	Fm van Peize Waalre en Maassluis			>12.000	<0.004
3e Watervoerende pakket (sectie 1)	123	144	21	Matig fijn zand, lokaal kleiig en kleibrokjes, schelpengruis	Fm van Maassluis	220	10.5		
Lokale kleiige laag	144	146	2	Verkitte kleilaagjes en matig grof zand				40	0.050
3e Watervoerende pakket (sectie 2)	146	154	8	Matig grof zand	Fm van Maassluis	93	11.6		
Lokale kleiige laag	154	156	2	Vaste klei en matig grof zand				45	0.044
3e Watervoerende pakket (sectie 3)	156	164	8	Matig grof zand	Fm van Maassluis	102	12.8		
Lokale kleiige laag	164	166	2	Matig vaste klei, zandig				35	0.057
3e Watervoerende pakket (sectie 4)	166	184	18	Matig grof zand, schelpresten en kleibrokjes in bijmenging	Fm van Maassluis	260	14.4		
3e Scheidende laag	184	234	50	Matig vaste tot vaste klei. Zand met klei tussen 191-198 m-mv	Fm van Maassluis en Oosterhout			>25.000	<0.002

Figuur 5.1. Schematische weergave van de bodemopbouw en bodemeigenschappen op de locatie van de proefboring. KD: Doorlaatvermogen of transmissiviteit, K_h/K_v: horizontale/verticale doorlatendheid, c: weerstand van de kleilaag. De figuur toont de interpretatie van de opbouw en eigenschappen van de bodem op de locatie van de proefboring. Vanwege horizontale heterogeniteit kan de bodemopbouw op enige afstand van de proefboring anders zijn. Met name voor de dunne 'Lokale kleiige lagen' binnen het 3^e Watervoerende pakket wordt verwacht dat dit kleilagen zijn die op afstand van de proefboring afwezig zouden kunnen zijn, en tegelijkertijd kunnen op andere locaties nabij de boring ook kleilagen aanwezig zijn op andere dieptes in het 3^e watervoerende pakket.

5.2 Doorlatendheid zandlagen

5.2.1 Totaal doorlaatvermogen

De meetgegevens van PF7 tijdens putproef 3 (80 m³/u, schone bron, alle secties) zijn gebruikt om het totale doorlaatvermogen van het watervoerende pakket te achterhalen. Uit de interpretatie van de proef volgt een doorlaatvermogen van 675 m²/d. Deze waarde ligt dicht bij de waarde die voor de zandlagen waarin het filter is geplaatst is berekend, op basis van de M50 waarden van de korrelgroottes uit de boorstaat (691 m²/d) en de relatie van Shepherd. De verkregen fit is weergegeven in Figuur 5.2. In de boorbeschrijving (van de geroerde monsters) wordt op veel plekken in het opslagpakket klei in de bijmenging vermeld. Op basis daarvan zou men kunnen verwachten dat het werkelijke doorlaatvermogen lager zou moeten liggen dan op basis van de korrelgroottes (van alleen het zand) zou worden verwacht. Echter, de metingen komen goed overeen. Dit is een indicatie dat de hoeveelheid klei in de lagen minder is dan in de boorbeschrijving is vermeld, en dat de boorgatmeting een betere indicatie geeft van het kleigehalte in deze zandlaag, en de variatie ervan in de diepte.



Figuur 5.2 | Vergelijking tussen de gemeten verlaging (cirkels) en de berekende verlaging zonder skin effect (groene lijn) en met skin effect (rode stippellijn) na interpretatie van de resultaten van putproef 3. De stopproef is gebruikt voor het afleiden van het doorlaatvermogen omdat de skin geen invloed heeft op het verloop van de stijghoogte tijdens de stopproef (stroomsnelheden zijn dan zeer laag). De grijze stippellijn geeft de verlaging in de put aan voor de theoretische situatie dat volledig filter wordt gesteld in al het zand van het pakket, zonder skin. De metingen tussen de blauwe stippellijnen (pompproef) en tussen de oranje stippellijnen (stopproef) zijn gebruikt om de fit te verkrijgen.

5.2.2 Verdeling doorlaatvermogen

Het totale doorlaatvermogen is niet gelijkmatig verdeeld over de diepte van het opslagpakket omdat bodemeigenschappen zoals de korrelgroottes en doorlatendheden kunnen variëren met de diepte. De verdeling van het totale doorlaatvermogen (675 m²/d) over het opslagpakket is in eerste instantie afgeleid uit de M50-waarden van de bodemonsters, die per meter zijn beschreven. Voor elke meter is op basis van de M50-waarde een inschatting gemaakt van de doorlatendheid, op basis van de relatie van Shepherd¹. Daaruit volgt een bepaalde variatie in de doorlatendheid over de diepte. Het totale doorlaatvermogen van 675 m²/d is vervolgens verdeeld over de zandlagen op basis van dezelfde verdeling.

¹ Shepherd, R. G. (1989). Correlations of Permeability and Grain Size. *Ground Water*, 27(5). In de gehanteerde relatie wordt de horizontale doorlatendheid (in m/d) bepaald door de formule: $150 \cdot (M50/1000)^{1.65}$. Daarbij is M50 de zandmediaan in micron.

Tabel 5.1. doorlaatvermogen (KD) en gemiddelde horizontale doorlatendheid (Kh-gem.) van de verschillende zandlagen, op basis van de korrelgrootteverdeling (M50-waardes) van de geroerde monsters en de vertaling naar doorlatendheid o.b.v. Shepherd.

Sectie	Top	Basis	Zanddikte	KD	K _h -gem.
	m-mv	m-mv	m	m ² /d	
1	123	144	21	220	10,5
2	146	154	8	93	11,6
3	156	164	8	141	17,7
4	166	184	18	221	12,3
KD_totaal:	675 m ² /d				
Kh_gem	12,3 m/d				

5.2.3 Check verdeling met flowmeting

Nadat de bron ontwikkeld was, is een flowmeting uitgevoerd op de gehele bron. Daarbij is grondwater onttrokken uit alle vier de bronfiltersecties. De flowmeting laat zien in welke mate de verschillende filtersecties bijdragen aan het totale onttrokken debiet. Dat betekent dat ook de flowmeting kan worden gebruikt om de verdeling van het doorlaatvermogen over de diepte te bepalen. De verdeling van de flow die is gemeten in de flowmeting is in Tabel 5.2 vergeleken met de verdeling van het doorlaatvermogen van de verschillende secties op basis van de korrelgrootteverdelingen uit Tabel 5.1.

Tabel 5.2. Resultaten flowmeting (kolom 1-6) en vergelijking van de relatieve bijdrage aan het totale debiet o.b.v. de flowmeting (kolom 6) en de verwachting o.b.v. de korrelgrootteverdeling (KGV) van de vier zandsecties.

Sectie	Filtersectie (#)	Diepte (m-mv)	Lengte (m)	Toestroom per meter filter (m ³ /h/m)	Bijdrage sectie van totaal (%)	KD zandsectie obv proef en KGV (m ² /d)	% KD_zandsectie tov KD_zand_totaal
A	Blind	103 - 123,6	20.6				
B	1	123,6 - 126	2.4	3.5	14%		
C	1	126-143	17	0.7	20%		
B+C	1	123,6 - 143	19.4	1.05	34%	220	33%
D	Blind	143 - 147	4				
E	2	147 - 151	4	2	13%	93	14%
F	Blind	151 - 157	6				
G	3	157 - 163	6	1.5	15%	141	21%
H	Blind	163 - 168,5	5.5				
I	4	168,5 - 183	14.5	1.6	38%	221	33%
J	Blind	183-190	7				

De tabel laat zien dat bij sectie 1 en 2 de werkelijke bijdrage aan de flow uit de flowmeting goed overeenkomt met de verwachting op basis van de korrelgrootteverdeling (groene percentages in Tabel 5.2). Voor sectie 3 en 4 zijn de verschillen groter (oranje tekst in Tabel 5.2). Dit suggereert dat het doorlaatvermogen van sectie 3 wat lager is dan op basis van de M50-waarde van de korrelgroottes ingeschat was. Dit is goed verklaarbaar als men kijkt naar de resultaten van de boorgatmeting: de GR-waardes bij sectie 3 zijn duidelijk wat hoger dan bij sectie 4, wat een aanwijzing is voor een wat hoger kleigehalte in deze sectie. Dus hoewel op basis van de M50-waarde van de zandkorrels in sectie 3 een hogere doorlatendheid wordt verwacht dan in sectie 4, is de werkelijke doorlatendheid waarschijnlijk lager door een verhoogd kleigehalte in deze laag. In de M50-waardes en de vertaling naar doorlatendheid met de Shepherd methode is namelijk geen rekening gehouden met het kleigehalte.

Op basis van deze bevindingen is het doorlaatvermogen van zandlaag 3 en 4 aangepast naar de verdeling zoals die is gemeten bij de flowmeting. Dit komt neer op een aanpassing van de doorlatendheid van de zandlagen in sectie 3 en 4 met respectievelijk een factor 0,72 en 1,18. Door deze aanpassing blijft het gecombineerde doorlaatvermogen (KD) van secties 3 en 4 gelijk, maar de verdeling onderling wordt iets

anders. In Figuur 5.1 zijn de verkregen doorlaatvermogens en de bijbehorende gemiddelde horizontale doorlatendheid per sectie weergegeven.

5.2.4 Ondiepere zandlagen

De doorlatendheid van het 1^e Watervoerende pakket wordt ingeschat op circa 50 m/d. Dit is gebaseerd op de 'Milieu Effect Rapportage Energieopslag TU Delft' (MER) die IF Technology voor de TU Delft heeft uitgevoerd in 2011 (referentie: '25.479/57466/CD', [link](#)).

Voor de doorlatendheid van het 2^e Watervoerende pakket is gebruik gemaakt van de interne database van IF Technology waar meerdere pomp- en stopproeven uit de omgeving van Delft zijn opgenomen. Daaruit volgt een verwachte doorlatendheid van circa 20 m/d.

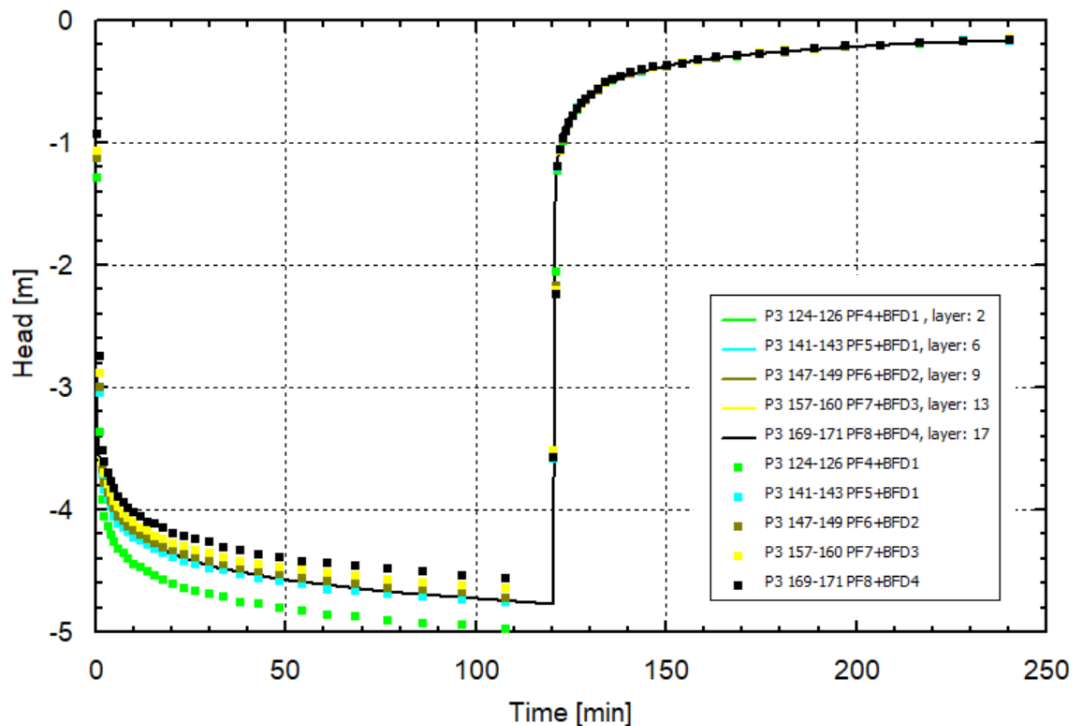
5.3 Afsluitende werking van kleilagen

Kleilagen boven en onder de gebruikte zandlagen

Tijdens de proeven die zijn uitgevoerd met onttrekking uit het gehele bronfilter is in zowel PeilFilter 3 (PF3) als PF9 in eerste instantie een toename van de stijghoogte gemeten in plaats van een verlaging. Dit opvallende effect is bekend onder de term Noordberghum effect, naar de plaats waar dit fenomeen voor het eerst is gemeten en beschreven. Wanneer dit Noordberghum effect optreedt, wijst dat op een relatief hoge weerstand van de afsluitende laag tussen het bronfilter en het waarnemingsfilter. Voor het Noordberghum effect is een methode uitgewerkt, waarmee de verticale doorlatendheid (en dus de weerstand) van de kleilaag kan worden geschat (zie [website rvde.nl](http://www.rvde.nl), of deze [link](#)). Uit de toepassing van deze methode op de meetgegevens volgt voor de kleilaag boven de bovenzijde van het bronfilter (tussen PF3 en PF4) een weerstand tussen 12.000 en 26.000 dagen. De weerstand van de kleilaag onder de onderzijde van het bronfilter is volgens deze methode nog veel hoger (hoe hoog is onduidelijk). Hieruit wordt geconcludeerd dat zowel de kleilaag aan de bovenzijde als de kleilaag aan de onderzijde van de gebruikte zandlagen (hydraulisch gezien) een zeer goede afsluitende werking heeft. De goede afsluitende werking en de relatief grote dikte van deze kleilagen zorgen voor een demping van de thermische effecten naar (on)diepere lagen.

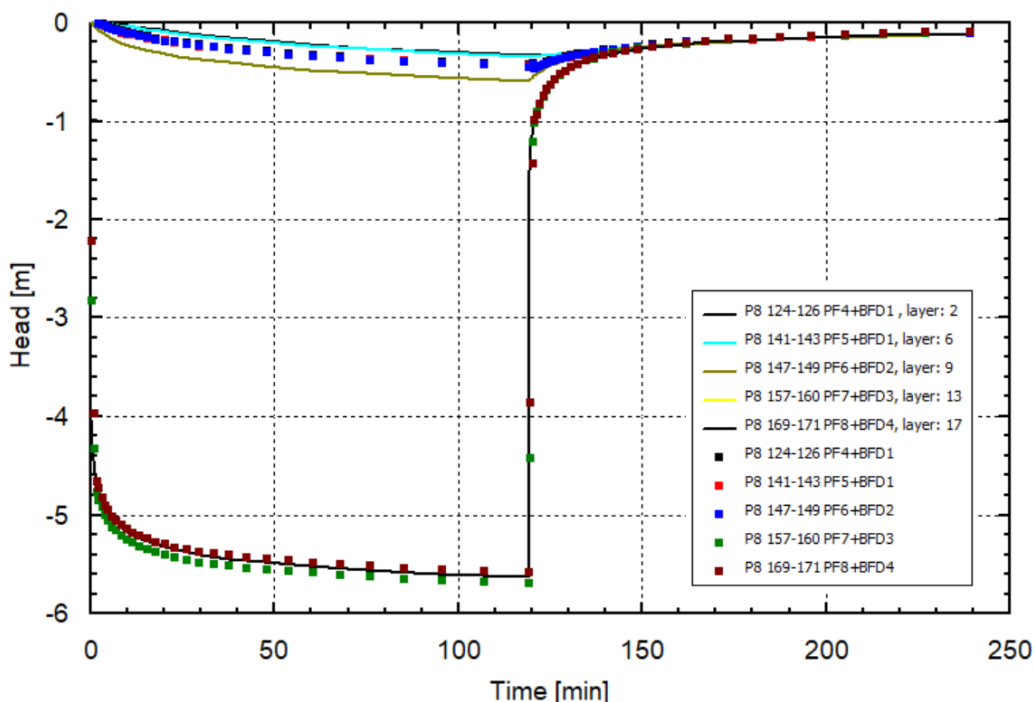
Kleilagen tussen de bronfilterdelen

De testen die zijn uitgevoerd op de verschillende delen van het bronfilter (packer testen en testen na afdichten onderste gedeelte van het bronfilter) waren bedoeld om te achterhalen in hoeverre weerstand aanwezig is in de lagen tussen de verschillende bronfilterdelen. Eerst zijn de bodemopbouw en bodemeigenschappen (excl. de weerstand van de lokale kleilagen) ingevoerd in een hydrologisch model in MLU volgens Figuur 5.1: het totale doorlaatvermogen zoals geïnterpreteerd uit de pomp-stopproef (zie 5.2.1), verdeeld over de secties op basis van de variatie in M50-waardes van de korrelgroottes (5.2.2) inclusief de correctie van sectie 3 en 4 naar aanleiding van de resultaten van de flowmeting (5.2.3). Vervolgens zijn de toegepaste debieten en de verlagingen op basis van de metingen van de verschillende testen ingevoerd in het model en is de weerstand van de lagen net zo lang aangepast totdat voor alle geselecteerde proeven een goede overeenkomst werd verkregen tussen de verlagingen op basis van de metingen en de modelresultaten. De verkregen fits tussen de verlagingen op basis van de metingen en de berekende verlagingen voor de verschillende proeven zijn weergegeven in onderstaande figuren.

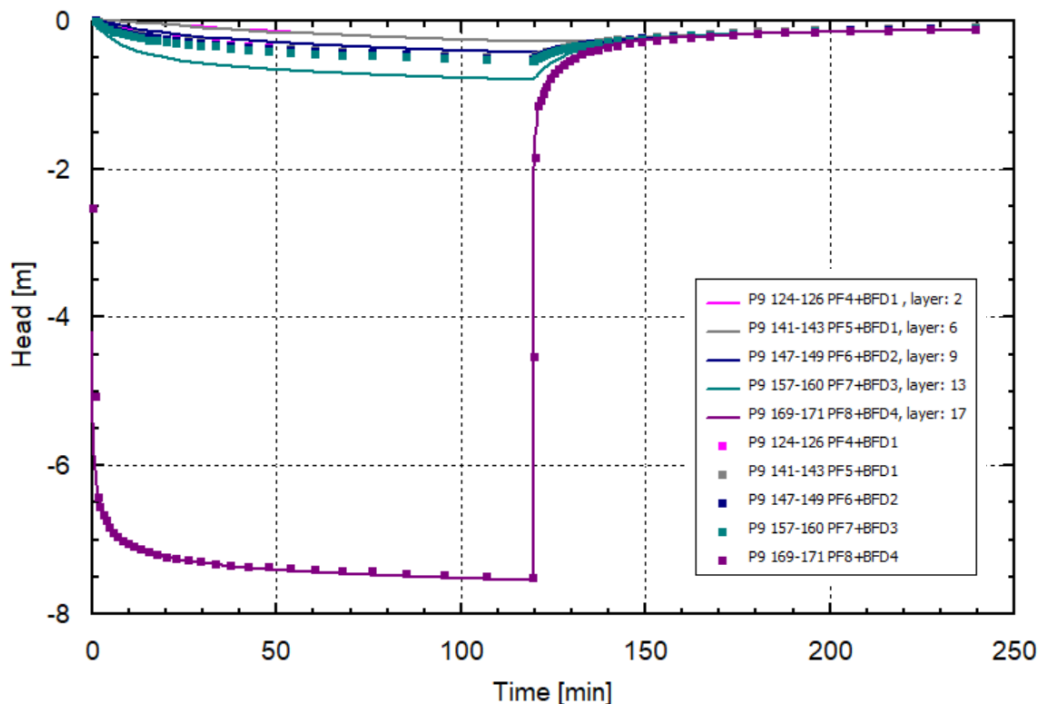


Figuur 5.3 | Gemeten en berekende verlagingen in het verkregen model voor de verschillende peilfilters (PF4-PF8). Simulatie van putproef 3, met onttrekking uit het volledige bronfilter.

In Figuur 5.3 is te zien dat de gemeten verlagingen in de verschillende peilfilters die aanwezig zijn binnen het bronfiltertraject tijdens de onttrekkingsperiode enigszins verschillen, wat in de model berekeningen niet tot uiting komt. Wel geeft het model tijdens de onttrekkingsperiode een goede overeenkomst met het gemiddelde van de metingen en komen de resultaten na het stopzetten van de onttrekking vrijwel exact overeen. Ook in Figuur 5.4 is iets dergelijks te zien, waarbij de metingen in PF7 en PF8 tijdens onttrekking een klein verschil in verlaging laten zien. De verklaring hiervoor is als volgt. Bij de proeven waarbij een deel van het bronfilter is afgesloten met een packer (putproef 8 en 9, zie resp. Figuur 5.4 en Figuur 5.5), zijn de gemeten verlagingen van de peilfilters in het gedeelte van het bronfiltertraject boven de packer gelijk. Dit is te verklaren doordat sprake is van zeer goede druk communicatie tussen die peilfilters via het bronfilter, waardoor de verlagingen in de betreffende peilfilters gelijk worden getrokken. In het MLU model kan deze drukcommunicatie via het bronfilter niet worden meegenomen en worden voor de verschillende peilfilters dus wel verschillende verlagingen berekend (de lijnen liggen iets uit elkaar). In Figuur 5.4 en Figuur 5.5 is te zien dat de gemeten verlagingen (puntjes) van de peilbuizen boven de packer tussen de berekende verlagingen (lijnen) liggen en dat het gemiddelde van de berekende verlagingen ongeveer overeen komt met de gemeten verlagingen. Dat geeft aan dat de gebruikte modelinvoer representatief is voor de werkelijke bodemeigenschappen.



Figuur 5.4 | Gemeten en berekende verlagingen in het verkregen model voor de verschillende peilfilters (PF4-PF8). Simulatie van putproef 8, met onttrekking uit bronfilterdelen 3 en 4.



Figuur 5.5 | Gemeten en berekende verlagingen in het verkregen model voor de verschillende peilfilters (PF4-PF8). Simulatie van putproef 9, met onttrekking uit bronfilterdeel 4.

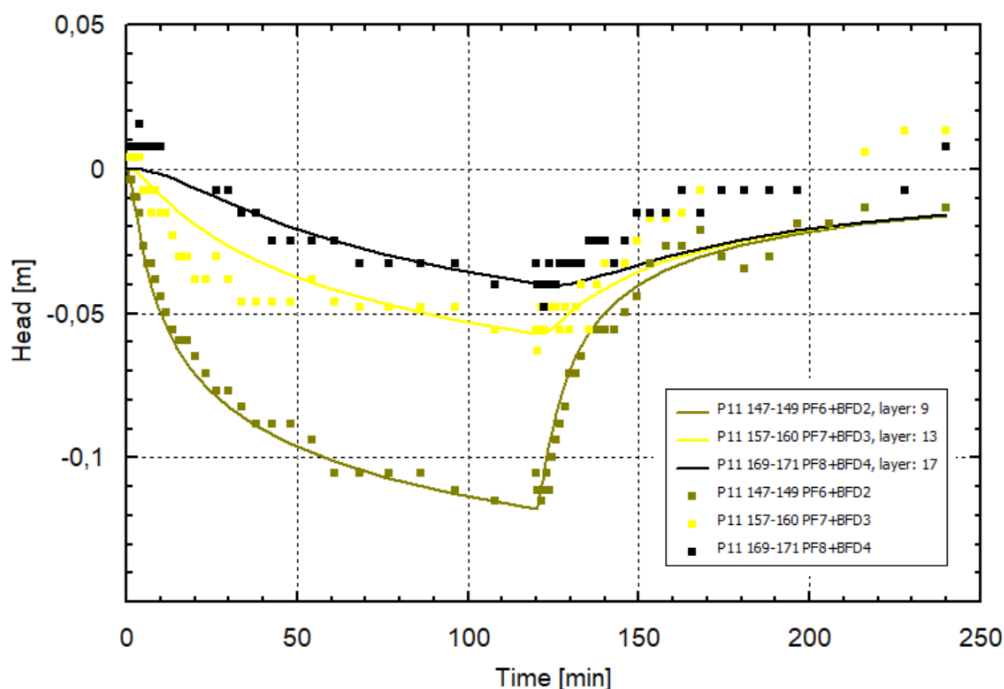
Bij de interpretatie van proef 11 (na het afdichten van het onderste deel van het bronfilter) is alleen voor PF6-PF8 een vergelijking gemaakt met de gemeten verlagingen aangezien de verlagingen in het nog resterende bronfiltertraject sterk worden beïnvloed door de diepte waarop het grondwater precies

wordt onttrokken, wat vanwege de geconstateerde verstoppingen in de filtersleuven onduidelijk is. Wel is in het model aangenomen dat de onttrekking geconcentreerd is in het bovenste deel van filtersectie 1 (het bovenste bronfilterdeel), aangezien in PF4 veruit de grootste verlaging is gemeten (zie Figuur 4.14). Het resultaat van het model geeft een goede fit met de metingen in PF6-8 (afwijkingen hooguit enkele centimeters).

De verkregen waarden voor de weerstand en verticale doorlatendheid (K_v) voor de kleiige lagen tussen de verschillende bronfilterdelen zijn:

Weerstand en K_v tussen bronfilterdeel 1 en 2 (146 - 146 m-mv):	40 dagen en 0,050 m/d
Weerstand en K_v tussen bronfilterdeel 2 en 3 (154 - 156 m-mv):	45 dagen en 0,044 m/d
Weerstand en K_v tussen bronfilterdeel 3 en 4 (164 - 166 m-mv):	35 dagen en 0,057 m/d

Daarmee volgt uit de interpretatie van de putproeven dat op verschillende niveaus enige mate van weerstand aanwezig is, maar er geen dominante scheidende laag aanwezig is. Wanneer naar het watervoerende pakket als geheel wordt gekeken, dan is er een totale weerstand aanwezig van 129 dagen: 120 dagen voor de tussengelegen kleilagen (zie hierboven) en in totaal circa 9 dagen voor de zandlagen (weerstand = zanddikte / K_v = zanddikte / (K_h /anisotropie) = 55/(12,3/2) = 9 d). Hieruit kan een gemiddelde verticale doorlatendheid van ([dikte pakket van 61m]/[verticale weerstand van 129 d]=) 0,47 m/d worden berekend. Dat betekent dat de gemiddelde horizontale doorlatendheid van het gehele 3^e watervoerende pakket uitkomt op (675 [m²/d]/ 61 [m] =) 11,1 m/d, de verticale doorlatendheid op 0,47 m/d en de anisotropie (K_h/K_v) op (11,1 / 0,47 =) circa 23.



Figuur 5.6 | Gemeten en berekende verlagingen in het verkregen model voor de verschillende peilfilters (PF6-PF8). Simulatie van putproef 11, met onttrekking uit het bovenste deel van bronfilterdeel 1.

5.4 Stijghoogtes

In Tabel 5.3 zijn de gemeten stijghoogtes in de peilbuizen weergegeven. Deze metingen zijn verricht op 7 augustus 2024, nadat de proefbron enkele weken in rust heeft gestaan en vlak voordat op die dag een bemonstering is uitgevoerd. Alle gemeten stijghoogtes liggen onder maaiveld. De gemeten stijghoogtes zijn een momentopname en kunnen door natuurlijke fluctuaties variëren in de tijd.

Tabel 5.3. Stijghoogtes in rust. WVP = Watervoerend pakket, SL = Scheidende laag

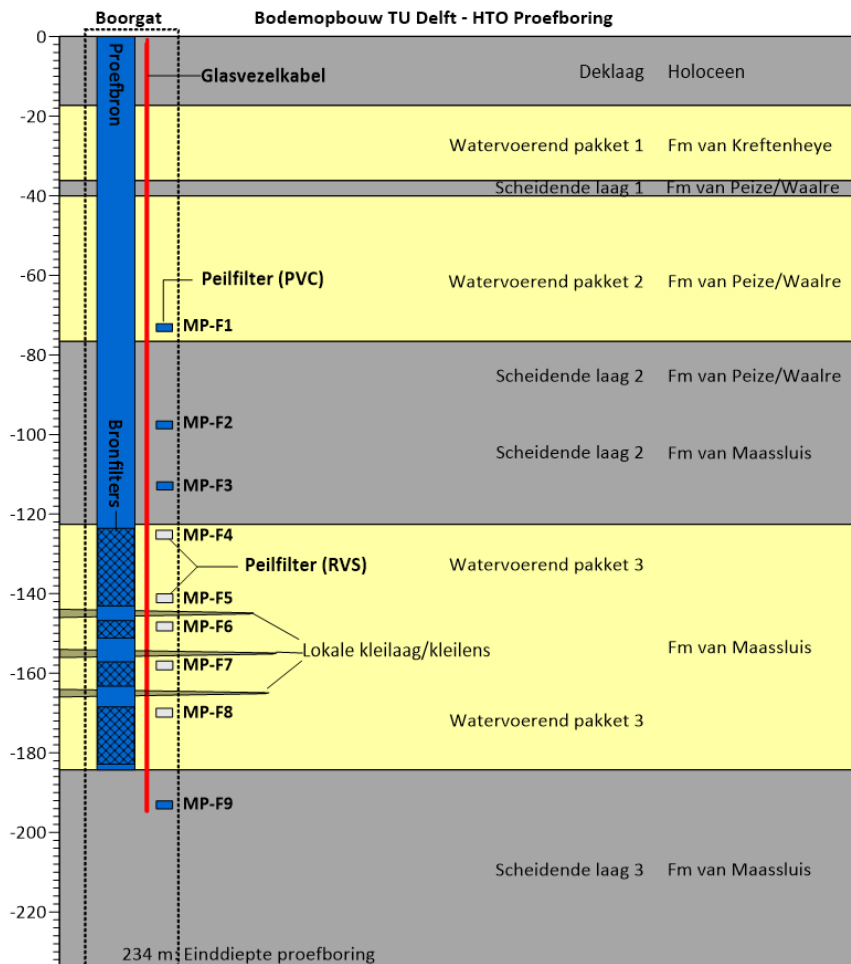
Nummer	Code	Diepte filter [m-mv]	Hydrologische eenheid	Gemeten Stijghoogte [m-bkbs*]	Chloride-gehalte [mg/l]
Peilbuis 1	MP-F1	72 - 74	2 ^e WVP	3,73	2.250
Peilbuis 2	MP-F2	97,5 - 98,5	2 ^e SL	3,65	2.780
Peilbuis 3	MP-F3	112,5 - 113,5	2 ^e SL	3,65	2.190
Peilbuis 4	MP-F4	124 - 126	3 ^e WVP	3,27	3.650
Peilbuis 5	MP-F5	140 - 142	3 ^e WVP	3,55	3.260
Peilbuis 6	MP-F6	147 - 149	3 ^e WVP	3,60	3.310
Peilbuis 7	MP-F7	157 - 159	3 ^e WVP	3,54	3.670
Peilbuis 8	MP-F8	169 - 171	3 ^e WVP	3,60	5.200
Peilbuis 9	MP-F9	193 - 194	3 ^e SL	3,61	3.350

* Stijghoogtes zijn weergegeven t.o.v. bovenkant van de buis ('bkbs') van peilbuis MP-F4. Peilbuizen MP-F4 t/m MP-F8 hebben allemaal dezelfde hoogte. MP-F1 en MP-F9 zijn 5cm lager afgewerkt en MP-F2 en MP-F3 5cm hoger dan MP-F4, maar de hierboven weergegeven stijghoogte is de gemeten stijghoogte t.o.v. de bovenkant van peilbuis 4 om de referentie gelijk te houden en vergelijking mogelijk te maken. De bovenkant van peilbuis MP-F4 bevindt zich op circa 70 cm boven maaiveld.

De stijghoogte in MP-F1, die geplaatst is onderin het 2^e watervoerende pakket, is duidelijk het laagst. Dit heeft vermoedelijk te maken met de grootschalige onttrekking die plaatsvindt in het eerste watervoerende pakket bij de DSM in het noordwesten van Delft (richting Rijswijk) en de invloed van de polders ten oosten van Delft. Deze effecten zijn ook in het 2^e Watervoerende pakket meetbaar. Stijghoogtes in het 2^e watervoerende pakket kunnen ook in beperkte mate beïnvloed zijn door actieve nabijgelegen WKO-systemen zoals EWI van de TU Delft. De stijghoogtemeting vond plaats in de zomer (7 augustus 2024) en de meest nabijgelegen WKO-bron is de warme bron van EWI. Daarom zou een beperkte verhoging van de stijghoogte mogen worden verwacht als gevolg van de infiltratie bij EWI. Echter, de stijghoogte bij MP-F1 blijft duidelijk lager dan de diepere pakketten en wijst op opwaartse stroming vanuit het derde naar het tweede watervoerende pakket, wat past in het regionale beeld. Ook binnen het 3^e watervoerende pakket wordt daarom enige toename van de stijghoogte met diepte verwacht. Dit is ook zichtbaar in de gemeten stijghoogtes in het 3^e WVP. Hoewel MP-F4 een afwijking laat zien, zijn de stijghoogtes van de peilbuizen in het 3^e WVP vergelijkbaar met elkaar (ca. 3,54 - 3,61 m-bkbs). Het grondwater in de diepere peilbuizen bevatten water met een hoger zoutgehalte en daarom neemt de stijghoogte binnen dit pakket iets toe met de diepte, wat in overeenstemming is met het regionale beeld.

5.5 Waterkwaliteit

Figuur 5.7 bevat een schematische weergave van de monitoringsopstelling die is geïnstalleerd in het boorgat van de proefboring.



Figuur 5.7 | Bodemopbouw en geïnstalleerde monitoringsopstelling van de proefboring. Schematisch en niet op schaal.

Alle geïnstalleerde peilbuizen én de proefbron zelf zijn bemonsterd. In Tabel 5.4 is aangegeven welke peilbuizen wanneer bemonsterd zijn en welke analyses op deze monsters zijn uitgevoerd.

De bemonsteringen op de bron en peilbuizen MP-F4, MP-F5, MP-F6, MP-F7 en MP-F8 zijn uitgevoerd terwijl er met een laag debiet water uit de proefbron werd onttrokken. Het doel hiervan was om ervoor te zorgen dat natuurlijk grondwater horizontaal naar de bron toestroomt door de onttrekking, waardoor variatie in de samenstelling van het grondwater op de diepte van de verschillende peilbuizen ook zichtbaar moest zijn.

De overige peilbuizen (MP-F1, MP-F2, MP-F3 en MP-F9) zijn bemonsterd terwijl de proefbron in rust was.

Tabel 5.4 | Bemonsteringen en analyses die zijn uitgevoerd op de bron en peilbuizen van de proefboring.

Peilbuis	Diepte (m-mv)	Mater iaal	Pomp- kamer*	Analyses						Datum bemonstering
				Veld	Chemie	Gas1 (IF)	Gas2 (Flask)	ATP & DNA	Overig	
MP-F1	72-74	PVC	Ja, 50m	x	x		x	x		07-08-2024
MP-F2	97,5-98,5	PVC	Ja, 50m	x	x		x	x		07-08-2024
MP-F3	112,5-114,5	PVC	Ja, 50m	x	x		x	x		28-08-2024
Bron	124-183	PVC	Ja, 50m	x			x		HCO ₃ ⁻	22-05-2024
MP-F4	124-126	RVS	Ja, 50m	x	x	x	x	x		22-05-2024
MP-F5	140-142	RVS	Ja, 50m	x	x	x	x	x		23-05-2024
MP-F6	147-149	RVS	Ja, 50m	x	x	x	x	x		23-05-2024
MP-F7	157-159	RVS	Ja, 50m	x	x	x	x	x		23-05-2024
MP-F8	169-171	RVS	Ja, 50m	x	x	x	x	x		22-05-2024
MP-F9	193-194	PVC	Ja, 50m	x	x		x	x		28-08-2024

* alleen in de peilbuizen met pompkamer was het mogelijk om een gasmonster onder druk (in cilinder) te nemen en te laten analyseren bij TNO volgens de 'standaard' methode die IF en TNO al jaren hanteren.

Veld: Veldmetingen, namelijk Electroconductiviteit (EC), pH, zuurstof, watertemperatuur

Chemie: een pakket aan chemische parameters die relevant zijn voor HTO. Zie ook tabel in de bijlage 8 voor de parameters in dit pakket.

Gas1 (IF): gasanalyse van een grondwatermonster dat onder druk verkregen is. Deze methode is ontwikkeld met TNO en wordt al tientallen jaren toegepast. Analyse op de gassen argon, stikstof, zuurstof, methaan, kooldioxide.

Gas2 (Flask): een meer eenvoudige en goedkopere gasbemonstering vergeleken met 'Gas (IF)' hierboven. De vraag was of deze methodiek voldoende betrouwbaar is, wat kan worden beoordeeld door de resultaten van Gas 1 en Gas 2 te vergelijken.

ATP: AdenosineTriPhosphate. Deze chemische stof is een algemene indicator voor de activiteit van de aanwezige biomassa in het monster.

DNA: DNA-conservering van het verkregen grondwatermonster. Het betreft geen analyse maar het isoleren van DNA uit het grondwatermonster en het invriezen ervan, ten behoeve van eventuele NGS-analyse (Next Generation Sequencing) in de toekomst. Voor de monsternames is 10 liter water over een filter worden gepompt voordat het opgevangen is in de fles.

De analyseresultaten zijn in één overzicht gezet in onderstaande Tabel 5.5. De analysecertificaten zijn toegevoegd in bijlage 8. Hieronder is de aangetroffen chemische grondwatersamenstelling toegelicht voor het 3^e watervoerende pakket (beoogd opslagpakket). Omdat de overige peilfilters zich buiten het opslagpakket bevinden en het opslagpakket goed is afgesloten is geen nadere toelichting gegeven op de resultaten van deze peilfilters: deze resultaten zijn in de toekomst bruikbaar als referentiemetingen.

Tabel 5.5 | Overzicht van de resultaten van de uitgevoerde grondwateranalyses.

Putcode	unit		MP-F1	MP-F2	MP-F3	MP-F4	MP-F5	MP-F6	MP-F7	MP-F8	MP-F9	Bron
Diepte peilfilter	m-mv		72-74	97.5-98.5	12.5-114.1	124-126	140-142	147-149	157-159	169-171	193-194	124-183
Diepte peilfilter top	m-mv		72	97.5	112.5	124	140	147	157	169	193	124
Diepte peilfilter basis	m-mv		74	98.5	114.5	126	142	149	159	171	194	183
Datum bemonstering	-		07-08-24	07-08-24	28-08-24	22-05-24	23-05-24	23-05-24	23-05-24	22-05-24	28-08-24	22-05-24
Opmerkingen	-		Bron uit	Bron uit	Bron uit	Bron aan	Bron aan	Bron aan	Bron aan	Bron aan	Bron uit	Bron aan
Yeldmeting	eenheid	lab	MP-F1	MP-F2	MP-F3	MP-F4	MP-F5	MP-F6	MP-F7	MP-F8	MP-F9	Bron
Datum meting			07-08-24	07-08-24	28-08-24	22-05-24	23-05-24	23-05-24	23-05-24	22-05-24	28-08-24	22-05-24
EC	µS/cm	IF	6870	8220	8008	9550	10510	10810	11610	12490	11040	11320
pH	-	IF	6.5	8.9	6.7	7.14	6.6	6.7	7.6	7	12	6.7
zuurstof	mg/l	IF	0.95	0.45	0.89	0.2	0.25	0.11	0.2	0.51	0.2	-
watertemperatuur	°C	IF	14.5	16.5	13.9	14.6	14	14.1	14.3	13.8	14.7	13.9
Observatie gasbellen	-	IF	ja	ja	ja	kleine bell	kleine bell	geen	geen	geen	nee	-
Observaties overig	-	IF	GFP 33m	GFP 33m	GFP 28m	troebel	peild 143,5m			troebel	GFP 28m	
NTU	-	IF	8.26	4.78	8.77						28.2	
Laboratorium chemie	eenheid	lab	MP-F1	MP-F2	MP-F3	MP-F4	MP-F5	MP-F6	MP-F7	MP-F8	MP-F9	Bron
Datum analyse												
DOC	mg/l	SGS	8.9	9.8	9.4	6.1	8.4	7.5	16	3.9	8.6	
pH	-	SGS	6.7	6.8	6.9	6.9	7	7	7	7.1	7.6	
temperatuur tbv pH	°C	SGS	21.6	21.5	22.1	20.3	20	20.4	19.5	20.2	22	
arsen	µg/l	SGS	20	13	4	<1	<1	<1	<1	<1	2	
barium	µg/l	SGS	230	250	230	250	290	300	390	250	120	
Borium	µg/l	SGS	59	110	140	320	260	250	370	690	1700	
cadmium	µg/l	SGS	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.3	<0.4	<0.5	<0.6	<0.2	
calcium	µg/l	SGS	600000	560000	540000	470000	450000	440000	460000	340000	120000	
chromium	µg/l	SGS	<1	<1	1.5	<1	<1	<1	<1	<1	<1	
kobalt	µg/l	SGS	3	2.8	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	
kalium	µg/l	SGS	9100	15000	18000	28000	33000	30000	42000	47000	43000	
koper	µg/l	SGS	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	
lithium	µg/l	SGS	<50	<50	55	77	60	65	67	57	<50	
lood	µg/l	SGS	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	
magnesium	µg/l	SGS	55000	75000	95000	170000	140000	130000	220000	260000	170000	
mangaan	µg/l	SGS	830	560	360	220	140	120	150	110	60	
molybdeen	µg/l	SGS	<2	<2	<2	<2	<2	62	<2	<2	2.3	
natrium	mg/l	SGS	690	1000	1000	1200	2100	1600	1900	1700	1900	
nikkel	µg/l	SGS	10	5.7	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	
Silicium	µg/l	SGS	13000	15000	17000	23000	18000	18000	14000	10000	4200	
vanadium	µg/l	SGS	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2	2.2	<2	
ijzer	µg/l	SGS	19000	16000	12000	8200	6700	6200	5700	4700	1500	
zink	µg/l	SGS	28	10	19	<10	<10	14	21	<10	<10	
ammonium	mg/l	SGS	4.7	5.3	6.1	10	8.6	8.4	11	14	11	
fluoride	mg/l	SGS	<0.2	<0.20	<0.20	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	
bromide	mg/l	SGS	6.7	9.7	7.9	12	11	11	12	17	12	
fosfor (totaal)	mgP/l	SGS	0.29	0.44	0.42	0.73	0.47	0.38	0.25	0.25	0.36	
bicarbonaat	mg/l	SGS	730	860	930	830	740	600	490	350	370	560
chloride	mg/l	SGS	2250	2780	2190	3650	3260	3310	3670	5200	3350	
nitraat	mgN/l	SGS	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
nitraat	mg/l	SGS	<0.2	<0.20	<0.20	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.20	
sulfaat	mg/l	SGS	22	9.9	26	<1.0	25	15	60	240	160	
(ortho)fosfaat	mgP/l	SGS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	
Alkaliteit	mgCaCO3/l	SGS	580	690	730	690	620	530	400	280	300	
Alkaliteit	mmol/l	SGS	12	14	15	14	12	11	8	5.5	6.1	
Gasanalyses TNO	eenheid	lab	MP-F1	MP-F2	MP-F3	MP-F4	MP-F5	MP-F6	MP-F7	MP-F8	MP-F9	Bron
argon	mg/l	TNO				0.44	0.59	0.55	0.61	0.74		
zuurstof	mg/l	TNO				<0.10	<0.10	<0.10	0.35	<0.10		
stikstof	mg/l	TNO				12.01	14.65	14.13	18.07	19.62		
methaan	mg/l	TNO				19.27	9.09	4.47	<0.10	<0.10		
kooldioxide	mg/l	TNO				117.94	104.58	87.35	48.2	24.93		
Gasanalyses Isolab	eenheid	lab	MP-F1	MP-F2	MP-F3	MP-F4	MP-F5	MP-F6	MP-F7	MP-F8	MP-F9	Bron
argon	mg/l	Isolab	0.64	0.56	0.53	0.57	0.67	0.7	0.76	0.81	1.4	0.75
argon	mg/l	Isolab + corr.				0.57	0.67	0.71	0.77	0.85	1.5	0.73
zuurstof	mg/l	Isolab	0.30	0.22	0.20	0.32	0.32	4.61	0.74	0.37	1.5	0.33
zuurstof	mg/l	Isolab + corr.				0.31	0.32	4.65	0.75	0.38	1.5	0.33
stikstof	mg/l	Isolab	17.06	14.19	13.05	14.72	16.73	20.29	17.41	21.11	96.3	18.1
stikstof	mg/l	Isolab + corr.				14.62	17	20.64	18.26	21.88	96.3	18.54
methaan	mg/l	Isolab	29.02	27.96	30.33	20.43	8.85	2.96	0.07	0.01	0.22	6.07
methaan	mg/l	Isolab + corr.				20.33	9.93	2.96	0.07	0.01	0.22	6.15
kooldioxide	mg/l	Isolab	226.08	234.29	211.88	179.92	149.62	100.65	105.83	39.42	0.61	100.48
kooldioxide	mg/l	Isolab + corr.				187.05	155.76	104.78	110.27	41.06	0.61	104.63
Microbiologie	eenheid	lab	MP-F1	MP-F2	MP-F3	MP-F4	MP-F5	MP-F6	MP-F7	MP-F8	MP-F9	Bron
Datum analyse	-	KWR	08-08-24	08-08-24	29-08-24	23-05-24	24-05-24	24-05-24	24-05-24	23-05-24	29-08-24	
ATP	pg/ml	KWR	25	14	18	5	<3.4	<3.5	<3.3	5.8	16	
Berekeningen	eenheid	partij	MP-F1	MP-F2	MP-F3	MP-F4	MP-F5	MP-F6	MP-F7	MP-F8	MP-F9	Bron
SO4/Cl	-	IF	0.0098	0.0036	0.0119	0.0003	0.0077	0.0045	0.0163	0.0462	0.0478	
Redoxklasse	-	IF	SO4-Red	SO4-Red	SO4-Red	Meth.	SO4-Red	SO4-Red	SO4-Red	SO4-Red	SO4-Red	

Zoutgehalte

De EC-waardes uit de veldmetingen laten een toenemende EC-waarde zien met diepte. Dit is in lijn met de verwachting dat het zoutgehalte toeneemt met de diepte. Bij de chloridewaarden is deze trend ook zichtbaar, maar de meting bij MP-F4 (bovenin het opslagpakket) geeft een relatief hoge concentratie (3.650mg/l), terwijl MP-F5 t/m MP-F8 een mooie toenemende trend laten zien (3.260 - 5.200 mg/l).

Redox

De redoxtoestand van het grondwater en de bijbehorende redoxprocessen zijn relevant voor WKO en HTO-systemen omdat het samenbrengen van grondwater met verschillende redox toestanden kan leiden tot redoxreacties die kunnen leiden tot verstopping van de putten.

- In ondiepe WKO-systemen levert het mengen van ondiep zuurstofrijk water met dieper ijzerrijk water putverstopping op, omdat daarbij ijzerhydroxide-deeltjes worden gevormd die leiden tot putverstopping. Dit is een (bio)chemisch proces.
- In diepere lagen waar geen zuurstof aanwezig is maar wel sulfaat, kan het proces van sulfaatreductie leiden tot sulfidevorming. Sulfides slaan vervolgens neer met het opgeloste ijzer tot verstoppende ijzersulfide-deeltjes. Microben spelen een belangrijke rol in de sulfaatreductie en de neerslag van sulfides met ijzer is een chemisch proces.

Om deze reden wordt bij Open Bodemenergiesystemen (WKO en HTO) zoveel mogelijk voorkomen dat water met verschillende redox toestanden wordt gemengd.

Voor Delft was voorafgaand aan de boring het risico op putverstopping door sulfaatreductie geïdentificeerd. Dit was aanleiding om een groot aantal peilbuizen in het opslagpakket te plaatsen: door metingen op verschillende dieptes wordt een scherper beeld verkregen van de diepte waarop de overgang zich bevindt.

De situatie bij de proefboring is als volgt. Het grondwater in het opslagpakket bevat geen zuurstof en nitraat en is dus anoxisch. Het opslagpakket heeft een mariene oorsprong (Maassluis) en bevat zout grondwater, waarbij het chloridegehalte toeneemt van 15% naar 25% ten opzichte van zeewater. Het sulfaatgehalte in zeewater is ongeveer 14% van het chloridegehalte van zeewater (beide mg/l). Het chloridegehalte in het opslagpakket neemt toe met de diepte, wat aangeeft dat de mengverhouding tussen zeewater en ondiep zoet grondwater met de diepte verschuift richting een groter aandeel zeewater. In het opslagpakket neemt het sulfaatgehalte dan ook toe met de diepte. Doordat het ondiepere, relatief zoete grondwater in de regio Delft verhoogde concentraties opgelost methaan bevat, neemt het methaangehalte juist af met de diepte.

Op basis van de observaties is er dus een overgangszone aanwezig in het opslagpakket waarin de redox toestand verandert van methanogeen (bovenin het pakket) naar sulfaat-reducerend (vanaf circa 140 m-mv), zie ook de classificatie in Figuur 5.8.

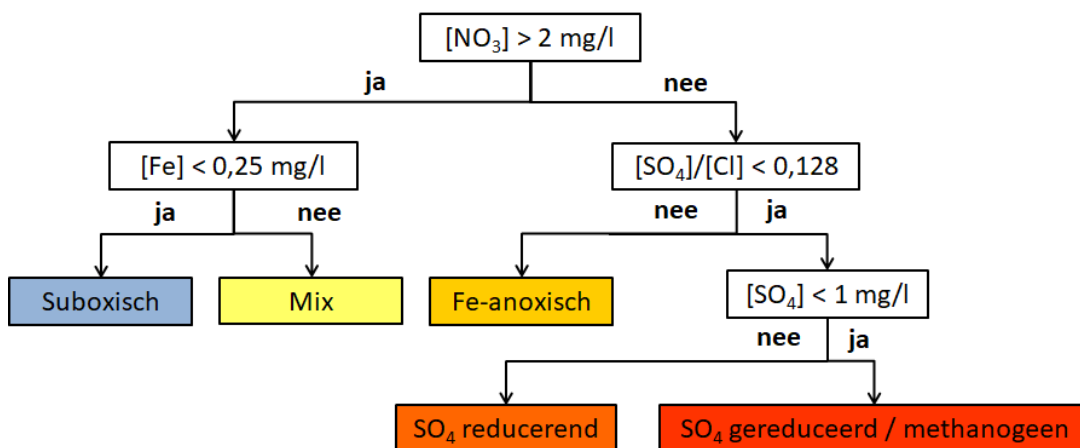
Op hoofdlijnen worden drie 'zones' onderscheiden in dit pakket:

- Bovenin het pakket is geen sulfaat aanwezig (<1 mg/l), zodat sprake is van methanogene redox condities. Het grondwater bevat hier een relatief hoge concentratie opgelost methaan (ca. 20 mg/l).
- Middenin het pakket, in peilbuizen MP-F5 en MP-F6 op 140 en 149 m diepte, is zowel sulfaat aanwezig (resp. 25 en 15 mg/l) als methaan (resp. circa 9,0 en 4,5 mg/l). Hier treedt mogelijk van nature enige mate van sulfaatreductie op.
- Dieper in het opslagpakket bij MP-F7 en MP-F8 is wel sulfaat aanwezig (resp. 60 en 240 mg/l) maar geen methaan (<0,10 mg/l).

In Amsterdam bestaan voorbeelden van WKO-systemen die met dezelfde overgang in redox toestand te maken hebben, en last hebben van putverstopping als gevolg van sulfaatreductie. Hoewel het verschil in

sulfaatconcentratie tussen de twee zones in Amsterdam aanzienlijk groter is dan in dit opslagpakket in Delft, kan op voorhand niet worden uitgesloten dat ook hier sulfaatreductie kan optreden wanneer grondwater uit het bovenste deel en het onderste deel van het derde watervoerende pakket wordt gemengd.

Een belangrijke vervolgstap is daarom om een preciezere beoordeling te maken van het risico dat deze overgang biedt voor het presteren van het beoogde HTO-systeem op de campus TU Delft. Deze beoordeling is onderdeel van het Plan van Aanpak dat IF Technology heeft voorgesteld voor de vervolgfase na de Rapportage Proefboring (zie ook hoofdstuk 1.5).



Figuur 5.8 | Classificatie van de grondwaterkwaliteit op basis van de redoxtoestand (Bron: TNO, 2007)²

Opgeloste gassen

Methaan:

Onder het kopje 'Redox' is beschreven dat de methaanconcentratie toeneemt met de diepte, van circa 20 mg/l in MP-F4 naar <0,1 mg/l in MP-F8.

Zuurstof

Het grondwater bevat geen zuurstof en is anoxisch. Dit is in lijn met de verwachting omdat zuurstof de sterkste oxidator is en daarom als eerste verbruikt zal worden in aanwezigheid van een reductor zodat zuurstof al op geringe diepte volledig is verbruikt.

Stikstof en argon

Water dat van nature in de ondergrond infiltreert is in evenwicht met de atmosfeer en bevat ongeveer 18 mg/l stikstof en 0,7 mg/l argon. Door de afbraak van nitraat kan de stikstofconcentratie nog wat verder toenemen. Afname van de concentraties stikstof en argon kan plaatsvinden wanneer sprake is geweest van ontgassing van het grondwater. Deze ontgassing treedt op wanneer processen optreden waarbij gassen worden gevormd: de belangrijkste processen zijn de vorming van stikstofgas door denitrificatie (afbraak van nitraat) en de vorming van methaan bij methanogenese. Uit de meetresultaten blijkt, dat de concentraties argon en stikstof in het grondwater uit de peilfilters 4 t/m 6 verlaagd is en methaan juist verhoogd (methaan is nauwelijks aanwezig in het water dat van nature in de ondergrond infiltreert). Deze resultaten wijzen op enige mate van ontgassing door methaanvorming. Methaan is gevormd in de bodem uit organisch-rijk materiaal (zoals veen) en dit heeft de gasdruk

² TNO, 2007. Landsdekkende, geologische karakterisering van de regionale grondwatersamenstelling in de geotoop van Nederland - Data rapport. TNO rapport 2006-U-R0171/A, Utrecht.

dusdanig verhoogd dat gasbellen ontstonden met daarin ook stikstof en argon. De gasbellen en stoffen daarin konden ontsnappen uit het systeem. Methaan kon blijven worden gevormd en bleef daardoor verhoogd in concentratie. De verhoogde CO₂ concentraties in het grondwater uit deze peilbuizen zijn ook in lijn met deze verklaring, aangezien methaanvorming in de ondiepe ondergrond met name een microbiologisch proces is en bij microbiologische methaanvorming ook CO₂ ontstaat (Stuyfzand et al, 1994).

Kalkevenwicht-gerelateerde parameters

In het Plan van Aanpak voor het vervolg (zie hoofdstuk 1.5) wordt voorgesteld om in een vervolgfase niet alleen de risico's van mogelijke redoxreacties, maar ook van kalkneerslag te onderzoeken. In die fase zal daarom ook uitgebreider moeten worden gekeken naar parameters die relevant zijn voor het carbonaatevenwicht, zoals calcium, magnesium, bicarbonaat, kooldioxide, zuurgraad, etc. Hieronder zijn kort een aantal observaties opgenomen. Een meer uitgebreide duiding en risico-inschatting op basis van het beeld, wordt in de volgende fase uitgevoerd.

- Kooldioxide: Er zijn twee verschillende bemonsterings- en analysemethodieken gebruikt voor het meten van de opgeloste gassen in de peilbuizen. Hoewel de resultaten tussen de methodes afwijken (resultaten Isolab laten gemiddeld 1,5x zo hoge waarde zien als resultaten TNO-lab), is duidelijk een trend zichtbaar van afnemende CO₂-concentratie met diepte. Volgens de TNO-resultaten neemt de CO₂-concentratie tussen MP-F4 en MP-F8 af van circa 118 tot 39 mg/l.
- Bicarbonaat (HCO₃⁻) volgt de trend die de concentratie opgelost CO₂ laat zien: de bicarbonaat concentratie het neemt af met de diepte.
- Calcium laat een vergelijkbare concentratie zien tussen MP-F4 en MP-F7 van circa 460 mg/l. De onderste peilbuis in het opslagpakket (MP-F8) laat een lagere waarde zien van 340 mg/l.
- Magnesium neemt in concentratie toe met de diepte van 170 mg/l (MP-F4) naar 260 mg/l (MP-F8).
- DOC en ortho-fosfaat: Dissolved Organic Carbon (specifieker: organische zuren) en fosfaat zijn parameters die niet direct deelnemen in de neerslagreactie van calciëet, maar die wel invloed kunnen hebben. Op basis van Griffioen³ (1992) zijn dit namelijk belangrijke inhibiterende stoffen (stoffen die het neerslagproces hinderen).

Microbiologie

ATP is een chemische verbinding die alle organismen gebruiken als energiedrager en daarom is ATP bruikbaar als maat voor de activiteit van de aanwezige microben. In alle gevallen zijn de ATP-concentraties laag (lager dan 5,8 pg/ml). Bij peilbuizen MP-F5, MP-F6 en MP-F7 vallen de concentraties onder de detectiegrens (<3,5 pg/ml). Het beeld dat hieruit naar voren komt is dat de aanwezige biomassa een beperkte activiteit heeft. Omdat sulfaatreductie een microbiologisch proces is, is deze parameter ook relevant bij de risico-inschatting hiervan.

5.6 Bodemtemperatuur

Voor zover bekend heeft er nog geen temperatuurmeting met de glasvezelkabel (Distributed Temperature Sensing, DTS) of met een ander meetinstrument plaatsgevonden.

Op basis van temperatuurmetingen uit de omgeving wordt in het 3^e watervoerende pakket een natuurlijke grondwatertemperatuur van circa 13,5 °C verwacht.

³ Griffioen, J. (1992). Cation-exchange and carbonate chemistry in Aquifers following groundwater flow. Academisch proefschrift.

5.7 Steekmonsters

In Delft zijn steekmonsters genomen op verschillende dieptes (zie Bijlage 2). Op dit moment zijn deze nog niet geanalyseerd en daarom kan hier geen aanvullende informatie over worden vermeld. Het advies is om op korte termijn, en in elk geval vóórdát het ontwerp van de bronnen wordt opgestart, deze informatie te benutten voor meer detailinformatie over de bodem nabij de gestoken dieptes.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Doelen van de proefboring

Op de Campus van de TU Delft is van april t/m juni 2024 een proefboring uitgevoerd om gedetailleerde informatie over de ondergrond te verkrijgen voor het beoogde HTO-systeem. Door onzekerheden vanuit de ondergrond voor een groot deel weg te nemen kan de haalbaarheid van HTO in de volgende projectfase scherper worden beoordeeld. Daarnaast is deze informatie van belang voor een goed en robuust ontwerp van de HTO-bronnen en bijbehorende installaties. Tenslotte is het van belang dat de proefboring wordt afgewerkt als monitoringsput zodat in de toekomst (ondergrondse) metingen kunnen worden gedaan aan de effecten en de prestatie van het HTO-systeem, wanneer het in bedrijf wordt genomen. Voorafgaand aan de proefboring is een uitgebreid meetprogramma opgesteld waarin de doelen en belangrijkste onderzoeksvragen voor deze boring zijn uitgewerkt (IF rapport met referentie 'PR09968/RK/20230724').

Onderzoeksvragen

Haalbaarheidsstudies voorafgaand aan de boring lieten zien dat de kansen voor HTO het grootst zijn in de formatie van Maassluis. Het opslagpakket zou op circa 100 - 185 m-mv liggen en aan de bovenkant daarvan werd een dikke kleilaag verwacht van circa 20 m dikte (75 - 95 m-mv). De proefboring had als hoofddoel om detailinformatie te verzamelen over het opslagpakket zelf, over de kleilaagjes binnen het opslagpakket, en de afsluitende kleilaag boven het opslagpakket. Het gaat daarbij vooral over...

- De bodemopbouw: waar bevindt zich zand en waar klei?
- De geohydrologische eigenschappen: wat is de doorlatendheid van de zandlagen en de weerstand van de aangetroffen kleilagen?
- De waterkwaliteit in het opslagpakket: is dit overal gelijk, of zijn er verschillen met diepte?
- De mate van deeltjesproductie: hoeveel deeltjes worden geproduceerd tijdens de onttrekkingstesten, al dan niet op hogere debieten bij overschrijding van normen?

Behalve deze hoofdvragen zijn ook natuurlijke stijghoogtes gemeten, is een glasvezelkabel geïnstalleerd in het boorgat om bodemtemperaturen te kunnen meten en zijn steekmonsters genomen die in de toekomst, door analyse in labs, nog meer details geven van de bodem.

Eigenschappen van de bodem

Op basis van de informatie uit de proefboring zijn bovenstaande onderzoeksvragen beantwoord. De bodemopbouw- en de geohydrologische eigenschappen zijn weergegeven in Figuur 5.1. Dit komt goed overeen met de verwachting vooraf, al is de afsluitende laag dikker dan verwacht en ligt het opslagpakket wat dieper. Dit is een positieve uitkomst vanuit zowel het oogpunt van de vergunning als de prestatie van HTO. Op een diepte van 123 tot 184 m-mv bevindt zich een zandlaag in de formatie van Maassluis die als opslagpakket kan dienen. Over dit dieptetraject van 61 m zijn vier verschillende bronfiltersecties geplaatst met een gezamenlijke bronfilterlengte van circa 44 m. De resultaten laten zien dat de gemiddelde doorlatendheid van de zandlagen uitkomt op 12,3 m/d en dat de gemiddelde doorlatendheid van het zand naast de bronfiltersecties een variatie kent tussen 10,5 en 14,4 m/d. De kleilaag boven en onder het zandpakket bieden veel weerstand en hebben dus een goed afsluitende werking. Binnen het opslagpakket zijn drie lokale kleiige lagen van circa 2 m dikte aangetroffen die een beperkte weerstand en een beperkte afsluitende werking hebben. Vermoedelijk gaat het om kleilagen.

Waterkwaliteit

Het zoutgehalte neemt toe met de diepte en dit past goed in het regionale beeld. Het grondwater in het opslagpakket bevat geen zuurstof en nitraat en is dus anoxisch. Op basis van de observaties is een overgangszone aanwezig in het opslagpakket waarin de redoxtoestand verandert van methanogeen (bovenin het pakket) naar sulfaat-reducerend (vanaf circa 140 m-mv). Dit verdient aandacht omdat het toepassen van HTO kan leiden tot het mengen van grondwater met verschillende redox toestanden en dit initieert of stimuleert redox- en neerslagprocessen die bij kunnen dragen aan bronverstopping.

Mate van deeltjesproductie

Er zijn verschillende pomptesten uitgevoerd met een debiet tot maximaal 100 m³/uur op de volledige proefbron, waarbij grondwater werd onttrokken uit alle vier de bronfiltersecties samen. De maximale overschrijdingsfactor van de NVOE-onttrekkingsnorm die is bereikt is daarmee 1,8. Deze testen lieten zien dat de zandproductie uit de proefbron op verschillende debieten zeer beperkt is en onder de BRL-normen ligt, voor deze debieten en overschrijdingsfactor. Uit de MFI-testen blijkt dat de slibhoudendheid van het water laag is bij alle testen. Vergeleken met de resultaten van de proefboring van het project in Middenmeer is de MFI in Delft zeer laag. Het patroon dat de productie van deeltjes toeneemt na opstarten van de pomp en vervolgens afneemt gedurende een onttrekkingsperiode, is bekend uit andere projecten en wordt ook geobserveerd bij de testen en metingen die zijn uitgevoerd bij dit project door IF Technology (metingen zand, slib, MFI) en KWR (deeltjestelling, MFI, troebelheid). Het oorspronkelijke plan was om de diepste twee bronfilters af te dichten en vervolgens het maximale debiet (circa 100 m³/uur) toe te passen op alleen de ondiepste bronfilters (sectie 1 en 2), zodat ook de mate van deeltjesproductie kon worden getest bij een overschrijdingsfactor van 3,5. Echter, deze tests konden niet plaatsvinden. Dat komt doordat de afdichting niet conform het plan is gerealiseerd. Na het aanbrengen van de afdichting bleek deze ondieper zijn komen te liggen door een onverklaarbare reden, en daarnaast bleek dat bronfiltersecties 1 en 2 verstopt waren geraakt met (vermoedelijk) cement, waardoor de put vrijwel dicht zat. Testen op hoge debieten na afdichten was dus niet mogelijk, en deeltjesproductie is daarmee getest tot maximaal een overschrijdingsfactor 1,8 op de NVOE-onttrekkingsnorm.

6.2 Aanbevelingen

Vervolgstappen volgens PVA.

Met de informatie over de ondergrond uit dit rapport kan de potentie van de aangetroffen bodemlagen voor HTO in de toekomst inzichtelijk worden gemaakt en kan worden toegewerkt naar een Go/No-go besluit voor het ontwerp en de realisatie van het HTO-systeem. Om daar invulling aan te geven adviseert IF Technology om de volgende onderdelen verder uit te werken:

1. De filterstelling-opties die mogelijk zijn voor de HTO-bronnen
2. Per filterstelling-optie bepalen wat het maximaal debiet is dat een HTO-bron kan leveren, waarbij het risico van deeltjesproductie en bijbehorende putverstopping acceptabel blijft;
3. Per filterstelling-optie berekenen welk terugwinrendement verwacht mag worden;
4. Per filterstelling-optie beoordelen wat de risico's zijn voor verstoppingen gerelateerd aan de (verschillende) grondwatersamenstelling in het pakket (kalk en redox);
5. Keuze maken van de voorkeursfilterstelling, op basis van resultaten van bovenstaande stappen;
6. Updaten van het systeemconcept en energiestromen;
7. Berekenen hernieuwde businesscase;
8. Opstellen van een risicoanalyse;
9. Keuze maken in de uitgangspunten voor het HTO-systeem en besluit tot ontwerp en realisatie.

Toetsen inzet van proefbron en monitoringsput voor vervolgfases

Na het afdichten van de diepe bronfilters met beton is een aantal problemen opgetreden met de proefbron. Zo is de betonprop een aantal dagen na het aanbrengen een aantal meters omhooggekomen en leverden de bronfilterdelen boven de betonprop nauwelijks water meer. Er is een camera-inspectie uitgevoerd om een visueel beeld van de put te krijgen en deze laat zien dat ondiepe bronfilters verstopt zijn (waarschijnlijk met beton), dat het water in de bron zeer troebel is en dat aan de bovenkant van de betonprop water door de betonprop omhoog komt, de bron in.

Na het dichtstorten van de bronnen zijn de peilbuizen weliswaar schoon gepompt middels luchtlichten, maar tijdens de bemonstering enkele weken later bleek dat het water dat uit de peilbuizen omhoog werd gepompt troebel was, met name wanneer van pompdebiet werd gewisseld.

Op basis van deze situatie dient nader beoordeeld te worden of de proefbron in staat is de functies te vervullen die vooraf voor de put bedacht zijn. Het advies is om samen met de booraannemer de werkwijze en de staat van de put te evalueren. Vanuit IF Technology worden concreet de volgende aanbevelingen gedaan:

- De peilbuizen zijn geïnstalleerd om in de toekomst dienst te doen als monitoringspunten voor het HTO-systeem. Daarbij moet de peilbuis faciliteren dat een representatief grondwatermonster van de betreffende diepte kan worden genomen om effecten van HTO te kunnen volgen. Omdat er bij de bemonstering troebel water werd opgepompt is het advies om de peilbuizen beter schoon te pompen met andere technieken en met grotere onttrekkingsvolumes dan al is gedaan door de booraannemer middels het luchtlichten.
- De proefbron zit behoorlijk dicht en er kan met maximaal circa 8 m³/uur uit de bron worden onttrokken. Er dient gekeken worden of de proefbron daarmee nog geschikt is om als werkwaterbron te functioneren. Zo niet, dan kan overwogen worden om de proefbron in zijn geheel te dempen. De peilbuizen en glasvezel-DTS kabel, die naast de proefbron in hetzelfde boorgat zijn geïnstalleerd, blijven intact en behouden hun functie.

IF Technology **Creating energy**



Velperweg 37
6824 BE Arnhem
Postbus 605
6800 AP Arnhem

T 026 35 35 555
E info@iftechnology.nl
I www.iftechnology.nl

NL60 RABO 0383 9420 47
KvK Arnhem 09065422
BTW nr. NL801045599B01

IF Technology **Creating energy**