

## ANEJO - GEOLÓGICO Y GEOTÉCNICO

## Índice

<b>1.</b>	Introducción .....	3
<b>2.</b>	Características geológicas de la zona de estudio .....	3
<b>3.</b>	Características hidrológicas de la zona de estudio.....	5
<b>4.</b>	Fenómenos geológicos de la zona de estudio.....	6
<b>5.</b>	SISMICIDAD .....	7
<b>6.</b>	Investigación de la zona de estudio .....	8
	5.1. Trabajos de campo realizados para el presente estudio.....	8
	5.2. Trabajos de campo realizados para el presente estudio.....	9
<b>7.</b>	Caracterización del terreno.....	11
<b>8.</b>	Características geotécnicas del terreno .....	15
<b>9.</b>	Cálculo de la estabilidad del cauce.....	16
	9.1 Plaxis.....	16
	9.2 SLIDE.....	18
	9.3 Discusión.....	19
<b>10.</b>	Plano de ubicación de los ensayos.	
<b>11.</b>	Fichas de los ensayos y sondeos.	

## 1. Introducción

Este anejo tiene como fin describir las características geológicas y geotecnias de la zona de actuación del proyecto de remodelación de la carretera R0 en Bruselas. Para ayudar a caracterizar geológicamente la zona de actuación, se cuenta con la información recopilada de los mapas de los Estudios Geológicos de Europa (*the Geological Surveys of Europe*). Junto a esta información, se cuentan con los datos de las diferentes campañas realizadas en la zona de actuación que hacen posible caracterizar la geotécnica del modelo.

Seguidamente, se analiza la geotecnia de la zona de actuación para realizar las comprobaciones de estabilidad que se requieren en los márgenes del cauce del río Woluwe, con los programas PLAXIS y Slide.

## 2. Características geológicas de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en Bruselas, Bélgica. En dicho país se pueden diferenciar tres regiones importantes definidas en función del relieve del país: la meseta de las Ardenas, la llanura central belga y la llanura marítima de Flandes como se observa en la *imagen 1*.



*Imagen 1. Mapa físico y político de Bélgica. En rojo marcada la zona de actuación (locuraviajes.com, Christian 2020).*

La zona de actuación de nuestro proyecto se encuentra en la llanura central belga. Esta, es de origen terciario, recubierta por arenas finas, arcillas y loes, algunos valles fluviales poco excavados y pequeños montes aislados rompen la uniformidad de la región. Como se puede apreciar en la *imagen 2*, la zona de actuación en la que nos encontramos presenta rocas sedimentarias, más concretamente en el Eoceno.

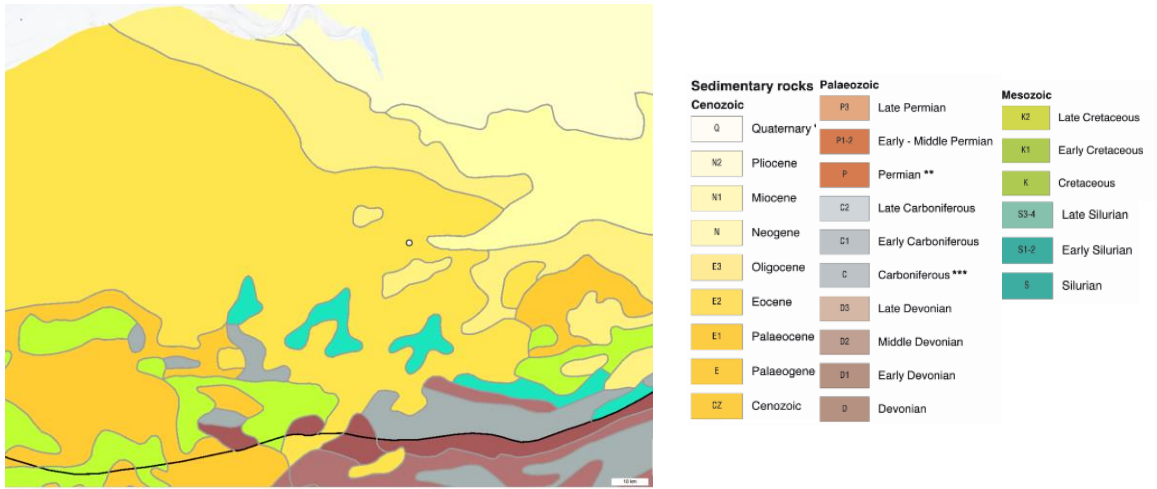


Imagen 2. Geología general de Bruselas. En blanco la zona de actuación (the Geological Surveys of Europe).

En la imagen 3, se puede apreciar como la zona de actuación está cercana a la B en el corte, por lo que la que está compuesta la zona de actuación es la formación de Bruxelles (Bruselas).

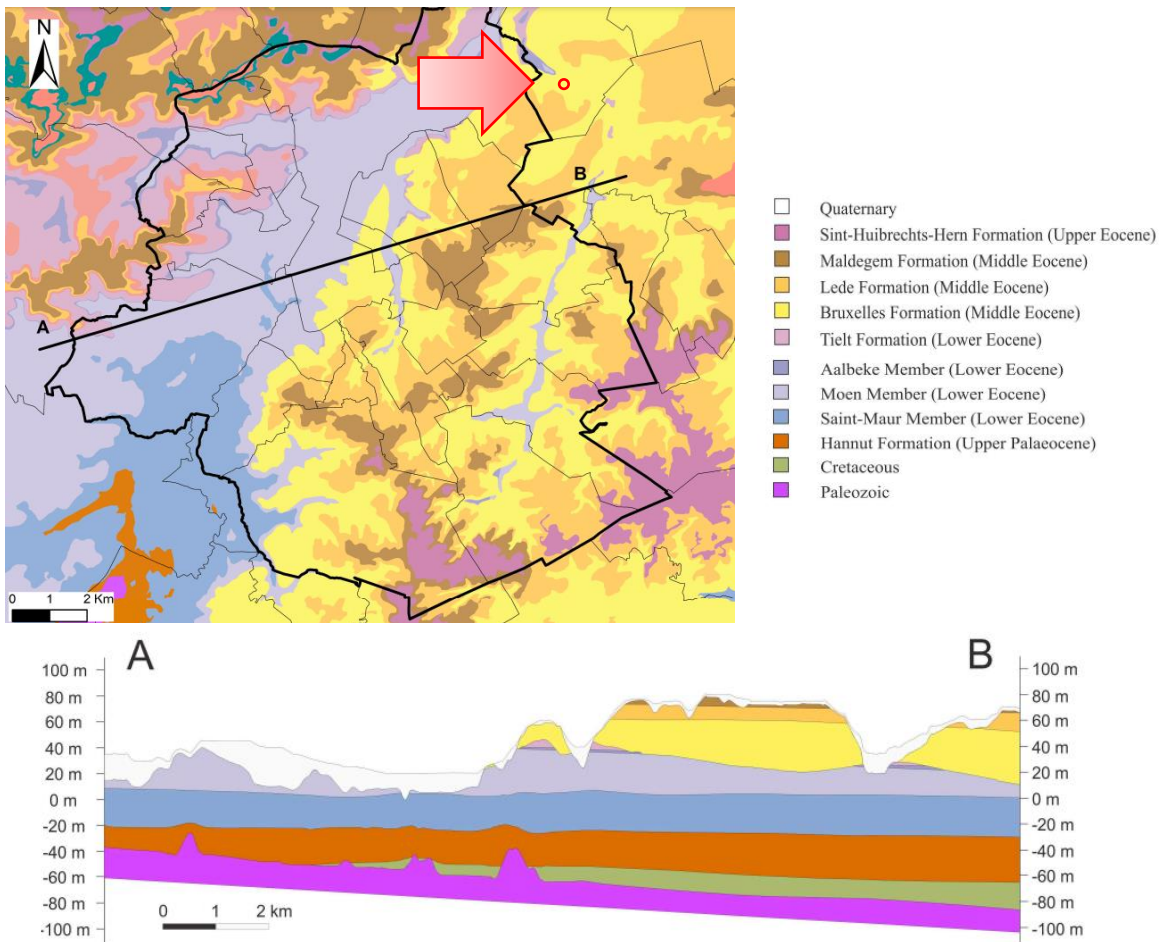
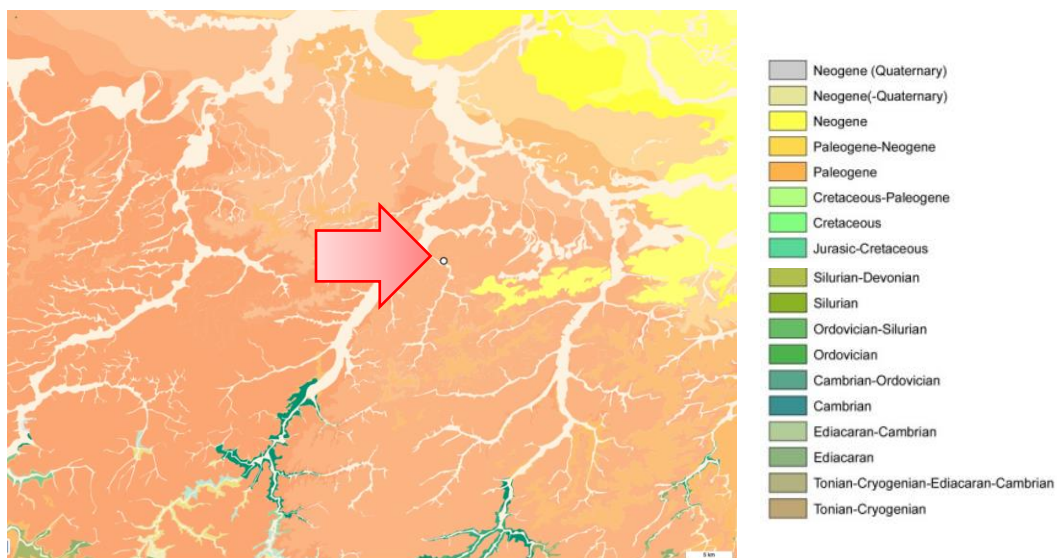


Imagen 3. Geología específica de la zona Bruselas. En rojo la zona de actuación (A Study of Ground Movements in Brussels (Belgium) Monitored by Persistent Scatterer Interferometry over a 25-Year Period).

La formación de Bruselas consta de arenas marinas poco profundas y arenas calcáreas, que se depositaron en el mar que cubría el norte y el centro de Bélgica durante el Eoceno. La formación se depositó en una cuenca marina con corrientes de marea en dirección sur-norte. Por lo tanto, la orilla oeste creció en paquetes inclinados de oeste a este. Los depósitos más jóvenes se encuentran a lo

largo del borde este, son más gruesos y muestran gruesos lechos cruzados que muestran fuertes corrientes, como se observa en la *imagen 3*. Por lo general, la formación de Bruselas tiene alrededor de 15 metros de espesor, pero a menudo tiene una incisión local más profunda, alcanzando espesores de hasta 40 metros. Generalmente se compone de arena fina de cuarzo calcáreo en el fondo y arena de cuarzo de grano medio en la parte superior aunque existen intercalaciones de arena sólida de grano medio a grueso en el centro de la cuenca.

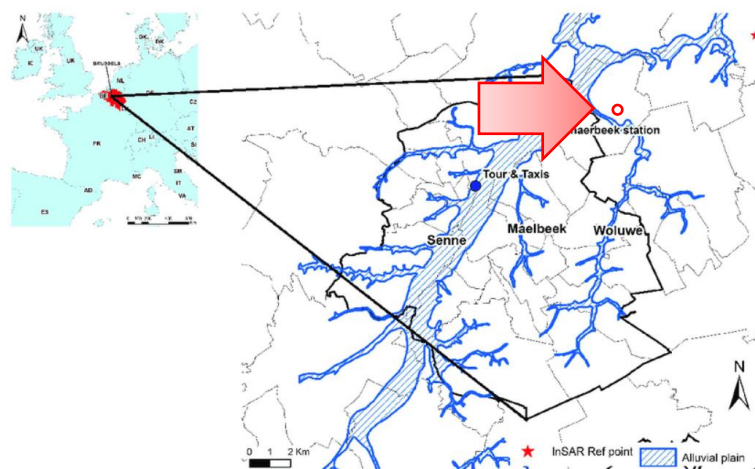
Pasando a hablar de la fisiografía, Bélgica está dividida en tres secciones fisiográficas: Bélgica inferior, media y superior. Estas secciones se extienden de este a oeste, estando nuestra zona de actuación en la media, la cual se compone por rocas paleozoicas que están parcialmente cubiertas por sedimentos cenozoicos. Como se puede observar en la *imagen 4*:



*Imagen 4. Fisiografía de Bruselas. En blanco la zona de actuación (the Geological Surveys of Europe).*

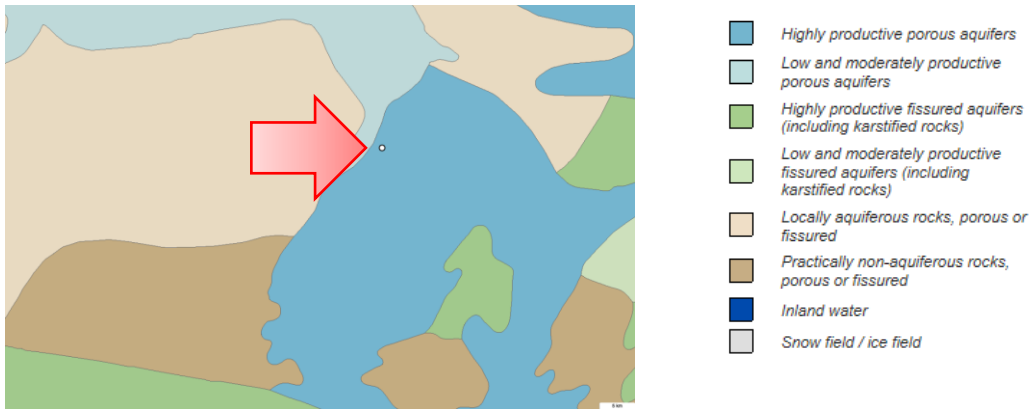
### 3. Características hidrológicas de la zona de estudio

Continuando con la hidrología, en Bruselas es muy importante el río Senne, que pasa en su mayoría por la ciudad de forma subterránea. Uno de sus afluentes, el Woluwe pasa por la zona de actuación y se planea hacer que pase por debajo de la infraestructura de la carretera R0 definiendo previamente la nueva cuenca del río. En la *imagen 5*, se pueden apreciar en azul las llanuras aluviales del Cuaternario de los ríos Senne, Maelbeek y Woluwe.



*Imagen 5. Hidrología de Bruselas. En rojo la zona de actuación (A Study of Ground Movements in Brussels (Belgium) Monitored by Persistent Scatterer Interferometry over a 25-Year Period).*

En cuanto a la hidrología subterránea, se puede observar en la *imagen 6* como en la zona de actuación los acuíferos son porosos muy productivos.

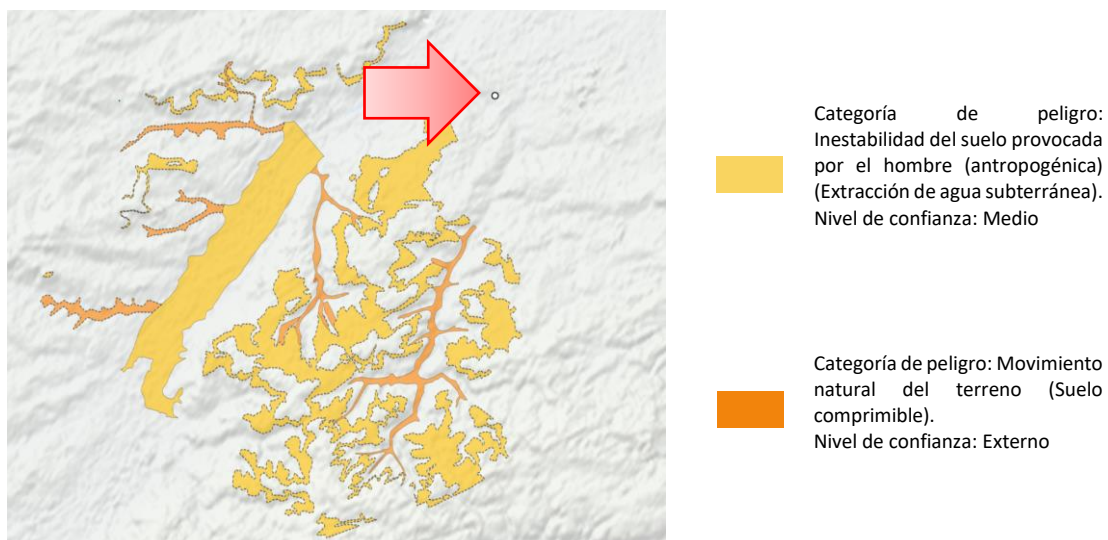


*Imagen 6. Hidrología subterránea de Bruselas. En blanco la zona de actuación (the Geological Surveys of Europe).*

#### 4. Fenómenos geológicos de la zona de estudio

Pasando a hablar de fenómenos geológicos que pueden ser un riesgo para la seguridad a la hora de llevar a cabo el proyecto en la zona de Bruselas, llaman la atención dos fenómenos que se deben tener en cuenta. Por un lado, la inestabilidad en la zona de Bruselas y por otro las pequeñas deformaciones que se generan en el terreno de Bélgica.

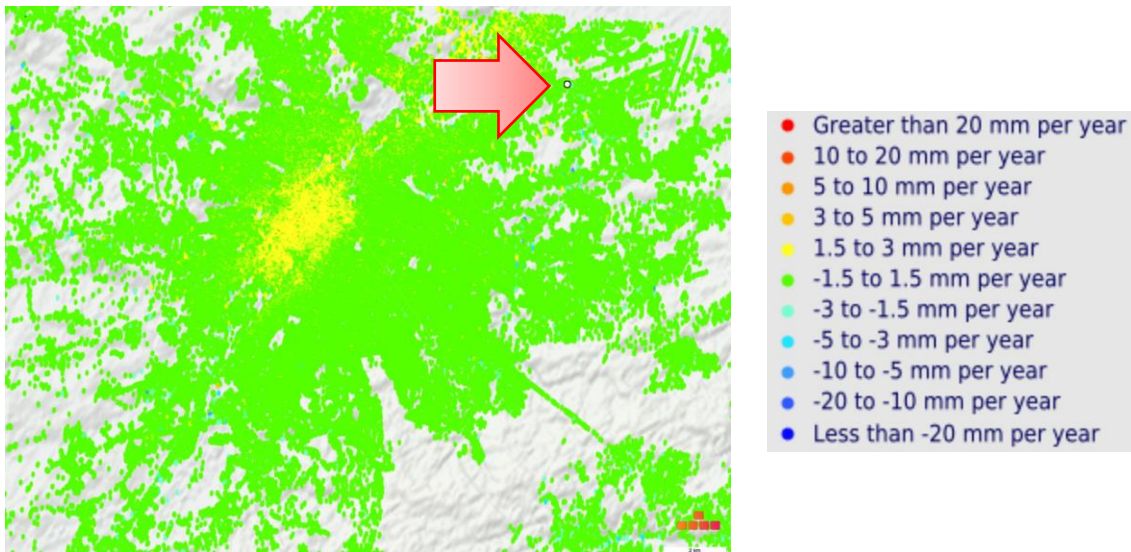
Como se puede observar en la *imagen 7*, en Bruselas existen riesgos de inestabilidad, por un lado la inestabilidad del suelo provocada por la extracción de agua subterránea, y en menor medida la inestabilidad por los movimientos de tierra naturales que pueden generar en el terreno. Estas inestabilidades, se encuentran fuera de la zona de actuación, por lo que no suponen un verdadero riesgo para el desarrollo del proyecto, pero se deberán tener en cuenta a la hora de realizar los trabajos de campo para que supongan un riesgo para la seguridad.



*Imagen 7. Mapa de inestabilidades geológicas de Bruselas. En blanco la zona de actuación (the Geological Surveys of Europe).*

Pasando a hablar de las deformaciones que se producen en el suelo, los resultados de los estudios realizados por el instituto de ciencias naturales de Bélgica destacan un área de levantamiento ubicada

en el centro de la ciudad, con un desplazamiento del suelo acumulado de  $\pm 4$  cm durante un período de 25 años. El levantamiento del centro de la ciudad se atribuye a una reducción de la extracción de agua subterránea de los acuíferos más profundos (Cenozoico-Paleozoico), relacionada con la desindustrialización del centro de la ciudad desde la década de 1970. Los niveles de agua subterránea atestiguados por piezómetros en estos acuíferos muestran una clara tendencia de recarga que indujo el levantamiento. Algunas áreas de hundimiento en los valles de los ríos, como Maelbeek (afluente del Woluwe), pueden estar relacionadas con el asentamiento natural de depósitos aluviales jóvenes y blandos, posiblemente aumentados por la carga de edificios. Como se observa en la *imagen 8*, en la zona de actuación, este desplazamiento se produce entre -1.5 a 1.5 mm cada año, aunque estamos cerca de la zona en la que se desplaza de 1.5 a 3 mm al año.



*Imagen 8. Deformaciones del terreno en Bruselas. En blanco la zona de actuación (the Geological Surveys of Europe).*

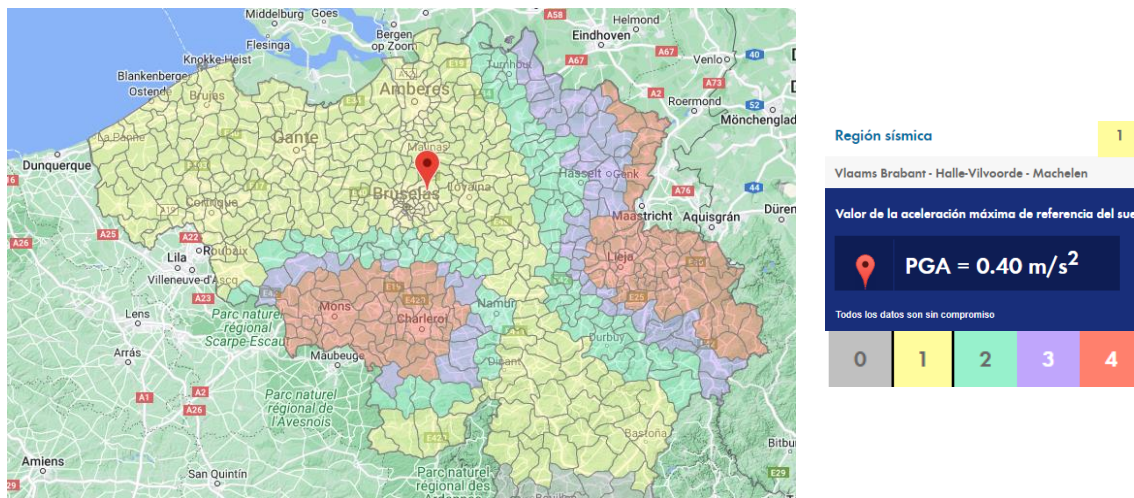
## 5. SISMICIDAD

En cuanto a sismicidad, en la zona de Vlaams-Brabant (*imagen 9*), el peligro de terremoto se clasifica como **medio** de acuerdo con la información actualmente disponible. Esto significa que hay un 10% de probabilidades de que en los próximos 50 años se produzca un terremoto potencialmente dañino en la zona de actuación. En base a esta información, el impacto de un terremoto debería tenerse en cuenta en todas las fases del proyecto, en particular durante el diseño y la construcción. Las decisiones relativas a la planificación del proyecto, el diseño del proyecto y los métodos de construcción deberían considerar el nivel de peligro sísmico.



*Imagen 9. Sismicidad de la zona del proyecto según thinkhazard. (<https://thinkhazard.org/>).*

Según el eurocódigo 8 (normativa EN 1998-1), Bruselas se encuentra en una región sísmica de riesgo 1, como se observa en la *imagen 10*. Por lo que a la hora del cálculo de estructuras se tomarán los valores indicados en dicha normativa.



*Imagen 10. Mapa de sismología de según el eurocódigo 8. ( www.dlupal.com).*

## 6. Investigación de la zona de estudio

Para caracterizar de una forma más exacta la zona de estudio, se cuenta con las prospecciones de estudios realizados previamente y con los trabajos realizados específicamente para el presente estudio. Todos los trabajos realizados en el entorno de la zona en estudio quedan reflejados en los planos adjuntados al final del presente anejo.

### 6.1. Trabajos de campo realizados para el presente estudio

Se han realizado los siguientes trabajos de investigación geológico-geotécnica:

- Observaciones de superficie: Se realizó un reportaje fotográfico de la zona, para proporcionar una caracterización superficial de la zona de estudio. El plano con el reportaje fotográfico se puede observar en el Anejo: Planos
- Observaciones de campo profundo: Se han realizado dos investigaciones mecánicas del suelo en la zona de actuación. Una de fue llevada a cabo en mayo, junio y julio de 2021 y la otra en agosto del 2021, las dos han sido realizada por la empresa GEOSONDA.

Las pruebas que se llevaron a cabo en mayo, junio y julio de 2021 fueron las siguientes:

- Primera visita a la zona de actuación el 02/02/2021. En esta, se examinó la accesibilidad de los puntos de investigación.
- Realización de sondeos previos, fue necesario en los puntos de perforación llevar a cabo un sondeo preliminar de hasta 1,5 m.
- Colocación de pozos de monitoreo, una vez realizadas las perforaciones. Como se realizó una perforación continua (en seco), fue posible estimar el nivel freático.
- Una semana después, se verificó la del nivel del agua subterránea. Aunque, en los pozos de monitoreo B6A-001, B6B-001, B6B 002, B6B-005 y B6B-006 no fue posible medir un nivel freático correcto por las fuertes lluvias de julio.

Las características de los sondeos realizados, se recogen en la *tabla 1*.



COORDENADAS				
Ensayos	RTK-X	RTK-Y	RTK-Z	Profundidad
B6A-001	155322,6	175954,47	21,86	6,50-8,50
B6B-001	156374,79	176073,04	35,95	10,50-12,50
B6B-002	156783,9	176031,21	38,46	8,00-10,00
B6B-006	156069,6	175704,2	33,18	7,50-11,50
B6C-001	155486,39	176089,46	36,78	12,50-16,50
B6C-002	156019,73	175407,98	40,43	17,50-21,50
B6C-003	155796,36	175200,83	45,75	20,70-22,70
B6C-004	155757,08	175041,46	46,91	18,00-22,00
B6C-005	155494,74	174919,05	43,06	13,50-15,50

Tabla 1. Coordenadas en los que se realizaron los sondeos y profundidad de los mismos.

El plano de la disposición de los sondeos realizados, así como las fichas técnicas de los sondeos se adjuntan al final de este anejo.

En cuanto al nivel freático observado en la zona de estudio, la información que se tiene del nivel freático por medio de los sondeos realizados se observa en la tabla 2:

Ensayo	Profundidad de NF medidos en metros
B6C-001	14,5 m
B6C-002	16 m
B6C-003	19,2 m
B6C-004	18,5 m
B6C-005	13,7 m

Tabla 2. Nivel freático medido en los sondeos.

Las pruebas que se llevaron a cabo en agosto de 2021 fueron:

- Once (11) ensayos de penetración estática o CPT, los puntos fueron desplazados de los bordes pavimentados hasta detrás de las barreras de seguridad. Como resultado, los puntos S2, S3, S4, S5, S7 y S8 no fueron accesibles a los vehículos de la CPT.

Las coordenadas y profundidad de los ensayos CPTs se recogen en la tabla 3.

COORDENADAS				
Ensayos	RTK-X	RTK-Y	RTK-Z (mTAW)	Profundidad (m)
S1	155831,54	175858,503	30,74	2,4
S6	156003,08	175796,83	34,24	20,2
S9	156066,75	175692,12	32,72	19,2
S10	156030,55	175743,32	32,96	17,2
S11	156087,68	175721,47	34,01	18,8

Tabla 3. Coordenadas en los que se realizaron los ensayos CPTs y profundidad de los mismos.

El plano de la disposición de los ensayos CPTs realizados, así como las fichas técnicas de los CPTs se adjuntan al final de este anejo.

## 6.2. Trabajos de campo realizados para el presente estudio

Para la zona de estudio se han podido recoger los siguientes antecedentes que han sido elaborados en el entorno de actuación.

- Información sobre todos los sondeos que se realizaron para la construcción de las diferentes infraestructuras desde 1777 a 2000.

A la hora de utilizar la información que nos aportan dichos sondeos históricos, es importante estudiar cómo ha variado el terreno con los años. Esto puede observarse en la imagen 11, donde se recoge como ha cambiado la zona de estudio en los diferentes años.

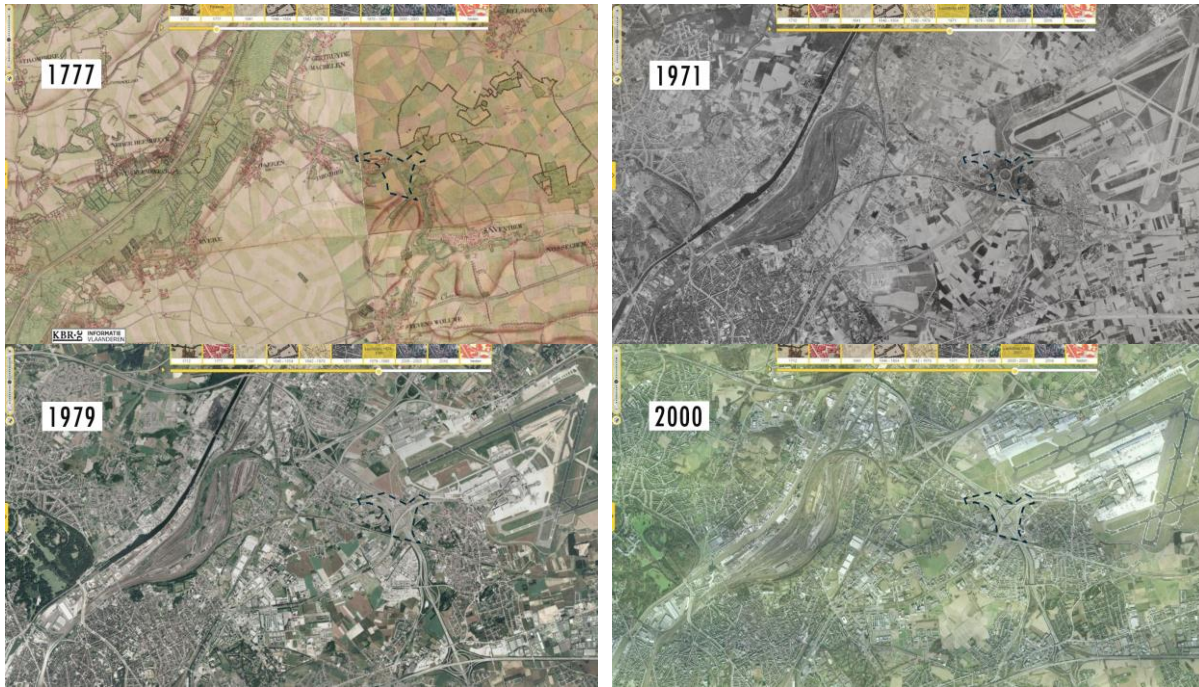


Imagen 11. Zona de actuación desde los años 1777 hasta los 2000.

Como se puede ver en las imágenes obtenidas de referencias históricas de la zona, el terreno sobre el que se va a trabajar ha sufrido diferentes modificaciones que se tienen que tener en cuenta a la hora de utilizar la información de los sondeos. Por ello, de la base de datos de estos sondeos históricos, sólo podíamos trabajar con los que se han realizado a partir del año 1979, ya que en los que se hicieron anteriormente el terreno fue modificado por las diferentes actuaciones que se llevaron a cabo en la carretera.

Los sondeos que están dentro de la zona de actuación y que corresponde con las fechas descritas, son los siguientes:

	RTK-X	RTK-Y	RTK-Z (mTAW)	Profundidad (m)
GEO-93/075-S206	154429,2	175720,1	35,02	14,2
GEO-93/075-S205	154523,7	175706,2	42,5	20,6
GEO-93/075-S204	154642,3	175690,1	42,72	17,2
GEO-93/075-S203	154734,9	175716,8	40,9	18,4
GEO-93/075-S202	154729	175672,1	42,43	17,4
GEO-93/075-S201	154821,5	175651,6	42,97	10,8
GEO-93/075-S200	154888,7	175633,3	43,31	14,2
GEO-93/075-S199	154963,5	175615,4	43,31	10
GEO-93/075-S198	155063,5	175588	35,7	15,8
GEO-93/075-S197	155167,8	175556,8	36,99	5,8
GEO-93/075-S196	155410,3	175486,1	33,34	19
GEO-93/075-S195	155488,5	175514,3	28,68	19,4
GEO-93/075-S194	155493,9	175462,9	35,03	14,8
GEO-93/075-S193	155555,8	175445,9	34,41	8,2
GEO-93/075-S192	155649	175421,4	40,36	16,6
GEO-93/075-S191	155745,4	175389,4	44,81	11
GEO-93/075-S190	155824,1	175364,4	46,18	10
GEO-93/075-S190-3	155944,9	175332,7	44,68	16,6
GEO-93/075-S190-2	156023,2	175300,5	43,77	19,6
GEO-93/075-S190-1	156104,9	175289,5	36,06	7,8

Tabla 4. Coordenadas en los que se realizaron los ensayos sondeos y profundidad de los mismos.

Estos nuevos sondeos, complementan la información que se disponía de forma que es más sencilla la caracterización del terreno a realizar. El plano de la zona con los ensayos en la que se realizan los sondeos, así como las fichas técnicas de estos se adjunta al final de este anejo.

Finalmente, en los planos dispuestos al final de este anejo, se añade un plano con la localización de todos los ensayos de la zona de estudio.

## 7. Caracterización del terreno

Los sondeos que se han realizado para este estudio, nos dan la información sobre los estratos en el que se encuentra la zona de actuación (*tabla 5*).

Ensayo	Tipo de material	Profundidad (m)
B6A-001	Arena fina con estratos de arenisca	0-8,5
B6B-001	Arena fina con estratos de arenisca	0-12,4
B6B-002	Arena medianamente gruesa, limosa, débilmente orgánica con grava y restos de ladrillo	0-0,6
B6B-002	Alternancia de capas de arena medianamente gruesa, con diferente matriz limosa y alguna arenisca	0,6-20
B6B-006	Limo débilmente arenoso	0-5
B6B-006	Arena fina con estratos de arenisca	5-11,4
B6C-001	Arena fina con estratos de arenisca	0-20
B6C-002	Arena medianamente gruesa, limosa, débilmente orgánica con grava y restos de ladrillo	0-4,4
B6C-002	Limo débilmente arenoso	4,4-14
B6C-002	Arena fina con estratos de arenisca	14-21
B6C-003	Arena fina con estratos de arenisca	0-22
B6C-004	Limo débilmente arenoso	0-6
B6C-004	Arena fina con estratos de arenisca	6-22
B6C-005	Arena fina con estratos de arenisca	0-15,4

*Tabla 5. Estratos en los que se encuentra la zona de actuación según la información recopilada de los sondeos.*

Por lo que las unidades geológicas de las que dan información se pueden resumir en las siguientes:

- Arena fina con estratos de arenisca
- Arena medianamente gruesa, limosa, débilmente orgánica con grava y restos de ladrillo
- Alternancia de capas de arena medianamente gruesa, con diferente matriz limosa y alguna arenisca
- Limo débilmente arenoso

Sin embargo, se puede obtener más información sobre el terreno utilizando la información que se obtiene de los ensayos de penetración estática y correlacionándola con las unidades geológicas de las que se disponen.

Así como los sondeos nos dan información directa sobre la clase de terreno que atraviesan, los CPTs no nos dan una prueba directa del material que atraviesan, aunque sí se puede hacer una estimación sobre de cual se trata.

Los equipos que realizan ensayos CPT, permiten que la penetración no se interrumpa por lo que pueden dar valores de la **resistencia por punta (qc)** a la **penetración** y el **rozamiento lateral (fs)** de dicha punta.

La resistencia por punta se obtiene de la siguiente forma:

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c}$$

Siendo:

- $Q_c$ , la fuerza aplicada sobre el cono.
- $A_c$ , el área de la base del cono, 10 cm<sup>2</sup>.

Por su parte, el rozamiento lateral se obtiene como:

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s}$$

Siendo:

- $Q_s$ , la fuerza en el fuste de fricción.
- $A_s$ , área del fuste.

De estos dos parámetros se puede obtener la relación de resistencia a la fricción del fuste, expresado en porcentaje.

$$R_f = \left( \frac{f_s}{q_c} \right) * 100$$

Con estos parámetros, es posible determinar qué clase de terreno se está atravesando con la clasificación de Robertson, 1986. La caracterización del suelo mediante este ensayo se conoce como "Soil Behaviour type" (SBT) y es posible ya que, los parámetros obtenidos en el ensayo están relacionados con las propiedades principales de los suelos como se puede observar en la *imagen 12* y la *tabla 6*.

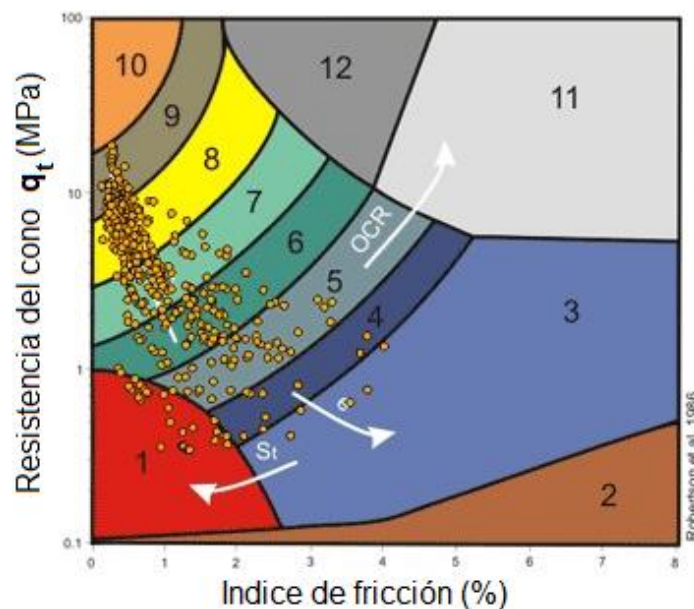


Imagen 12. Clasificación de suelos según Robertson, 1986 (Robertson et al., 1986).

Zona	Tipo de Comportamiento de Suelo (SBT)
1	Grano fino, sensible
2	Material Orgánico
3	Arcilla
4	Arcilla limosa a arcilla
5	Limo arcilloso a arcilla limosa
6	Limo arenoso a limo arcilloso
7	Arena limosa a limo arenoso
8	Arena a arena limosa
9	Arena
10	Arena grava a arena
11	Grano fino muy rígido (Sobre consolidados o el suelo cementado)
12	Arena a arena arcillosa (Sobre consolidados o el suelo cementado)

Tabla 6. Clasificación de suelos según Robertson, 1986 (Robertson et al., 1986).

Se debe tener en cuenta que esta interpretación del suelo puede proporcionar predicciones razonables del tipo de suelo hasta una profundidad cercana a 20 metros, por lo que aunque se pueda suponer que clase de suelo podemos encontrar, no se puede garantizar con seguridad.

Utilizando la clasificación de Robertson y correlacionando los diferentes materiales obtenidos con los de los sondeos realizados, obtenemos los materiales recogidos en la tabla 7.

Ensayo	Tipo de material	Profundidad (m)
S1	Limo débilmente arenoso	0-0,4
S1	Arena fina con estratos de arenisca	0,4-2,4
S10	Arena fina con estratos de arenisca	0-11,8
S10	Limo arcilloso	11,8-13,4
S10	Arcilla	13,4-15,2
S10	Arena fina con estratos de arenisca	15,2-17,2
S11	Arena fina con estratos de arenisca	0-10
S11	Limo arcilloso	10-15,6
S11	Arcilla	15,6-17,2
S11	Arena fina con estratos de arenisca	17,2-18,8
S6	Limo débilmente arenoso	0-0,8
S6	Arena fina con estratos de arenisca	0,8-10,8
S6	Limo arcilloso	10,8-15,2
S6	Arena fina con estratos de arenisca	15,2-20,2
S9	Limo débilmente arenoso	0-0,6
S9	Arena fina con estratos de arenisca	0,6-8,8
S9	Limo arcilloso	8,8-14,2
S9	Arcilla	14,2-16,2
S9	Arena fina con estratos de arenisca	16,2-19,2

Tabla 7. Estratos en los que se encuentra la zona de actuación según la información recopilada de los CPTs.

La clase de terreno que se corresponde a cada dato ofrecido por cada CPT se adjunta al final de este anejo.

Las unidades geológicas que se han obtenido una vez realizada esta correlación son las siguientes:

- Arena fina con estratos de arenisca
- Limo débilmente arenoso
- Limo arcilloso
- Arcilla
- Arena medianamente gruesa, limosa, débilmente orgánica con grava y restos de ladrillo
- Alternancia de capas de arena medianamente gruesa, con diferente matriz limosa y alguna arenisca

Por último, para caracterizar el terreno se usa la información obtenida por los sondeos que se han realizado en el año 1993 de la zona de actuación. Que dan la información recogida en la *tabla 8*:

Ensayo	Tipo de material	Profundidad (m)
GEO-93/075-S206	Limo débilmente arenoso	0-8
GEO-93/075-S206	Arena fina con estratos de arenisca	8-14,2
GEO-93/075-S205	Limo débilmente arenoso	0-8,6
GEO-93/075-S205	Arena fina con estratos de arenisca	8,6-20,6
GEO-93/075-S204	Limo débilmente arenoso	0-6
GEO-93/075-S204	Arena fina con estratos de arenisca	6-17,2
GEO-93/075-S203	Limo débilmente arenoso	0-8,2
GEO-93/075-S203	Arena fina con estratos de arenisca	8,2-18,4
GEO-93/075-S202	Limo débilmente arenoso	0-6,5
GEO-93/075-S202	Arena fina con estratos de arenisca	6,5-17,4
GEO-93/075-S201	Limo débilmente arenoso	0-8
GEO-93/075-S201	Arena fina con estratos de arenisca	8-10,8
GEO-93/075-S200	Limo débilmente arenoso	0-14,2
GEO-93/075-S199	Limo débilmente arenoso	0-10
GEO-93/075-S198	Limo débilmente arenoso	0-15,8
GEO-93/075-S197	Limo débilmente arenoso	0-4
GEO-93/075-S197	Arena fina con estratos de arenisca	4-5,8
GEO-93/075-S196	Material desconocido	0-4
GEO-93/075-S195	Limo débilmente arenoso	0-7,5
GEO-93/075-S195	Arena fina con estratos de arenisca	7,5-19,4
GEO-93/075-S194	Limo débilmente arenoso	0-7,5
GEO-93/075-S194	Arena fina con estratos de arenisca	7,5-19,4
GEO-93/075-S193	Limo débilmente arenoso	0-4
GEO-93/075-S193	Arena fina con estratos de arenisca	4-8,2
GEO-93/075-S192	Limo débilmente arenoso	0-4,2
GEO-93/075-S192	Arena fina con estratos de arenisca	4,2-16,6
GEO-93/075-S191	Material desconocido	0-11
GEO-93/075-S190	Limo débilmente arenoso	0-4,2
GEO-93/075-S190	Formación Tielt	4,2-16,6
GEO-93/075-S190-3	Limo débilmente arenoso	0-4,2
GEO-93/075-S190-3	Arena fina con estratos de arenisca	4,2-16,6
GEO-93/075-S190-2	Limo débilmente arenoso	0-8
GEO-93/075-S190-2	Arena fina con estratos de arenisca	8-19,6
GEO-93/075-S190-1	Limo débilmente arenoso	0-6
GEO-93/075-S190-1	Arena fina con estratos de arenisca	6-7,8

*Tabla 8. Estratos en los que se encuentra la zona de actuación según la información recopilada de los sondeos históricos.*

Por lo que finalmente, las unidades geológicas con las que se realizará el modelo del terreno son los siguientes:

- UG-1. Arena fina con estratos de arenisca.
- UG-2. Limo débilmente arenoso.
- UG-3. Limo arcilloso.
- UG-4. Arcilla.
- UG-5. Arena medianamente gruesa, limosa, débilmente orgánica con grava y restos de ladrillo.
- UG-6. Alternancia de capas de arena medianamente gruesa, con diferente matriz limosa y alguna arenisca.
- UG-7, Formación Tielt.

- UG-8, Material desconocido.

Como se puede ver, la mayoría del terreno está formado por arena fina con estratos de arenisca, que es una de las singularidades de la formación de Bruselas. A la hora de trabajar con esta formación no se tiene en cuenta la resistencia que puede ofrecer el estrato de areniscas a la hora de realizar los cálculos de resistencia del terreno, por lo que al hacer esta clase de cálculos se considera que en la formación está resistiendo únicamente la arena.

Sin embargo, a la hora de trabajar con maquinaria de excavación se tienen en cuenta la existencia de estas capas de arenisca a la hora de seleccionar la forma más eficiente de trabajar para que no existan problemas con la maquinaria.

## 8. Características geotécnicas del terreno

Aún con esta clasificación de los materiales del suelo, se debe tener en cuenta las características geotécnicas del terreno.

La información que se puede obtener de los ensayos CPT no se puede esperar exacta debido a las características físicas del suelo como la distribución de tamaños de grano. Sin embargo, sí se puede realizar una caracterización mecánica (resistencia, rigidez) del suelo que tenga resultados adecuados. Los parámetros geotécnicos que se pueden obtener realizando correlaciones con este ensayo son los siguientes:

- Resistencia al corte no drenada  $C_u$ 
  - $cu=qc/9$  para terrenos arcillosos blandos
  - $cu=qc/15$  para arcillas blandas a duras
  - $cu=qc/30$  para arcillas duras fisuradas
- Ángulo de fricción

Robertson y Campanella sugirieron una correlación para estimar el ángulo de fricción máximo del suelo para arenas a base de cuarzo, no cementadas, moderadamente compresibles y sin envejecer:

$$\tan \varphi' = \frac{1}{2.68} \left[ \log \left( \frac{q_c}{\sigma'_{v0}} \right) + 0.29 \right]$$

Por otro lado, Kulhawy y Mayne sugirieron una relación alternativa para arenas redondeadas, limpias a base de cuarzo, esta se ve en la ecuación.

$$\varphi' = 17.6 + 11 \log(Q_{tn})$$

- Velocidad de la onda de corte
- SPT,

$$qc = n \cdot N$$

Donde  $qc$  es la resistencia por punta del cono,  $N$  el valor del ensayo SPT y  $n$  un parámetro dependiente del suelo que puede adoptar los siguientes valores:

- $n=2$  Limos, limos arenosos y mezclas de arena y limo ligeramente coherentes
  - $n=3-4$  Arenas limpias, de finas a medias y arenas ligeramente limosas
  - $n=5-6$  Arenas gruesas y arenas con poca grava
  - $n=8-10$  Gravas arenosas y gravas
- Módulo de elasticidad, Para suelos granulares Schmertmann (1978) propuso la relación,

$$E = 2,5qc$$

Como el proyecto se encuentra en fase de diseño, es suficiente para una estimación sobre la estabilidad del cauce proyectado que las características de los materiales se estimen con las fórmulas anteriores. Por lo tanto, las características del estrato de arenas que se encuentra en la zona de actuación tienen las características recogidas en la *tabla 9*.

Características geotécnicas de la UG.1 Arena fina con estratos de arenisca	
Tipo de material	Arena
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	17
Peso específico saturado (kN/m <sup>3</sup> )	18
Cohesión	nula
Ángulo de rozamiento interno del terrero (°)	28
Módulo de elasticidad (kN/m <sup>3</sup> )	25000

*Tabla 9. Características geotécnicas de la UG.1 Arena fina con estratos de arenisca.*

En cuanto al trabajo con dicha unidad geológica, el equipo geotécnico encargado del proyecto recomendó que no se tuvieran en cuenta las distintas capas de arenisca a la hora de realizar los cálculos de estabilidad. Sin embargo, si deberían tomarse en cuenta estos estratos más resistentes a la hora de realizar las excavaciones.

## 9. Cálculo de la estabilidad del cauce

No se espera que se incorpore material diferente al del estrato que se encuentra en la zona de actuación, ya que se tiene previsto reaprovechar el propio material de la excavación para realizar la sección del cauce del río.

Por lo tanto, para el análisis de estabilidad se utilizarán las características geotécnicas del estrato de arenas UG1.

### 9.1 Plaxis

Para el cálculo del desplazamiento máximo que sufrirá el cauce del río, se modeló mediante elementos finitos con el software PLAXIS. Los pasos que se siguieron fueron:

- Introducción del modelo (*imagen 13*).
- Introducción de los materiales y sus características (*imagen 14*).
- Se genera el mallado (*imagen 15*).
- Se introduce el nivel freático, establecido a 3 metros por debajo de la superficie del río (*imagen 16*).
- Se establecen hipótesis de cálculo para que se calcule con la acción del peso propio (*imagen 17*).
- Se activa el modelo y se calcula (*imagen 18*).



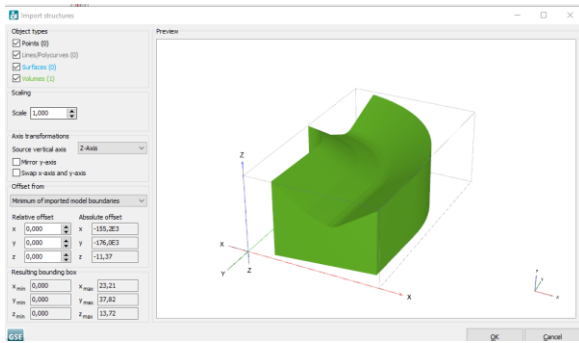


Imagen 13, Introducción del modelo en PLAXIS.

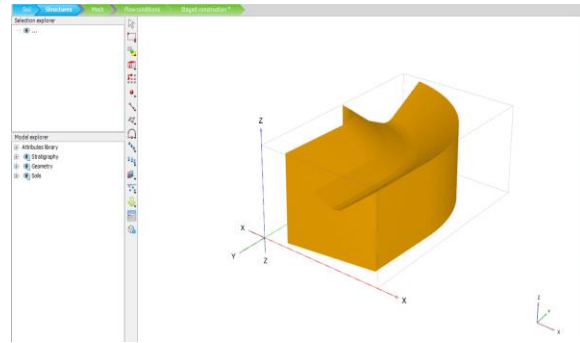


Imagen 14, Introducción de los materiales y sus características en PLAXIS.

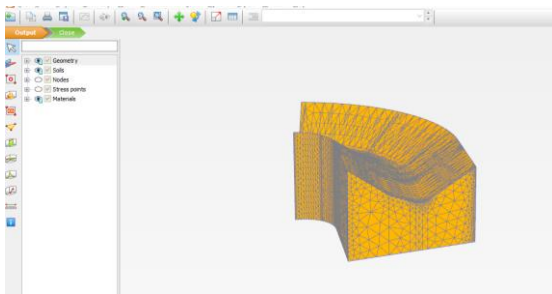


Imagen 15. Generación del mallado PLAXIS.

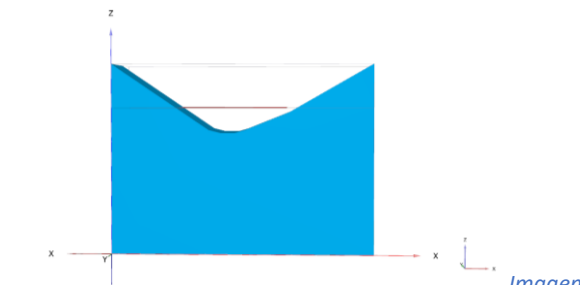


Imagen 16. Introducción del nivel freático modelo en PLAXIS.

Name	Value
<b>General</b>	
ID	Initial phase [InitialPhase]
Calculation type	Gravity loading
Loading type	Staged construction
EM_weight	1,000
Pore pressure calculation type	Phreatic
Time interval	0,000 day
Estimated end time	0,000 day
First step	
Last step	
Special option	0
<b>Deformation control parameters</b>	
<b>Numerical control parameters</b>	

Imagen 17. Hipótesis de cálculo para que se calcule con la acción del peso propio, en PLAXIS.

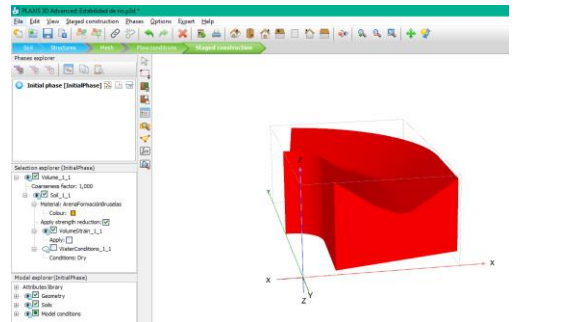


Imagen 18. Activación y cálculo del modelo en PLAXIS.

El resultado de los cálculos, fue un desplazamiento total de 0.85 m como se puede ver en la imagen 19.

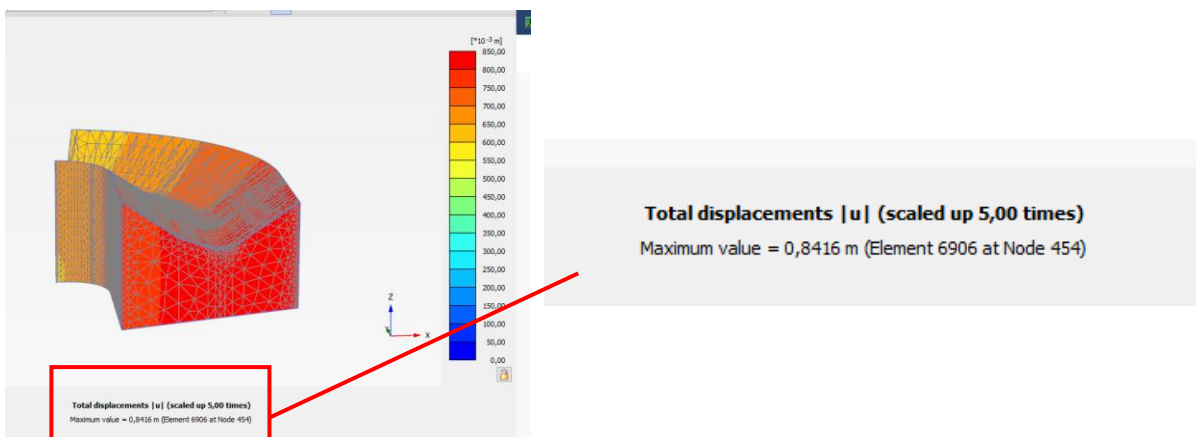


Imagen 19. Resultados del cálculo en PLAXIS.

## 9.2 SLIDE

Por otro lado, se calcula el factor de seguridad con el programa Slide, con el cual se siguió el siguiente procedimiento:

- Se importó la geometría en 2D del cauce (*imagen 20*).
- Se define el material y se le asigna a este estrato (*imagen 21*).
- Se define el nivel freático, al mismo nivel que el apartado anterior (*imagen 22*).
- Se genera la superficie de la malla de puntos que se utiliza para calcular el factor de seguridad del lado derecho del cauce (*imagen 23*).
- Posteriormente, se calcula el lado izquierdo del cauce.

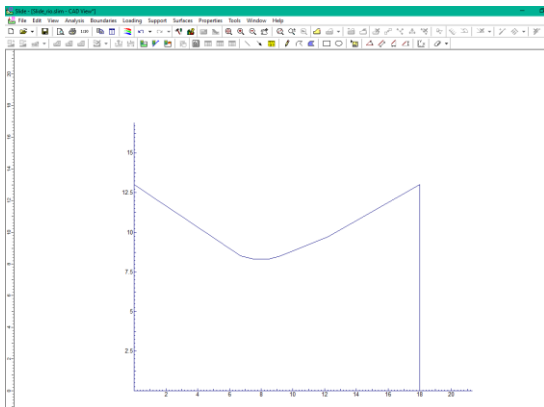


Imagen 20. Importación de la geometría en 2D en Slide.

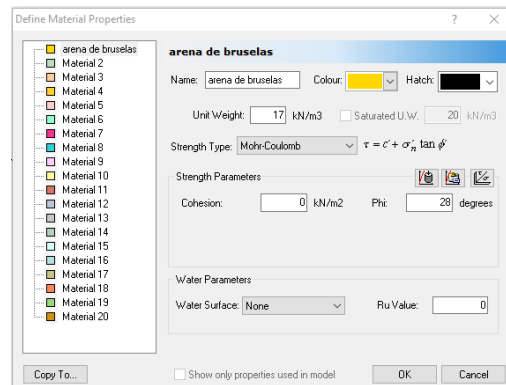


Imagen 21. Definición de materiales y asignación al estrato en Slide.

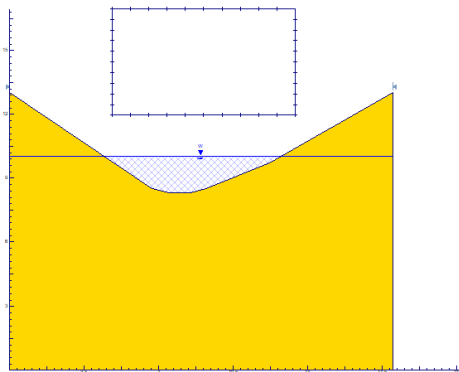


Imagen 22. Definición del nivel freático en Slide.

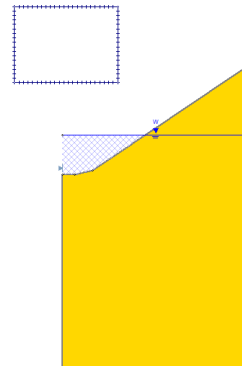


Imagen 23. Creación de la superficie de la malla en Slide.

Los resultados de este cálculo, indican que el cauce tiene un factor de seguridad de 0.9 en el lado derecho y de 0.7 en el lado izquierdo (*imagen 24*). Por lo tanto, la sección del río no era adecuada.

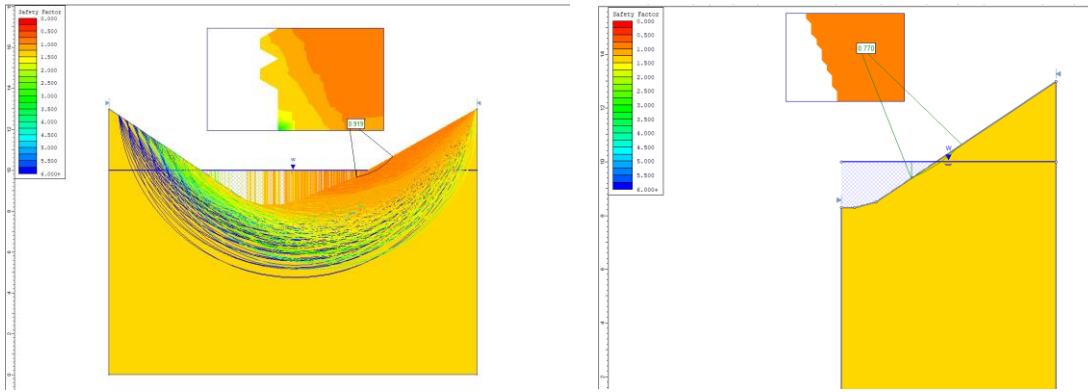


Imagen 24. Resultados obtenidos en el Slide.

### 9.3 Discusión

Después de observar los diferentes resultados ofrecidos por los programas geotécnicos, se llega a la conclusión de que el cauce como se plantea no es adecuado. Por lo tanto, y ya que la forma del cauce viene definida por el proyecto, se propone otro procedimiento constructivo para que se pueda utilizar la sección del cauce propuesta.

Ya que el material que se tiene pensado reutilizar está formado por arenas, se propone la colocación de una escollera. Esta necesita un filtro para impedir la migración y pérdida de material del substrato bajo la acción hidrodinámica, por lo que se proyecta la colocación de un geotextil.

Como se observa en la *imagen 25*, la nueva sección que se propone, está formada por:

- El terreno natural.
- Un geotextil, para evitar que se formen filtraciones.
- Una escollera unida por hormigón de baja resistencia.

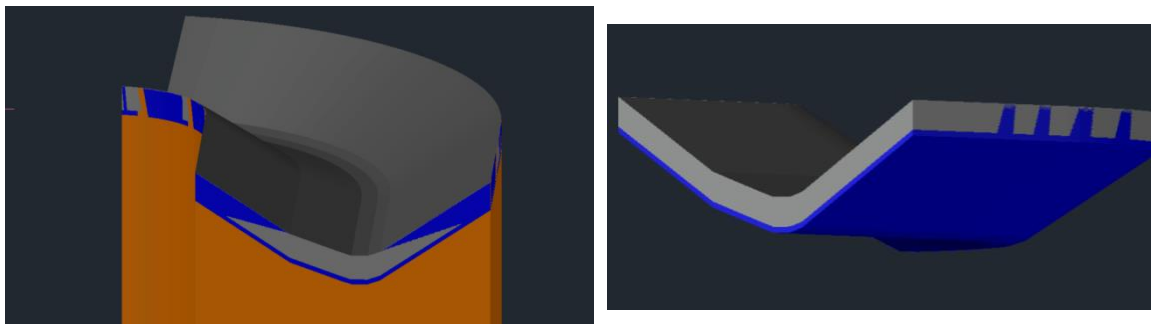


Imagen 25. Sección de los márgenes del río propuesta para mejorar el cálculo geotécnico.

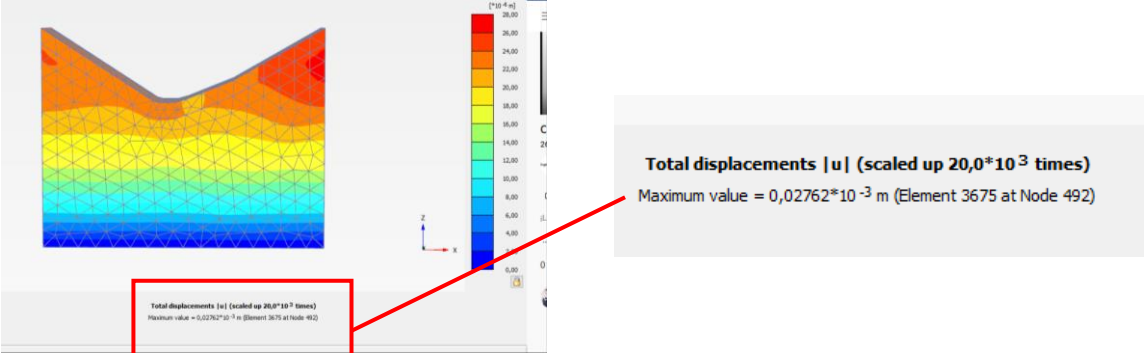
Con esta nueva sección se busca que el estrato de arenas no pierda su forma y aumente el factor de seguridad de la sección del cauce. Por lo tanto, se vuelve a calcular en los anteriores programas, pero añadiendo la escollera.

Las propiedades geotécnicas que se introducen en los programas de cálculo para introducir la escollera son los siguientes:

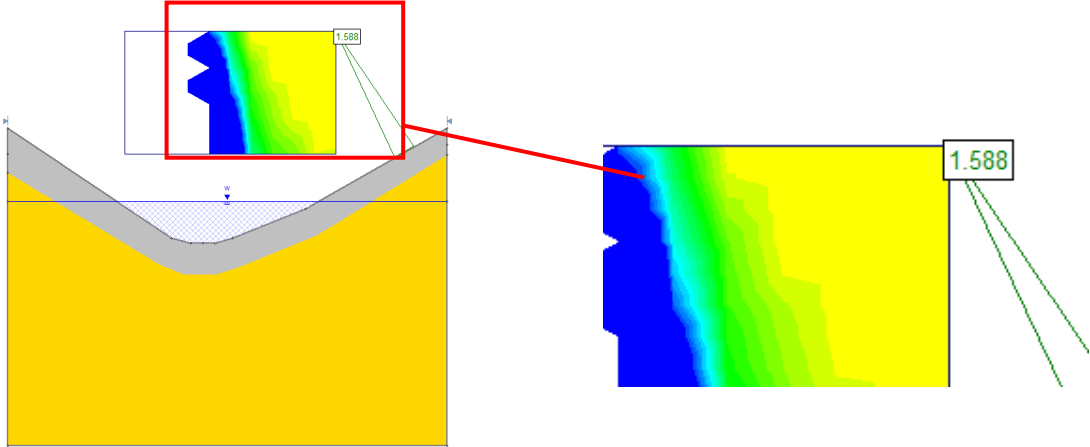
Características geotécnicas de la escollera	
Tipo de material	Escollera de 300-700 kg
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	26
Cohesión	nula
Ángulo de rozamiento interno del terrero (°)	42
Módulo de elasticidad (kN/m <sup>2</sup> )	79067000

Tabla 10. Características geotécnicas de la escollera

Los resultados que se obtienen se pueden observar en la *imagen 26* y *27*, como puede apreciarse, aumenta el factor de seguridad y disminuye considerablemente el desplazamiento de los márgenes del cauce.

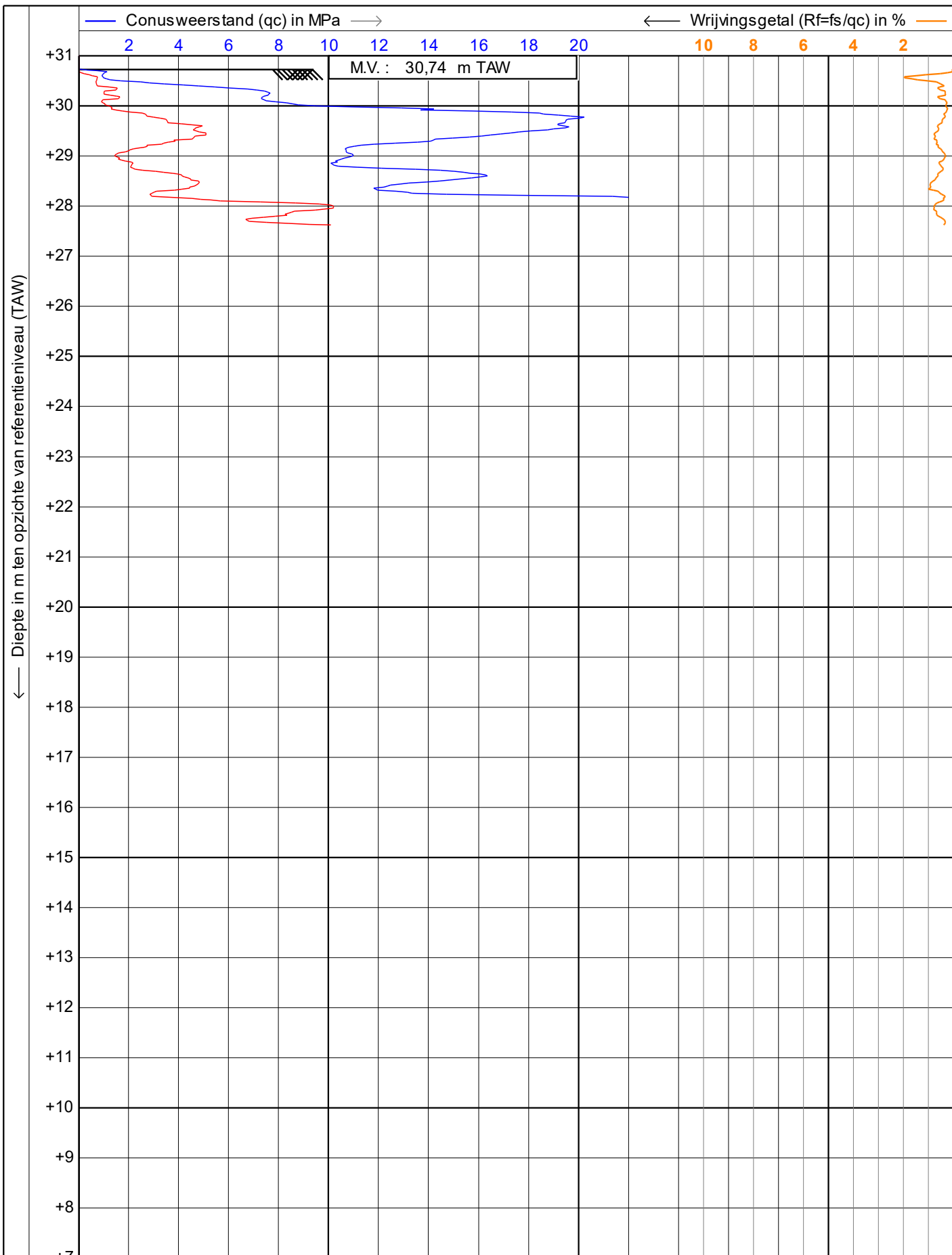


*Imagen 26. Resultados del cálculo en PLAXIS con la nueva sección.*



*Imagen 27. Resultados del cálculo en Slide con la nueva sección.*



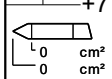
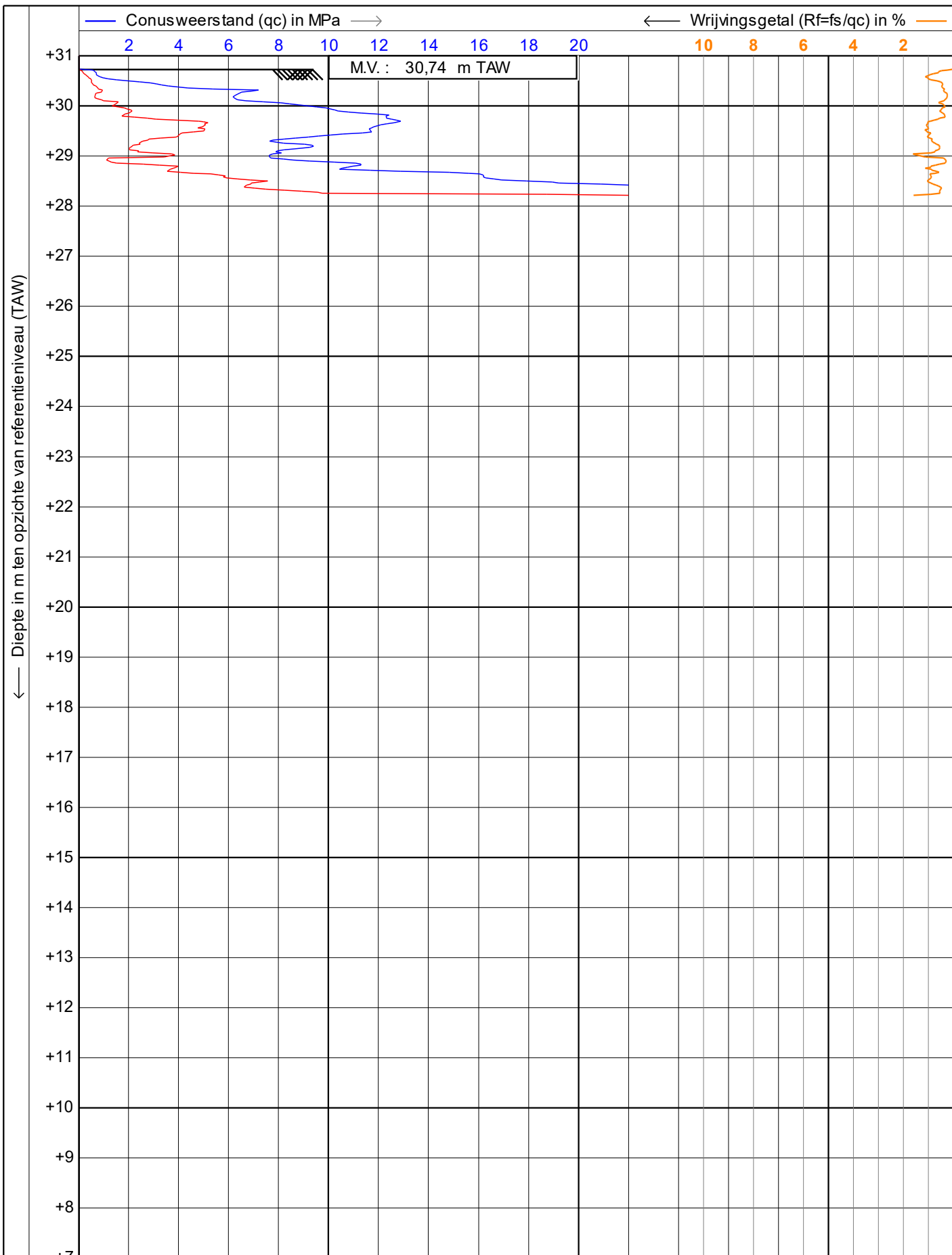


CP/Flak V1.28



Test according NEN 5140 class 1  
 Project : **DWV**  
 Locatie : **Machelen**

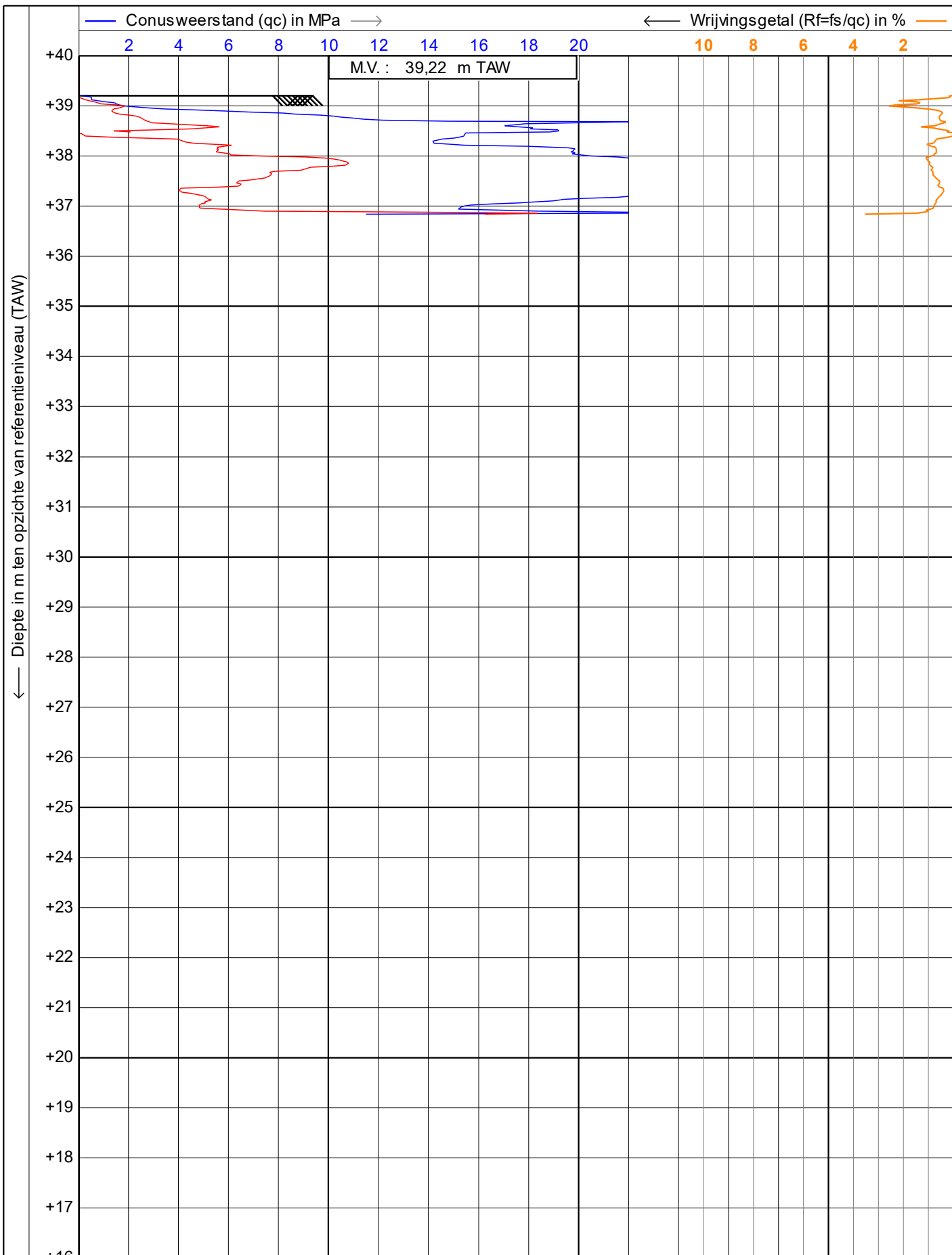
Datum : **9-8-2021**  
 Conusnr. : **I-C2xFXY-10/160617**  
 Projectnr. : **2021-00142**  
 Sondeernr.: **S1.1** | 1/1



0,10 0,20 0,30 0,40 0,50

Wrijvingsweerstand ( $f_s$ ) in MPa

	Test according NEN 5140 class 1	Datum : 17-8-2021
	Project : DWV	Conusnr. : I-C2xFXY-10/160617
	Locatie :	Projectnr. : 2021-00142
		Sondeernr.: S1



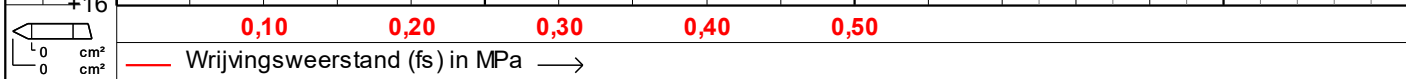
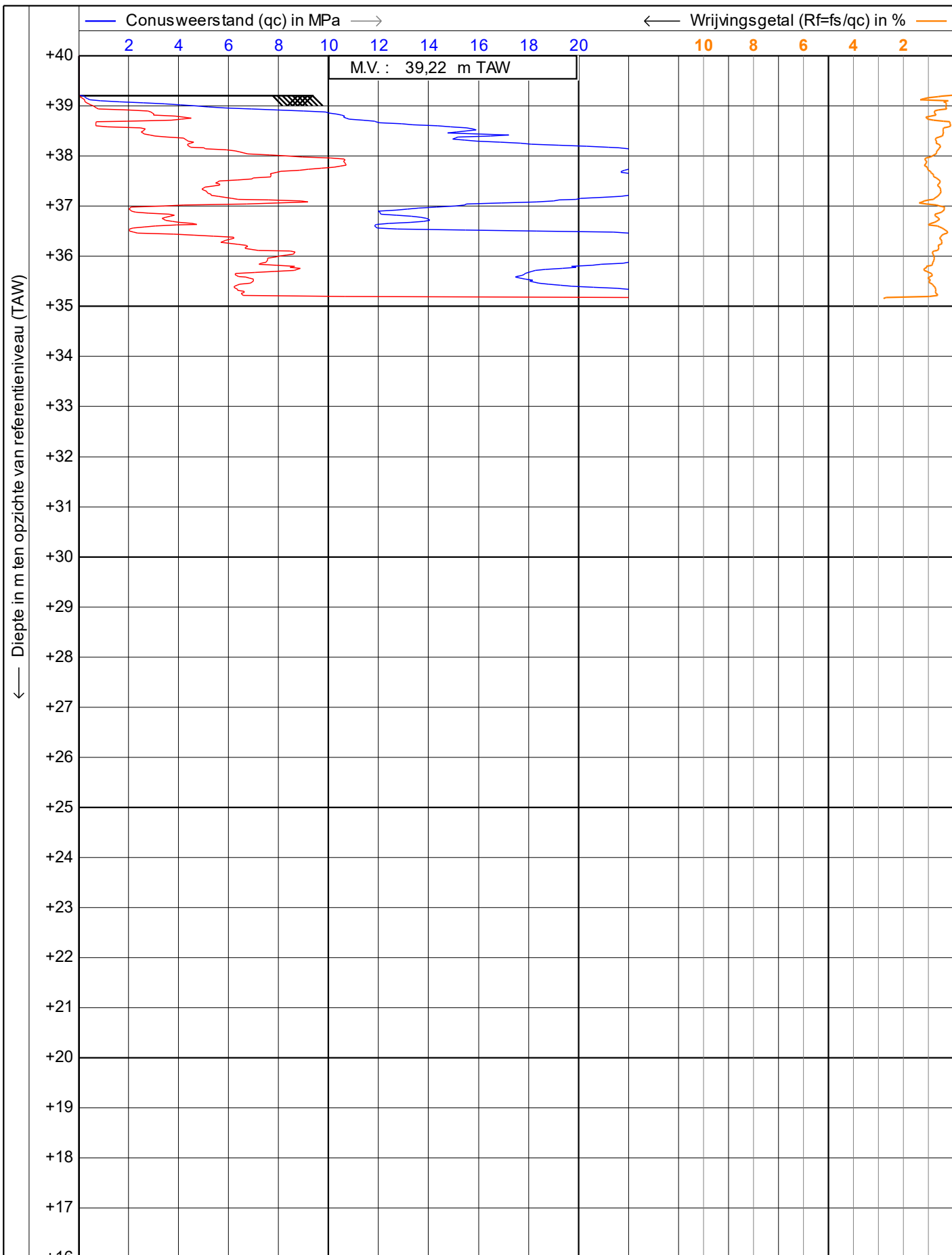
CP/Flak V.1.28



Test according NEN 5140 class 1  
 Project : **DWV**  
 Locatie :

Datum : **17-8-2021**  
 Conusnr. : **I-C2xFXY-10/160617**  
 Projectnr. : **2021-00142**  
 Sondeernr.: **S5.1**      1/1

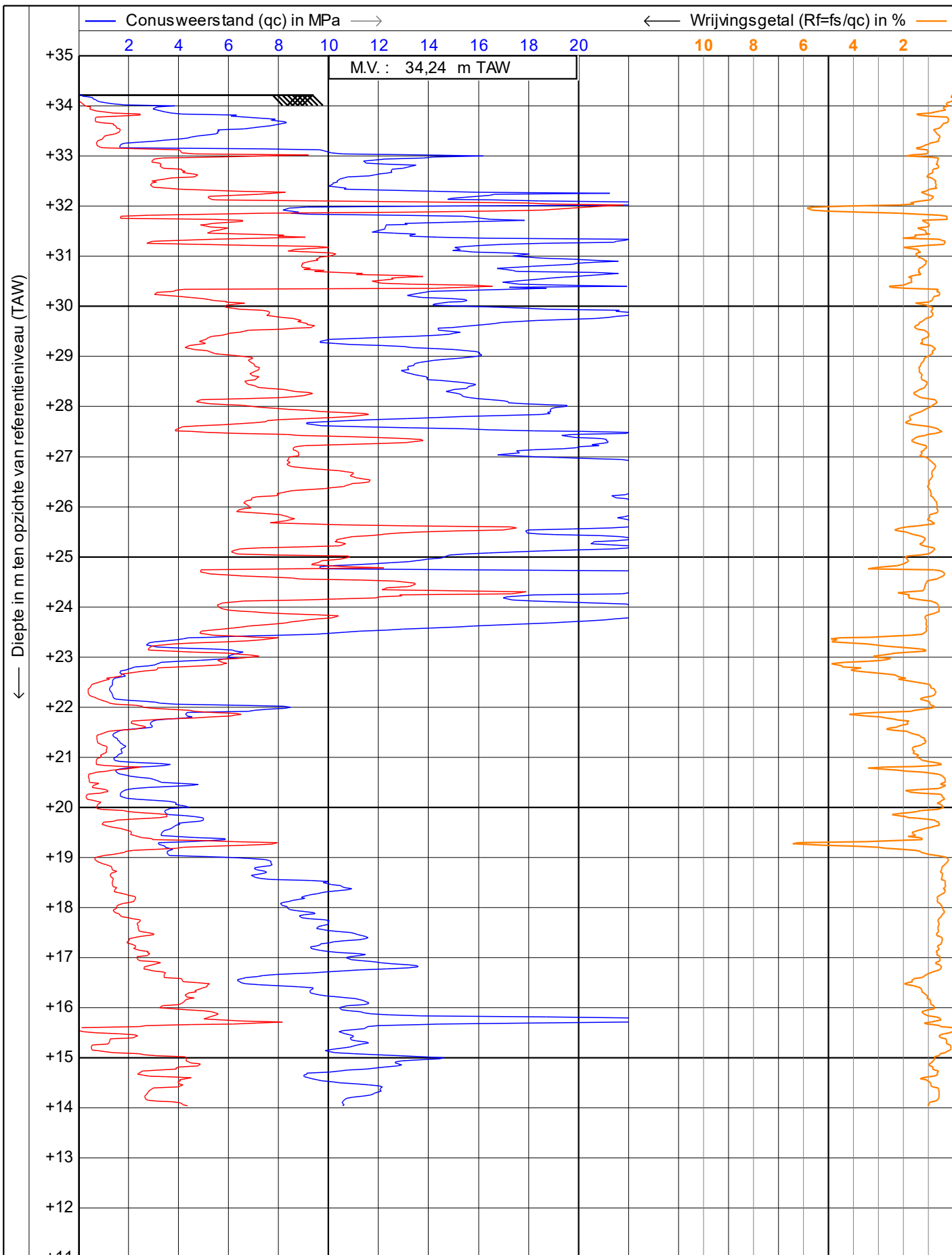




CP/Flak V.1.28



Test according NEN 5140 class 1 Project : <b>DWV</b> Locatie :	Datum : <b>17-8-2021</b> Conusnr. : <b>I-C2xFXY-10/160617</b> Projectnr. : <b>2021-00142</b>	
	Sondeernr.: <b>S5</b>	<b>1/1</b>

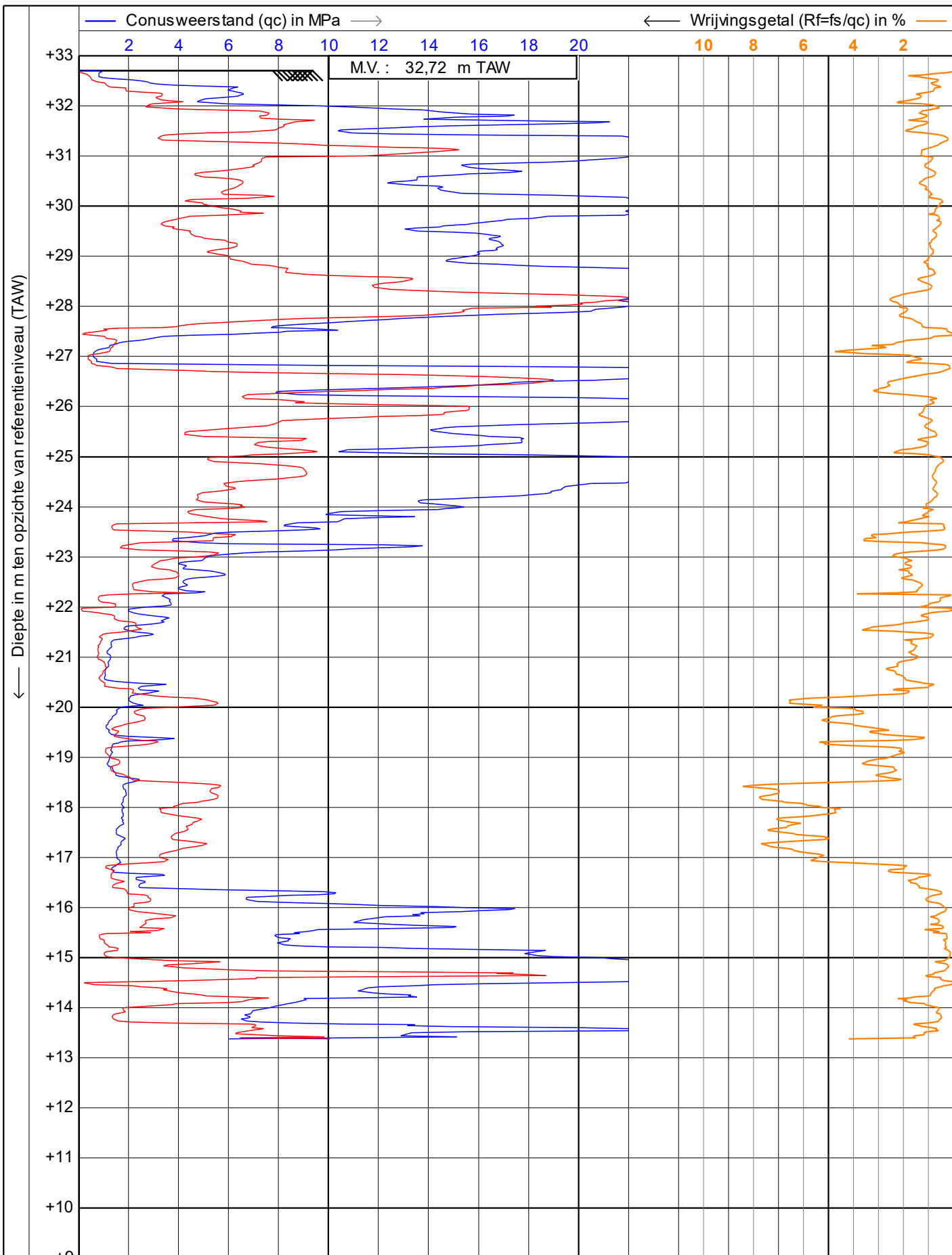


CP/Flank V1.28



Test according NEN 5140 class 1  
 Project : **DWV**  
 Locatie :

Datum : **17-8-2021**  
 Conusnr. : **I-C2xFXY-10/160617**  
 Projectnr. : **2021-00142**  
 Sondeernr.: **S6**      1/1

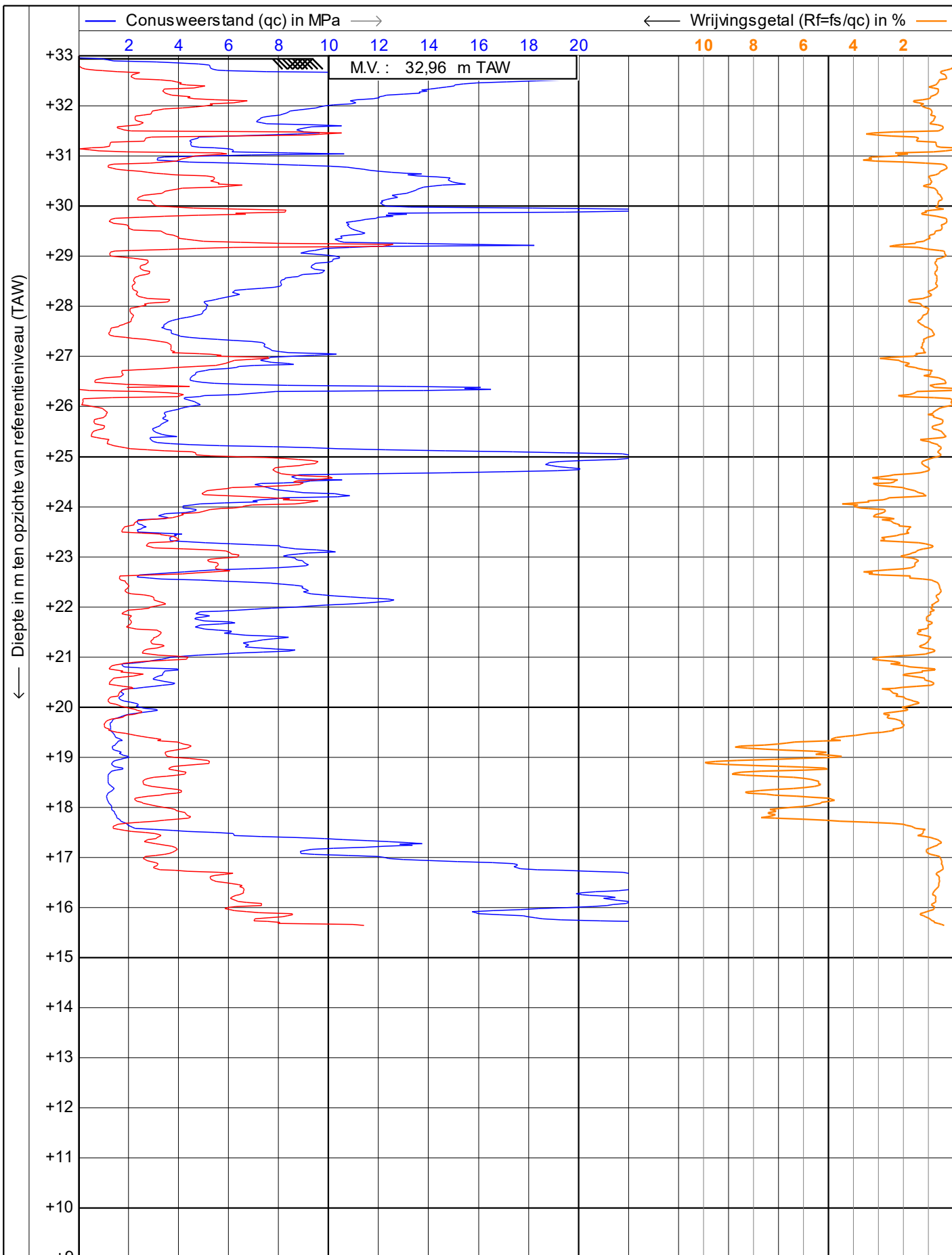


CP/Flank V1.28



Test according NEN 5140 class 1  
 Project : **DWV**  
 Locatie :

Datum : **17-8-2021**  
 Conusnr. : **I-C2xFXY-10/160617**  
 Projectnr. : **2021-00142**  
 Sondeernr.: **S9**      1/1



CP/Flak V1.28



Test according NEN 5140 class 1

Project : **DWV**

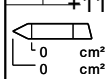
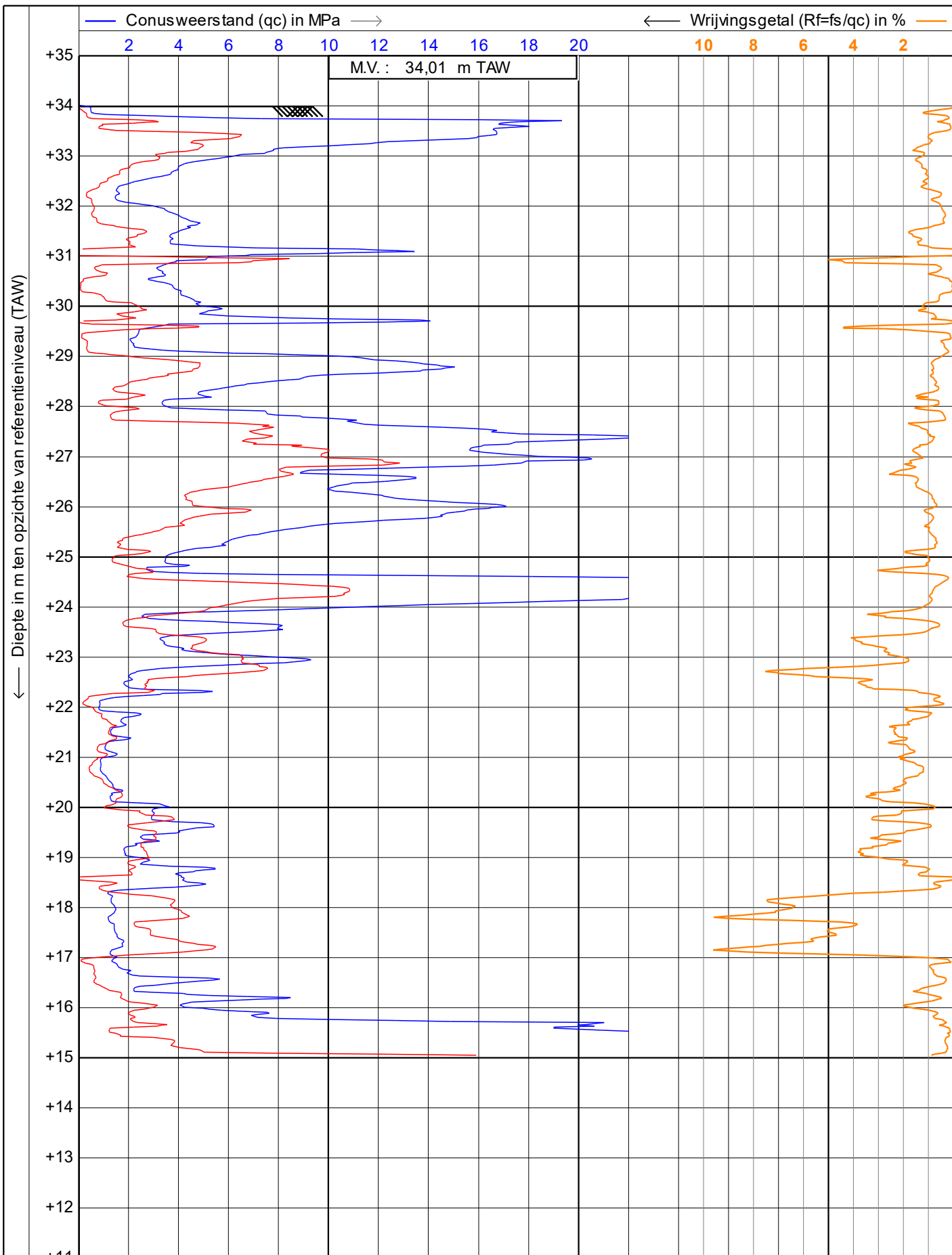
Locatie :

Datum : **17-8-2021**

Conusnr. : **I-C2xFXY-10/160617**

Projectnr. : **2021-00142**

Sondeernr.: **S10** 1/1



0,10 0,20 0,30 0,40 0,50  
 — Wrijvingsweerstand (fs) in MPa —>

CP/Flank V1.28



Test according NEN 5140 class 1  
 Project : **DWV**  
 Locatie :

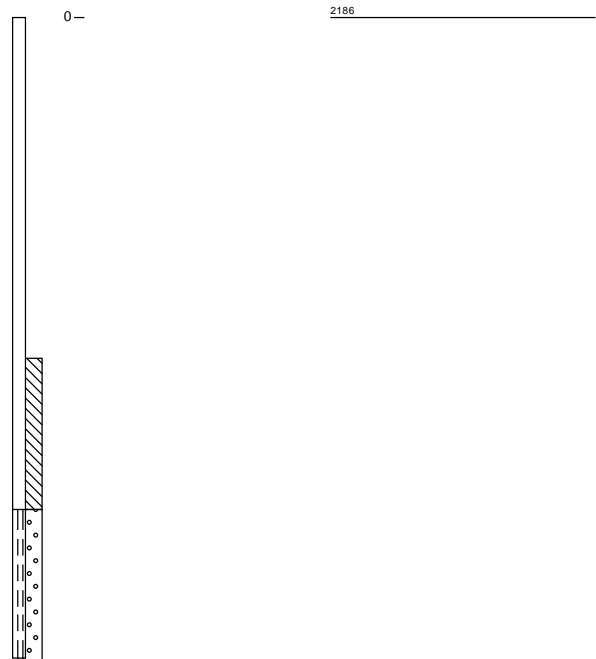
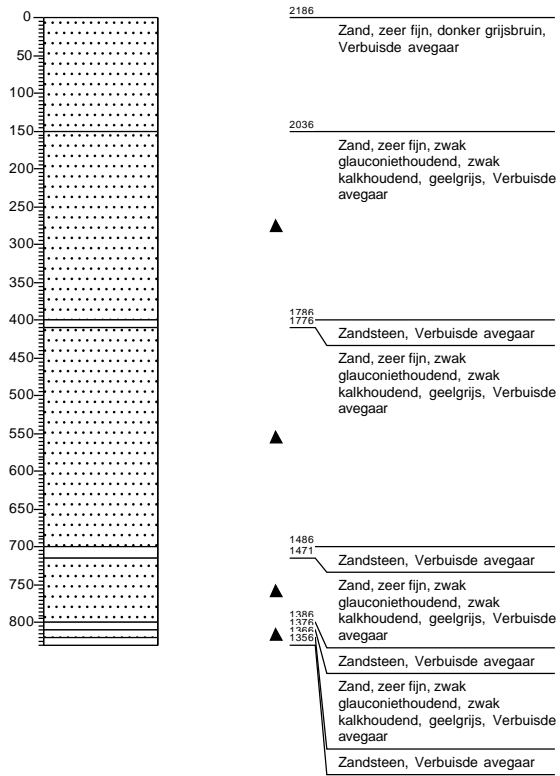
Datum : **17-8-2021**  
 Conusnr. : **I-C2xFXY-10/160617**  
 Projectnr. : **2021-00142**  
 Sondeernr.: **S11** 1/1

**Boring: B6A-001**

X: 155322,60  
Y: 175954,47  
Datum: 6-7-2021

**Boring: P6A-001**

X: 155322,60  
Y: 175954,47  
Datum: 6-7-2021

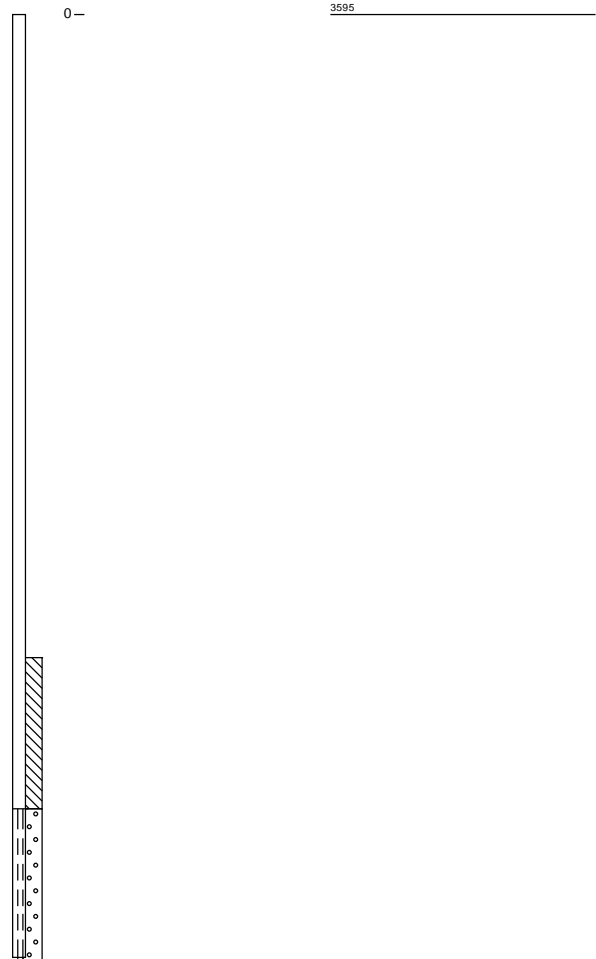
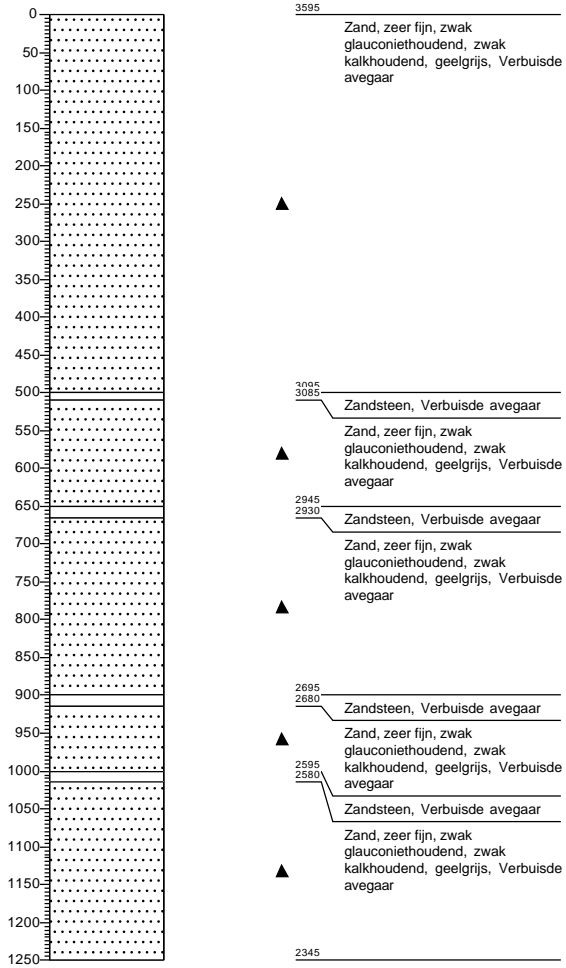


**Boring: B6B-001**

X: 156374,79  
Y: 176073,04  
Datum: 6-7-2021

**Boring: P6B-001**

X: 156374,79  
Y: 176073,04  
Datum: 6-7-2021

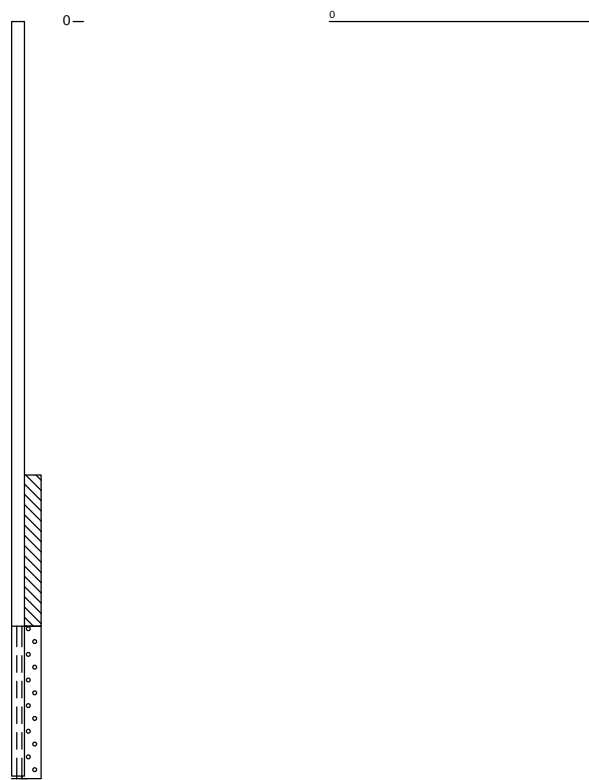
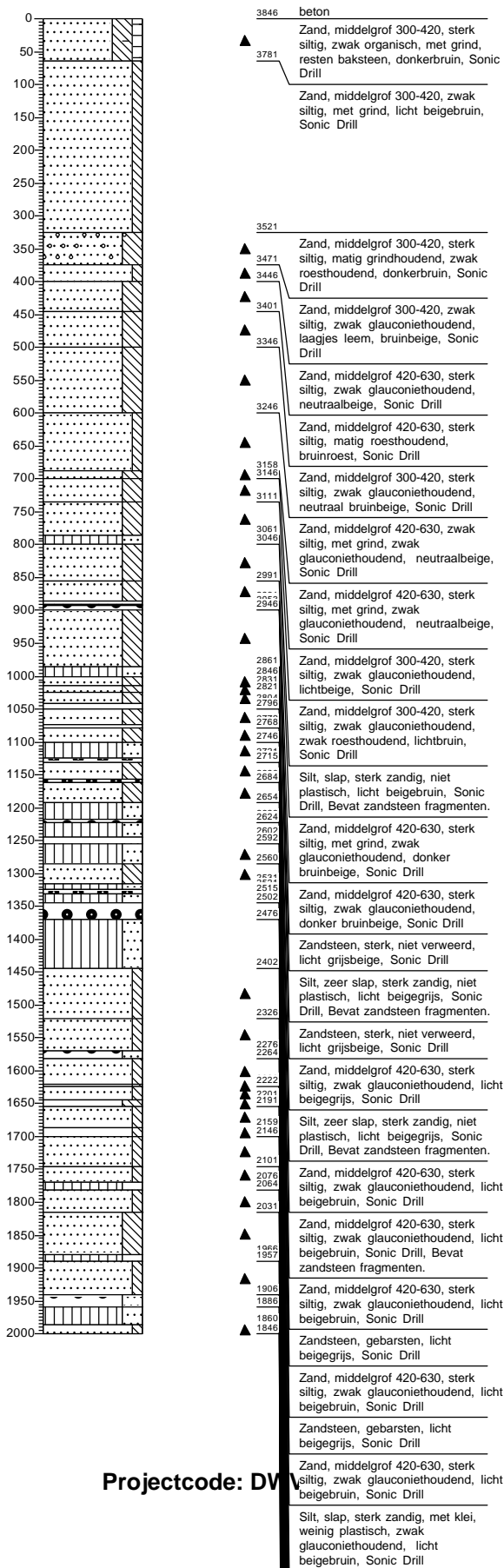


**Boring: B6B-002**

X: 156783,90  
 Y: 176031,21  
 Datum: 17-5-2021

**Boring: P6B-002**

X: 156717,10  
 Y: 175983,60  
 Datum: 6-7-2021



Projectcode: DV



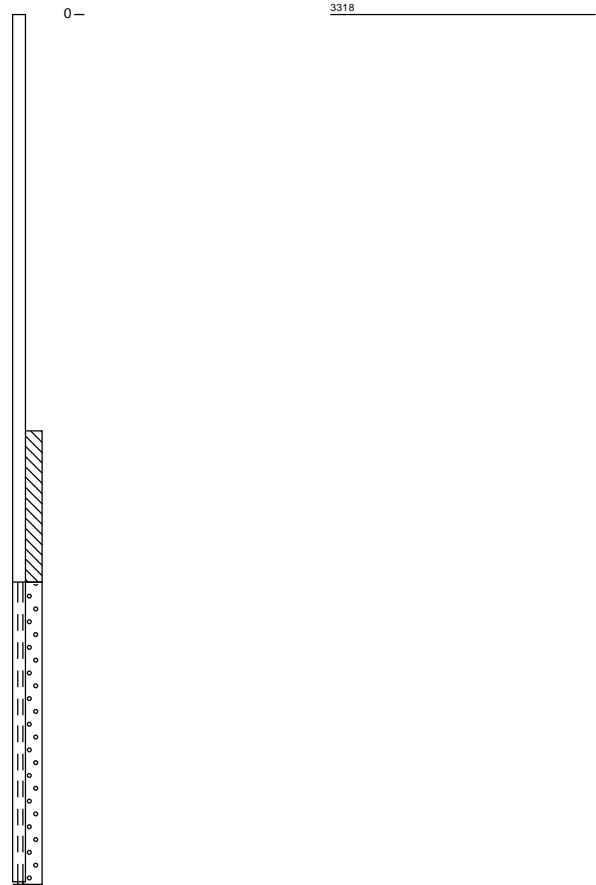
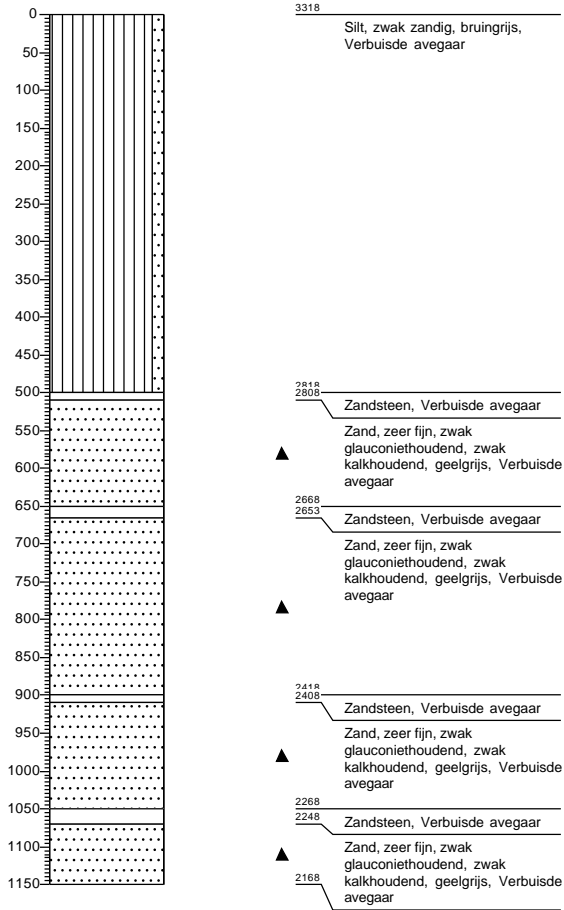


**Boring: B6B-006**

X: 156069,60  
Y: 175704,20  
Datum: 6-7-2021

**Boring: P6B-006**

X: 156069,60  
Y: 175704,20  
Datum: 15-7-2021

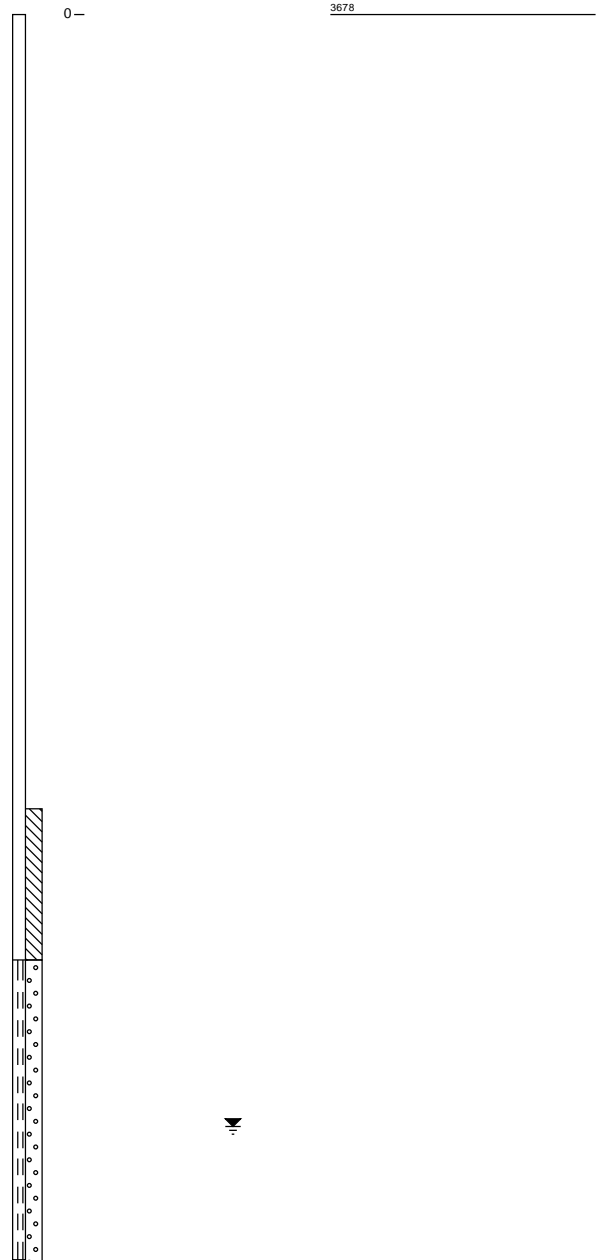
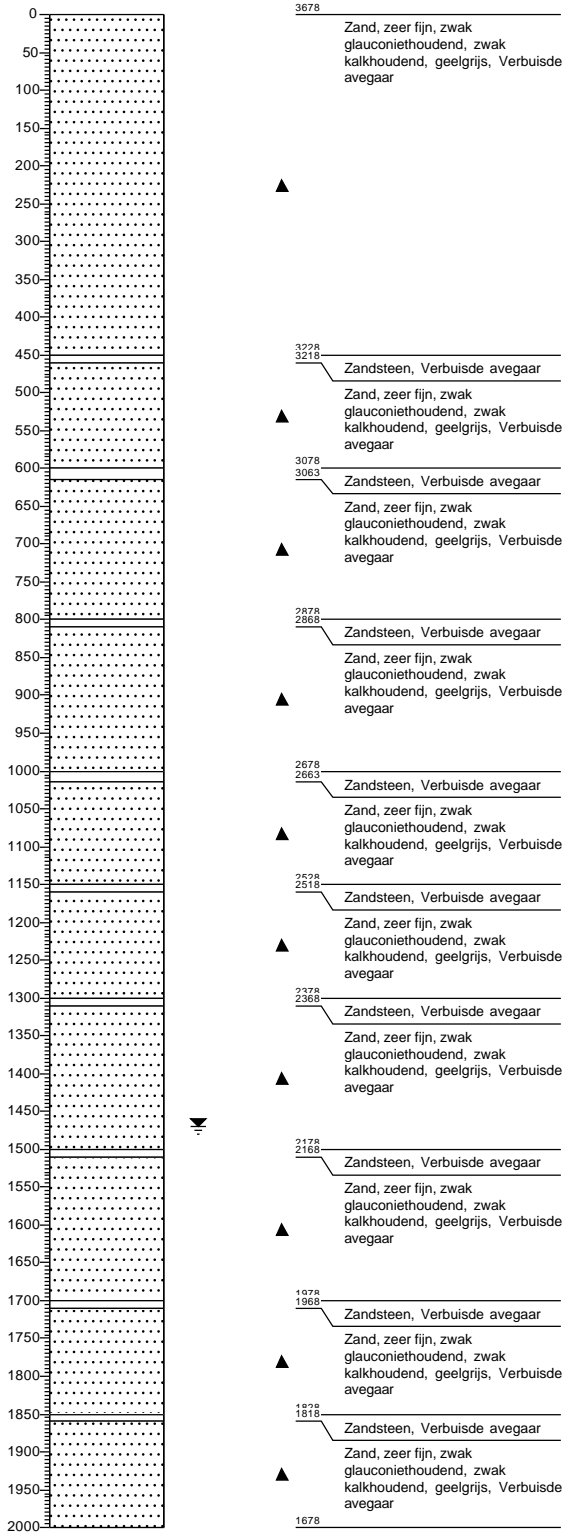


**Boring: B6C-001**

X: 155486,39  
Y: 176089,46  
Datum: 6-7-2021  
GWS: 1470

**Boring: P6C-001**

X: 155486,39  
Y: 176089,46  
Datum: 6-7-2021  
GWS: 1470

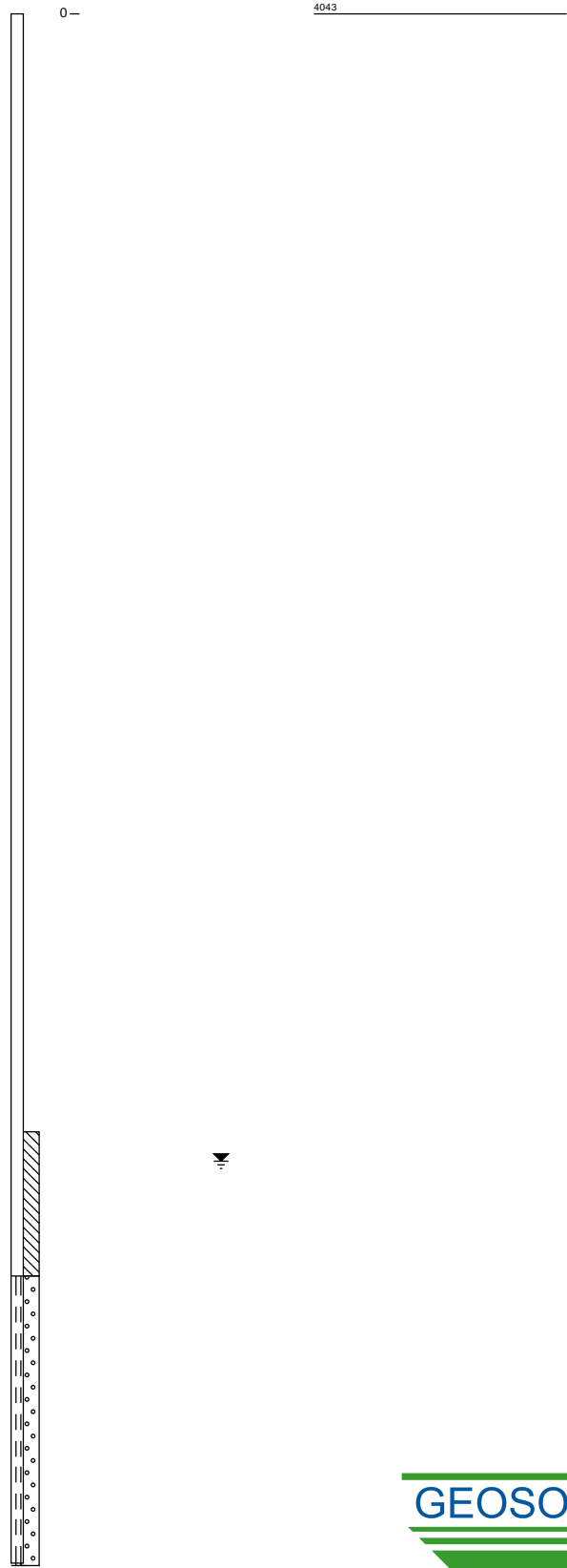
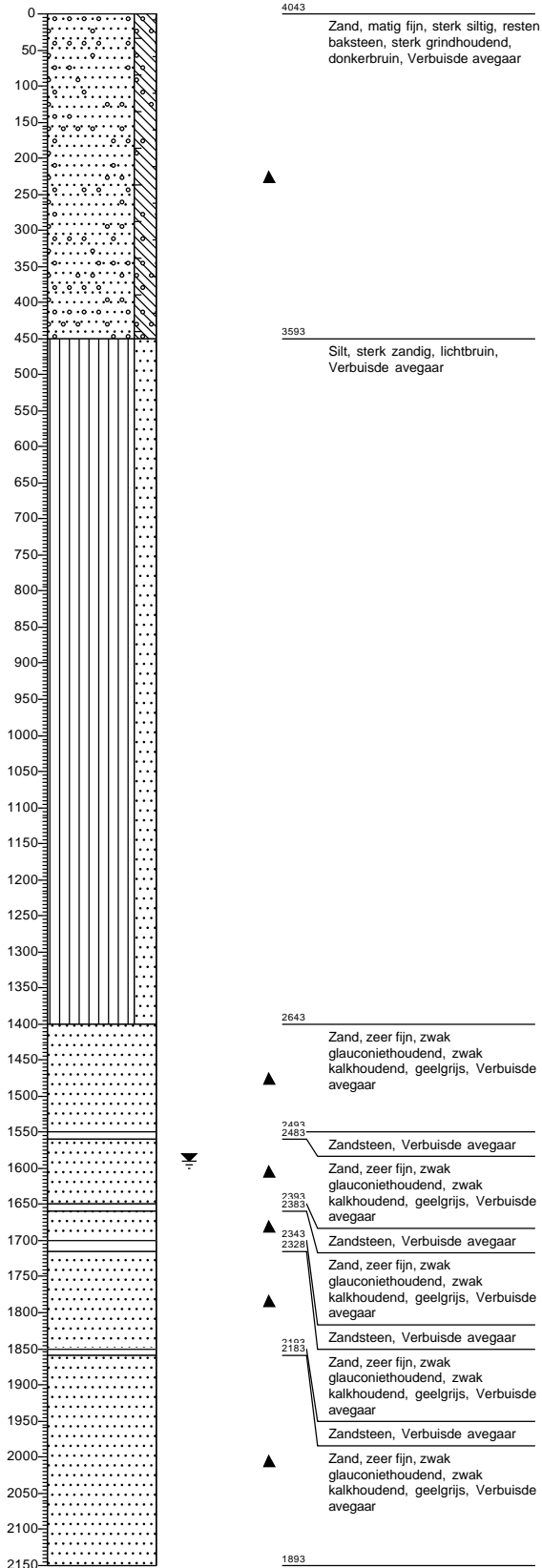


**Boring: B6C-002**

X: 156019,73  
 Y: 175407,98  
 Datum: 6-7-2021  
 GWS: 1590

**Boring: P6C-002**

X: 156019,73  
 Y: 175407,98  
 Datum: 6-7-2021  
 GWS: 1590



Projectcode: DWV

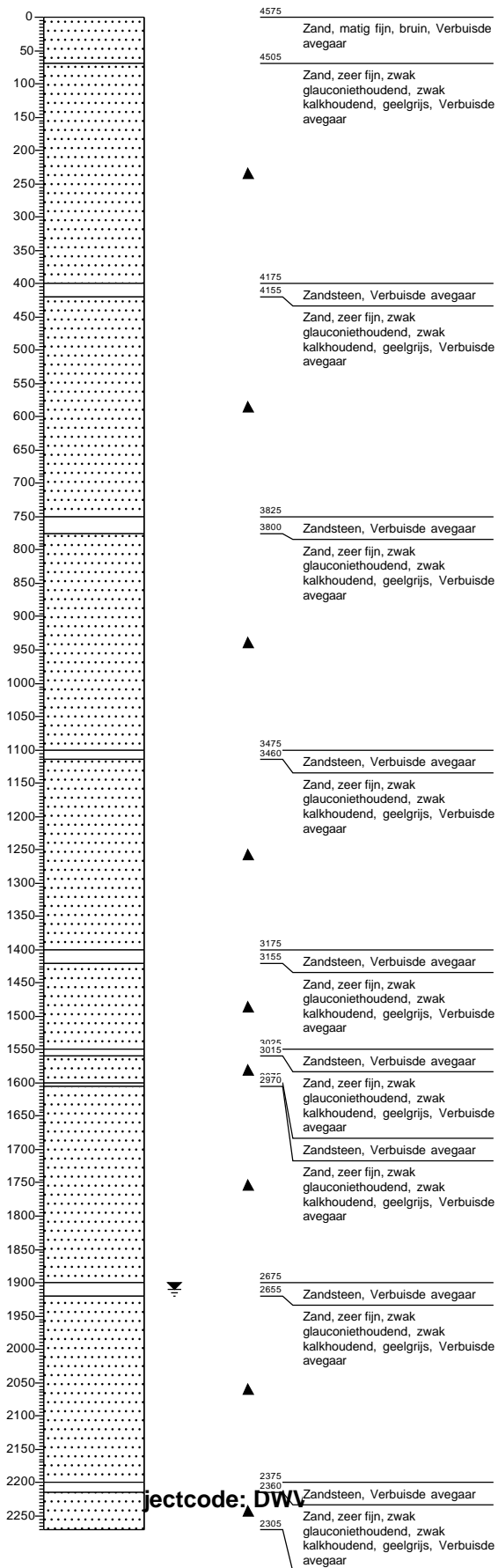


**Boring: B6C-003**

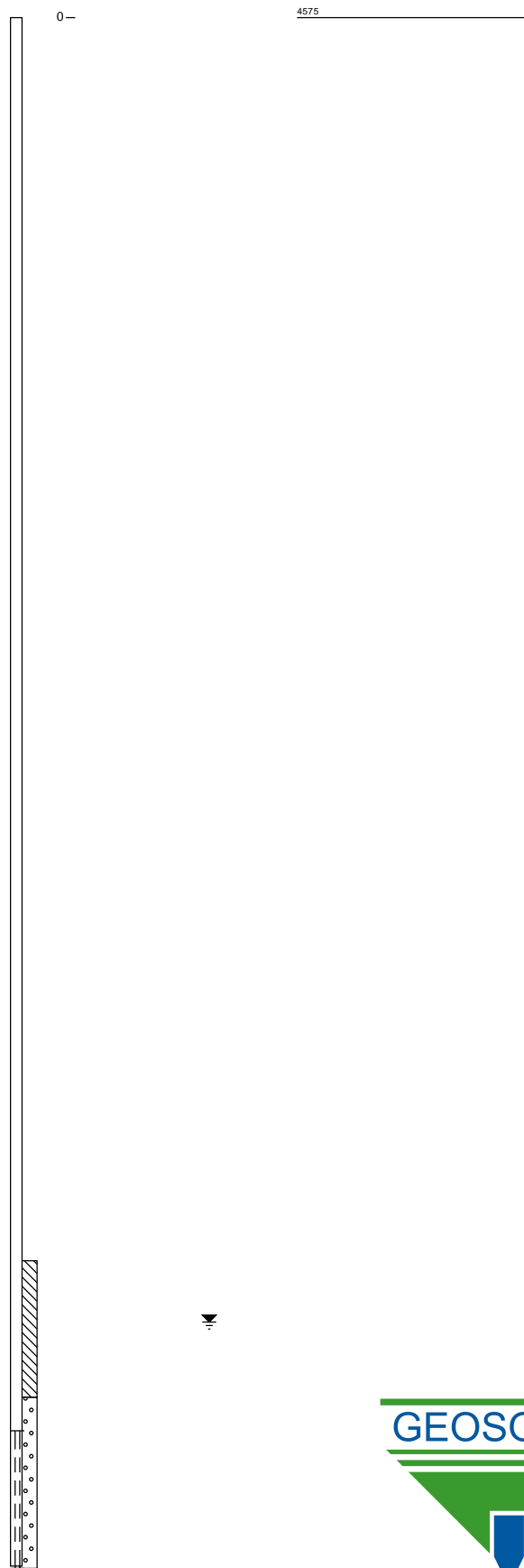
X: 155796,36  
 Y: 175200,83  
 Datum: 6-7-2021  
 GWS: 1910

**Boring: P6C-003**

X: 155796,36  
 Y: 175200,83  
 Datum: 6-7-2021  
 GWS: 1910



jectcode: DW

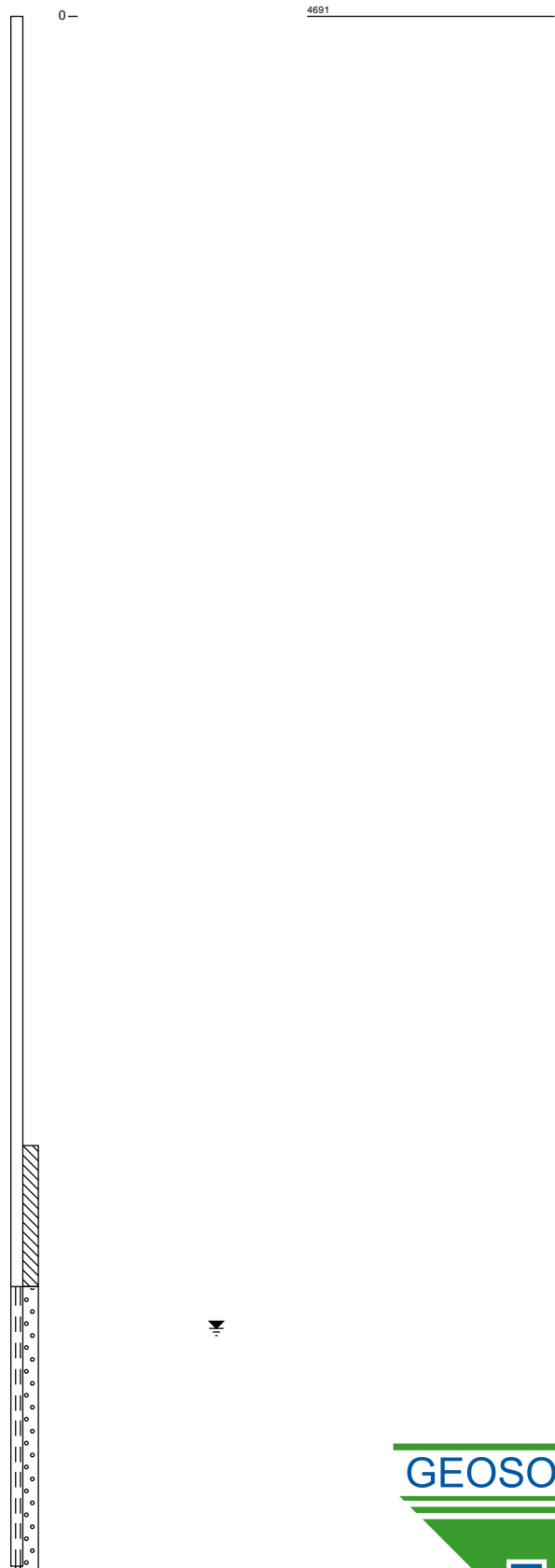
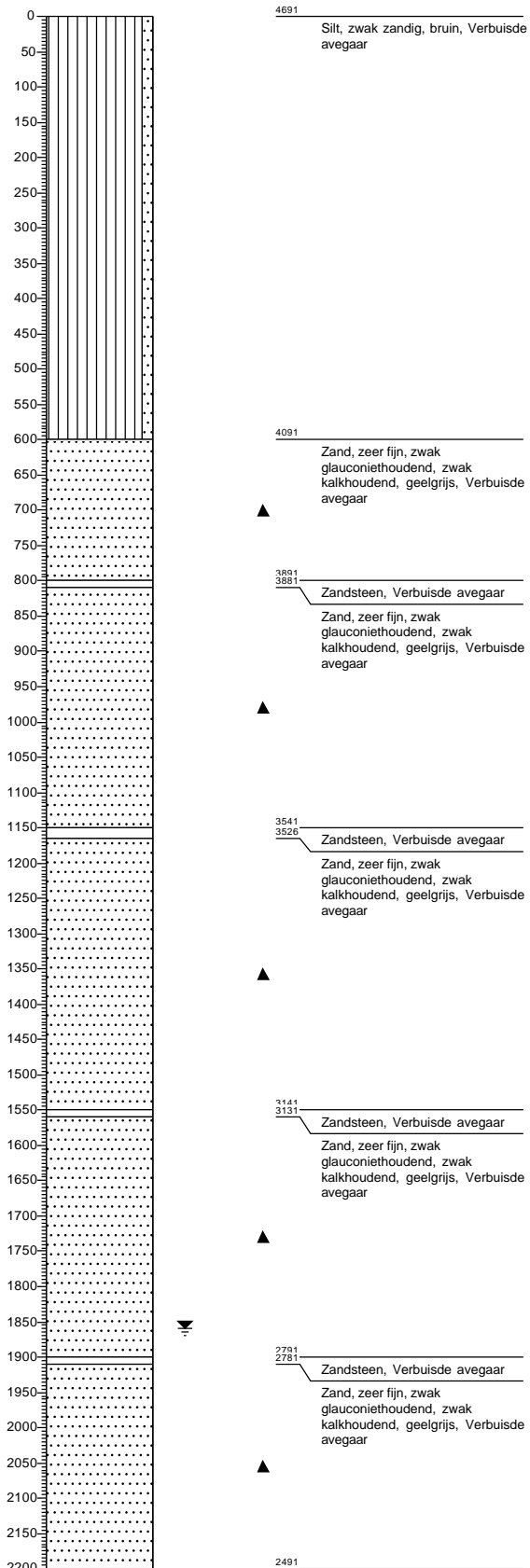


**Boring: B6C-004**

X: 155757,08  
Y: 175041,46  
Datum: 6-7-2021  
GWS: 1860

**Boring: P6C-004**

X: 155757,08  
Y: 175041,46  
Datum: 6-7-2021  
GWS: 1860

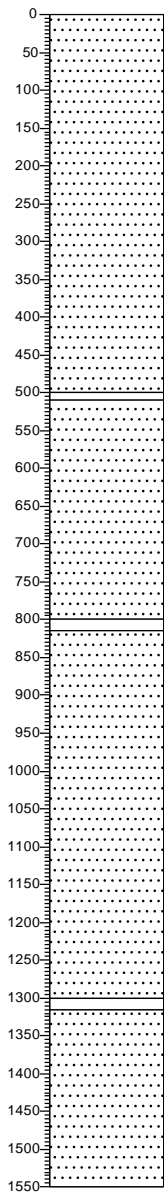


Projectcode: DWV



**Boring: B6C-005**

X: 155494,74  
Y: 174919,05  
Datum: 6-7-2021  
GWS: 1380



4306  
Zand, zeer fijn, zwak glauconiethoudend, zwak kalkhoudend, geelgrijs, Verbuisde avegaar

▲

3406  
3796  
Zandsteen, Verbuisde avegaar  
Zand, zeer fijn, zwak glauconiethoudend, zwak kalkhoudend, geelgrijs, Verbuisde avegaar

▲

3506  
3491  
Zandsteen, Verbuisde avegaar  
Zand, zeer fijn, zwak glauconiethoudend, zwak kalkhoudend, geelgrijs, Verbuisde avegaar

▲

3006  
2991  
Zandsteen, Verbuisde avegaar  
Zand, zeer fijn, zwak glauconiethoudend, zwak kalkhoudend, geelgrijs, Verbuisde avegaar

▲

2756

**Boring: P6C-006**

X: 155494,74  
Y: 174919,05  
GWS: 1380



0—

4306



**Boring: B6B-004**

X: 157199,12  
Y: 175938,36

GWS: 910

**Boring: P6B-004**

X: 157199,00  
Y: 175938,36

Datum: 6-7-2021  
GWS: 910

0— 3946

0— 3946



**Boring: B6B-005**

X: 156249,18  
Y: 175830,55

0— 3461 \_\_\_\_\_

**Boring: P6B-005**

X: 156249,18  
Y: 175830,55

0— 3461 \_\_\_\_\_

