

## Expertise rapport:

# Bepaling van de sokkeldiepte van het Brabant Massief met behulp van seismische ruismetingen ter hoogte van de Bospoortbrug te Halle

---



**Koen Van Noten, Raphael De Plaen**

Koninklijke Sterrenwacht van België, Ringlaan 3, 1180 Brussel

ROB-DVW 2024-01

12 maart 2024

*Contact: [Koen.vannoten\[at\]seismology.be](mailto:Koen.vannoten[at]seismology.be)*

*In opdracht van:*

De Vlaamse Waterweg NV  
Afdeling Regio Centraal  
Oostdijk 110, 2830 Willebroek



Vertegenwoordigd door  
Olivier Devriese en Diether De Cree

BESIX  
Rijvisschestraat 126, 9052 Gent



Vertegenwoordigd door  
Alexander Hoste

Referentie:

*Van Noten, K., De Plaen, R. 2024. Bepaling van de sokkeldiepte van het Brabant Massief met behulp van seismische ruismetingen ter hoogte van de Bospoortbrug te Halle. Expertiserapport ROB-DVW 2024-01. Koninklijke Sterrenwacht van België, Ukkel. 34 p. <https://doi.org/10.24414/4539-0k37>*

# Inhoudstafel

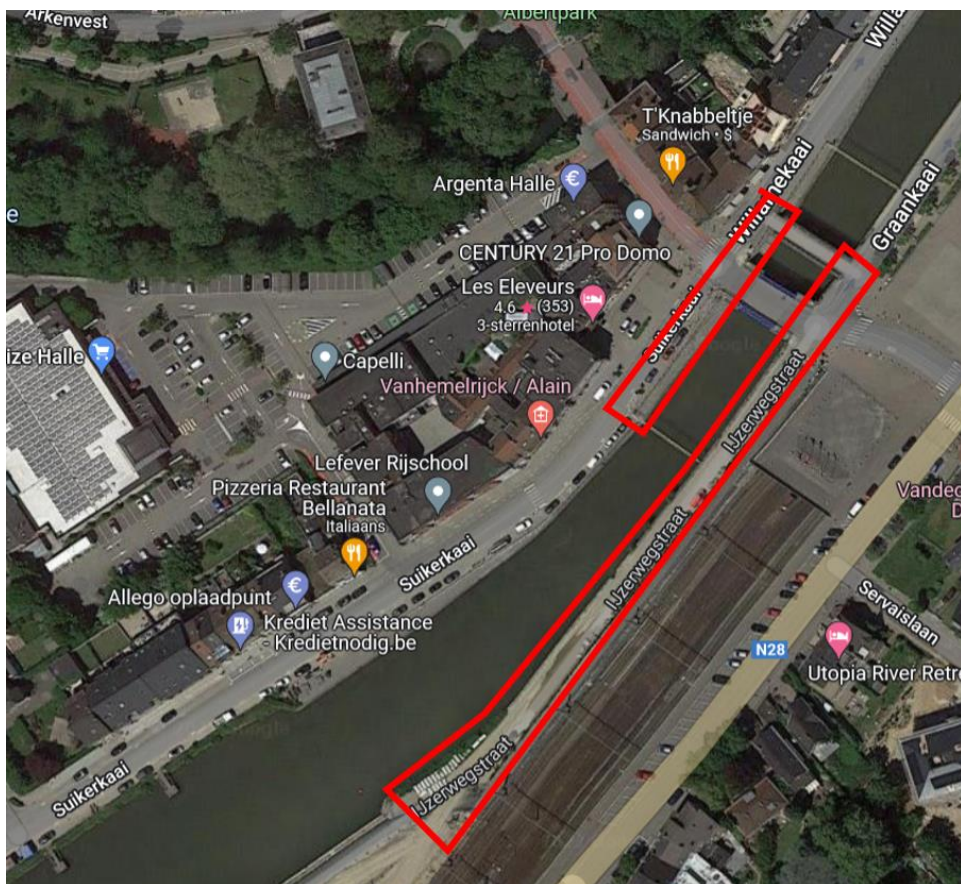
Inhoudstafel .....	1
1. Inleiding.....	2
1.1 Opdracht .....	2
1.2. Overzicht van de uit te voeren taken .....	3
1.3. Methode: H/V spectraal ratio (HVSR) van seismische ruis .....	3
1.4. Instrumenten .....	6
2. Omzetting resonantiefrequentie naar sokkeldiepte .....	8
2.1 Uitvoering.....	8
2.2 HVSR resultaten .....	10
2.2.1. Linkeroever (van zuid naar noord) .....	11
2.2.2. Recheroever (van noord naar zuid) .....	13
2.3. Powerlaw kalibratie tussen resonantiefrequentie en diepte .....	15
2.4. Toepassing van de powerlaw relatie boven boorgaten in Halle .....	16
3. HVSR-profielen naast de Bospoortbrug .....	18
3.1. Meettijden en installatie .....	18
3.2. Resultaten .....	22
3.3.1. Vergelijking seismische campagne en boorgaten .....	22
3.3.2. Polarisation.....	22
3.3.3. Recheroever.....	23
3.3.4. Linkeroever.....	25
3.3.5. “Anker”-metingen .....	27
4. Interpretatie en conclusies.....	30
4.1. HVSR resultaten .....	30
4.2. Interpretatie .....	30
4.3. Kwartairgeologie .....	31
Bijlagen.....	32
Referenties .....	34

# 1. Inleiding

## 1.1 Opdracht

In 2024 start De Vlaamse Waterweg NW (DVW) met de uitvoering van de vervanging van de **Bospoortbrug** en de **IJzerwegstraat** in het centrum van Halle (Vlaams Brabant). Aan de Bospoortbrug gaat DVW een nieuwe oever en grote brugkelder bouwen. Aan de linkeroever van het Zennekanaal, ter hoogte van de Suikerkaai, én aan de rechteroever, ter hoogte van de IJzerwegstraat, zullen nieuwe verticale oevermuren worden gebouwd die meer landinwaarts zullen liggen dan de huidige oever. Gezien de onregelmatigheid van de diepte waarop de harde rots (zijnde het gesteente van het Onder-Paleozoïsch Brabant Massief) wordt teruggevonden in deze regio, is in een eerste fase grondonderzoek en studiewerk nodig. Het is gekend dat het afbraakoppervlak van het Brabant Massief erg onregelmatig is en de erosie sterk beïnvloedt is geweest door de lithologische opbouw van het Brabant Massief. Enerzijds heeft BESIX sonderingen, kernboringen en pressiometerproeven uitgevoerd die door Verbeke bvba werden geïnterpreteerd (zie Rapport 24013448-001 en 24013448-002), anderzijds werd aan de Koninklijke Sterrenwacht van België gevraagd om de Horizontale over Verticale spectraal ratio (HVSr) seismische methode uit te testen in diezelfde werfzone om 1/ de betrouwbaarheid van deze methode uit te testen en te vergelijken met de andere proefmethodes en 2/ deze methode verder toe te passen en uit te testen langs beide oevers om zo met deze geofysische methode de proefboringen te kunnen extrapoleren. De grondproeven die eerder werden uitgevoerd zijn 8 CPT testen, 13 boringen en 6 pressiometer testen.

Concreet gaat het om de volgende twee zones:



**Figuur 1** : Interessegebied. Linker- en rechteroever rond de Bospoortbrug in het centrum van Halle.

## 1.2. Overzicht van de uit te voeren taken

In dit verslag rapporteren we de resultaten van de seismische campagne die naast de Bospoortbrug werden uitgevoerd in januari en februari 2024. De opdracht heeft als doel een niet-destructieve seismische methode uit te testen om de afstand van de oppervlakte tot de harde rots (sokkel) in de ondergrond te berekenen op vooraf aangegeven locaties naast het Zennekanaal. Aangezien de onzekerheid op deze metingen, betrof dit werk een inspanningsverbintenis en geen resultaatsverbintenis. De berekeningen worden uitgevoerd door middel van de **Horizontale over Verticale Spectrale Ratio (HVSR)** analyse toe te passen op **seismische ruis** die wordt gemeten met behulp van 5 Hz en 5s geofonen. Deze methode levert de resonantiefrequentie op, dewelke een maat is voor de diepte van het contrast tussen zachte sedimenten en de onderliggende harde rots. De omzetting van resonantiefrequentie naar diepte wordt gekalibreerd met behulp van boorgegevens aangeleverd door de klant. Deze opdracht omvat volgende taken:

**Taak 1:** Meetcampagne 1: Een HVSR-analyse rond de Bospoortbrug vóór dat de boringen plaatsvonden om interferentie met boorgaten te vermijden. Aan de linker- en rechteroever van het kanaal werden op 18 januari 2024 op 13 aangegeven locaties (12 boringen en 1 pressiometer locatie) telkens 2 geofonen geplaatst: 1 boven het boorgat en 1 op 1 meter afstand van het boorgat (ter controle).

De resonantiefrequentie van de meting boven het boorgat wordt opgeleverd.

Na de metingen wordt een empirische formule (kalibratie) tussen resonantiefrequentie en diepte tot de top van de sokkel opgesteld. Deze relatie kan elders worden toegepast om de diepte tot de sokkel empirisch te berekenen na HVSR-analyse op seismische ruismetingen.

**Taak 2:** Meetcampagne 2: opmeten van 2 seismische profielen aan de linker- en rechteroever van het Zenne kanaal ter hoogte van de Bospoortbrug. Op 26 februari 2024 werd de linkeroever opgemeten en werden op 32 locaties 5 Hz (n = 22) en 5s (n = 10) geofonen geplaatst. Op 29 februari 2024 werd de rechteroever opgemeten en werden op 42 locaties 5 Hz (n = 22) en 5s (n = 20) geofonen geplaatst. Als extra kalibratie werd ook langsheen de rechteroever een elektrisch resistiviteitsprofiel (ERT) opgemeten. De resultaten van dit ERT-profiel waren echter negatief door de aanwezigheid van te veel beton in de ondergrond.

Deze taak levert de resonantiefrequentie op 74 locaties op (bijlage) en 2 frequentie- en diepte profielen. De bijlages voorzien de omzetting van de ruwe data tot een virtueel boorgat dewelke zowel een diepteberekening tot de harde rots inhoudt als een onzekerheidsbepaling op deze meting.

**Taak 3:** Interpretatie van de 2 profielen en discussie opbouw ondergrond onder de Bospoortbrug.

Alle HVSR metingen zullen in de HVSR database voor België terecht komen, beheerd door de afdeling Seismologie-Gravimetrie, Koninklijke Sterrenwacht van België.

## 1.3. Methode: H/V spectraal ratio (HVSR) van seismische ruis

Het schatten van de sedimentdikte bovenop vast gesteente is een belangrijk onderdeel van veel hydrogeologisch en seismisch onderzoek en is van belang om te simuleren hoe aardbevingsgolven door de bovenste korst worden overgedragen of verzwakt naar de oppervlakte toe. De **horizontale/verticale (H/V) spectrale ratio (HVSR)** van seismische omgevingsruis is een niet-invasieve passieve seismische methode die wordt gebruikt om de diepte van het vast gesteente onder sedimentaire lagen te berekenen. De HVSR-methode (Nakamura, 1989) maakt gebruik van een drie-componenten seismometer of -gefoon om omgevingstrillingen/-ruis op te nemen die worden geproduceerd door lokale oppervlaktebronnen zoals verkeer en andere menselijke activiteiten in het hoogfrequentie bereik (> 1 Hz), of door bronnen op grote afstand zoals oceaangolven en wind in het

lage frequentiebereik (< 1 Hz). HVSR bestaat uit het berekenen van de verhouding tussen de Fourier amplitudespectra van de gemiddelde horizontale (H) componenten en de verticale (V) component van seismische ruis opgenomen door één enkel station. Wanneer een impedantiecontrast (= schuifnelheidscontrast) aanwezig is in de ondergrond, bv. veroorzaakt door de aanwezigheid van sediment bovenop harde rots, krijgt men na HVSR-analyse van seismische ruis een typische piek in het Fourier amplitudespectrum. Een aanname is dat de dominante piek van de HVSR-curve een betrouwbare inschatting geeft van de schuifgolf (S-golf) resonantiefrequentie van een horizontaal gelaagde ondergrond. Bijgevolg nemen we aan dat **HVSR-analyse de resonantiefrequentie ( $f_0$ ) van de ondergrond oplevert**. De positie van de  $f_0$ -piek is omgekeerd evenredig met de diepte tot het sediment-gesteente contrast, met hoe lager de piekwaarde, des te dieper het contrast. Door seismometers of geofonen langsheen een lineair profiel te installeren, kan met deze methode de paleomorfologie van de top van het gesteente worden uitgekarteerd.

De  $f_0$ -piek kan worden omgezet naar diepte volgens 2 methodes:

1. ofwel is de schuifgolfsnelheid ( $V_s$ ) gekend van het gehele sedimentpakket en kan de diepte ( $h$ ) worden berekend m.b.v. de formule  $h = V_s / (4 \cdot f_0)$ . Echter, het bepalen van  $V_s$  kan enkel door snelheidsmetingen in boorgaten of door netwerkmetingen toe te passen.
2. Een alternatieve methode is het bepalen van de empirische relatie tussen  $f_0$  en  $h$  door HVSR-analyse van seismische ruis uit te voeren boven boorgaten waarvan de diepte tot het gesteente is gekend. Deze methode levert een powerlaw relatie op tussen beide parameters en kan worden toegepast in het gebied waarin de relatie werd bepaald.

In centraal Vlaanderen en Brussel komt de dominante  $f_0$ -piek meestal overeen met het contact tussen Cenozoïsche of Krijt-sedimenten en het onderliggende Onder-Paleozoïsche Brabant Massief. In het Brussels hoofdstedelijk gebied, voerde Van Noten *et al.* (2022) 65 metingen uit boven boorgaten in Brussel om de relatie tussen  $f_0$  en de sedimentdikte bovenop het Brabant Massief te bepalen. In deze studie werd onderstaande powerlaw relatie voorgesteld als geschikte omzetting van  $f_0$  naar  $h$ :

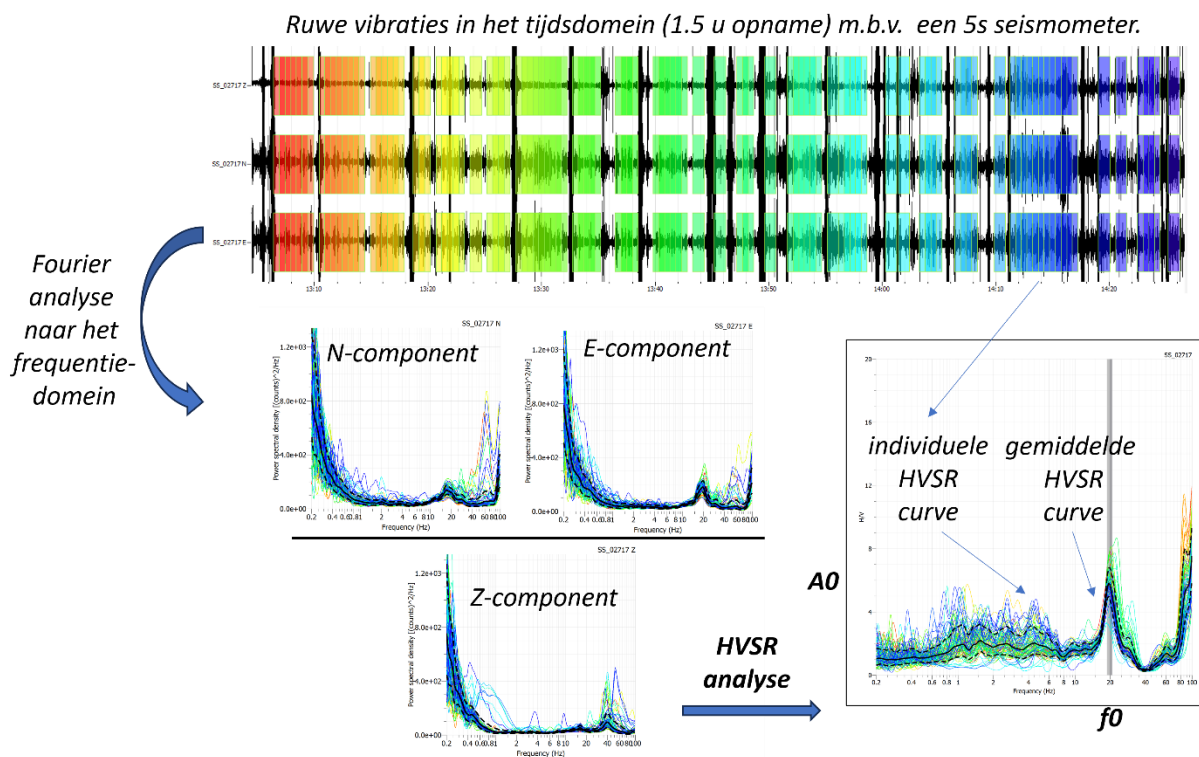
$$h = 88.631 \cdot f_0^{-1.683}$$

Deze relatie werkt goed in Brussel en leverde intussen al meer inzicht in de variabiliteit van top van het Brabant Massief, langs beide oevers van de Zenne. Voor het gebied te Halle werden echter enkel metingen boven 12 boorgaten gebruikt. Hierdoor is de relatie minder geschikt om de dikte van de Formatie van Hannut (oudste Cenozoïsche formatie boven op het Brabant Massief) en de alluviale sedimenten van de Zenne rivier afgezet in het Kwartair uit te karteren. Om deze relatie te verbeteren, is bijkomende HVSR-analyse boven boorgaten nodig. Deze bijkomende informatie wordt in dit rapport geleverd.

Als de directe omzetting naar diepte niet werkt door de aanwezigheid van beton in de ondergrond (deze verhoogt immers de  $V_s$  sterk waardoor de diepte wordt overschat), kan de HVSR-methode toch nog steeds relatief goede informatie leveren door individuele HVSR-curves relatief met elkaar te vergelijken langsheen de opgemeten profielen.

De HVSR-analyse werd uitgevoerd met behulp van de open source software GEOPSY versie 3.3.3 (Wathelet *et al.*, 2020). Vóór analyse werd de *gain* verwijderd van de ruwe data. Ruwe data werd in de tijd geknipt met behulp van python module Obspy (Krischer *et al.*, 2015). Uit de ruwe data werden signalen van voorbij passerende voertuigen, treinen of boten weggeknipt. Omdat deze signalen een bron in hetzelfde frequentiebereik als de  $f_0$  waarde hebben, verstoren deze signalen de HVSR-analyse te erg en dienen ze dus te worden verwijderd. Door het vele verkeer, en om representatieve metingen te bekomen, werd ervoor gekozen om lange metingen uit te voeren (meer dan 3 u). De

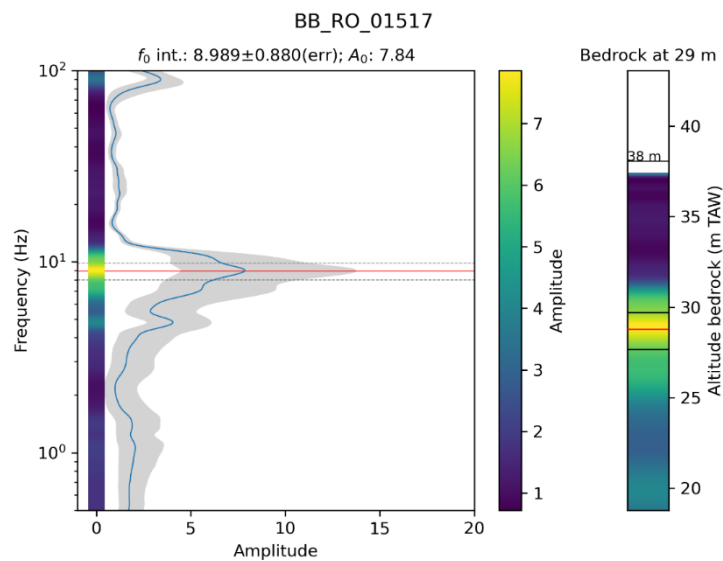
gemiddelde HVSR-curve en zijn  $f_0$  en H/V amplitudewaarde werd dan berekend door een HVSR-analyse uit te voeren op individuele tijdsvensters van 60 seconden, geknipt uit de opname, en het gemiddelde te nemen van alle curves. Meer informatie over de techniek en parameters kan worden bekomen in de SESAME richtlijnen voor HVSR-analyse (Bard *et al.*, 2004).



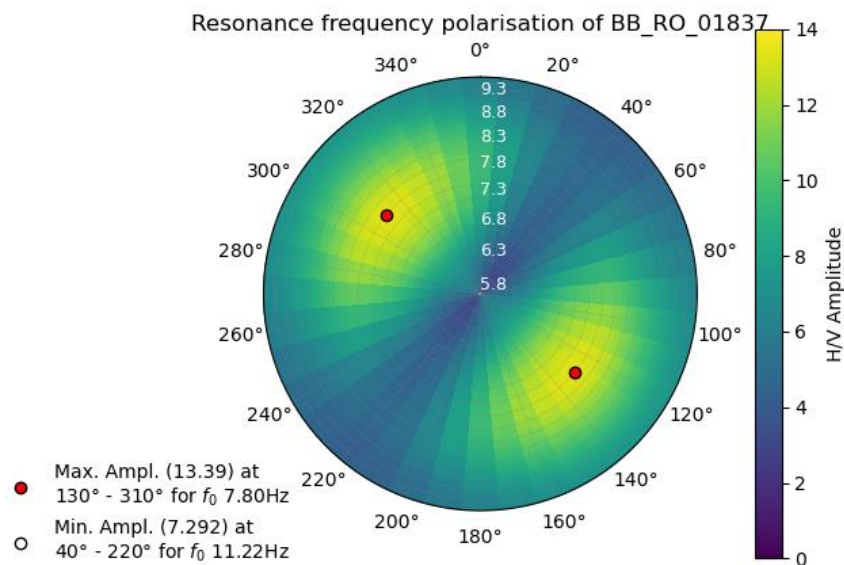
**Figuur 2 :** Overzicht van de H/V spectraal ratio methode met behulp van het programma GEOPSY. Zie tekst voor uitleg.

De ruwe output gegevens (frequentie-amplitude diagram opgeslagen in bestanden met *.hv* extensie) van het programma Geopsy werden herplot gebruik makend van Python codes gepubliceerd in Van Noten *et al.* (2020). In deze nieuwe representatie (zie Figuur 3) wordt de HVSR-curve in het frequentie-amplitude diagram weergegeven. Met behulp van nieuw opgestelde  $f_0$  naar sedimentdikte powerlaw relaties wordt deze gehele curve omgezet naar een **Virtueel Boorgat**, waarbij de kleurschaal de amplitude van de HVSR-curve weergeeft en aantoont waar de waarschijnlijkheid het hoogste is waar het contrast tussen sediment en gesteente te vinden is. Op deze figuur wordt dit contrast wordt weergegeven met een rode lijn (de  $f_0$ -waarde), en deze waarde werd ook omgezet naar de diepte (in m TAW).

Als aanvulling op de resonantiefrequentieanalyse werd eveneens een **HVSR-polarisatieanalyse** uitgevoerd om de directionele of azimuthale richting af te leiden waarin  $f_0$  zijn maximale piekamplitude heeft. De directionele HVSR wordt berekend in stappen van  $10^\circ$ , van noord ( $0^\circ$ ) naar zuid ( $180^\circ$ ). In de HVSR-polarisatieanalyse worden dezelfde tijdsvensters gebruikt als in de H/V module om voorbijgaande bronnen te vermijden die deze analyse zouden kunnen beïnvloeden. Elk polarisatie resultaat werd geëxporteerd uit Geopsy en opnieuw uitgezet in een azimut versus frequentie polair diagram. De maximale en minimale H/V amplitude bij  $f_0$  en hun corresponderende azimut zijn automatisch afgeleid uit de gegevens (zie rode en witte stippen in Figuur 4). Na polarisatie-analyse werd voor elke meting de HVSR-curve opnieuw berekend in de richting waar de maximale piekwaarde optrad. Deze procedure levert een meer nauwkeurige piekwaarde op en resulteert in een hogere H/V amplitude  $A_0$  rond de  $f_0$ -waarde.



**Figuur 3 :** HVSr-curve weergegeven in een frequentie-amplitude diagram (links) en omzetting van de HVSr-curve naar een virtueel boorgat (rechts). Rode lijn geeft de resonantiefrequentie ( $f_0$ ) weer. Zwarte gestippelde en volle lijnen geven de 1 sigma onzekerheid weer op de bepaling van de  $f_0$ -waarde. Voorbeeld: Meting BB\_RO\_01517 boven boorgat B27 op de rechteroever van de Bospoortbrug.



**Figuur 4 :** Polarisatie van de HVSr-curve in een frequentie-azimut diagram. Deze methode toont aan dat de  $f_0$  waarde niet uniform is in alle richtingen maar een maximum en minimum heeft in een bepaalde richting (max 130° - 310° in dit voorbeeld). Het berekenen van de  $f_0$  in deze azimutale richting geeft nauwkeurige resultaten.

## 1.4. Instrumenten

De seismische ruismetingen werden uitgevoerd met 32 SmartSolo 5 Hz IGU-16HR 3C en 10 SmartSolo 5 s IGU-BD3C-5 geofonen. De 5 Hz IGU-16HR 3C toestellen werden gekoppeld aan een *low capacity* batterij en werden geïnstalleerd op een metalen driepikkel om zo te kunnen worden geplaatst op een hard oppervlak. De driepikkels zijn echter niet in hoogte verstelbaar waardoor aangeraden is ze op een horizontaal oppervlak te installeren. De 5 s IGU-BD3C-5 geofonen hebben wel drie metalen schroeven onderaan het toestel om zo horizontaal te kunnen worden geplaatst.



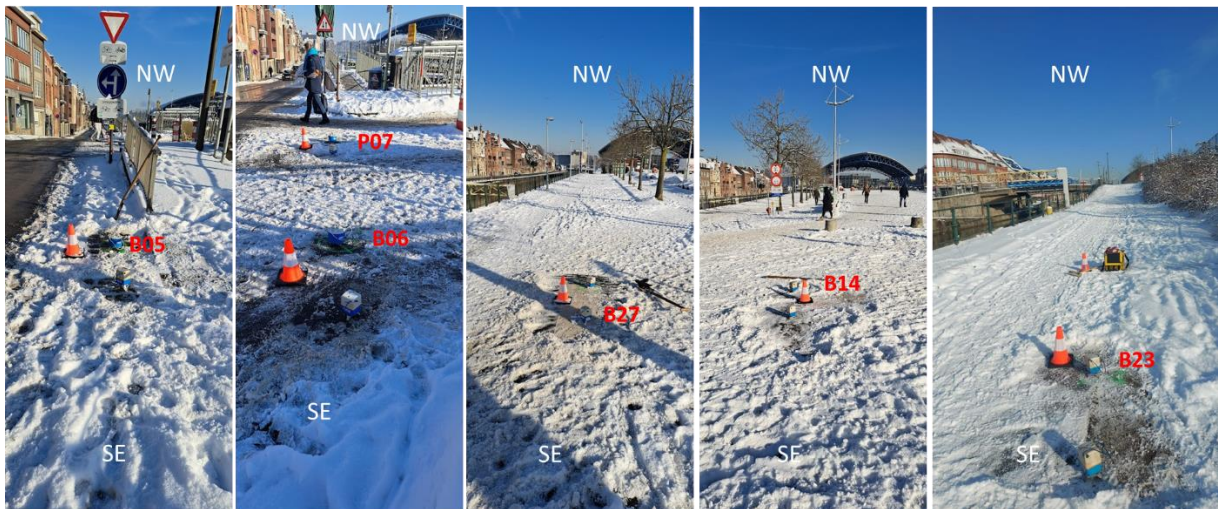


**Figuur 5** : Overzicht van SmartSolo geofonen gebruikt in deze studie. Ronde blauwe toestellen zijn SmartSolo 5 s IGU-BD3C-5 geofonen. Vierkante toestellen zijn SmartSolo 5 Hz IGU-16HR 3C geofonen met lage capaciteitsbatterijen geïnstalleerd op een metalen driepikkel.

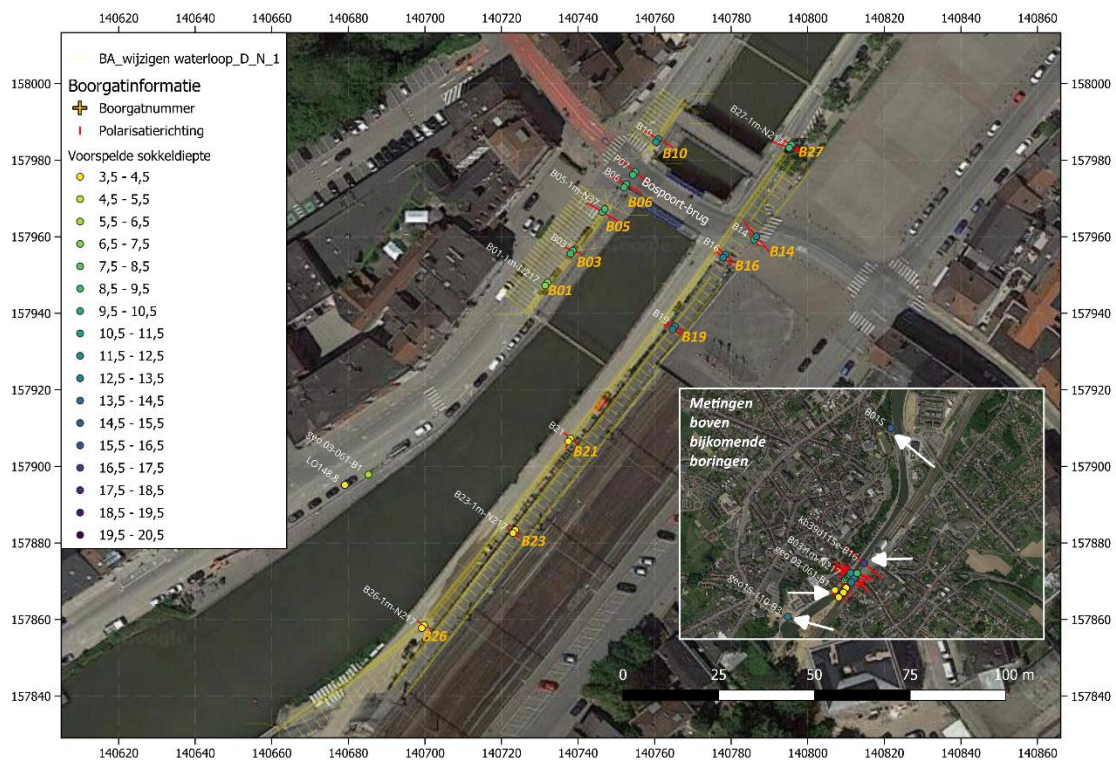
## 2. Omzetting resonantiefrequentie naar sokkeldiepte

### 2.1 Uitvoering

Op 18 januari 2024 werden op 26 locaties seismische ruismetingen uitgevoerd. Boven 13 geplande boorgaten en op 1 m afstand van het boorgat werden geofonen geplaatst. De tweede gefoon op 1 m afstand van het boorgat dient om na de boring de HVSR-metingen te kunnen verifiëren tijdens de seismische campagne en om de gevoeligheid van de meting in de ruimte te kunnen inschatten. Totale meetduur bedraagt minstens 3,5 uur om zeker een lang genoeg signaal te hebben voor de HVSR-analyse na het wegknippen van voorbijgaande signalen zoals auto's, treinen, boten, etc.

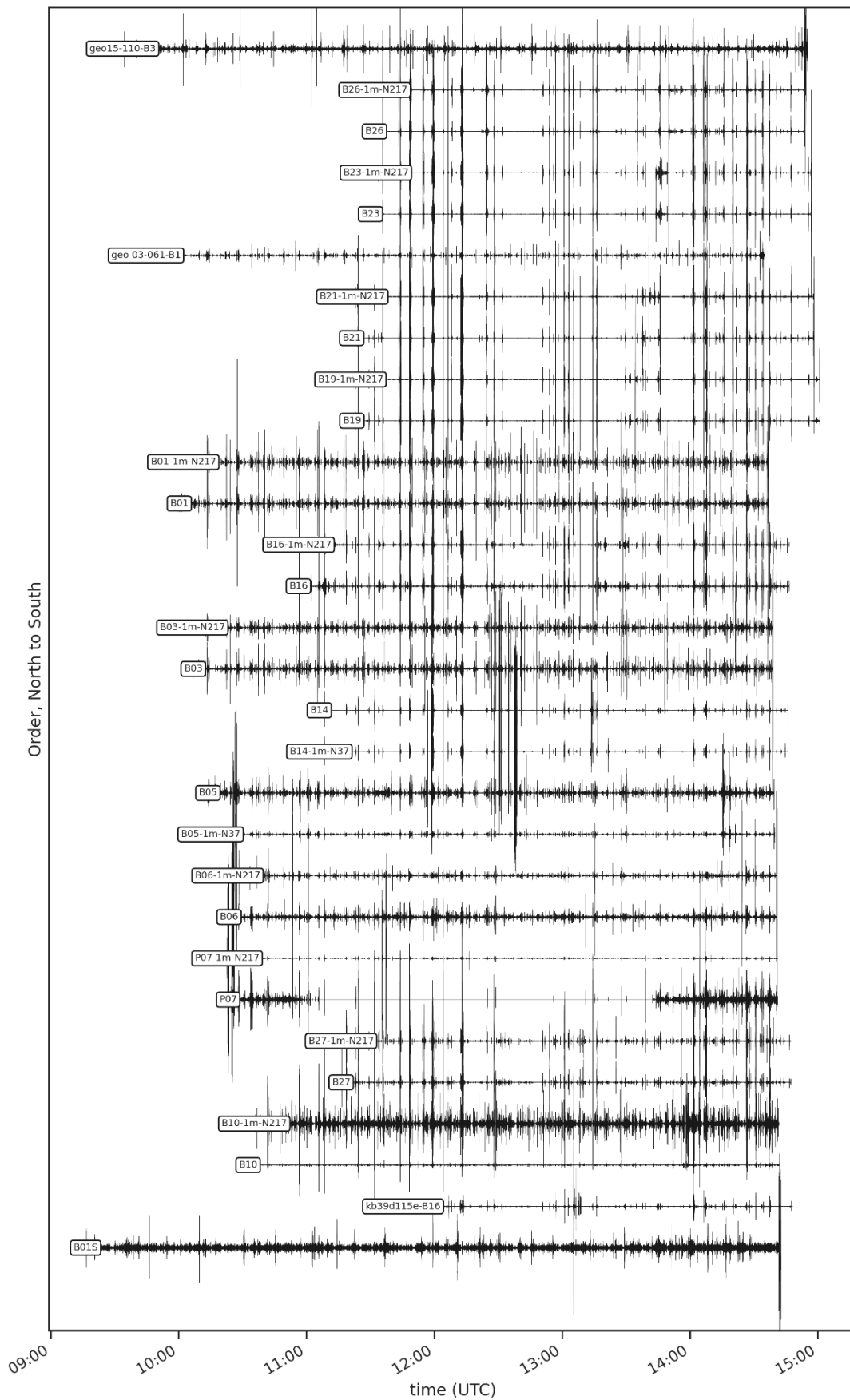


**Figuur 6 :** Overzichtsfoto's van de meetcampagne boven boorgatlocaties alvorens deze werden geboord. Er werd telkens een gefoon boven het boorgat geplaatst, en een andere op 1 m ten ZO van het boorgat ter verificatie. Enkele boorgat locaties zijn aangeduid op de foto's.



**Figuur 7 :** Locaties proefboringen en pressiometer testen. Boven boring B01, B02, B03, B05, B06, P07, B10, B14, B16, B23, B26 en B27 werden geofonen geplaatst. Een meting boven B08 was niet mogelijk door het verkeer.

2024-01-18



**Figuur 8 :** Installatietijd (~4u) op 2024-01-18 van 22 sensoren op de linkeroever en rechteroever van de Bospoortbrug boven de aangegeven boorgatlocaties. Ook werd geofonen geplaatst boven extra boorgaten in de regio Halle.

## 2.2 HVSR resultaten

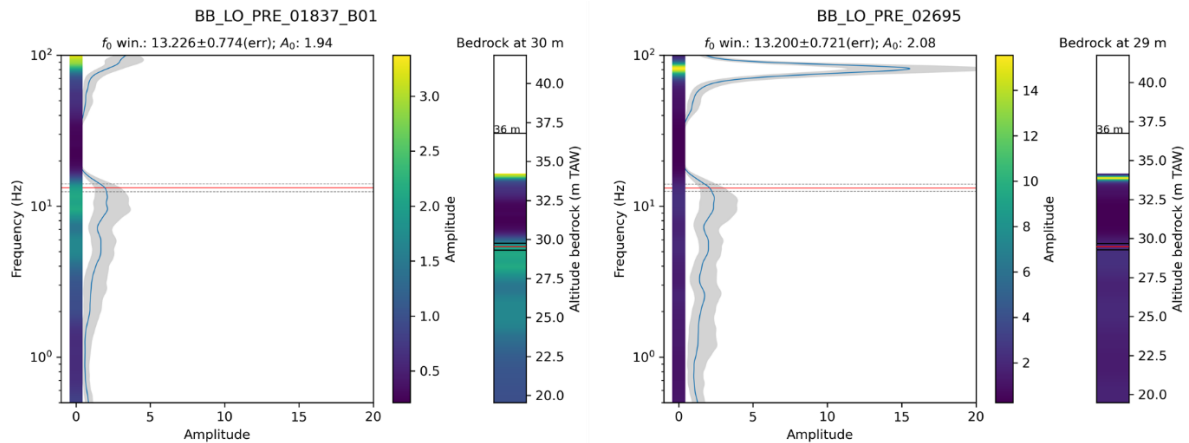
Eerst worden de individuele HVSR-resultaten per boorgat besproken. Vervolgens worden verschillende empirische powerlaw relaties tussen resonantiefrequentie en sokkeldiepte opgesteld op basis van de HVSR-metingen (zie 2.3). In onderstaande boorgat bespreking werd deze powerlaw relatie al toegepast en werd de HVSR-curve omgezet in een virtueel boorgat waarbij de voorspelde diepte is genoteerd boven elk virtueel boorgat. Nabij elk boorgat werden 2 geofonen geplaatst. Eén boven het boorgat en één op 1 m van het boorgat. Beide resultaten worden getoond. Onderstaande tabel toont de resultaten van de HVSR-analyse.

**Tabel 1:** Resultaten metingen boven boorgaten gerangschikt van noord naar zuid. **Loc:** Locatie van gefoon. **LO=** Linkeroever. **RO =** Rechteroever; **Borehole:** Boorgat nummer. Voor de nodes geplaatst op 1m van het boorgat is de afstand en azimut genoteerd; **Node Nr:** ID van de gefoon; **X, Y:** Lambert72 coördinaten. **Z:** Altitude afgeleid uit Digitaal Hoogte Model Vlaanderen II. **H:** sedimentdikte/diepte tot sokkel [m]. **f0\_min, f0\_win, f0\_max:** minimum  $f_0$ , resonantiefrequentie  $f_0$ , maximum  $f_0$ ; **Pol:** polarisatie van  $f_0$ ; **P:** voorspelde diepte [m] door de powerlaw relaties toe te passen (zie verder). Rijen in grijs werden niet gebruikt voor de kalibratie.

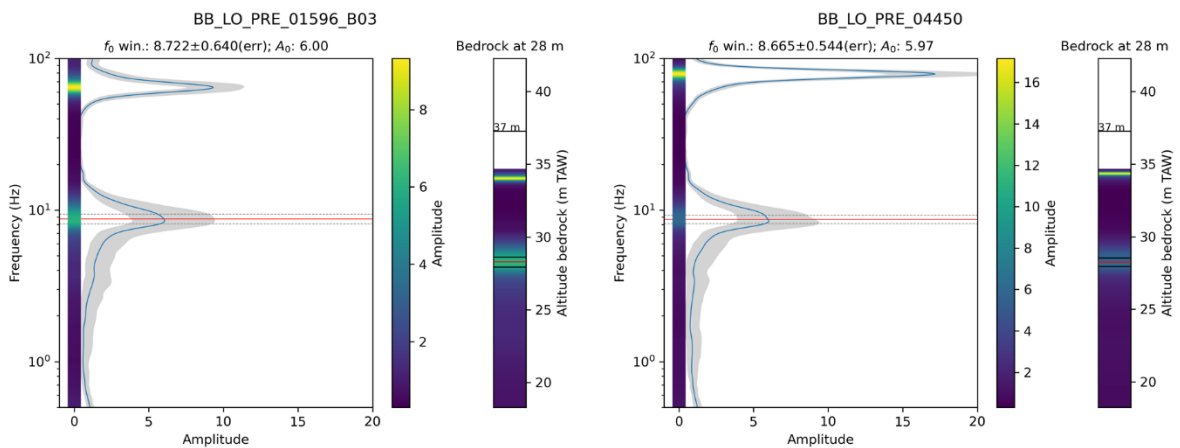
Loc	Borehole	Node_Nr	X	Y	Z	h	f0_min	f0_win	f0_max	Pol	P
LO	GEO-14-118-BL-B07	BE_04465	140971.30	158740.90	35.1	15.5	3.281	3.347	3.415	0	14.5
LO	GEO-15-110-B3	BE_01960	140433.00	157756.50	37.95	16.5	4.325	4.410	4.496	65	12.6
LO	GEO-03-061-B1	BE_11999	140678.10	157895.10	34.86	4.5	20.607	20.887	21.170	130	5.7
LO	B10	BE_01517	140760.96	157985.51	37.91	12.2	4.553	4.914	5.304	120	11.9
LO	B10-1m-N217	BE_20066	140760.36	157984.71	37.83	12.2	4.492	4.859	5.256	120	12.0
LO	P07	BE_01869	140754.94	157976.96	38.25	10	7.461	7.926	8.420	130	9.4
LO	P07-1m-N217	BE_19524	140754.33	157976.16	38.25	10	7.391	7.879	8.400	130	9.4
LO	B06	BE_01713	140752.61	157973.71	38.19	-	7.411	7.846	8.306	120	9.4
LO	B06-1m-N217	BE_20486	140752.01	157972.91	38.21	-	7.555	7.964	8.395	120	9.3
LO	B05	BE_01881	140746.36	157966.46	37.88	9	7.967	8.214	8.469	120	9.2
LO	B05-1m-N37	BE_04778	140746.96	157967.26	37.85	9	7.920	8.230	8.553	120	9.2
LO	B03	BE_01596	140738.62	157956.38	37.28	9	8.082	8.722	9.413	110	8.9
LO	B03-1m-N217	BE_04450	140738.02	157955.59	37.27	9	8.121	8.665	9.246	110	8.9
LO	B01	BE_01837	140732.01	157948.03	36.82	7.6	12.453	13.226	14.048	100	7.2
LO	B01-1m-N217	BE_02695	140731.41	157947.23	36.76	7.6	12.479	13.200	13.962	100	7.2
RO	kb39d115e-B16	BE_04316	140832.00	158035.00	37.94	9	5.090	5.282	5.481	130	17.1
RO	B27	BE_03798	140795.76	157984.03	38.04	11	8.273	8.703	9.156	120	9.4
RO	B27-1m-N217	BE_15043	140795.16	157983.23	38.07	11	8.530	8.877	9.238	110	9.2
RO	B14	BE_12736	140785.96	157959.29	38.68	20.02	7.488	7.930	8.397	140	10.5
RO	B14-1m-N37	BE_04444	140786.56	157960.09	38.73	20.02	6.035	6.796	7.653	140	12.7
RO	B16	BE_13728	140778.51	157955.34	38.68	11.2	6.269	6.837	7.456	130	12.6
RO	B16-1m-N217	BE_03625	140777.91	157954.54	38.68	11.2	6.243	6.662	7.109	130	13.0
RO	B19	BE_01838	140765.28	157936.57	38.8	11	6.219	6.497	6.788	120	13.4
RO	B19-1m-N217	BE_16235	140764.68	157935.77	38.19	11	6.200	6.480	6.772	120	13.4
RO	B21	BE_04512	140738.07	157907.29	35.46	6	14.147	14.723	15.323	130	5.0
RO	B21-1m-N217	BE_04744	140737.46	157906.50	35.41	6	16.453	16.833	17.223	20	4.3
RO	B23	BE_04823	140723.60	157883.35	35.29	5	15.920	16.243	16.573	130	4.5
RO	B23-1m-N217	BE_01974	140723.00	157882.55	35.22	5	15.916	16.251	16.593	130	4.5
RO	B26	BE_13956	140699.78	157858.50	34.87	-	19.260	19.653	20.054	120	3.6
RO	B26-1m-N217	BE_01250	140699.20	157857.70	34.93	-	19.622	19.984	20.353	120	3.5

### 2.2.1. Linkeroever (van zuid naar noord)

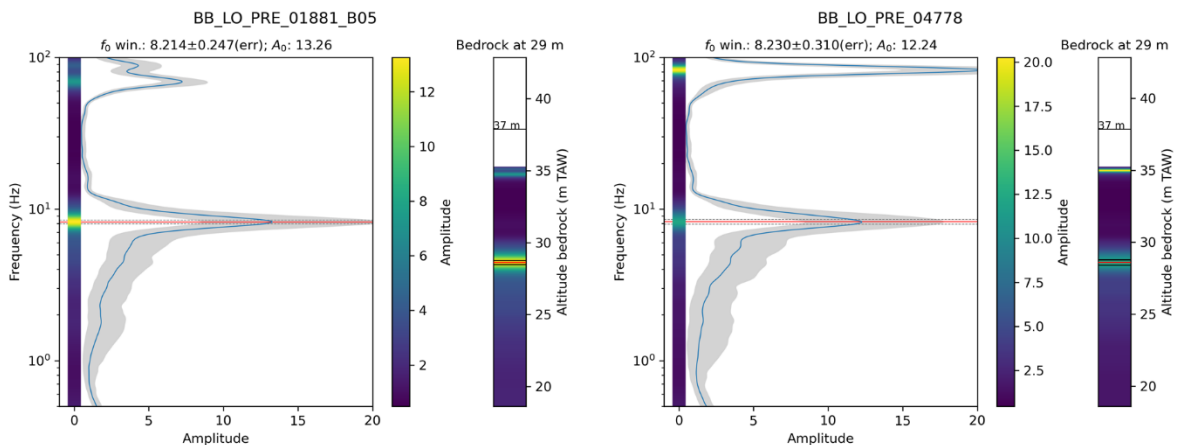
**B01** gaf een sokkeldiepte van **7.6 m**. Een duidelijke piek is afwezig maar de  $f_0$  kan worden afgeleid en volgt na een H/V minimum tussen 11 en 15 Hz. De  $f_0$ -waarde bedraagt **13.2 Hz**. De voorspelde sokkeldiepte is 6 m.



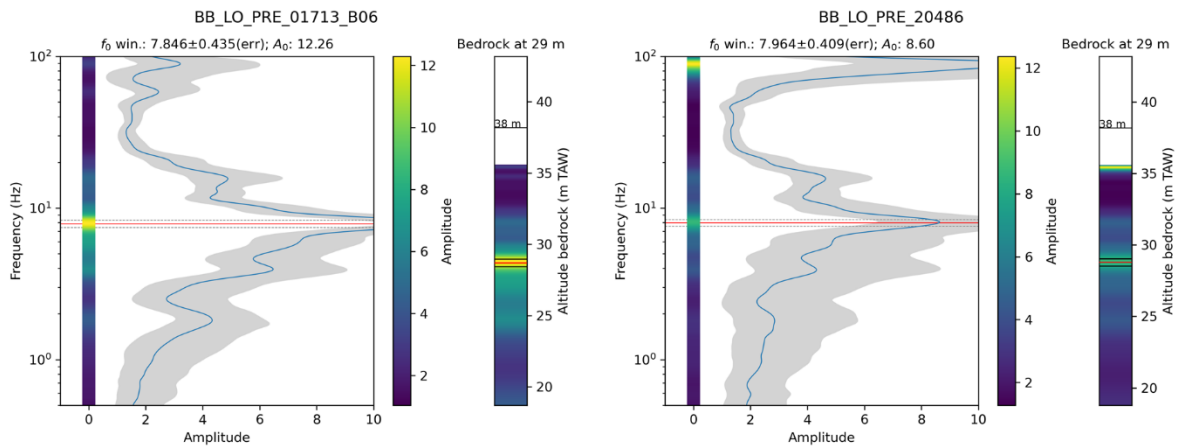
**B03** gaf een sokkeldiepte van **9 m**. Er is een duidelijke  $f_0$ -piek aanwezig. De  $f_0$ -waarde is **8.7 Hz**. De voorspelde sokkeldiepte is 9 m.



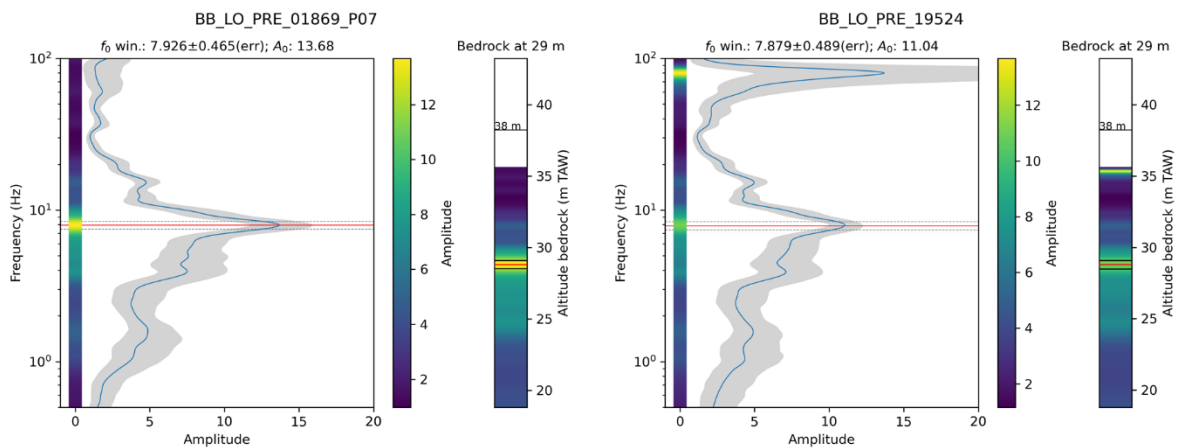
**B05** gaf een sokkeldiepte van **9 m**. Er is een duidelijke  $f_0$ -piek aanwezig. De  $f_0$ -waarde is **8.2 Hz**. De voorspelde sokkeldiepte is 8 m.



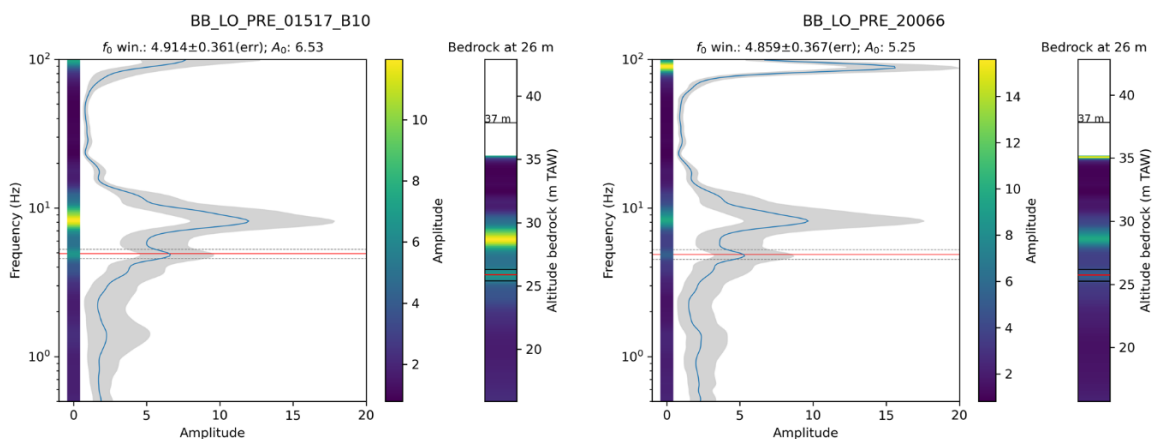
**B06** werd geboord in een paalfundering en er werd geen sokkeldiepte bekomen. De HVSR-curve toont echter wel een  $f_0$ -piek op **7.85 Hz**. Voorspelde diepte is 9 m.



**B08** werd geboord in het midden van de straat van de Suikerkaai. Als alternatief werd boven **P07** een toestel geplaatst. B08 gaf een sokkeldiepte van **10 m**. P07 geeft een diepte van 9.80 m. Er is een duidelijke piek aanwezig. De  $f_0$ -waarde bedraagt **7.5 Hz**. Voorspelde diepte is 9 m.

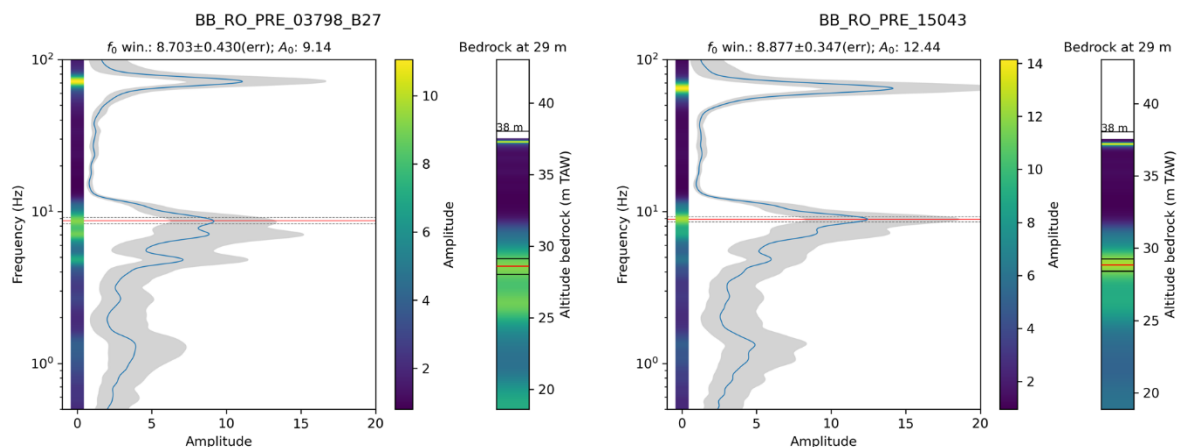


**B10** gaf een sokkeldiepte van **12.2 m**. Er is een dubbele piek aanwezig. De tweede piek op **4.6 Hz** geeft vermoedelijk de top van de sokkel aan. De eerste piek op 8.15 Hz heeft een hogere H/V amplitude en geeft vermoedelijk de top van een ander pakket aan dat meer competent is dan het bovenliggend sediment. In B10 wordt dit beschreven als *zandsteengrind, sterk grindhoudend, grijs-groen*. De voorspelde sokkeldiepte is **11 m**.

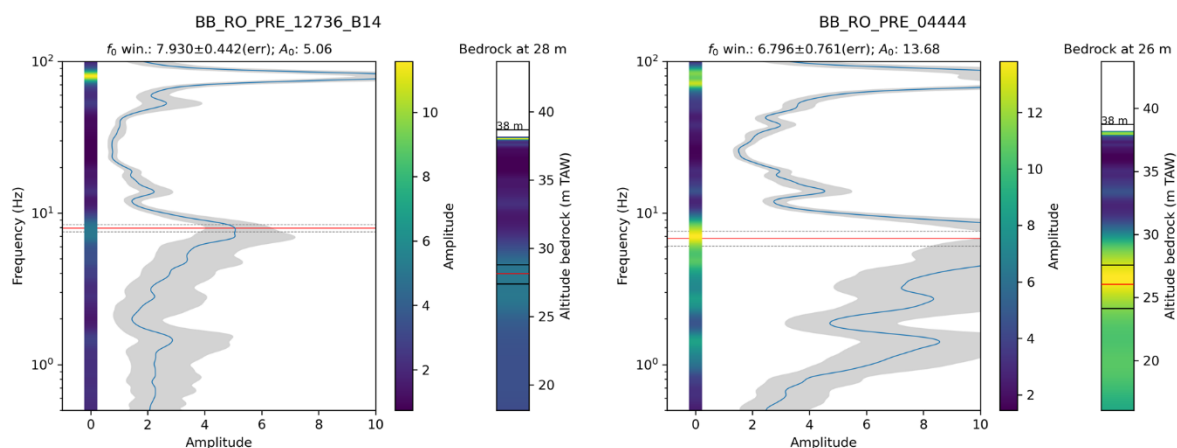


## 2.2.2. Rechteroever (van noord naar zuid)

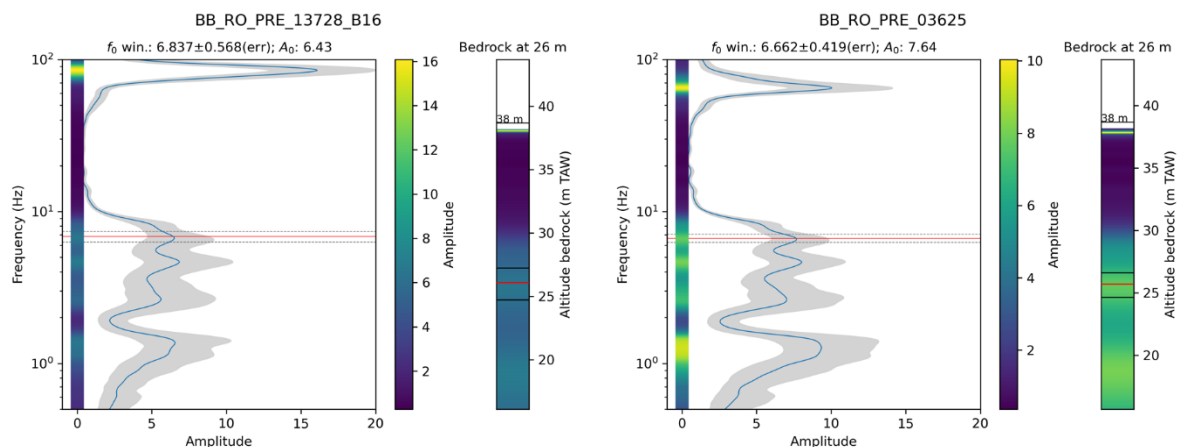
**B27** gaf een sokkeldiepte van **11 m**.  $f_0$  waarde is **8.7 Hz**. Voorspelde diepte is 11 m.



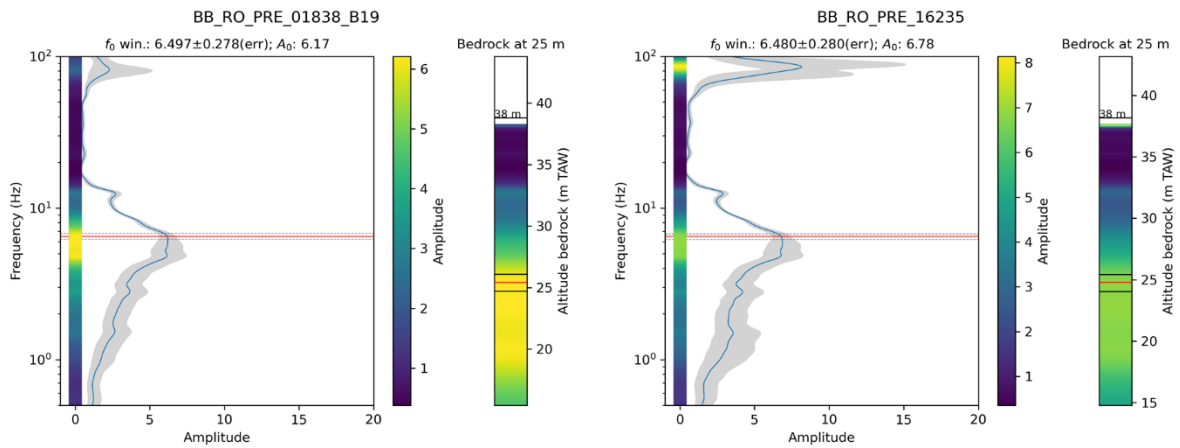
**B14** gaf een sokkeldiepte van **20 m**. De HVSR geeft dit niet weer. Er werd een  $f_0$ -piek gemeten op  $\sim 7.9$  Hz. In het *zandsteengrind, matig grof zandhoudend* (vanaf 25.06 m tot 20m) in B14 treden er meerdere meerdere H/V pieken op, duidend op meerdere contrasten. De  $f_0$ -piek op  $\sim 7.9$  Hz is te hoog om met een sedimentdikte van 20 m te koppelen. Mogelijks kan een 2<sup>e</sup> piek worden gezien op 1.6 Hz, maar door deze onzekerheid werd boring B14 niet mee in rekening gebracht in het opstellen van de  $f_0$ -sokkeldiepte powerlaw relatie.



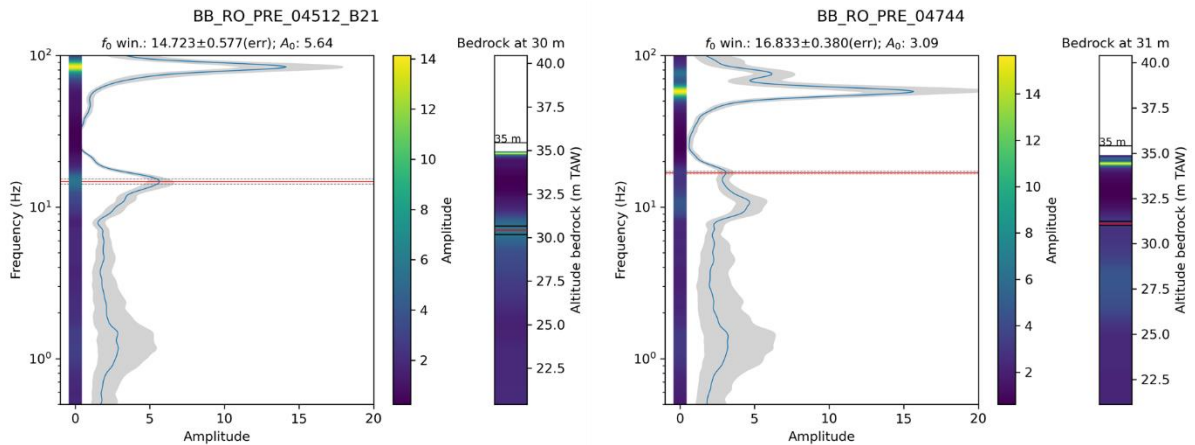
**B16** gaf een sokkeldiepte van **11.6 m** diepte.  $f_0$  waarde is **6.8 Hz**. Voorspelde diepte is 12 m.



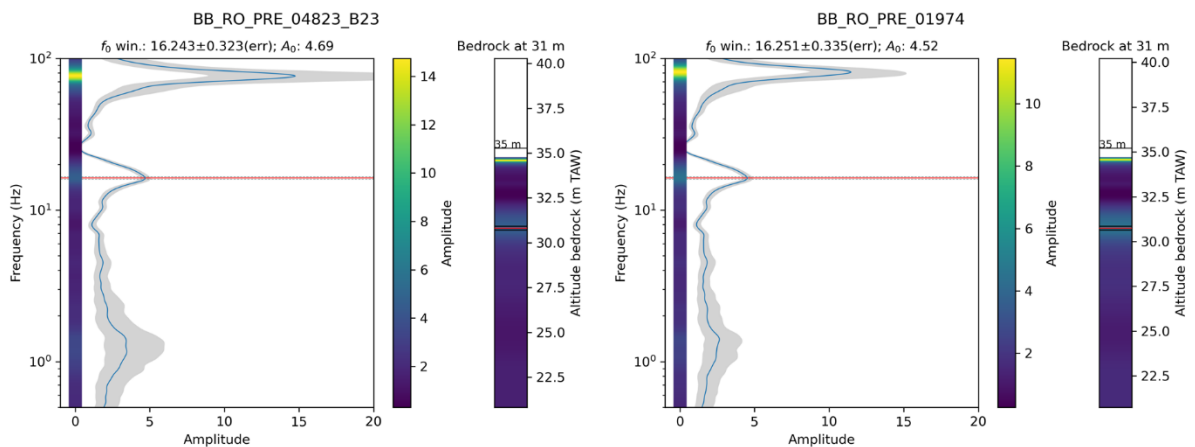
**B19** gaf een sokkeldiepte van **11 m**.  $f_0$  waarde is **6.5 Hz**. Er wordt geen scherpe piek geobserveerd. Voorspelde diepte is 13 m.



**B21** gaf een sokkeldiepte van **6 m**.  $f_0$ -waarde is **14.7 Hz**. Er is een duidelijke  $f_0$ -piek met H/V amplitude van bijna 6. Voorspelde diepte is 5 m.

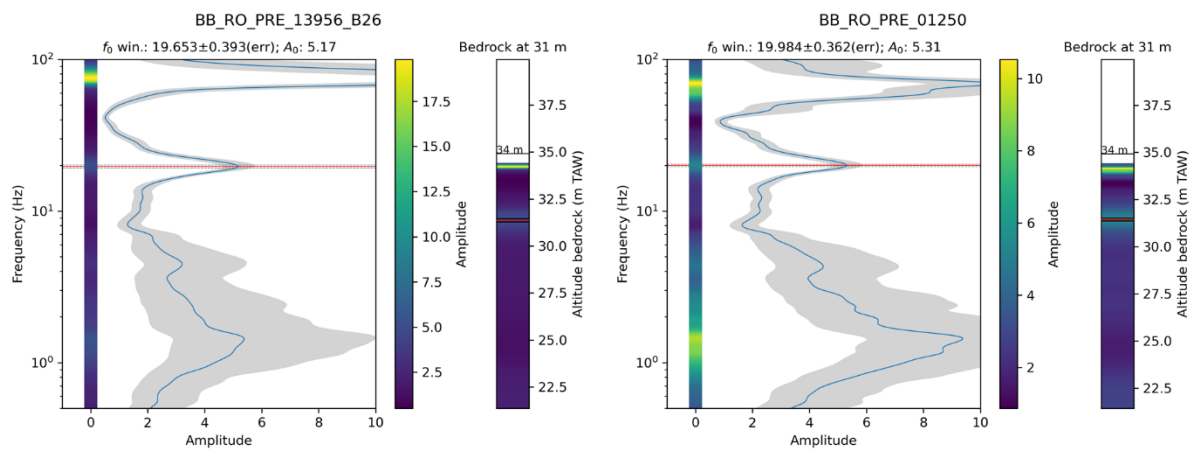


**B23** gaf een sokkeldiepte van **5 m**.  $f_0$  waarde is **16.2 Hz**. Er is een duidelijke  $f_0$  piek met H/V amplitude van bijna 5. Voorspelde diepte is 4 m.





**B26** werd niet geboord.  $f_0$  waarde is **19.6 Hz**, wat duidelijk hoger is dan de waarde in B23. Er is een duidelijke  $f_0$  piek met H/V amplitude van bijna 5. Het sokkelgesteente bevindt zich ondieper dan in B23. Voorspelde diepte is **3 m**. Tussen B23 en B26 zit **P24**, dewelke een sokkeldiepte van 3,80 m gaf.



### 2.3. Powerlaw kalibratie tussen resonantiefrequentie en diepte

Om een relatie op te stellen tussen resonantiefrequentie ( $f_0$ ) en sokkeldiepte ( $h$ ), werden alle boorgegevens en  $f_0$  waarden, bekomen na HVSR-analyse, uitgezet in een log-log diagram. We hanteren dezelfde regressiemethode als in Van Noten *et al.* (2022) waarin een empirische powerlaw relatie voor Brussel werd opgesteld. Deze Brussel relatie werd eveneens op het diagram uitgezet (rode lijn) ter informatie. Het is duidelijk dat deze relatie niet toepasbaar is voor de regio van Halle en een nieuwe relatie moet worden opgesteld die geschikt is voor de Bospoortbrug.

Vanwege de heteroscedasticiteit van de gegevens wijken de  $f_0$  versus diepte gegevens af van een perfecte powerlaw (perfecte rechte lijn in een log-log relatie) relatie. Om de relatie tussen  $f_0$  en  $h$  op te stellen werd een gewone kleinste-kwadraten lineaire regressie van  $f_0$  als functie van  $h$  afgeleid (*least-square linear regression*). De fout (één sigma) op  $f_0$  wordt meegenomen om de regressie te wegen: d.w.z. een kleinere fout resulteert in een hoger gewicht. We hebben de reciproke regressie ( $h$  als functie van  $f_0$ ) niet uitgevoerd omdat dit een andere best passende fit zou opleveren vanwege de verschillende onzekerheid over  $h$ . De beste fit geeft dus een spreiding van frequenties die een ware foutschatting geeft van  $f_0$  ten opzichte van  $h$ . Ook  $R^2$ , de statistische factor die de kwaliteit van de fit verklaart, werd berekend.

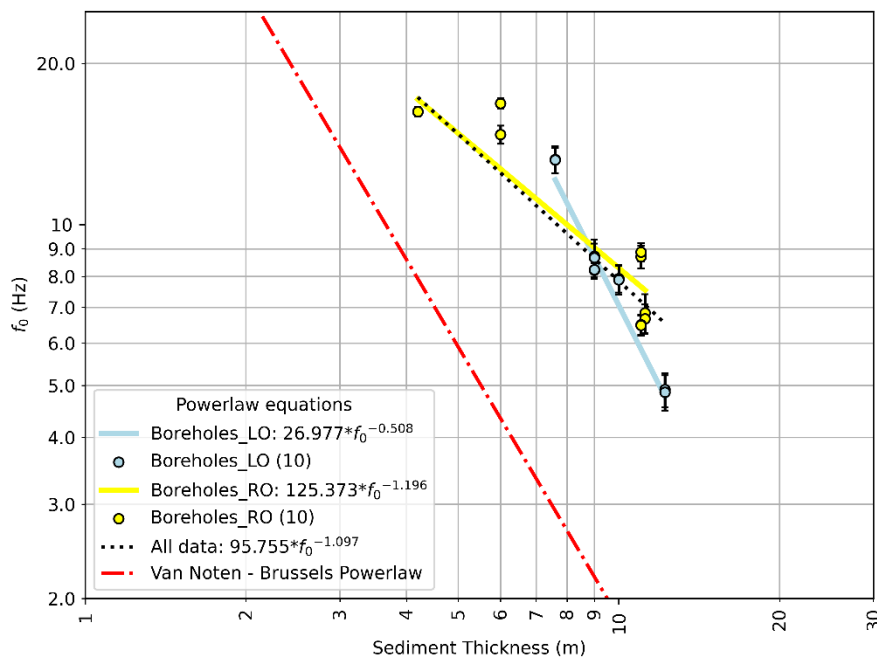
Figuur 9 en de vergelijkingen hieronder geven de resultaten van de verschillende regressies afgeleid uit de gegevens. De gegevens van de linker- en rechteroever werden apart behandeld om zo correct mogelijk de diepte te kunnen inschatten uit de ruismetingen op elke oever. De opgestelde regressies zijn hieronder enkel beperkt in het bereik van de sedimentdiktes aangegeven tussen de verticale haakjes hieronder. Deze formules zullen niet, of maar beperkt, werken voor andere plaatsen waar men de sokkeldiepte wil berekenen met behulp van ruismetingen. Voor de linker- en rechteroever van de Bospoortbrug werden volgende twee empirische powerlaw vergelijkingen tussen  $h$  en  $f_0$  verkregen (met  $h$  in meters en  $f_0$  in Hz):

$$\text{Linkeroever: } h = 26.977 * f_0^{-0.508} \quad (R^2 = 0.94) \quad [7.5 \text{ m} - 12 \text{ m}]$$

$$\text{Rechteroever: } h = 125.373 * f_0^{-1.196} \quad (R^2 = 0.85) \quad [7 \text{ m} - 11,2 \text{ m}]$$

De zwarte stippellijn geeft de beste fit doorheen alle data weer, maar wordt verder niet gebruikt omdat deze relatie de sokkeldiepte op de linkeroever over- en onderschat en op de rechteroever

onderschat. Naar de toekomst toe kan het echter interessant zijn andere boorgaten mee in deze regressie te integreren om tot een algemene  $f_0$  – sokkeldiepte powerlaw relatie te komen voor de regio Halle.



**Figuur 9 :** Kalibratie tussen sedimentdikte en resonantiefrequentie gebaseerd op boorgatinformatie op de Linkeroever (LO, blauw), rechteroever (RO, geel) of beide samen (grijze stippellijn). Rode lijn geeft de algemene kalibratie weer voor de regio Brussel en wijkt duidelijk af van de data rond de Bospoortbrug.

## 2.4. Toepassing van de powerlaw relatie boven boorgaten in Halle

Naast de opgegeven locaties werd ook boven onderstaande boorgaten een extra gefoon geplaatst om de kalibratie tussen  $f_0$  en de diepte te testen verder weg van de Bospoortbrug (zie ook Tabel 1). Deze boringen werden *niet* gebruikt in de kalibratie hierboven (te grote onzekerheid van gegevens, boring te oud, weinig lithologische informatie op DOV, etc) maar worden kort gebruikt om de geschiktheid van de opgestelde powerlaw relaties in de regio Halle te bestuderen. De diepte tot de sokkel van deze boorgaten werd bekomen via DOV. De HVSR-curve werd omgezet naar diepte gebruikmakend van de twee verschillende powerlaw relaties voor de linker- en rechteroever. De boorgaten en hun echte en voorspelde diepte tot de sokkel van het Brabant Massief zijn:

### Omgeving Bospoortbrug:

GEO-03/061-B1: <https://www.dov.vlaanderen.be/data/boring/2003-109452>:

Sokkeldiepte is 4.5 m (LO), voorspelde diepte is 5 m.

GEO-15/110-B3: <https://www.dov.vlaanderen.be/data/boring/2015-150545>:

Sokkeldiepte is 16.5 m (LO), voorspelde diepte is 12 m.

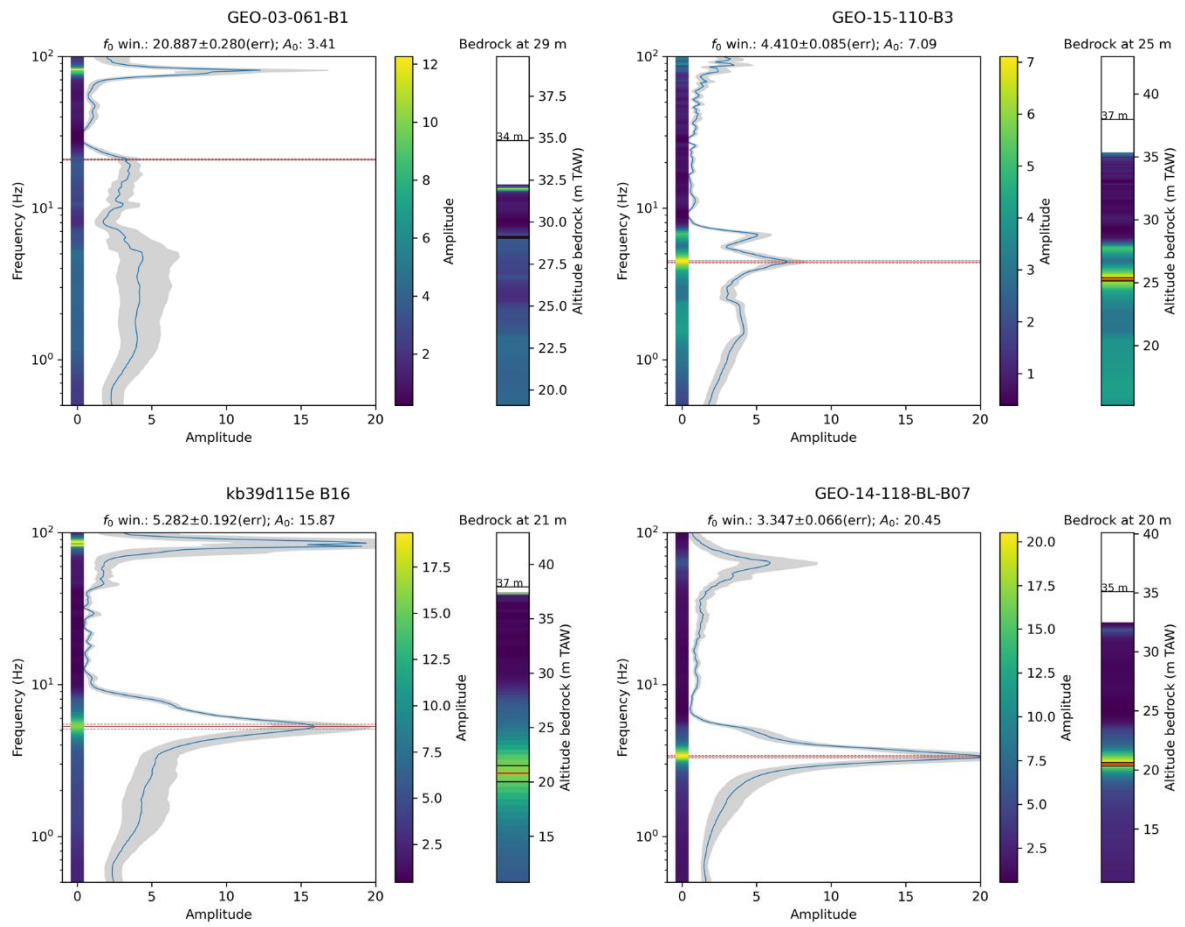
kb39d115e B16: <https://www.dov.vlaanderen.be/data/boring/1894-091184>:

Sokkeldiepte is 9 m (RO), voorspelde diepte is 15 m. Het is duidelijk dat de powerlaw relatie voor de rechteroever niet werkt voor dit boorgat en de diepte overschat. Dit boorgat ligt ten noorden van B27. Een dubbele piek is hier echter afwezig.

### Omgeving De Bres

GEO-14/118-BL-B07: <https://www.dov.vlaanderen.be/data/boring/2015-190366>:

Sokkeldiepte is 15.5 m (LO), voorspelde diepte 15 m. De powerlaw relatie voor de linkeroever lijkt ook hier te werken, maar dit moet worden geverifieerd met extra metingen rond De Bres.



### 3. HVSR-profielen naast de Bospoortbrug

#### 3.1. Meettijden en installatie



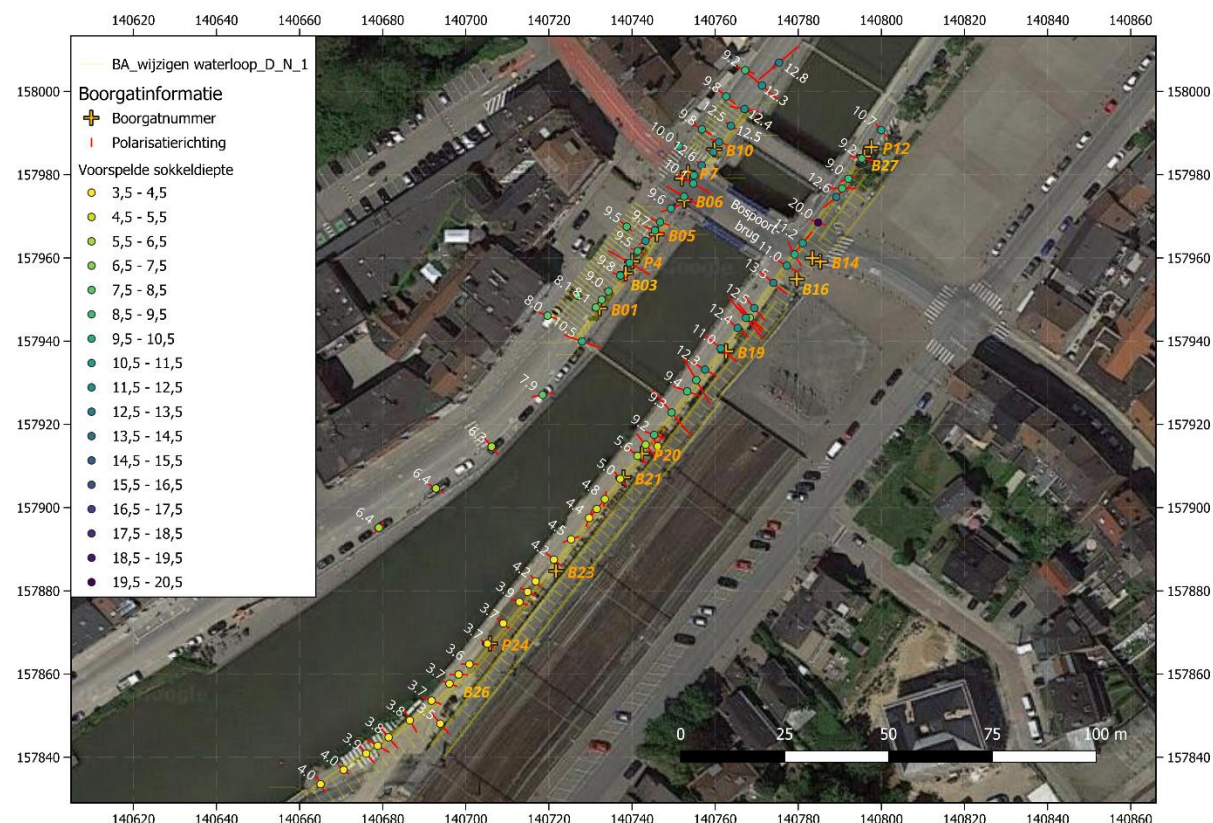
**Figuur 10 :** Overzichtsfoto's van de meetcampagne op de rechteroever.



**Figuur 11 :** Overzichtsfoto's van de meetcampagne op de linkeroever.

Het profiel langsheen de rechteroever start 6 m ten NO van boring B27 en stopt waar de nieuwe kaaimuur al aanwezig is. Elke 6,5 m werd een gefoon geplaatst. SmartSolo 5 Hz IGU-16HR 3C en SmartSolo 5 s IGU-BD3C-5 geofonen werden alternerend door elkaar gebruikt. Aangezien de 5s geofonen gevoeliger instrumenten zijn, werden deze na 3 u verplaatst en op het einde van de dag nog een extra uur tussen de 5 Hz geofonen gezet (zie blauwe sporen in Figuur 13).

Het profiel langsheen de linkeroever start 26 m ten NO van boring B10 en stopt aan boring GEO 03-061-B1 in het ZO. Gefoons werden op een afstand van 3,5 m tot 6m van elkaar geplaatst. Aangezien de meeste interesse naar de Bospoortbrug uitging, werden voornamelijk SmartSolo 5 s IGU-BD3C-5 aan de brug geplaatst. Verder naar het ZO werden enkel SmartSolo 5 Hz IGU-16HR 3C geplaatst. Echter, deze “tripod” geofonen wegen niet erg veel en zijn dus meer gevoelig voor extra trillingen veroorzaakt door het verkeer. Dit is ook te zien in de data waarin lagere frequenties slechter werden gemeten dan met de 5s geofonen. Bijgevolg is de HVSR-data minder goed en zijn de pieken minder duidelijk dan met de 5s geofonen.

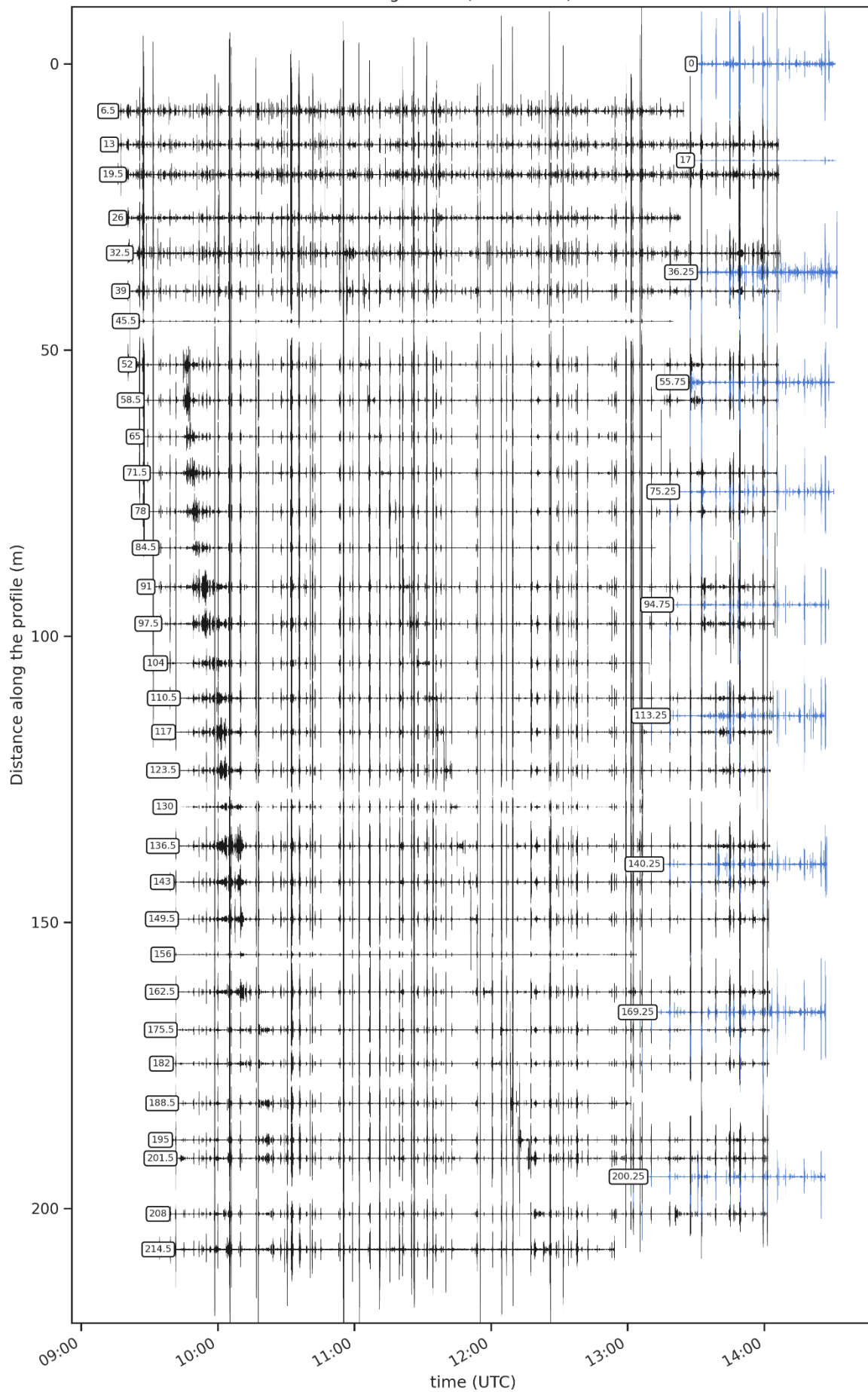


**Figuur 12 :** Overzichtskartaal van de seismische campagne langs de rechteroever van de Bospoortbrug. Diepte tot sokkel afgeleid uit HVSR-metingen is aangeduid. Rode lijnen geven de polariseringsrichting van  $f_0$  weer. Zie bijlagen voor de omzetting van HVSR naar diepte voor elk punt.

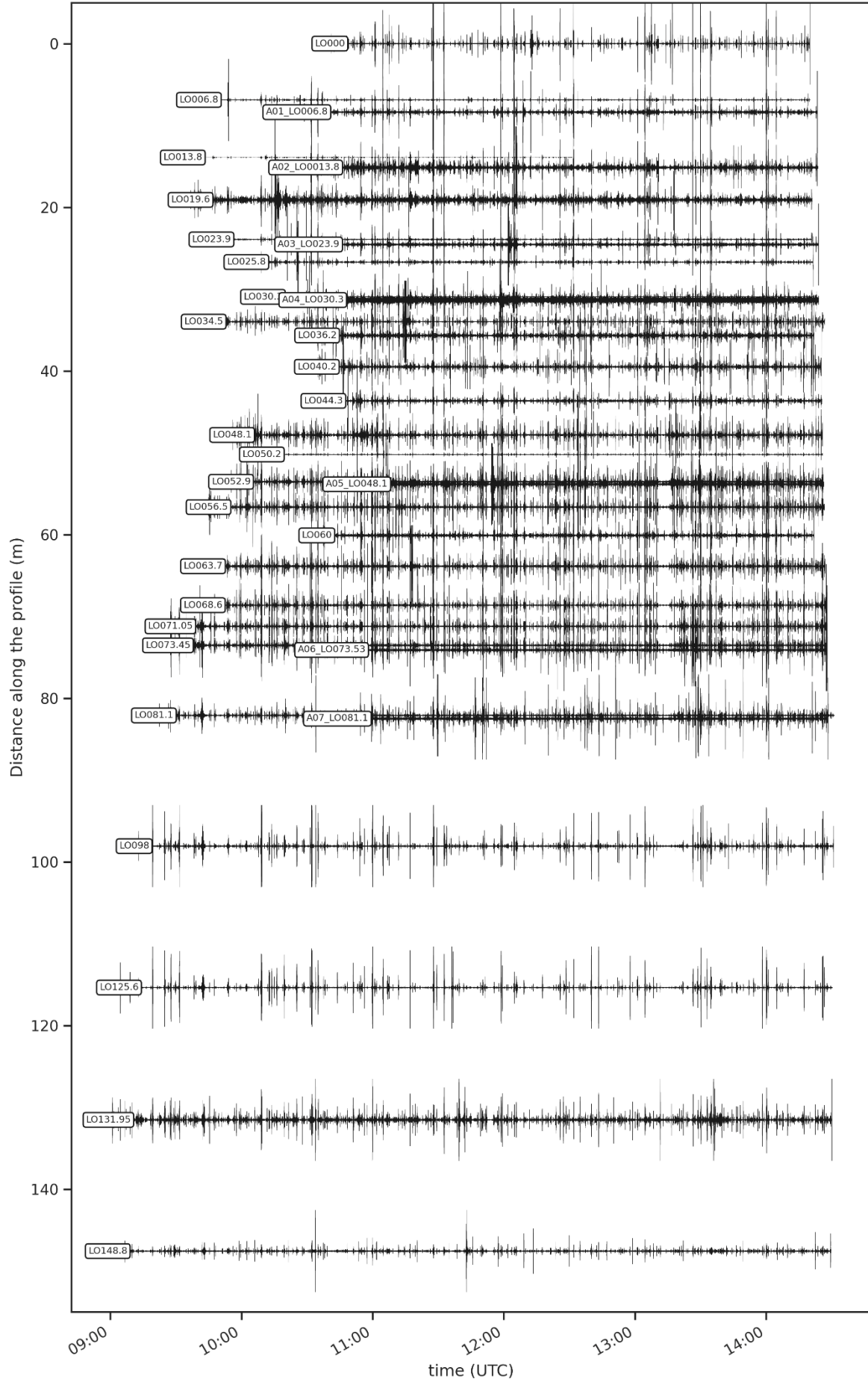
**Figuur 13 (volgende pagina):** Overzicht van de seismische campagne langs de rechteroever van de Bospoortbrug. Installatietijd bedraagt  $\sim 4u$  voor alle sensoren. Blauwe sporen zijn 5s geofonen die 1x werden verplaatst om meer data ( $3u + 1u$ ) te bekomen langsheen het profiel. Data werd gefilterd in het 2 Hz – 25 Hz bereik en daarna genormaliseerd. Korte verticale spikes zijn treinen die werden gemeten tijdens de opname. Het spoor kort voor en na 10u (UTC) is een boot die de Bospoortbrug passeert.

**Figuur 14 (2<sup>e</sup> volgende pagina):** Installatietijd ( $\sim 3.5 - 5u$ ) op 2024-02-26 van sensoren op de linkeroever van de Bospoortbrug. Sensoren zijn gerangschikt van noord naar zuid en hun ID is weergegeven (voor resultaten zie bijlage).

Right bank (2024-02-29)



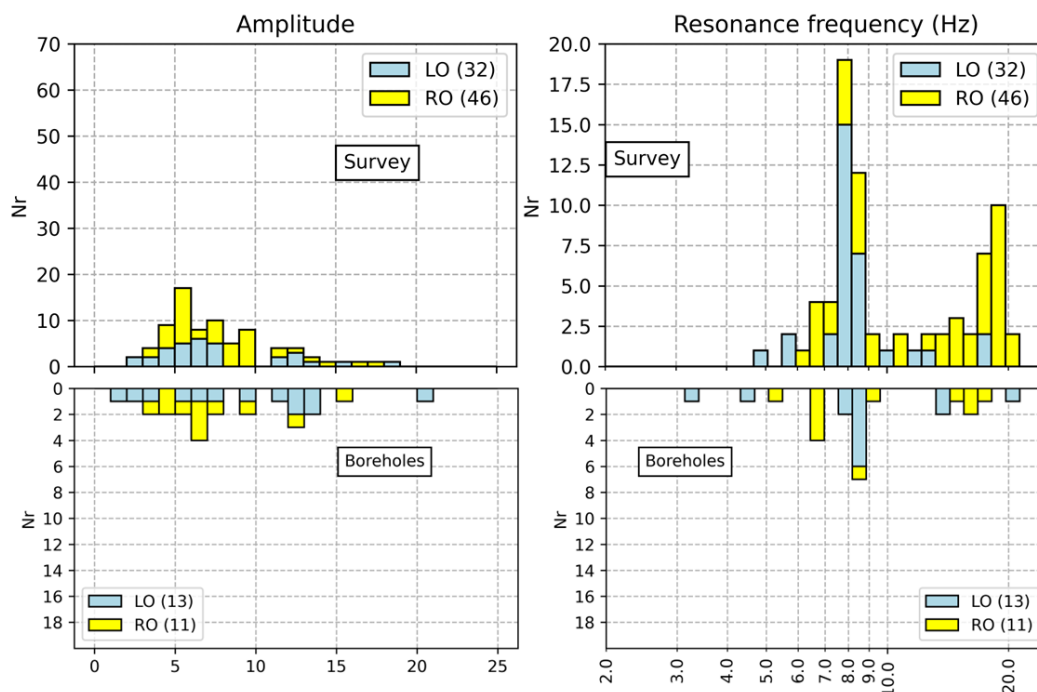
Left bank (2024-02-26)



## 3.2. Resultaten

### 3.3.1. Vergelijking seismische campagne en boorgaten

Onderstaande figuur vergelijkt de resonantiefrequentie en zijn amplitude van de twee campagnes (linker- en rechteroever; *survey*) met de metingen boven de boorgaten (*Boreholes*). Het maken van deze vergelijking is belangrijk om aan te tonen dat de resultaten van de seismische campagne volledig in het bereik van de opgestelde powerlaw relatie vallen.



**Figuur 15 :** Vergelijking van de verdeling tussen resonantiefrequentie en H/V amplitude data voor de boringen en de 2 profielen (*survey*) langs linker- en rechteroever. De profielen vallen volledig binnen de bereik waarin boorgat informatie is verworven.

### 3.3.2. Polariseratie

De resonantiefrequentie rond de Bospoortbrug is sterk gepolariseerd in een NW-ZO richting. In de HVSR-analyse is rekening gehouden deze polarisatie en is telkens de richting geselecteerd waarin  $f_0$  maximaal is. We kunnen 3 hypothesen bedenken waarom deze polarisatie optreedt:

1/ De polarisatie toont de richting waarin het ruisniveau maximaal is en toont mogelijks ruisbronnen aan.

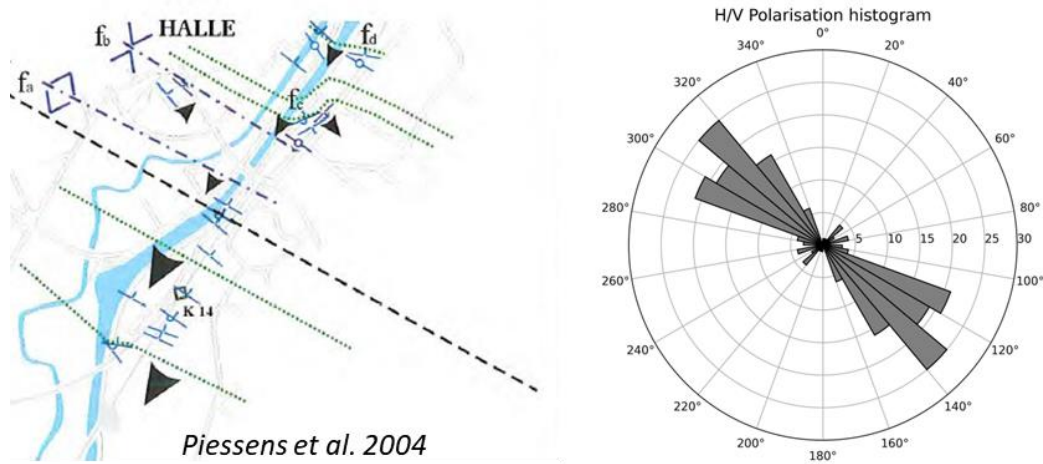
2/ De NW-ZO richting is exact loodrecht op de richting van het kanaal. Dit kan mogelijks de voortplanting van trillingen beïnvloeden en resonantie in een richting loodrecht op het kanaal veroorzaken. Dit fenomeen is bijvoorbeeld ook gekend in de resonantie van kliffen in gebergtes waarbij resonantie loodrecht op een klif optreedt. Echter, prospectiemetingen nabij het park van De Bres toont een polarisatie die schuin op het kanaal staat, wat deze hypothese ontkracht.

3/ Tijdens de bouw van de HST rondom Halle eind jaren '90 (Piessens et al., 2004) werd de Tubize formatie blootgelegd. Deze lagen staan steil rechtop en hun oriëntatie is dominant NW-ZO, wat heel sterk overeenkomt met de  $f_0$  polarisatie. Mogelijks is de H/V-polarisatie dus een structureel geologisch gegeven en kan ze worden gelinkt aan de strekking van de lagen van de Tubize Formatie in



het Brabant Massief. In het frequentiebereik waarin we geïnteresseerd zijn (5-25 Hz) plant de gemeten seismische ruis zich beter voort in een NW-ZO richting, langsheen deze lagen.

Deze hypothesen kunnen enkel worden ontkracht/bevestigd als meer metingen worden uitgevoerd verder weg van het kanaal nabij ontsluitingen waarvan de structurele oriëntatie gekend is.



**Figuur 16 :** Vergelijking tussen de polarisatie van de resonantiefrequentie (info van beide oevers) met de structurele kaart van Piessens et al. (2004) opgemaakt tijdens de bouw van de HST te Halle.

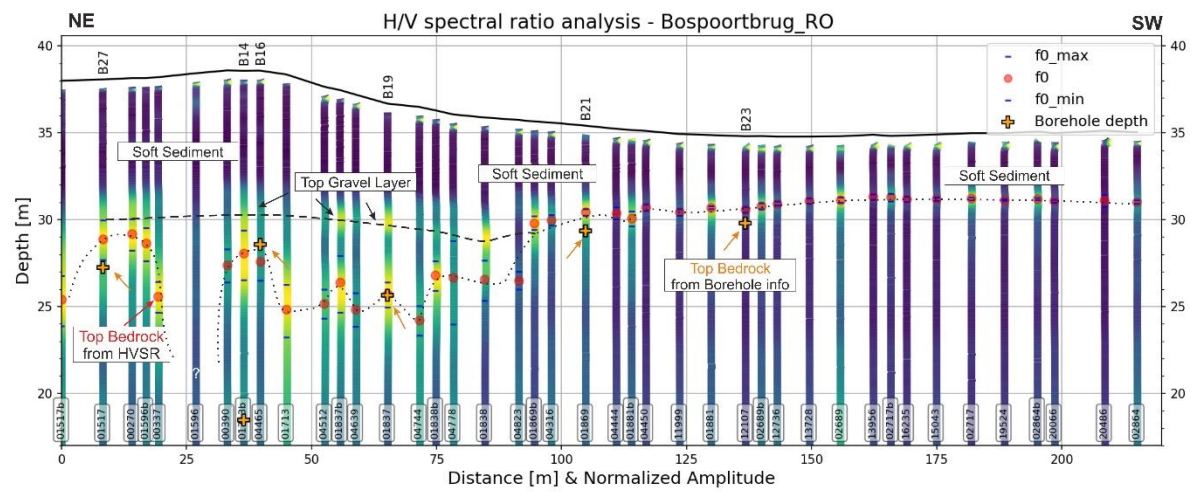
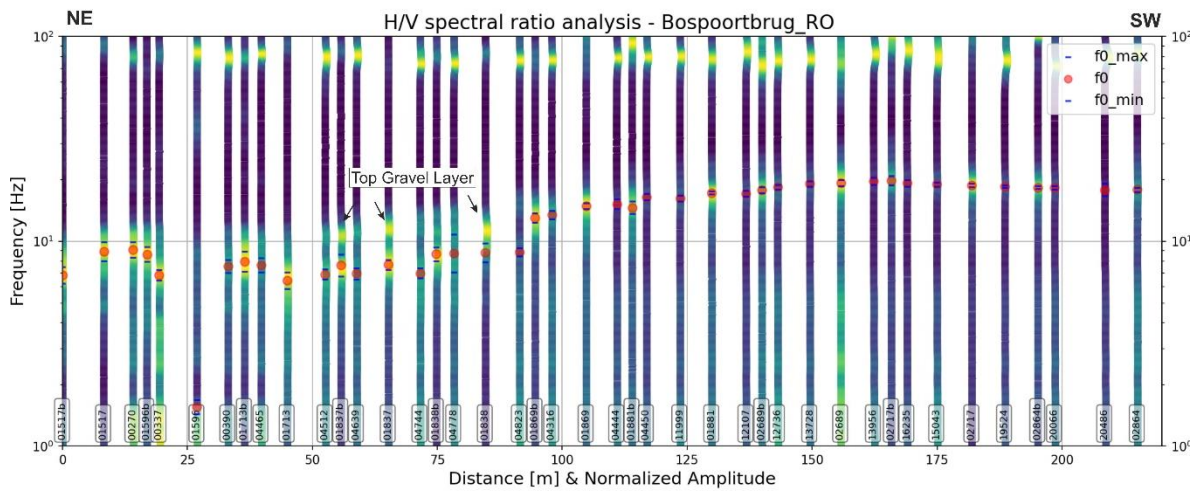
### 3.3.3. Rechteroever

Figuur 17 toont de oplijning van de HVSR-curves (boven) en virtuele voorgaten (onder) langsheen het gemeten profiel. Figuur 19 toont hetzelfde profiel maar hier zijn de HVSR-curves en virtuele boorgaten horizontaal overdreven door de curves te overdrijven naar de H/V amplitude. Deze voorstelling heeft als voordeel dat pieken en dalen in de HVSR-curves duidelijker te zien zijn, maar de locatie van de piek ligt echter niet meer op de juiste locatie langsheen het profiel.

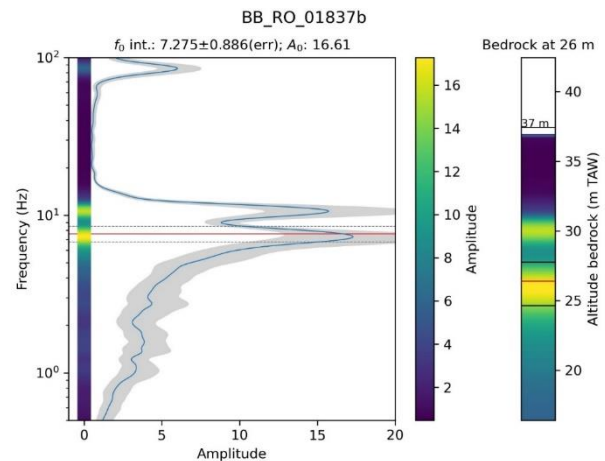
Op het frequentie-afstand profiel verlaagt  $f_0$  van het ZW naar het NO. In het ZW blijft ze schommelen tussen 15 en 20 Hz. Omgezet naar de diepte (m.b.v. de powerlaw relatie voor de rechteroever) geeft dit een sokkeldiepte van 3.5 tot 4 m. Verder naar het noorden verlaagt  $f_0$  naar 7 - 8 Hz aan de Bospoortbrug. Een tiental meter ten noorden van B21 (~85 m op het profiel) begint een complexiteit op te treden. In het frequentiediagram en in de virtuele boorgaten van meetpunten 10 tot 17 (zie

Figuur 18 en HVSR-curves in bijlage 2, folder campagne rechteroever) is duidelijk te zien dat een 2<sup>e</sup> piek optreedt. In B19 wordt melding gemaakt van *zandsteengrind* van 3 m dik van 28,63 tot 25,63 m. In B16 is dit *zandsteengrind* eveneens aanwezig van 33,56 m tot 30,96 m (2,6 m dik). In B14 is dit pakket enorm verdikt en is te vinden van 25,06 m tot 18,46 m (6,6 m dik). In B27 is het *zandsteengrind* maar 1 m dik, maar wordt ook een ondergrondse ruimte ontdekt waardoor de 2<sup>e</sup> piek moeilijk te interpreteren valt. In boring [kb39d115e B16](#), gesitueerd 55 m ten noorden van het profiel, is de top van de sokkel op 9 m diepte en wordt enkel kort melding gemaakt van de aanwezigheid van *zandsteengrind*.

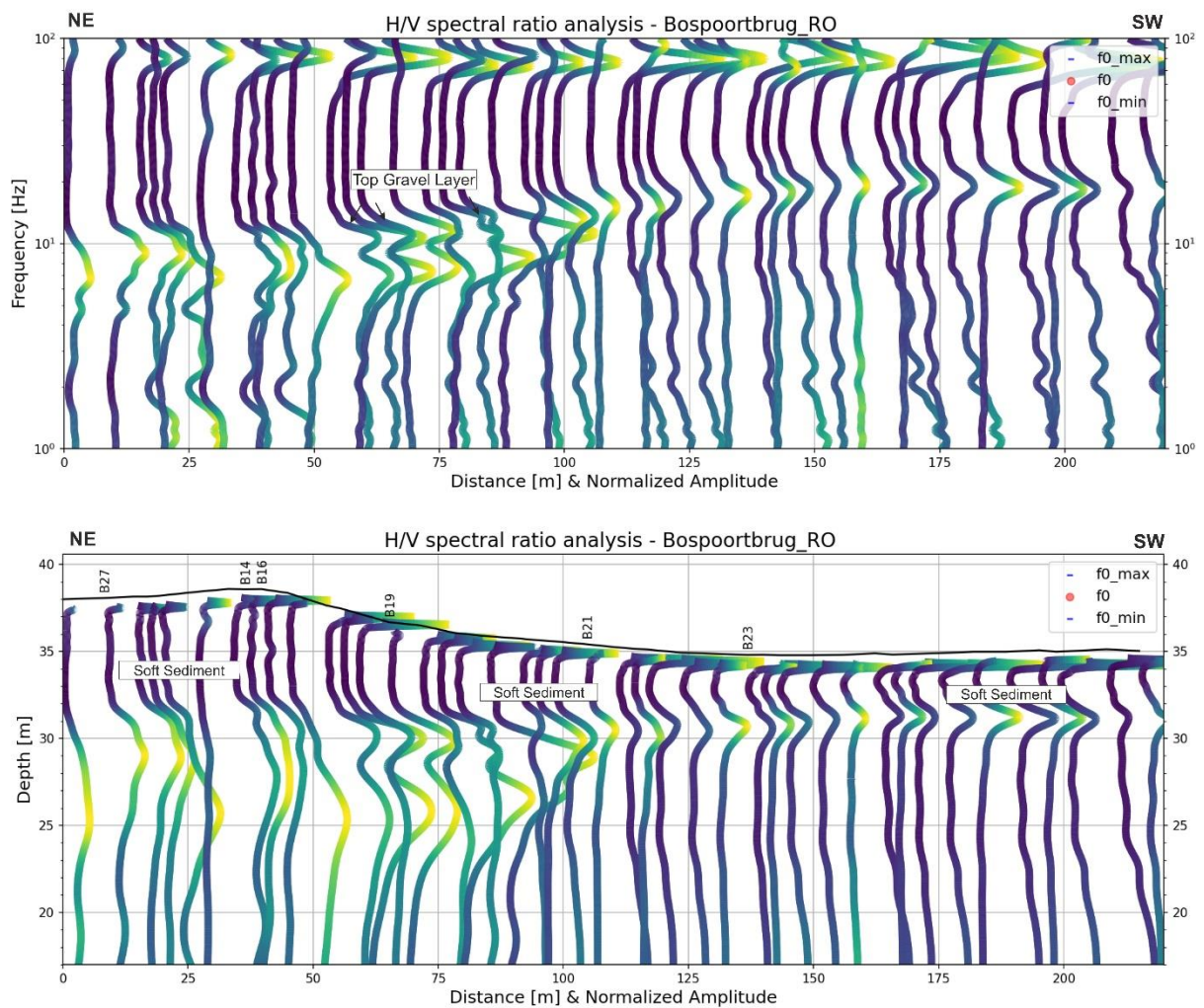
Onze algemene interpretatie is dat de dubbele HVSR-piek waarschijnlijk kan worden gerelateerd aan dit *zandsteengrind* pakket, met de 1<sup>e</sup> piek overeenkomende met de top van het grind, en de 2<sup>e</sup> piek met de top van het sokkelgesteente. Omzetting van de HVSR-curves naar de diepte geeft een sokkeldiepte op 25 m TAW onder de helling naar de bospoortbrug. Omdat de kalibratie enkel werkt voor de sokkeldiepte, kan de diepte tot de top tot dit *zandsteengrind* niet worden voorspeld met HVSR en dienen de boringen en eventueel pressiometertesten worden gebruikt.



**Figuur 17** : **Boven**: Resonantiefrequentie profiel langsheen de rechteroever van de Bospoortbrug van NO naar ZW. **Onder**: Resonantiefrequentie omgezet naar de diepte gebruikmakend van de powerlaw relatie tussen  $f_0$  en sokkeldiepte voor de rechteroever. Elke verticale lijn geeft een virtueel boorgat weer.



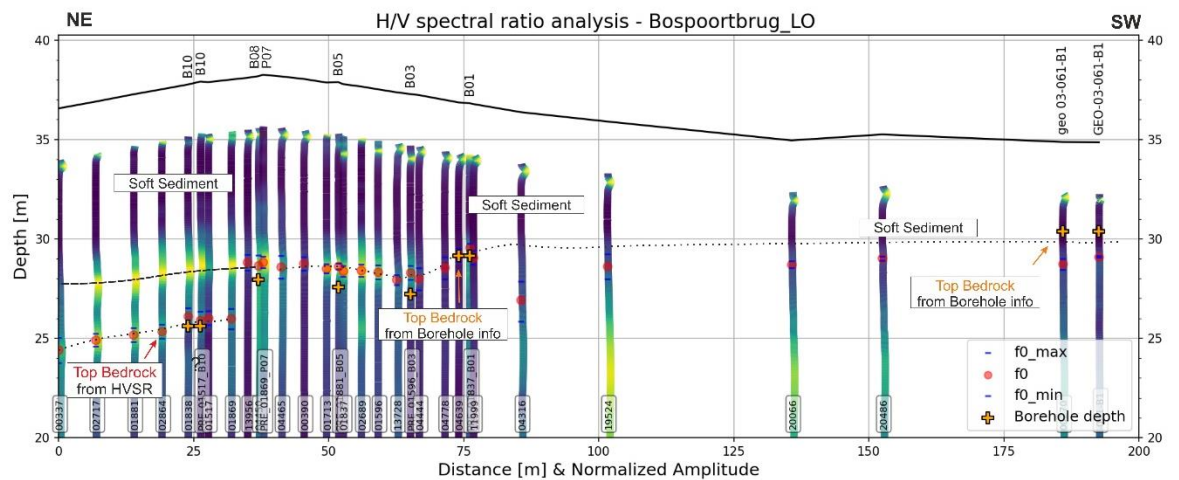
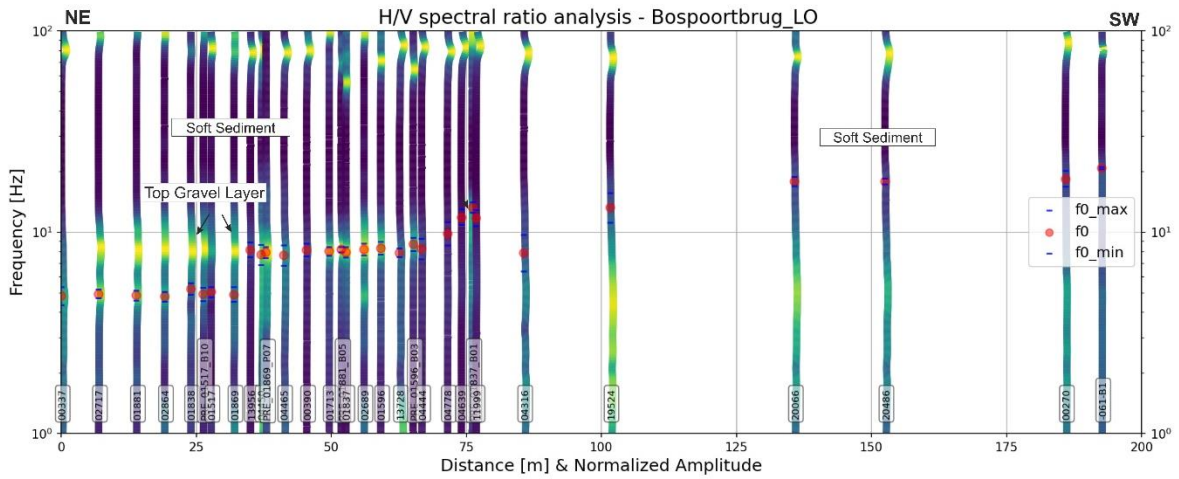
**Figuur 18** : Dubbele piek geobserveerd in meetpunt BB\_RO\_01837b op 55 m van het profiel op de rechteroever.



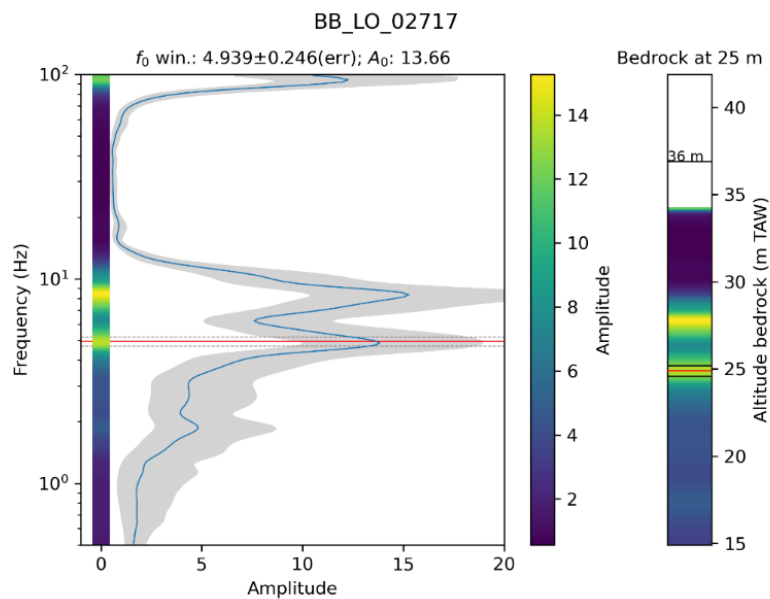
**Figuur 19** : **Boven**: Resonantiefrequentie profiel langsheen de rechteroever van de Bospoortbrug van NO naar ZW met een horizontale overdrijving (x50) van de HVSR-curve. **Onder**: Resonantiefrequentie omgezet naar de diepte gebruikmakend van de powerlaw relatie tussen  $f_0$  en sokkeldiepte voor de rechteroever. Elke verticale lijn geeft een virtueel boorgat weer met een horizontale overdrijving (x50).

### 3.3.4. Linkeroever

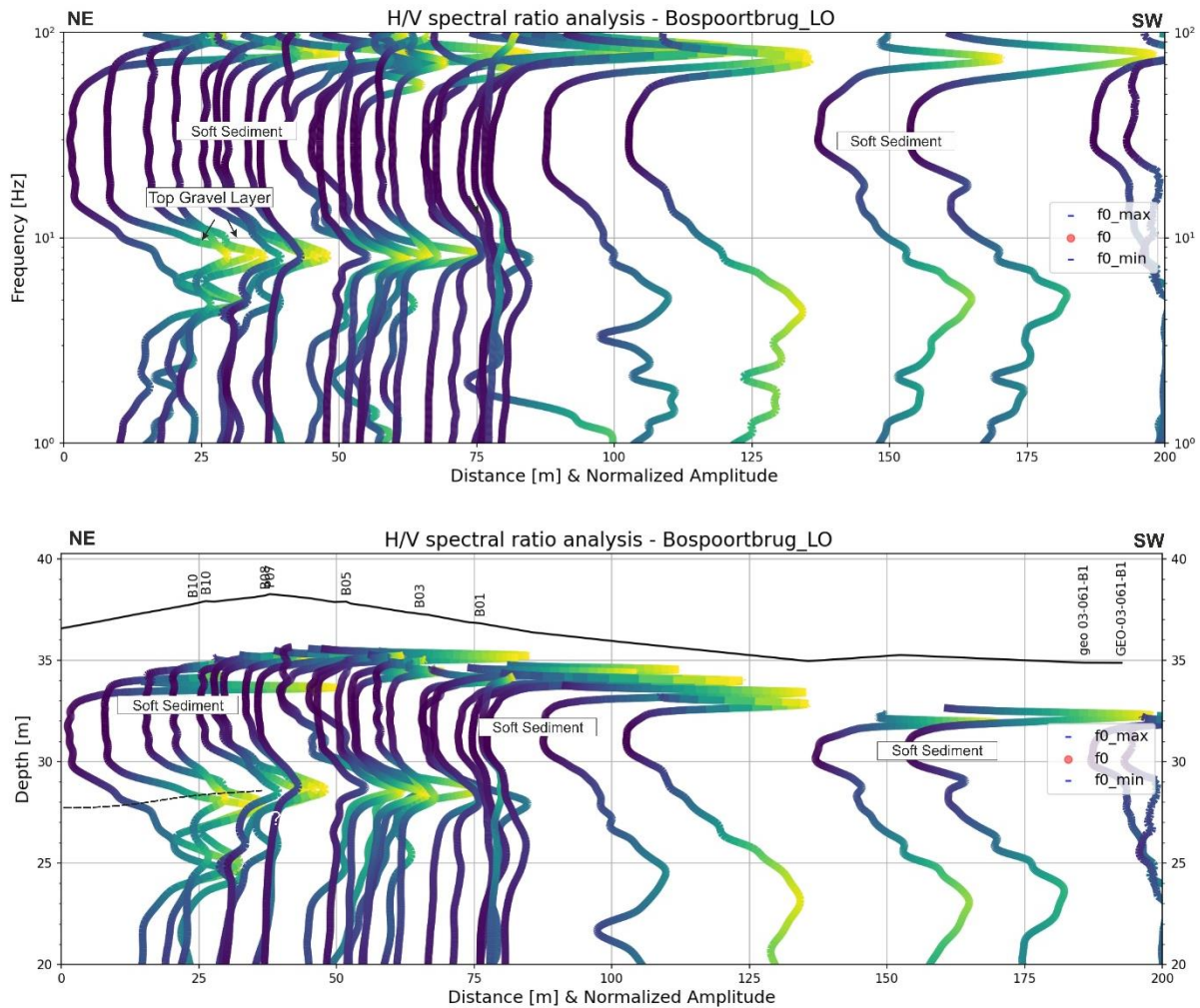
Net als op de rechteroever neemt  $f_0$  van ZW naar NO af, overeenkomend met een toenemende diepte tot de sokkel. In het zuiden van het profiel is de sokkeldiepte een 5-tal meter. Door de verhoging in de topografie door de aanwezigheid van de brug, daalt de  $f_0$ , maar blijft de topografie van de sokkel redelijk constant. Dit blijft zo tot B05 waar de sokkel op 9,8 m diepte wordt aangetroffen. De  $f_0$  – diepte kalibratie is minder goed dan op de rechteroever en de HVSR-curves duiden een iets ondiepere sokkel aan dan de boringen. Deze kalibratie onderschat dus lichtjes de sokkeldiepte. Vanaf B08 wordt opnieuw *zandsteengrind* aangetroffen, zowel dicht tegen de oppervlakte als net boven de sokkel van 30,54 m tot 27,94 m (1.6 m dik). Hoewel een 2<sup>e</sup> piek niet duidelijk is in B08 (dit punt werd gemeten boven P07), beginnen de 2 pieken opnieuw duidelijk te worden vanaf B08 naar het NO toe. In B10 komen vanaf 32,80 m tot aan de sokkel op 26,0 m verschillende lagen grind voor. Zowel in B10 (zie H2.2) als vanaf meting *BB\_LO\_02717\_VB* (Figuur 21) tot *BB\_LO\_01869\_VB* blijft de dubbele piek voorkomen. Gelijkaardig aan de rechteroever is onze interpretatie opnieuw dat *zandsteengrind* hier voorkomt van ~28 m tot ~25m TAW. Zoals gezegd bij de rechteroever werkt de kalibratie niet om de top van het *zandsteengrind* te berekenen uit de HVSR-analyse en dienen de boringen hiervoor worden gebruikt.



**Figuur 20** : *Boven*: Resonantiefrequentie profiel langsheen de linkeroever van de Bospoortbrug van NO naar ZW. *Onder*: Resonantiefrequentie omgezet naar de diepte gebruikmakend van de powerlaw relatie tussen  $f_0$  en sokkeldiepte voor de linkeroever. Elke verticale lijn geeft een virtueel boorgat weer.



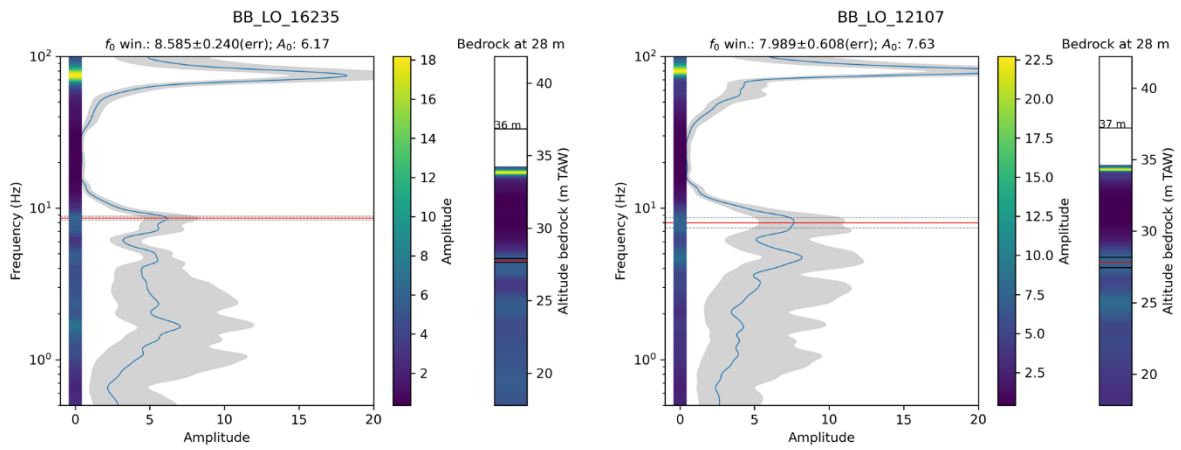
**Figuur 21** : Dubbele piek geobserveerd in meetpunt BB\_LO\_02717 op 6,7 m van het profiel op de linkeroever.



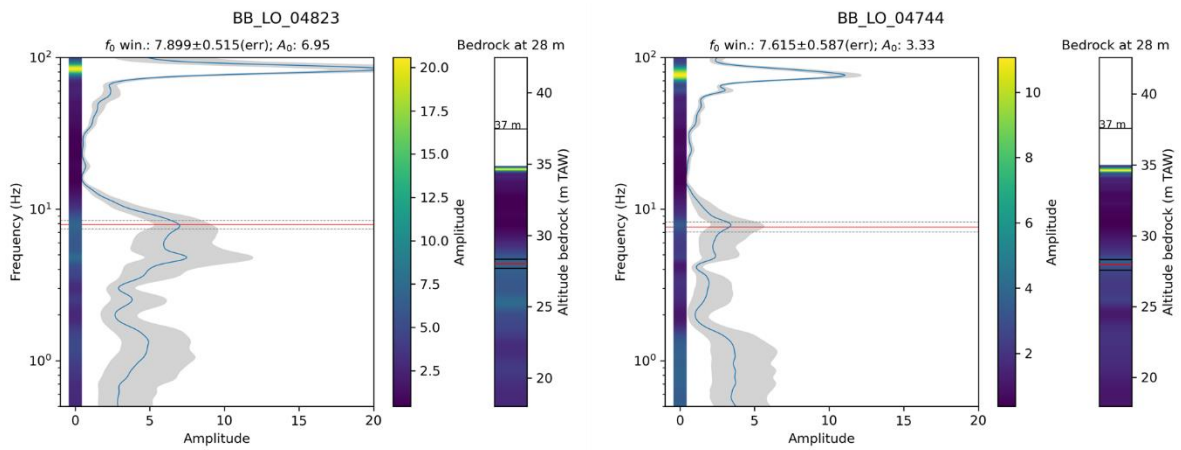
**Figuur 22** : **Boven**: Resonantiefrequentie profiel langsheen de linkeroever van de Bospoortbrug van NO naar ZW met een horizontale overdrijving (x50) van de HVSR-curve. **Onder**: Resonantiefrequentie omgezet naar de diepte gebruikmakend van de powerlaw relatie tussen  $f_0$  en sokkeldiepte voor de linkeroever. Elke verticale lijn geeft een virtueel boorgat weer met een horizontale overdrijving (x50).

### 3.3.5. “Anker”-metingen

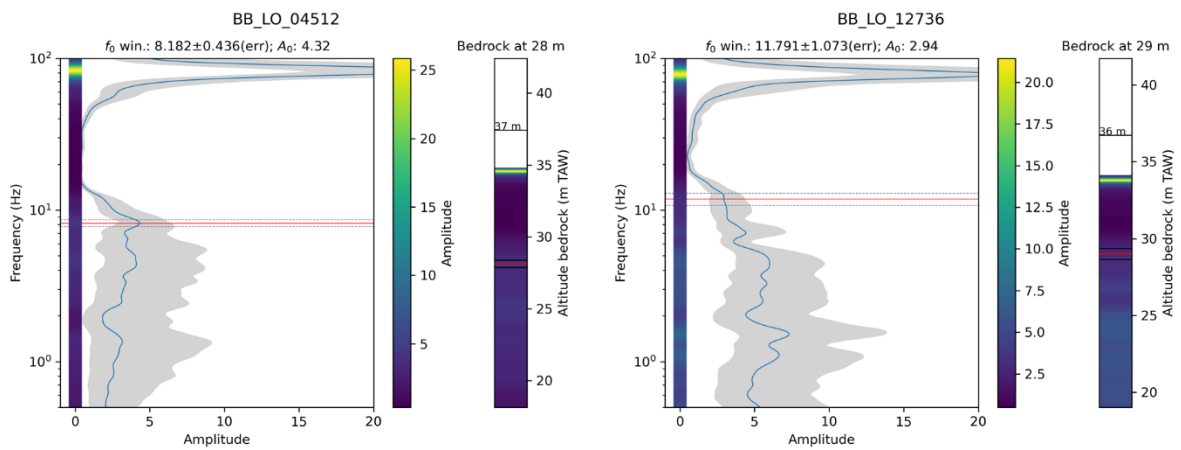
Langs de linkeroever werden ook enkele geofonen geplaatst op het voetpad aan de Suikerkaai en de Willamekaai. Ter hoogte van dit voetpad zullen verankeringen worden geplaatst (zie metingen A01 – A07 in bijlage 1). Omdat hier opnieuw SmartSolo 5 Hz IGU-16HR 3C geofonen op driepikkels werden gebruikt zijn de metingen in het lagere frequentiebereik moeilijker te interpreteren. In metingen BB\_LO\_16235, BB\_LO\_12107 en BB\_LO\_04823, dewelke zich recht over boring B10 bevond, is ook een dubbele piek aanwezig, maar door de grote onzekerheid op deze meting (zie grijze zone in figuren hieronder) is enige voorzichtigheid geboden. Ook de andere metingen tonen niet echt duidelijk een  $f_0$  piek. Desondanks kan toch het HVSR-dal in de figuren hieronder worden geïnterpreteerd als zachte sedimenten.



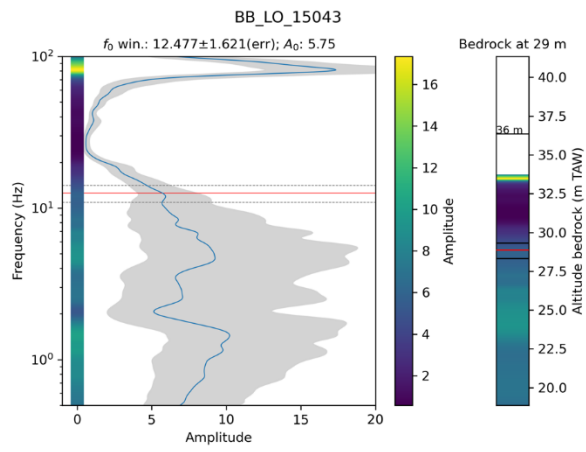
**Figuur 23** : “Anker”-metingen BB\_LO\_1623 (A01) en BB\_LO\_12107 (A02) dewelke zich over metingen ID L0006.8 en L0013.8 bevonden.



**Figuur 24** : “Anker”-metingen BB\_LO\_04823 (A03) en BB\_LO\_04744 (A04) dewelke zich over metingen L0023.9 (B10) en L0030.3 bevonden.



**Figuur 25** : “Anker”-metingen BB\_LO\_04512 (A05) en BB\_LO\_12736 (A06) dewelke zich over metingen L0048.1 (B05) en L0073.53 bevonden.



**Figuur 26** : “Anker”-metingen BB\_LO\_15043 (A06) dewelke zich over meting LO081.1 bevond.

## 4. Interpretatie en conclusies

### 4.1. HVSR resultaten

Deze studie toont aan dat de toepassing van Horizontale-over-Vertical Spectraal Ratio (HVSR) analyse van seismische ruis werkt in een stedelijk gebied. Meettijden van 3 tot 4 uur waren zeker voldoende om een stabiele en statistische HVSR-curve te krijgen. Voornamelijk de SmartSolo 5 s IGU-BD3C-5 geofonen werken goed en geven ook een duidelijk signaal in het lagere frequentiebereik (< 4 Hz). Reden hiertoe is dat deze toestellen meer wegen en hun basis breder is dan de SmartSolo 5 Hz IGU-16HR-3C waardoor ze stabielere metingen in een lager frequentiebereik. Een toekomstige oplossing om toch ook de 5 Hz geofonen te kunnen blijven gebruiken in drukke stadsomgeving is om extra gewicht op de geofonen te leggen (bv. zandzakjes) om zo de koppeling met de ondergrond te verbeteren.

Zowel voor de linker- als rechteroever werd een aparte empirische formule opgesteld om resonantiefrequentie ( $f_0$ ) om te zetten naar sokkeldiepte ( $h$ ). Deze formules zijn maar beperkt bruikbaar rondom de Bospoortbrug en meer metingen dienen te gebeuren in de regio Halle om een meer algemene formule te kunnen gebruiken. Vooral de variabiliteit van de diepte waarop het sokkelgesteente werd aangetroffen verstoort de opmaak van een algemene formule.

Voor elke seismische ruismeting werd de bijhorende HVSR-curve omgezet naar een **virtueel boorgat**. De figuren en geëxporteerde data van deze virtuele boorgaten zijn beschikbaar in de bijlagen. Wanneer deze resultaten verder worden gebruikt in een vergelijking met de boorgaten en pressiometer resultaten raden we aan om **meer gewicht** te geven aan de resultaten bekomen met de **SmartSolo 5 s IGU-BD3C-5** geofonen. In bijlage 3 is aangeduid welk toestel werd gebruikt bij elke meting.

De HVSR-polarisatie geeft interessante resultaten en toont dat  $f_0$  sterk gepolariseerd is rond de Bospoortbrug in een NW-ZO richting. Nieuwe metingen nabij gekende ontsluitingen zou uitsluitel kunnen geven of deze polarisatie kan worden gelinkt met de NW-ZO structurele oriëntatie van de steil- tot rechtopstaande gesteentelagen van de Tubize Formatie, zoals geobserveerd bij het station van Halle, of dat de polarisatie wordt veroorzaakt door een resonantie loodrecht op het kanaalbekken. Ongeacht de oorzaak, werd de polarisatierichting waarin de H/V amplitude maximaal is toegepast op elke meting om een duidelijkere HVSR-curve en  $f_0$ -waarde te krijgen.

### 4.2. Interpretatie

De boringen (B01-B23) die gebruikt werden in dit rapport werden opgeleverd in een grafische wijze. Na een korte vergelijking met beschikbare foto's en tijdens een discussie met de opdrachtgever bleek dat de term *grind of zandsteengrind* in de boringen (bv. in B08, B10, B14, B19) niet geheel overeenkomt met de foto's en een bijkomende gedetailleerde beschrijving nodig is. In de interpretatie hieronder hanteren we de term *een competent pakket* om dit *grind of zandsteengrind* te benoemen aangezien dit pakket duidelijk te zien is met HVSR. Dit contrast resulteert in 2 HVSR pieken: één piek te wijten aan het contact tussen zand- en leemsedimenten en het competent pakket, en een 2<sup>e</sup> piek veroorzaakt tussen het contrast tussen het competent pakket en de onderliggende sokkel. Boring B14 werd niet mee in rekening gebracht in de interpretatie van de HVSR-profielen door de onzekerheid in de boorbeschrijving.

Ten ZO van de Bospoortbrug is zowel op de linker- als rechteroever het afbraak/erosie vlak van het Brabant Massief vrij horizontaal. Naar de Bospoortbrug toe wordt er direct boven het sokkelgesteente van het Brabant Massief een competent pakket aangetroffen dat zeer sterk



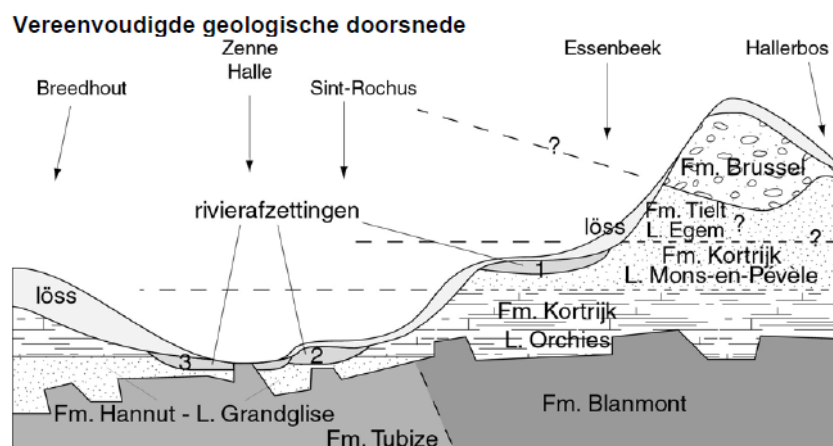
variërend is in dikte. De HVSR-resultaten tonen bovendien dat dit competent pakket langsheen beide oevers waarschijnlijk met elkaar worden kan verbonden. Zowel het afbraakvlak van het Brabant Massief in het ZO als de top van het competent pakket lijnen vrij goed op en lopen in elkaar door. We vragen ons af of dit door een periode van peneplanatie (het steeds vlakker worden van een landschap tengevolge van erosie) kan zijn veroorzaakt tijdens de ijstijden?

### 4.3. Kwartairgeologie

In *recente* Kwartair glaciële (ijstijden) perioden heeft de Zenne een brede paleovallei uitgeschuurd, enerzijds door de erosieverhoging door zeespiegeldaling, en anderzijds door de opheffing van het Brabant Massief. Dit uitschuren ging gepaard met sterke verwerking van de onderliggende sokkel én de afzetting van rivierafzettingen waarvan zijn samenstelling sterk gerelateerd is met de samenstelling van het gesteente van het Brabant Massief (Houthuys, 2010). Ook ter hoogte van het station van Halle werden deze zeer permeabele rivierterrassen (terras 2 op Figuur 27) aangetroffen. Dit terras 2 zorgt voor een bijna permanente aanvoer van zeer ijzerrijk grondwater.

Om het competent pakket dat werd aangetroffen in de HVSR-profielen en in de boringen verder te karakteriseren, zouden de stalen aan een Kwartair geoloog moeten worden voorgelegd. Op de kwartairgeologische kaart van Brussel-Nijvel (kaartblad 31-39, (Schroyen et al., 2003) komt ter hoogte van de Bospoortbrug slechts één profieltype voor: type 6 (Vroeg Weichseliaan fluviatiel grind en zand F2). Dit grind bestaat uit gerolde en gebroken silexen, herwerkte sokkelgesteenten (fyllades, kwartsieten, arkoses), en herwerkte Tertiaire zandstenen. Silex werd veelal in alle boringen rondom de Bospoortbrug aangetroffen. De sedimenten in de Zennevallei zijn als volgt verder beschreven: *...onderste afzettingen in de Zennevallei gevormd zijn door een vlechtend riviersysteem, waarin geul- en bankafzettingen dominant zijn. Grofkorrelige fluviatiele afzettingen werden vooral gedetermineerd over de hele huidige vlakte van de Zennevallei en in de zijrivieren van de Zenne...* **Ofwel** kan het competent pakket dat onder de Bospoortbrug werd aangetroffen in de HVSR-profielen worden gerelateerd met een **oude Weichseliaan (Kwartair) terras** of meander van de paleo-Zenne, **ofwel** kan het competent pakket kan een **zeer sterk verweerd deel van de sokkel** aangeven. Een verdere studie van de boringen kan van belang zijn voor verdere Kwartairgeologische inzichten in dit gebied.

In de berm van de 'Zuidbrug Halle' werd tijdens een geologische studie van een tijdelijke ontsluiting (Bogemans et al., 2019) een jonger grindpakket aangetroffen volgens de kwartairgeologische kaart (Type 5 Pre-Saaliaan terrasgrind & -zand en diachroon leem en type 18, Laat-Weichseliaan eolisch leem en diachroon grind & zand).



**Figuur 27** : Sterk vereenvoudigd geologisch profiel doorheen de Zenne vallei (naar Houthuys (Houthuys, 2010). Het grindpakket aangetroffen in deze studie komt overeen met de Kwartaire rivierafzettingen aangeduid in deze figuur.

## Bijlagen

**Bijlage 1:** *HVSR\_database\_Bospoortbrug.csv*: HVSR-database met alle meetlocaties en HVSR-resultaten van de metingen boven boorgaten en meetpunten. Volgende kolommen en data zijn beschikbaar:

Column	Explanation
Comment	Location of measurement
Root	Type of analysis
Project	Province of the project
Operator	Operators in the seismic campaign
Year	Year of installation
Date	Date of installation
Region	Region of the project
Instrument	Seismometer type used
Raw_Data	Raw seismometer recording files. Available upon request.
Data_format	Data format
ID	Id of measurement: either a borehole, distance from a borehole, profile distance, etc...
Node_Nr	Serial number of the seismometer used
Lat	Latitude WGS84
Lon	Longitude WGS84
Z	Altitude TAW - from Digital Terrain Model - Digitaal Hoogtemodel Vlaanderen II
EPSG	EPSG of local coordinates
X	Northing
Y	Easting
Borehole_Nr	Boreholenumber if present below the HVSR measurement
Bedrock_depth	Depth to largest contrast (Brabant Massif here)
Bedrock_unit	Encountered bedrock unit
Analysed	Analysed HVSR file (.hv extension, available upon request)
f0_min	Minimum f0: f0_win/stddev (from GEOPSY)
f0_win	Average f0 computed by computing an average HV curve out of all individuele f0 windows (60s) (from GEOPSY)
error	Standard deviation on f0 (from GEOPSY)
f0_max	Maximum f0: f0_win.stddev (from GEOPSY)
A0	Maximum H/V amplitude (from GEOPSY)
nw	Number of used windows (60s) to compute f0 (from GEOPSY)
predicted	Predicted bedrock depth by applying a powerlaw relation on f0_win
A_max	Maximum H/V amplitude at f0 deduced from the HVSR polarisation analysis in GEOPSY
max_freq	f0 at A_max
max_Azi	Azimuth at which f0 is maximal
A_min	Minimum H/V amplitude at f0 deduced from the HVSR polarisation analysis in GEOPSY
min_freq	f0 at A_min
min_Azi	Azimuth at which f0 is minimal

**Bijlagen 2 en 3:** Virtuele boorgaten afgeleid uit seismische ruismetingen boven proefboorgaten en seismische ruis campagnes op de linkeroever én rechteroever van de Bospoortbrug te Halle. Alle virtuele boorgaten werden opgeleverd. De corresponderende data werden opgeleverd in een **.csv formaat** waarbij de **freq, h, A, A\_min, A\_max** kolommen respectievelijk de frequentie, diepte (m TAW), H/V amplitude, minimum H/V amplitude en maximum amplitude weergeven van elke ruismeting rondom de Bospoortbrug. **h** werd berekend door de linker- en rechteroever powerlaw relaties toe te passen op **freq**. Deze data kunnen worden uitgezet naast de boorgaten en pressiometer resultaten.

Virtuele boorgaten werden berekend met volgende python module:

Van Noten, K., Lecocq, T., Power, B., 2020. HVSR to Virtual Borehole.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.4276310>

**Bijlagen 4 en 5:** Polarisatiefiguren afgeleid uit seismische ruismetingen boven proefboorgaten en seismische ruis campagnes op de linkeroever én rechteroever van de Bospoortbrug te Halle. Van elke meting werd de polarisatie geplot in een polair diagram om de richting te tonen waarin de resonantiefrequentie minimaal en maximaal is. Deze waarden zijn eveneens ook beschikbaar in bijlage 1.

**Bijlage 6:** Google Earth .kml files met HVSR-profielen geprojecteerd in een Google Earth omgeving. Projecties werden opgemaakt met behulp van het Geolokit software programma (Triantafyllou et al., 2017).

## Referenties

- Bard, P., Duval, A., Koehler, A., Rao, S., 2004. SESAME: GUIDELINES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE H / V SPECTRAL RATIO TECHNIQUE ON AMBIENT VIBRATIONS MEASUREMENTS , PROCESSING AND INTERPRETATION (No. SESAME European research project WP12 – Deliverable D23.12), European Commission – Research General Directorate Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME.
- Bogemans, F., Devleeschouwer, X., Meyvis, B., Walstra, J., 2019. Documentering van de tijdelijke ontsluiting ‘Zuidbrug Halle.’ Belgische Geologische Dienst.
- Houthuys, R., 2010. Een geologische beschrijving van Halle 1–15.
- Krischer, L., Megies, T., Barsch, R., Beyreuther, M., Lecocq, T., Caudron, C., Wassermann, J., 2015. ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem. *Comput. Sci. Discov.* 8, 014003. <https://doi.org/10.1088/1749-4699/8/1/014003>
- Nakamura, Y., 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor of the Ground Surface. *QR RTRI* 30, 25–33.
- Piessens, K., De Vos, W., Herbosch, A., Debacker, T.N., Verniers, J., 2004. Lithostratigraphy and geological structure of the Cambrian rocks at Halle-Lembeek (zenne Valley, Belgium), Belgische Geologische Dienst, Professional Paper 300.
- Schroyen, K., Buffel, P., Matthijs, J., 2003. Toelichting bij de Quartairgeologische kaart van België: kaartblad 31-39: Brussel Nijvel.
- Triantafyllou, A., Watlet, A., Bastin, C., 2017. Geolokit: An interactive tool for visualising and exploring geoscientific data in Google Earth. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 62, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.05.011>
- Van Noten, K., Lecocq, T., Goffin, C., Meyvis, B., Molron, J., Debacker, T.N., Devleeschouwer, X., 2022. Brussels’ bedrock paleorelief from borehole-controlled power laws linking polarised H/V resonance frequencies and sediment thickness. *J. Seismol.* 26, 35–55. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10039-8>
- Van Noten, K., Lecocq, T., Power, B., 2020. HVSR to Virtual Borehole. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4276310>
- Wathelet, M., Chatelain, J.-L., Cornou, C., Giulio, G.D., Guillier, B., Ohrnberger, M., Savvaidis, A., 2020. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. *Seismol. Res. Lett.* 91, 1878–1889. <https://doi.org/10.1785/0220190360>