

Expertise rapport:

Bepaling van de sokkeldiepte van het Brabant Massief met behulp van seismische ruismetingen ter hoogte van spoorwegbruggen L94 en L96 te Halle



Koen Van Noten, Raphael De Plaen

Koninklijke Sterrenwacht van België, Ringlaan 3, 1180 Brussel

ROB-DVW 2025-01

14 juli 2025

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	SWECO Havenkant 8, 3000 Leuven  Vertegenwoordigd door Leen Laeremans
---	--

Referentie:

Van Noten, K., De Plaen, R. 2025. Bepaling van de sokkeldiepte van het Brabant Massief met behulp van seismische ruismetingen ter hoogte van spoorwegbruggen L94 en L96 te Halle. Expertiserapport ROB-DVW 2025-01. Koninklijke Sterrenwacht van België, Ukkel. 85 p. <https://doi.org/10.24414/e551-9r40>

Inhoudstafel

Inhoudstafel	1
1. Inleiding.....	1
1.1 Opdracht	1
1.2. Overzicht van de uit te voeren taken	2
1.3. Methode: H/V spectraal ratio (HVSr) van seismische ruis	3
1.4. Instrumenten	2
1.5. Maaiveldpeil.....	3
2. Meetcampagne	4
2.1 Uitvoering.....	4
2.2 Factoren die HVSr beïnvloeden	5
2.3 HVSr boven boorgaten	7
2.4. Powerlaw kalibratie tussen resonantiefrequentie en diepte	13
3. HVSr-profielen tussen de spoorwegbruggen	15
3.1. Metingen en kaarten.....	15
3.2. Polarisatierichting van de HVSr-metingen	19
3.3. HVSr-profiel langsheen het jaagpad.....	20
3.4. HVSr “anker’ profiel.....	23
4. Conclusies	26
5. Referenties	27
Bijlage 1: HVSr metingen en resultaten.....	28
Bijlage 2: HVSr metingen en Virtuele boorgaten.....	29
Bijlage 3: HVSr polarisatie analyse	59

1. Inleiding

1.1 Opdracht

In 2024 werd door De Vlaamse Waterweg NW (DVW) een ontwerpstudie opgestart voor de vervanging en verbreding van de linkeroever van het kanaal Brussel-Charleroi ter hoogte van de **spoorwegbruggen** Hoge Snelheidslijn (HSL) L94 en L96 over het kanaal in het zuiden van Halle (België). Aangezien het kanaal hier op haar smalst is, houdt deze studie in om het kanaal te hier verbreden en de bottleneck weg te nemen. Aangezien eerder onderzoek heeft aangetoond dat de diepte waarop de harde rots (zijnde het gesteente van het Onder-Paleozoïsch Brabant Massief) wordt teruggevonden in deze regio erg onregelmatig is en de verwerking van de top van het Brabant Massief erg sterk was, is in een eerste fase grondonderzoek en bijkomend niet-destructief studiewerk nodig alvorens deze werken aan te vangen. Aan de Koninklijke Sterrenwacht van België werd gevraagd om de Horizontale-over-Verticale Spectraal Ratio (HVSAR) seismische methode uit te voeren tussen de spoorwegbruggen om niet-destructieve informatie te bekomen over de diepte van de harde rots langsheen deze sectie. Ter voorbereiding van deze verkenningsopdracht, leverde SWECO een gedetailleerd kanaalplan op waarop de bestaande structuur rondom het kanaal is uitgewerkt. De HVSAR-resultaten worden afgetoetst met 7 verkenningsboringen, uitgevoerd door Group Verbeke. Concreet gaat het om drie zones (aangegeven in rood hieronder): één zone ten noorden van de L94 brug, één zone tussen de bruggen en één zone ten zuiden van de L96 brug. Op het landhoofd van de twee bruggen (groene zones) zal de HVSAR-methode minder goed werken, aangezien het vele beton en landhoofdpalen in de ondergrond de schuifgolfsnelheid verandert. Seismische metingen op het landhoofd werden toch genomen, maar dienen met enige voorzichtigheid te worden geïnterpreteerd.



Figuur 1 : Studiegebied: Linkeroever van het kanaal Brussel-Charleroi, tussen spoorwegbruggen L94 en 96 te Halle. De kaart rechts toont het technisch plan opgeleverd door Sweco.

1.2. Overzicht van de uit te voeren taken

In dit verslag rapporteren we de resultaten van de seismische campagne die in februari 2025 werd uitgevoerd. De opdracht heeft als doel een niet-destructieve seismische methode uit te voeren 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 Spectraal Ratio (HVSr)** analyse toe te passen op **seismische ruis** die wordt gemeten met behulp van 5 Hz en 5s SmartSolo 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 naar best vermogen gekalibreerd met behulp van zowel boorgegevens aangeleverd door de klant als met HVSr-analyses uitgevoerd in eerdere opdrachten. Deze opdracht omvat volgende taken:

Taak 1: Voorstudie: Studie en lokalisatie van bestaande boorgaten en integreren van bestaande ruismetingen rondom het studiegebied gebruikmakend van de Databank Ondergrond Vlaanderen en de HVSr-database van de KSB. In het verleden werden al eerder HVSr-studies uitgevoerd. Deze metingen zijn nuttig om de metingen in deze opdracht beter te kaderen.

Taak 2: Meetcampagne: 1 seismisch profiel ten W van het kanaal Brussel-Charleroi. Op 10 en 11 februari 2025 werden op 52 locaties geofonen geplaatst. In elke zone werd er op de kanaaloever op 10 meter afstand telkens een gefoon geplaatst. In totaal werden er 31 5Hz en tien 5s geofonen geïnstalleerd langs de kanaaloever. Parallel met dit profiel, daar waar mogelijk ankers komen, werden in het bos naast de kanaaloever op 11 locaties extra toestellen geplaatst.

Taak 3: Analyse van gegevens: De verzamelde data van het seismische profiel werden geanalyseerd en de bekomen resonantiefrequentie werd omgezet naar diepte. Een eerste oplevering werd uitgevoerd vóór de proefboringen. Deze oplevering bevatte een virtueel profiel van 52 meetlocaties. Omzetting van resonantiefrequentie naar diepte gebeurde naar “best vermogen”, gebruik makend van de huidige geofysische kennis rondom Halle.

Taak 4: Kalibreren van virtuele boorgaten: Met behulp van de 7 proefboren, werd de relatie tussen resonantiefrequentie en diepte herbekeken. De metingen en boringen laten toe een lokale empirische formule (kalibratie) tussen resonantiefrequentie en diepte tot de top van de sokkel op te stellen. Hiermee worden de virtuele boorgaten herrekend en wordt een onzekerheidsbepaling op de dieptebepaling toegevoegd.

Alle HVSr-metingen worden in de Belgische HVSr database opgeslagen, een database beheerd door de afdeling Seismologie-Gravimetrie, Koninklijke Sterrenwacht van België. De HVSr-resultaten worden in bijlage bij dit rapport geleverd.

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-over-verticale (H/V) spectraal 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 (= schuifsnelheidscontrast) 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 in kaart gebracht.

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 toe te passen, door netwerkmetingen uit te voeren of door actieve tests te doen.
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 maar deze relatie kan enkel 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. Het paleoreliëf, of het afbraakoppervlak, van het Brabant Massief is gevormd door herhaalde episodes van positieve verticale bewegingen sinds de Brabantse gebergtevervorming en na de belangrijkste eroderende fase na het einde van het Laat Krijt en Vroeg Cenozoïcum (Danian). De resulterende verwerking van de top van het Brabant Massief wordt gedomineerd door differentiële erosie van de verweerde en gebroken zandstenen/leien en kwartsieten die de kern vormen van het Brabant Massief. Ter hoogte van het studiegebied bevindt zich de Tubize Formatie (TUB). Deze bestaat uit een afwisseling van harde, rechtopstaande kwartsiet gesteentebanken en zachtere sterk gespleten fyllades. Een voorbeeld van deze gesteenteopeenvolging is te zien in de groeve van Rodenem aan de rechteroever van het kanaal.

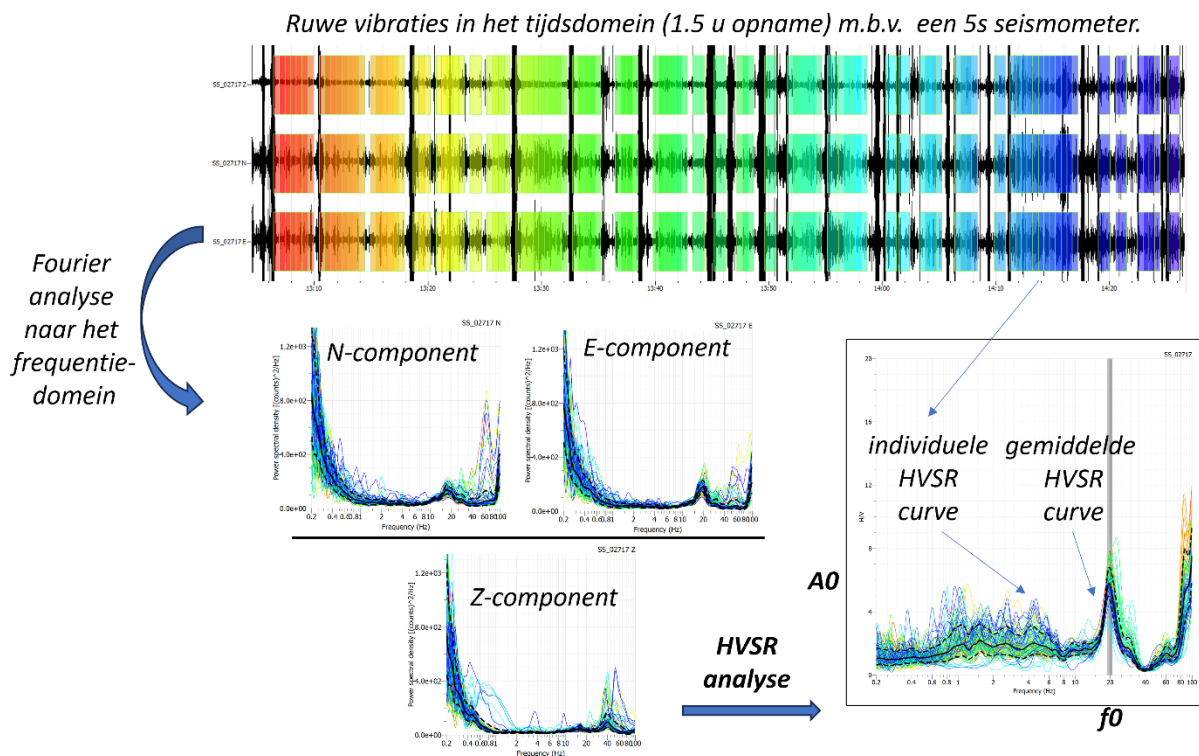
In het Brussels hoofdstedelijk gebied, voerde Van Noten *et al.* (2022) reeds 65 metingen uit boven boorgaten in Brussel om de relatie tussen f_0 en de sedimentdikte bovenop het Brabant Massief te bepalen. In deze studie werd onderstaande powerlaw relatie voorgesteld als geschikte omzetting van f_0 naar h :

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

Deze relatie werkt goed in Brussel en werd bijkomend toegepast in het BRAIN.be 2.0 GEOCAMP ondiepe geothermie project (Petitclercq *et al.*, 2024) om meer informatie over de top van het Brabant Massief te verzamelen. Eén van de bekomen inzichten in het GEOCAMP-project was dat de resonantiepiek in de H/V curve eerder overeenkomt met de top van de verweerde sokkel dan dat ze overeenkomt met het contrast tussen het verweerd en niet-verweerd gesteente. Een verklaring hiervoor is dat het dichtheidscontrast tussen zachte sedimenten en de verweerde top al groot genoeg is om voor een impedantie contrast te zorgen, dewelke dus met HVSR kan worden gedetecteerd.

In het alluviale gebied ter hoogte van Halle werd door Van Noten *et al.* (2022) al enkele metingen boven 12 boorgaten gebruikt. Enkele van deze boorgaten dateren echter uit het midden van vorige eeuw, en daardoor is de informatie onbetrouwbaar. Hierdoor is de bovenstaande relatie niet voldoende geschikt om de dikte van de Formatie van Hannut (oudste Cenozoïsche formatie boven op het Brabant Massief) en/of de alluviale sedimenten van de Zenne rivier afgezet in het Kwartair boven op het Brabant Massief te berekenen. Moest de bovenstaande powerlaw relatie toch worden gebruikt, onderschat ze steeds de sedimentdikte. Om een lokale powerlaw relatie op te stellen zijn er meer lokale HVSR-metingen bovenop nieuwe boringen nodig in de Zenne vallei.

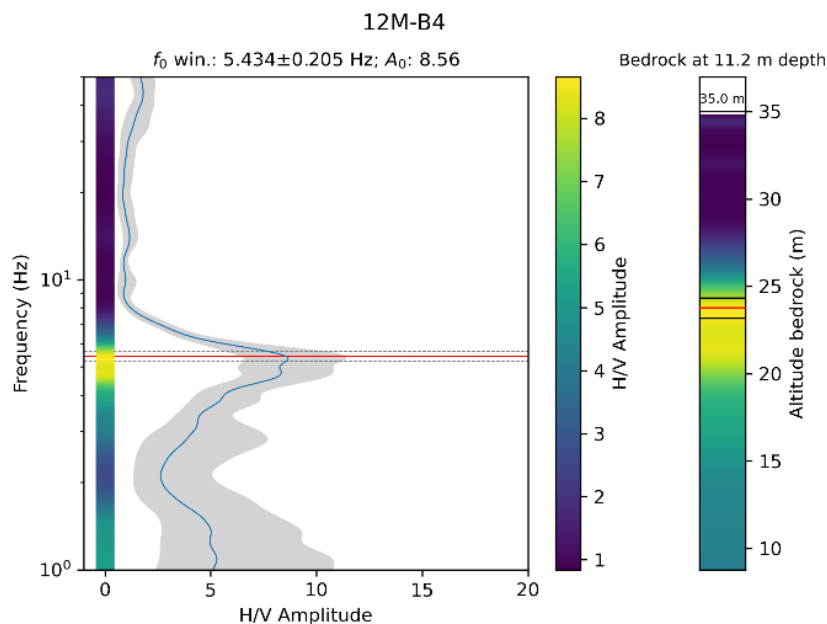
Indien de boorgaten toch niet voldoende informatie verschaffen (bv. een te graduele overgang van sediment naar gesteente) dan kan de HVSR-methode toch nog steeds relatief goede informatie leveren door individuele HVSR-curves relatief met elkaar te vergelijken langsheen het opgemeten profiel.



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

De HVSR-analyse werd uitgevoerd met behulp van de open source software GEOPSY versie 3.3.3 (Wathelet *et al.*, 2020) (Figuur 2). 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 treinverkeer, 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).

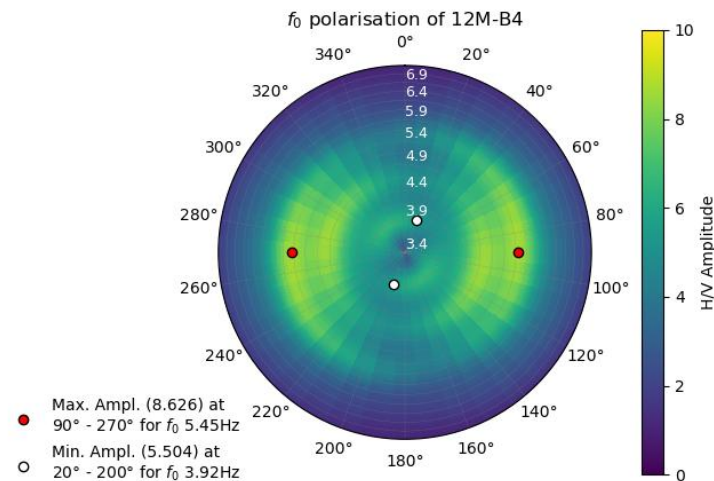
De ruwe output gegevens, zijnde het frequentie-amplitude diagram opgeslagen in bestanden met *.hv* extensie vanuit het programma Geopsy, werden opnieuw geplott gebruik makend van Python codes gepubliceerd in Van Noten *et al.* (2020). In deze nieuwe representatie (zie Figuur 3) wordt de HVSR-curve in een frequentie-amplitude diagram weergegeven. Met behulp van 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 hoogste dichtheidscontrast 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.



Figuur 3 : HVSR-curves weergegeven in een frequentie-amplitude diagram (links) en omzetting van de HVSR-curve naar een virtueel boorgat. 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 12M_B4 voor sensor BE_02695 boven boorgat B4, zonder polarisatiecorrectie.

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° , van noord (0°) naar zuid (180°). In de HVSR-polarisatieanalyse worden dezelfde tijdsvensters gebruikt als in de H/V module om te vermijden dat voorbijgaande bronnen de analyse zouden kunnen beïnvloeden. Elk polarisatie resultaat werd geëxporteerd uit Geopsy en opnieuw uitgezet in een azimuth 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 A0 rond de f_0 -waarde.



Figuur 4 : Polarisation 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 90° in dit voorbeeld). Het berekenen van de f_0 in deze azimutale richting geeft nauwkeurige resultaten. Voorbeeld: Meting 12M_B4 voor sensor BE_02695 boven boorgat B4.

1.4. Instrumenten

De seismische ruismetingen werden uitgevoerd met behulp van 41 SmartSolo 5 Hz IGU-16HR 3C en 10 SmartSolo 5 s IGU-BD3C-5 geofonen. De 5 Hz IGU-16HR 3C toestellen werden op twee verschillende manieren geïnstalleerd. Waar mogelijk, werden ze ingegraven aan de rand van de berm om maximale koppeling tussen grond en toestel te verzekeren. Op sommige plaatsen was dit niet mogelijk en werd de sensor op een metalen driepikkel geïnstalleerd om zo toch een meting te kunnen uitvoeren. Ofwel werden de driepikkels op het verharde jaagpad geplaatst, ofwel werden ze op een stenen dal geplaatst als de ondergrond onverhard was (grindoppervlak onder de bruggen bijvoorbeeld). We weten van installatie op driepikkels dat de data opgenomen met de horizontale componenten minder nauwkeurig is dan wanneer de sensors worden ingegraven (Zeckra et al., 2022).

De 5s IGU-BD3C-5 geofonen werden eveneens niet ingegraven, maar deze zijn zwaarder dan de driepikkel installaties, zijn gevoeliger en bovendien hebben ze drie metalen schroeven onderaan het toestel om ze horizontaal te kunnen plaatsen. Daar waar nodig, werden de 5 s IGU-BD3C-5 eveneens op een dal geplaatst. In de tabel met meetresultaten worden verschillende installatiemethoden vermeld naast het ID van de meting met volgende afkortingen:

M: SmartSolo 5 Hz IGU-16HR 3C ingegraven in de berm

T: SmartSolo 5 Hz IGU-16HR 3C geïnstalleerd op een metalen driepikkel

G: SmartSolo 5 s IGU-BD3C-5 toestel geplaatst op een stenen dal.



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. Installatie van IGU-16HR 3C gebeurde ofwel door hen in te graven, ofwel door installatie op een metalen driepikkel op het jaagpad of op een stenen dal.

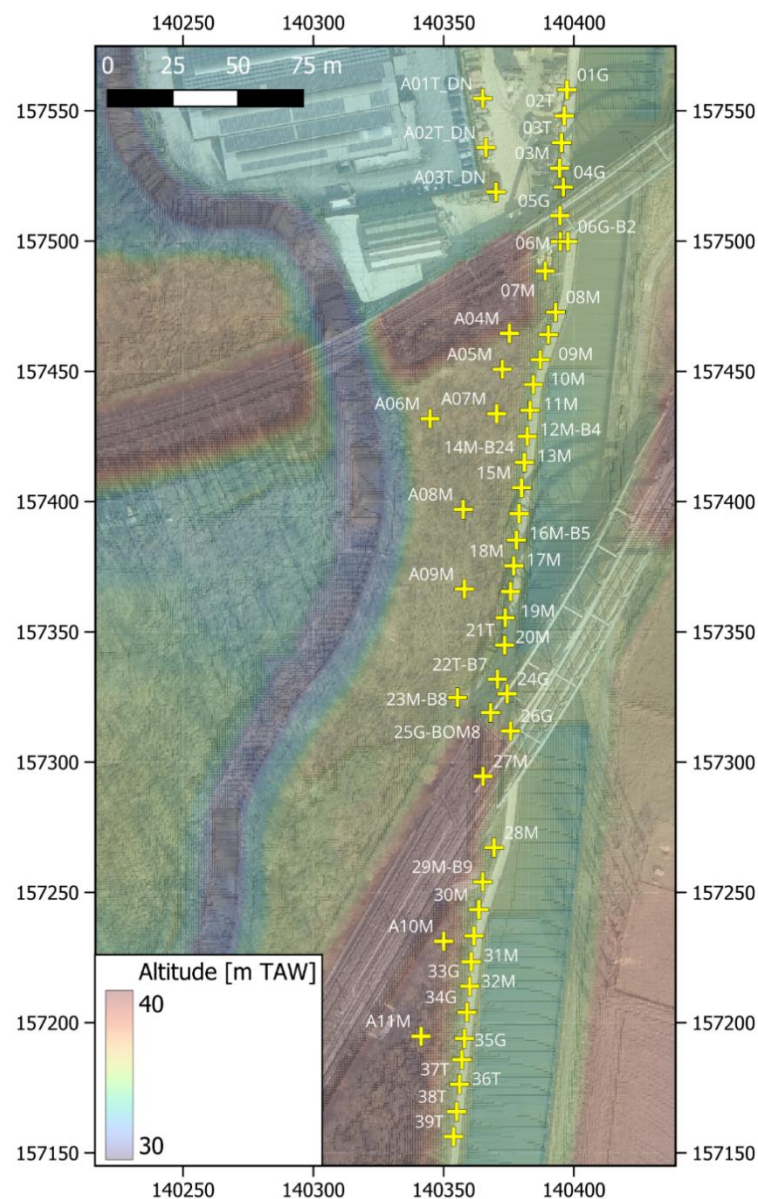
1.5. Maaiveldpeil

Het maaiveldpeil van de seismische metingen werden afgeleid uit het DOV [Digitaal Hoogte Model Vlaanderen II](#), DTM, raster 1m. Dit digital terrein model is een model geïnterpoleerd uit een [Lidar punten wolk](#) waarvan de hoogte werd geïnterpoleerd voor 1 m² cellen. In het studiegebied resulteerde satelliet metingen in een 4 à 5 Lidar punten / m². De horizontale resolutie van het model is dus 1 m². De verticale fout op DHMII is niet vermeld maar bij vorige versie DHMI bedroeg de verticale resolutie op de individuele LIDAR-metingen [0.07 m](#).

2. Meetcampagne

2.1 Uitvoering

Op 10 en 11 februari 2025 werden op 52 locaties geofonen geplaatst. In elke zone werd er op de kanaaloever op 10 meter afstand telkens een gefoon geplaatst. In totaal werden er 31 5 Hz en tien 5s geofonen geïnstalleerd langsheen de kanaaloever. Parallel met dit profiel, daar waar mogelijk ankers komen, werden in het bos naast de kanaaloever op 11 locaties extra toestellen geplaatst. Totale meetduur was minimum 3u voor het hele profiel. De geofonen die eerst werden geïnstalleerd, maten ~6u lang. Deze lange meettijd is nodig om stabiele HVSR-curves te bekomen. De sensoren in het bos, daar waar mogelijk ankers komen, werden op 10 februari geïnstalleerd en maten de hele nacht door tot 11 februari 's ochtends. Op 11 februari werden ook enkele metingen herhaald onder de bruggen om stabielere metingen te bekomen (installatie op stenen dal).



Figuur 6 : Locatie van seismische metingen tussen de spoorwegbruggen. Locaties van boringen worden aangegeven met letter B en worden verder toegelicht in Tabel 1.

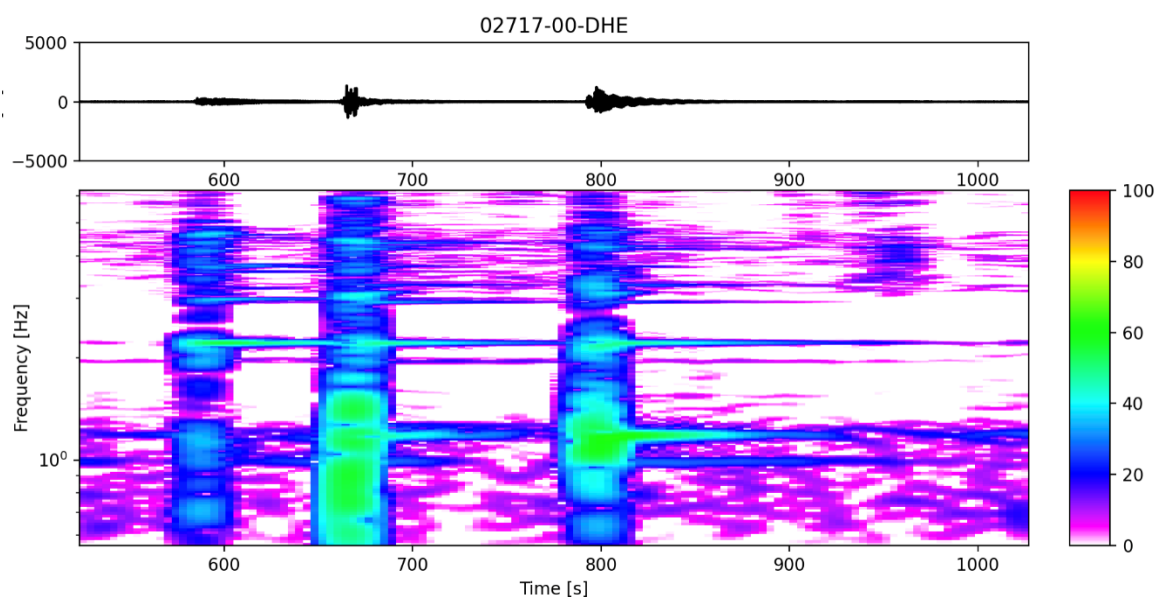
2.2 Factoren die HVSR beïnvloeden

Hoewel de zones onder twee spoorwegbruggen niet tot de studieopdracht behoorden, werden er toch extra sensoren geïnstalleerd. Onder de brug werden namelijk boringen B7 en B8 uitgevoerd. Aangezien de f_0 -waarden van de HVSR-metingen boven deze boringen mee worden geïntegreerd in de berekening van de powerlaw relatie is het belangrijk resonantie-effecten veroorzaakt door de brug uit te sluiten. De extra toestellen onder de brug lieten toe het effect van de brug op de seismische metingen/ruis te bepalen en lieten toe te verhinderen dat de bewegingen van de brug de HVSR-resultaten beïnvloedden.

Om deze methode toe te lichten wordt een spectrum analyse van meting 26G (E-W horizontale component van sensor BE_02712) onder brug L96 als voorbeeld getoond wanneer 3 treinen achtereenvolgend over de brug rijden. Wanneer een trein over de brug rijdt, blijft de brug nog tientallen seconden tot minutenlang natrillen. Deze resonanties vinden plaats over verschillende frequenties en de resonantie wordt sterker gemeten op de horizontale componenten van de geofoon dan op de verticale component, bijgevolg kan in de HVSR-curve deze resonanties ook verschijnen. Resonanties die kunnen worden geïdentificeerd zijn:

$f_r = [0.988, 1.174, 1.19, 1.95, 2.21, 2.91, 2.98, 3.27]$

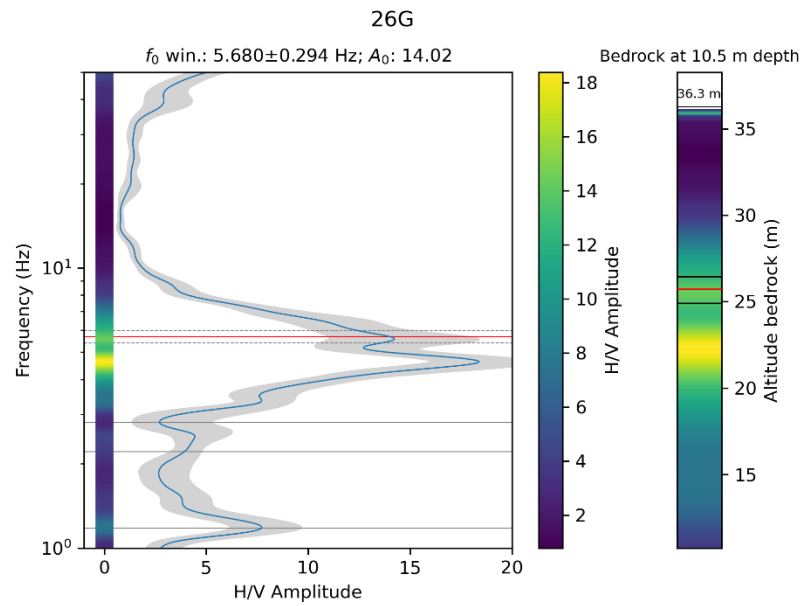
met 1.174 Hz, 2.21 Hz en 2.8-2.9 als frequenties met hogere energetische waarden.



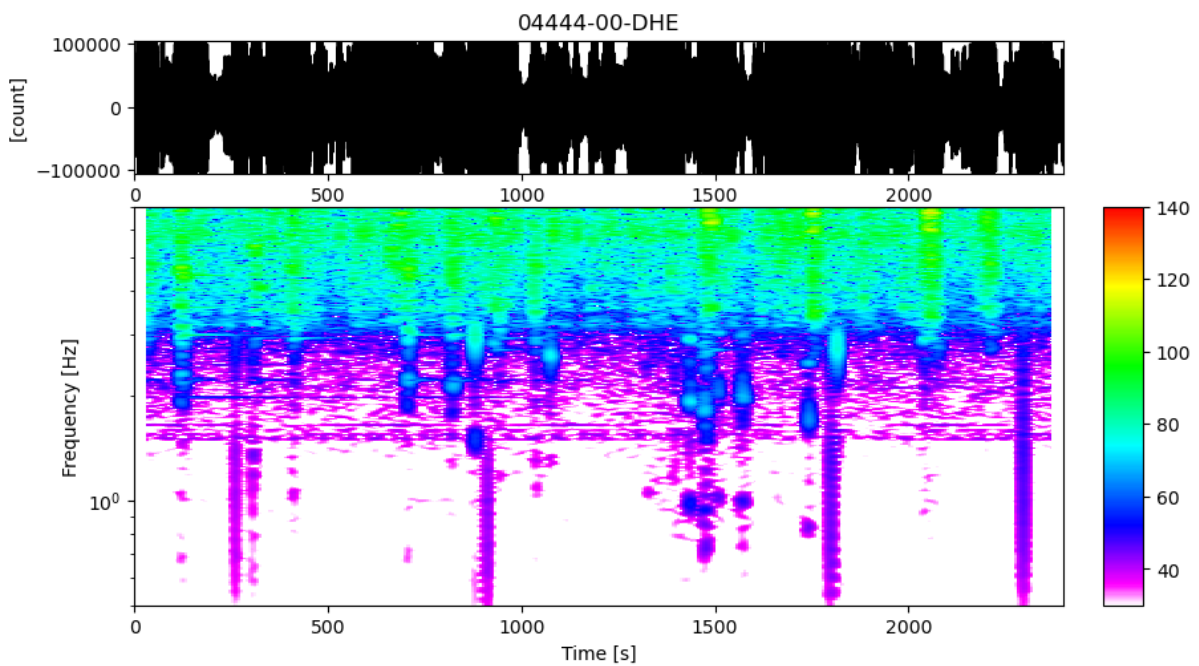
Figuur 7 : Boven) Tijdsdomein. Brute waarden in counts. Onder) Spectrum analyse van de horizontale component van sensor 26G. Kleurenschaal toont de amplitude van grondbeweging

Wanneer we deze resonanties op de HVSR-curve van meting 26G uitzetten, zien we dat deze resonanties lager uitvallen dan de HVSR-resonantie piek. Dit laat toe de geobserveerde fundamentele resonantie piek van 5,58 Hz van meting 26G mee te integreren in het opstellen van de lokale powerlaw relatie tussen resonantiefrequentie en sedimentdikte.

Ter vergelijking werd ook voor meting 18M tussen de spoorwegbruggen een spectrum analyse uitgevoerd. In het resultaat zijn voor dezelfde tijdsperiode geen brug resonanties herkenbaar.



Figuur 8 : HVSR amplitude-frequentie diagram, met indicatie van resonantie frequentie (rode lijn) en dominante resonanties (grijze lijnen) van de brug. Er is geen verwarring mogelijk tussen de HVSR en brug resonanties.



Figuur 9 : Spectrum analyse van de horizontale component van sensor 18M in het midden van de sectie. Hier wordt geen resonantie van de brug gemeten en is het niet mogelijk om fundamentele resonantiefrequentie te verwarren met één van de resonanties van de brug.

2.3 HVSR boven boorgaten

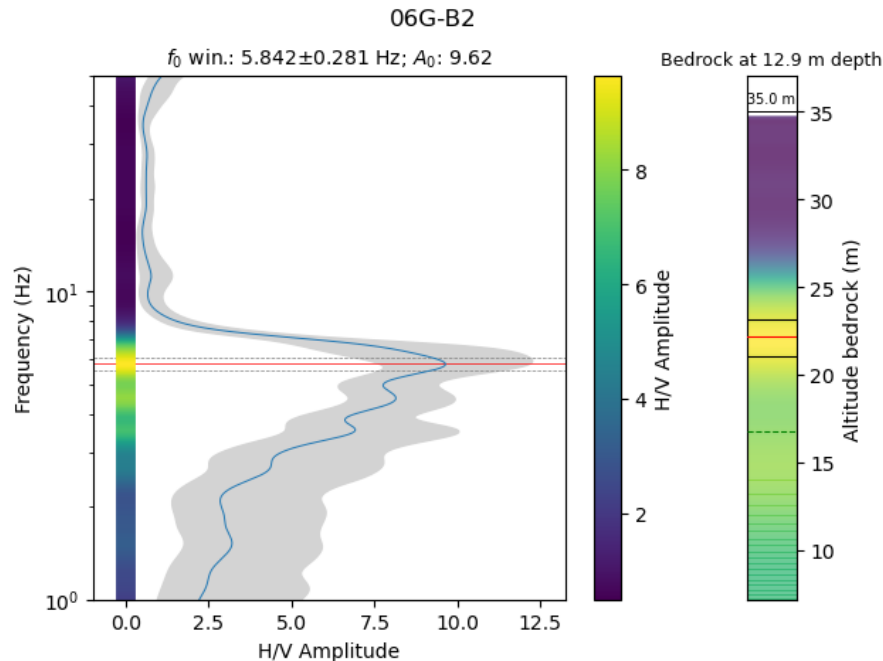
Eerst worden de individuele HVSR-resultaten per boorgat besproken om nadien een empirische powerlaw relatie tussen resonantiefrequentie en sokkeldiepte te kunnen opstellen op basis van de HVSR-metingen. In de virtuele boorgaten in onderstaande bespreking werd de HVSR-curve boven elk boorgat al omgezet in een virtueel boorgat waarbij de voorspelde diepte is genoteerd boven elk virtueel boorgat. Hierbij is opgestelde powerlaw relatie (zie verder) al toegepast wat toelaat de onzekerheid op de voorspelde gesteentediepte te visualiseren en te bespreken. Onderstaande tabel toont de resultaten van de HVSR-analyse boven de boorgaten. Zie ook bijlage 1 voor de gehele tabel.

Het verschil tussen het maaiveldpeil afgeleid uit DHVII (Z_DHVII in Tabel 1) en het maaiveldpeil (Z-borehole in Tabel 1, mTAW) gerapporteerd in de boringen werd niet mee in rekening gebracht. De onzekerheid op het maaiveldpeil aangegeven in het DHVII-model wordt hierdoor rechtstreeks doorgezet naar een extra onzekerheid op de diepte van het gesteente. Echter, deze bijkomende fout is aanzienlijk kleiner dan de onzekerheid op de HVSR-metingen waarvan de onzekerheid op de resonantiefrequentie f_0 wordt aangegeven door de f_{0_min} en f_{0_max} waarden in Tabel 1. Deze onzekerheden worden in de virtuele boorgaten aangeduid met de verticale zwarte lijnen.

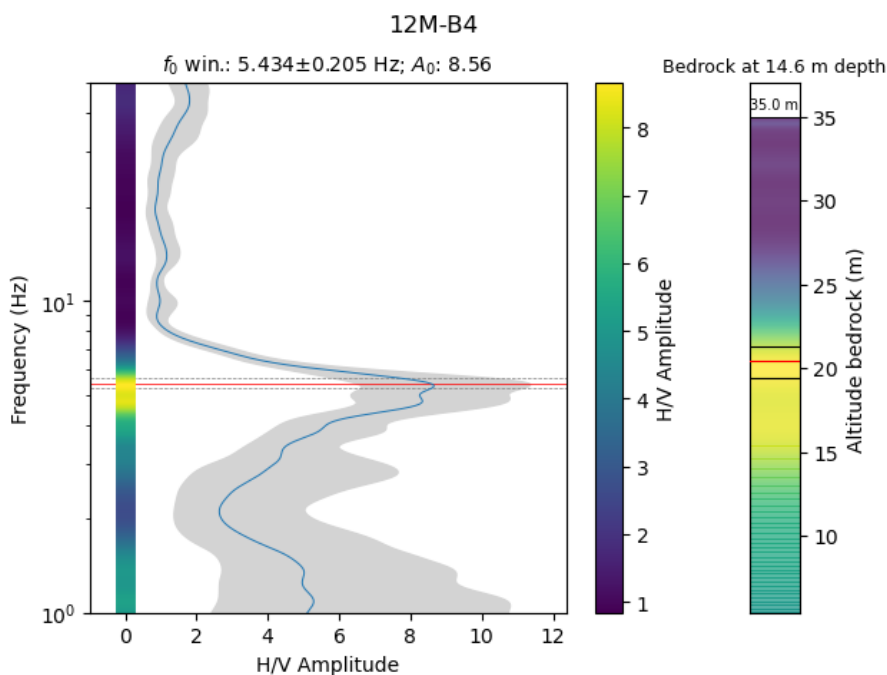
Tabel 1 : Resultaten HVSR metingen boven boorgaten gerangschikt van noord naar zuid. **Borehole:** Sensor en Boorgat nummer; **Node Nr:** ID van de geofoon; **X, Y:** Lambert72 coördinaten. **Z_DHVII:** Altitude afgeleid uit DOV Digitaal Hoogte Model Vlaanderen II [m TAW]. **Z_borehole:** Altitude gerapporteerd op de boorverslagen [m TAW]; **h_w:** sedimentdikte/diepte tot top verweerde sokkel [m] uit boorrapport. **h_f:** diepte tot top niet-verweerde sokkel [m]. **P:** voorspelde diepte tot top verweerde sokkel met behulp van powerlaw relatie $h_w : h = 277.787 * f_0^{-1.741}$. **diff:** verschil tussen P en h_w. **f0_min, f0_win, f0_max:** minimum f_0 , resonantiefrequentie f_0 , maximum f_0 ; **Pol:** polarisatie-richting van f_0 .

Borehole	Node_Nr	X (Lambert72)	Y (Lambert72)	Z_DHVII	Z_Borehole	h_w	h_f	P	diff	f0_min	f0_win	f0_max	Pol
06G-B2	BE_01837	140397.64	157499.84	35.04	35.04	13.4	18.3	12.86	-0.5	5.56067	5.84192	6.1374	100
12M-B4	BE_02695	140383.08	157435.04	35.00	34.95	14.3	-	14.58	0.3	5.22917	5.43378	5.64641	90
14M-B24	BE_03625	140380.98	157415.06	35.00	34.78	13	-	13.51	0.5	5.28006	5.67856	6.10715	110
16M-B5	BE_04248	140378.94	157395.33	35.05	34.80	14.45	28	18.14	3.7	4.43215	4.79408	5.18556	80
22T-B7	BE_23747	140370.61	157331.77	35.15	35.04	13	15	12.71	-0.3	5.61951	5.88114	6.15494	130
23M-B8	BE_04823	140355.28	157324.74	35.46	35.42	13.6	18	14.48	0.9	5.1192	5.45685	5.81677	130
25G-BOM8	BE_01838	140368.00	157319.00	35.31	34.95	12	30	10.96	-1	6.18256	6.40183	6.62889	90
29M-B9	BE_12107	140364.93	157253.97	35.09	34.55	4.1	5.3	4.2	0.1	10.5846	11.1124	11.6665	40

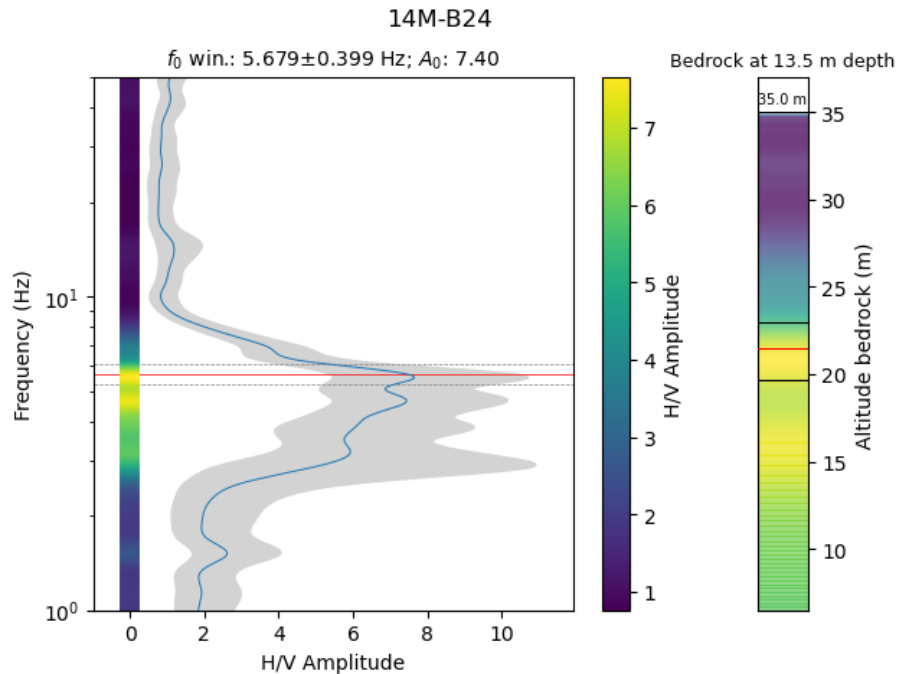
In boring **06G-B2** is de diepte tot de top van de verwerking **13.4 m**. Er is een duidelijke piek is aanwezig. De f_0 -waarde bedraagt **5.842 Hz** in een N100 richting. De voorspelde sokkeldiepte is 12.9 m, een verschil van -0.5 m. Er zijn verschillende andere kleinere pieken aanwezig in het verweerde en niet-verweerde gedeelte. De top van de niet-verweerde sokkel wordt in de virtuele boring aangeduid met een groene stippellijn en komt mogelijks overeen met de piek tussen 4.5 en 4.6 Hz. Echter, aangezien de schuifgolfsnelheid van het gesteente niet gekend is, is dit louter een interpretatieve observatie.



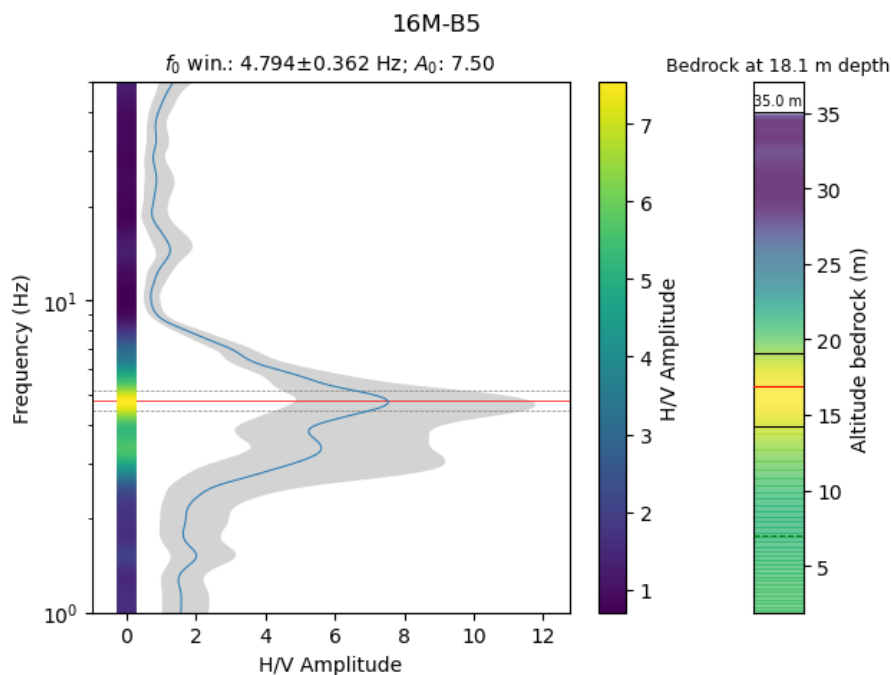
In boring **12M-B4** is de diepte tot de top van de verwerking **14.3 m**. Er is een duidelijke, maar brede resonantie piek aanwezig. De f_0 -waarde bedraagt **5.434 Hz** in een N90 richting. De voorspelde sokkeldiepte is 14.59 m, een verschil van 0.3 m. De top van de niet-verweerde sokkel werd in deze boring niet aangetroffen, maar de HVSR-meting toont ook geen duidelijk extra pieken lager in het frequentiebereik.



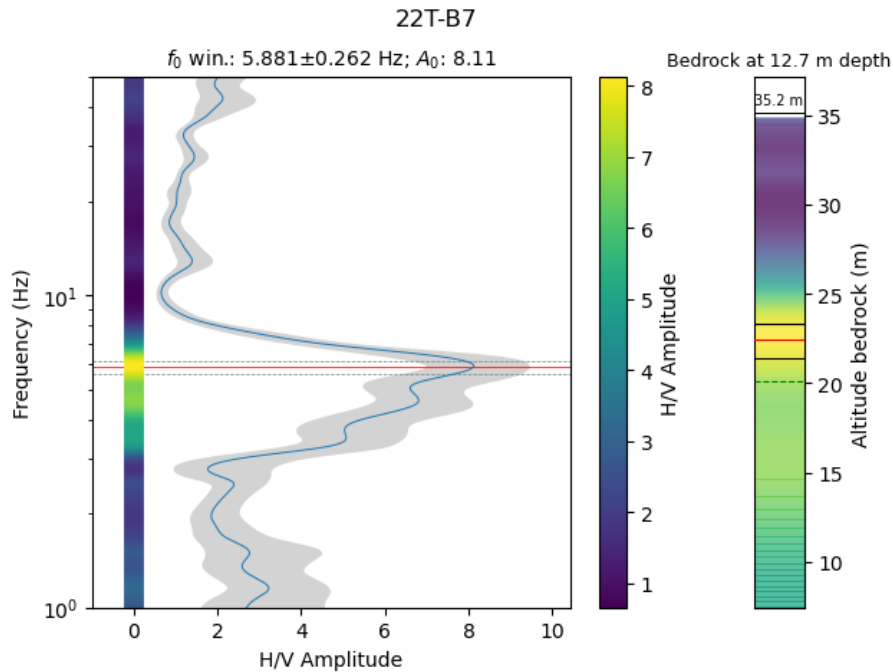
In boring **14M-B24** is de diepte tot de top van de verwerking **13 m**. Er is een resonantie piek aanwezig maar die wordt pas bereikt na graduele toename van de HVSR-curve. De f_0 -waarde bedraagt **5.791 Hz** in een N110 richting. De voorspelde sokkeldiepte is 13.5 m, een verschil van 0.5 m. De top van de niet-verweerde sokkel werd in deze boring niet aangetroffen en de HVSR-meting toont enkele extra pieken lager in het frequentiebereik die deze observatie bevestigen.



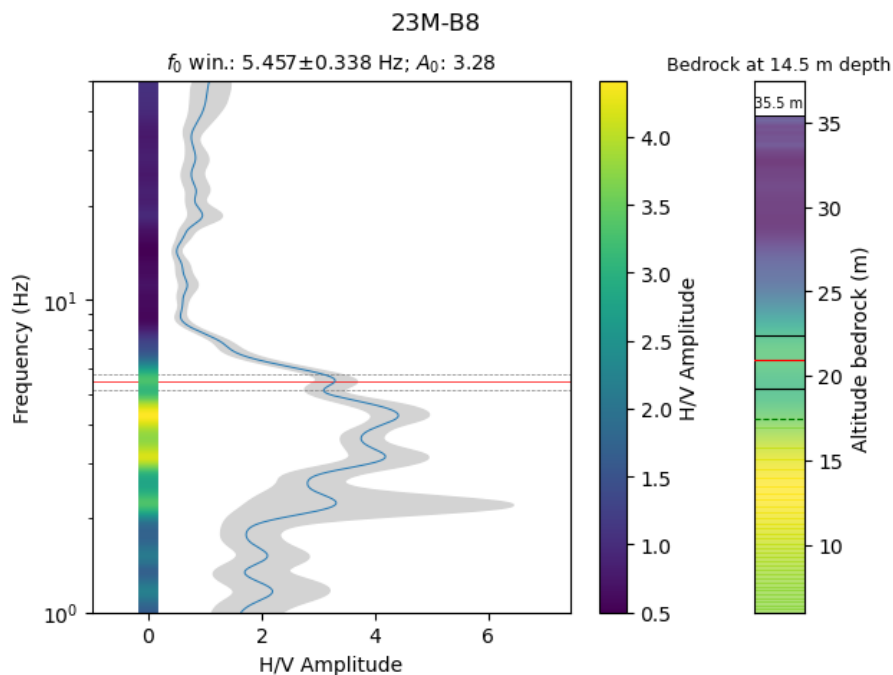
In boring **16M-B5** is de diepte tot de top van de verwerking **14.45 m**. Er is een duidelijke resonantie piek aanwezig. De f_0 -waarde bedraagt **4.794 Hz** in een N80 richting. De voorspelde sokkeldiepte is 18.1 m, een verschil van 3.7 m. Dit is de enige boring waar de voorspelde diepte afwijkt van de voorspelde diepte. De top van de niet-verweerde sokkel werd in deze boring op 28 m aangetroffen en deze wordt aangeduid met de groene stippellijn. De HVSR-meting toont een extra piek rond 3.3 Hz die deze overgang mogelijk kan verklaren.



In boring **22T-B7** is de diepte tot de top van de verwerking **13 m**. Er is een duidelijke resonantie piek aanwezig. De f_0 -waarde bedraagt **5.881 Hz** in een N130 richting. De voorspelde sokkeldiepte is 12.71 m, een verschil van -0.3 m. De top van de niet-verweerde sokkel werd in deze boring op 15 m aangetroffen en deze wordt aangeduid met de groene stippellijn in de virtuele boring. De HVSR-meting toont een extra piek rond 3.5 Hz die deze overgang mogelijk kan verklaren.

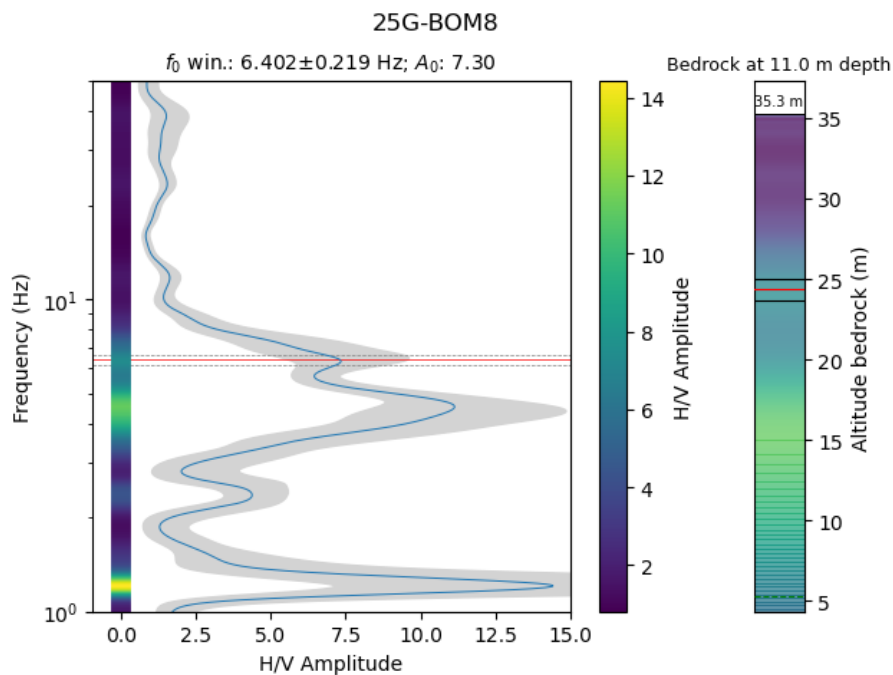


In boring **23M-B8** is de diepte tot de top van de verwerking **13.6 m**. Er zijn meerdere resonantie pieken aanwezig in de HVSR-curve. Zoals vorige boorgatmetingen, wordt de eerste HVSR-piek als representatief genomen voor de densiteitsovergang van sediment naar gesteente. De f_0 -waarde bedraagt hierdoor **5.547 Hz** in een N130 richting. De voorspelde sokkeldiepte is 14.48 m, een verschil van 0.9 m. De top van de niet-verweerde sokkel werd in deze boring op 18 m aangetroffen en deze wordt aangeduid met de groene stippellijn in de virtuele boring. De HVSR-meting toont enkele extra pieken lager in het frequentiebereik, wat het moeilijk maakt deze overgang in de meting te verklaren.

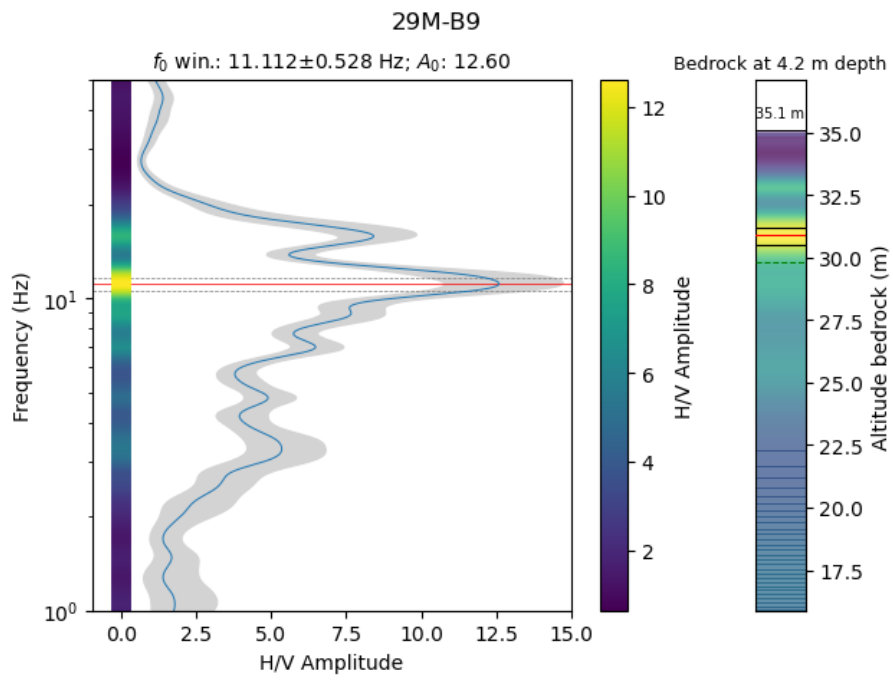


In boring **25G-BOM8** is de diepte tot de top van de verwerking **12 m**. Dit is de enige boring die niet in de loop van dit project werd geboord, maar waarvan de gegevens van de Databank Ondergrond Vlaanderen werden gedownload: <https://www.dov.vlaanderen.be/data/boring/1989-024807>. Deze boring dateert van 1989 en stopt op 36.7 m diepte. Het niet-verweerde gesteente werd bereikt op 30 m diepte en deze diepte wordt aangeduid met de groene stippellijn in de virtuele boring.

Er zijn meerdere resonantie pieken aanwezig in de HVSR-curve. Zoals vorige boorgatmetingen, wordt de eerste HVSR-piek als representatief genomen voor de densiteitsovergang van sediment naar gesteente. De f_0 -waarde bedraagt **6.402 Hz** in een N90 richting. De voorspelde sokkeldiepte is 11.0 m, een verschil van -1.0 m. De boring bevindt zich aan de voet van de tweede brug, waardoor enige voorzichtigheid dient te worden ingelast met de interpretatie van andere pieken, die mogelijks niet-natuurlijke contrasten in de ondergrond kunnen aanduiden.



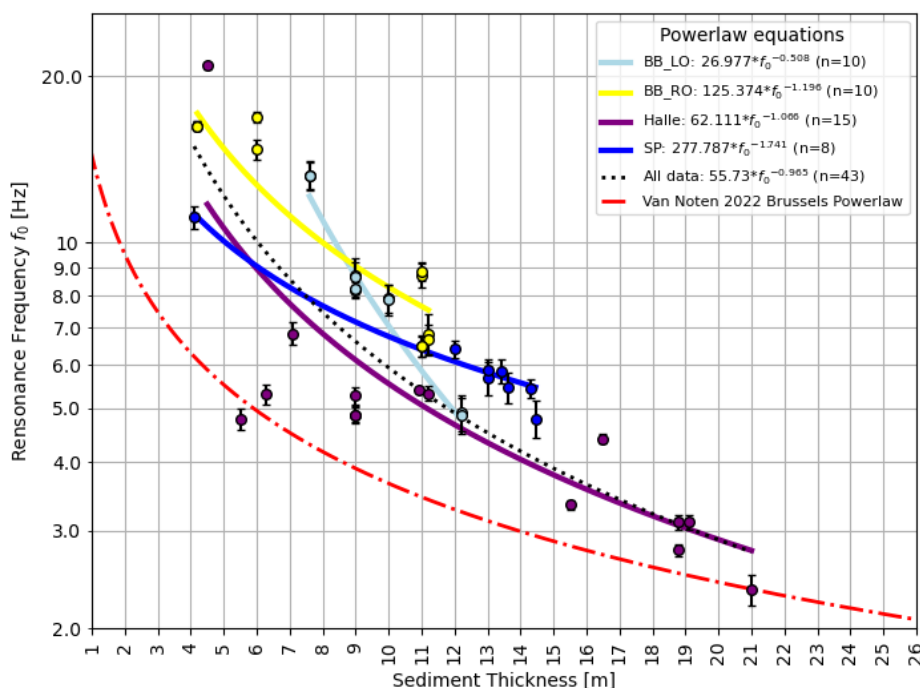
In boring **29M-B9** is de diepte tot de top van de verwerking **4.1 m**. Er zijn meerdere resonantie pieken aanwezig die aanzienlijk hoger in waarden liggen dan vergeleken met alle andere boringen. Dit duidt op een ondieper gesteente. De f_0 -waarde bedraagt **11.112 Hz** in een N40 richting. De voorspelde sokkeldiepte is 4.2 m, een verschil van 0.1 m. De top van de niet-verweerde sokkel werd in deze boring op 5.3 m aangetroffen en deze wordt aangeduid met de groene stippellijn in de virtuele boring. De HVSR-meting toont extra pieken in het dieper frequentie bereik wat mogelijks meerdere diepere contrasten kan aantonen. Opgelet, in het boorverslag bevindt het maaiveldpeil van de boring zich 0.53 m lager dan het maaiveldpeil van de seismische meting (zie Tabel 1). Dit komt omdat de boring in de gracht werd uitgevoerd en de meting op kanaalpadhoogte. Er werd geen topografische correctie uitgevoerd, maar deze correctie zou niets veranderen aan de interpretatie dat het gesteente hier aanzienlijk hoger ligt dan aan de andere kant van de brug.



2.4. 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 (zie hierboven), uitgezet in een log-lineair diagram. We hanteren dezelfde empirische 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 het gebied tussen de spoorwegbruggen. In 2024 werden langsheen de Bospoortbrug te Halle eveneens HVSR-metingen uitgevoerd in een lokale studie om de harde rots onder de Bospoortbrug in kaart te brengen (Van Noten & De Plaen, 2024). Ook deze dataset wordt in het onderstaand diagram weergegeven. Ook werden individuele punten rondom Halle weergegeven. Aangezien het dikwijls om gegevens uit boorgaten gaat die dateren van vorige eeuw, is het moeilijk de kwaliteit van deze boorgaten te evalueren. Dit wordt aangetoond door de grote spreiding op de sedimentdikte waardes. Bijgevolg stellen we enkel een powerlaw relatie op met de nieuwe metingen en boorgatresultaten tussen de spoorwegbruggen.

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 10 : Kalibratie tussen sedimentdikte en resonantiefrequentie gebaseerd op boorgat informatie in dit project (blauwe curve). Rode lijn geeft de algemene kalibratie weer voor de regio Brussel en wijkt duidelijk af van de data rond Halle. De powerlaw relaties voor de linker- en rechteroever van de Bospoortbrug (Van Noten & De Plaen, 2024) worden eveneens meegegeven.

Figuur 10 en de vergelijking hieronder geven de resultaten van de verschillende regressies afgeleid uit de gegevens weergegeven in Tabel 1. De opgestelde regressie hieronder is enkel beperkt in het bereik van de sedimentdiktes aangeven tussen de verticale haakjes. Deze formule zal niet, of maar beperkt, werken voor andere plaatsen waar men de sokkeldiepte wil berekenen met behulp van ruismetingen. Volgende empirische powerlaw relatie (paarse lijn) tussen h en f_0 werd verkregen voor de metingen in dit project (met h in meters en f_0 in Hz):

$$h = 277.787 * f_0^{-1.741} \quad (R^2 = 0.98) \quad [4.1 \text{ m} - 14.45 \text{ m}]$$

De topografische fout op de inschatting van het maaiveldpeil door het gebruik van het DHVII-model (zie sectie 1.5) werd niet mee in rekening gebracht met de bepaling van de powerlaw relatie. Indien het topografisch verschil tussen het maaiveld aangegeven in de boorverslagen van Group Verbeke en de hoogte afgeleid van dit model wel zou worden meegerekend, dan wordt de powerlaw relatie lichtjes anders:

$$h = 209.878 * f_0^{-1.5736} \quad (R^2 = 0.98) \quad [4.64 \text{ m} - 14.70 \text{ m}]$$

(relatie niet getoond op Figuur 10)

Deze relatie werd echter niet gebruikt aangezien we de onzekerheid van het DHVII-model dan mee in de kalibratie zouden betrekken.

De powerlaw relatie van de Bospoortbrug (BB_LO en BB_RO), Brussel (rode lijn), Halle regio (paarse lijn) worden eveneens ook weergegeven. De zwarte stippellijn geeft de beste fit doorheen alle data weer, maar wordt verder niet gebruikt omdat deze relatie de sokkeldiepte tussen de spoorwegbruggen zou onderschatten. Naar de toekomst toe kan het echter interessant zijn andere boorgaten, zoals diegene rond De Bres in het noorden van Halle, mee in deze regressie te integreren om tot een algemene f_0 – sokkeldiepte powerlaw relatie te komen voor de regio Halle.

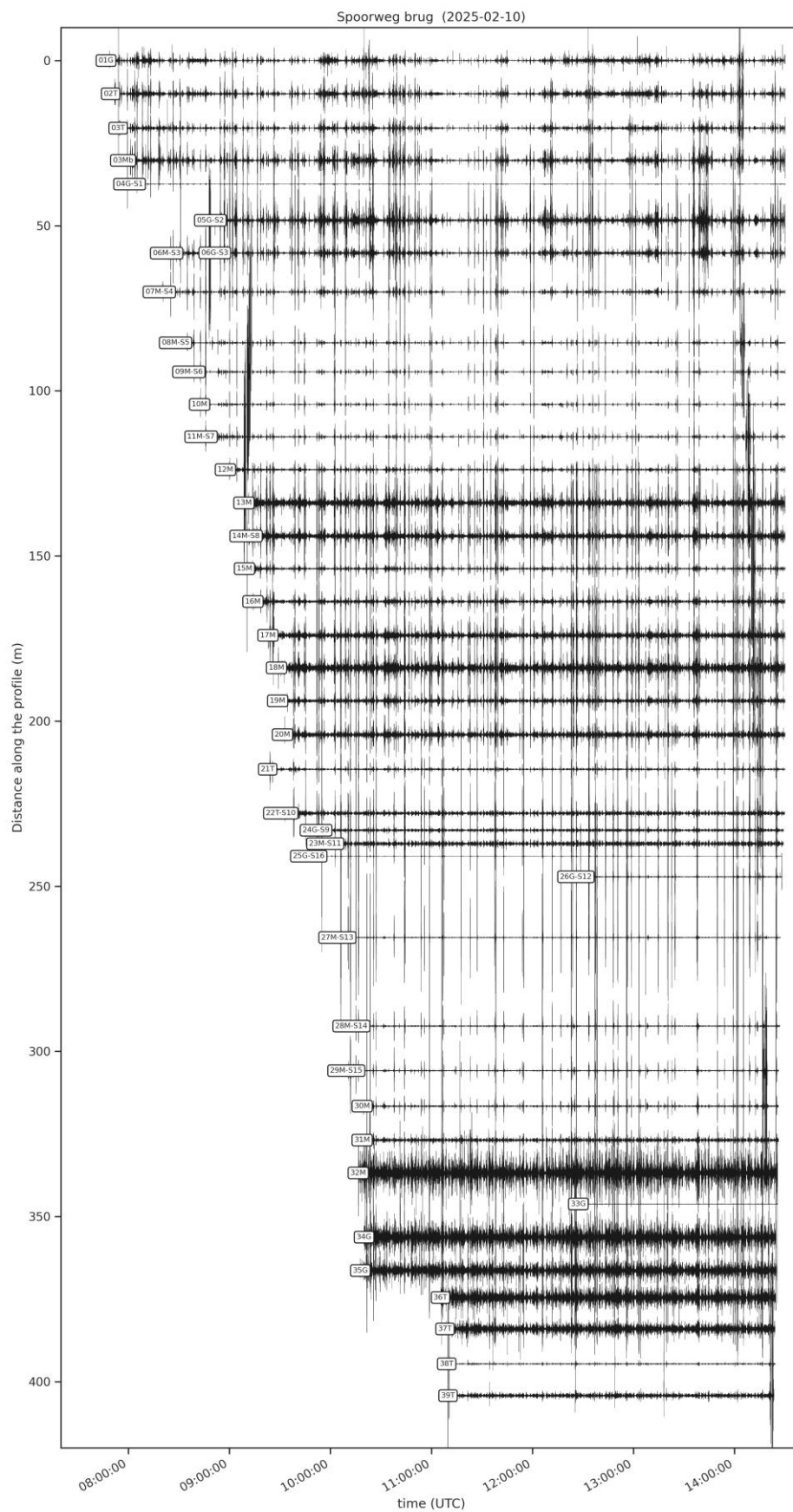
De reden waarom de powerlaw relatie rond de Bospoortbrug aanzienlijk hoger ligt (d.w.z., voor eenzelfde resonantiefrequentie wordt een grotere diepte voorspeld) kan vermoedelijk liggen aan de stadsomgeving waarin de metingen werden genomen. De metingen rond de Bospoortbrug werden uitgevoerd op driepikkels bovenop het fiets- en voetpad naast de Bospoortbrug. Hier zit veel beton in de ondergrond, dewelke de schuifgolfsnelheid aanzienlijk verhoogt, en waardoor dus hogere resonantiefrequenties bekomen werden.

3. HVSR-profielen tussen de spoorwegbruggen

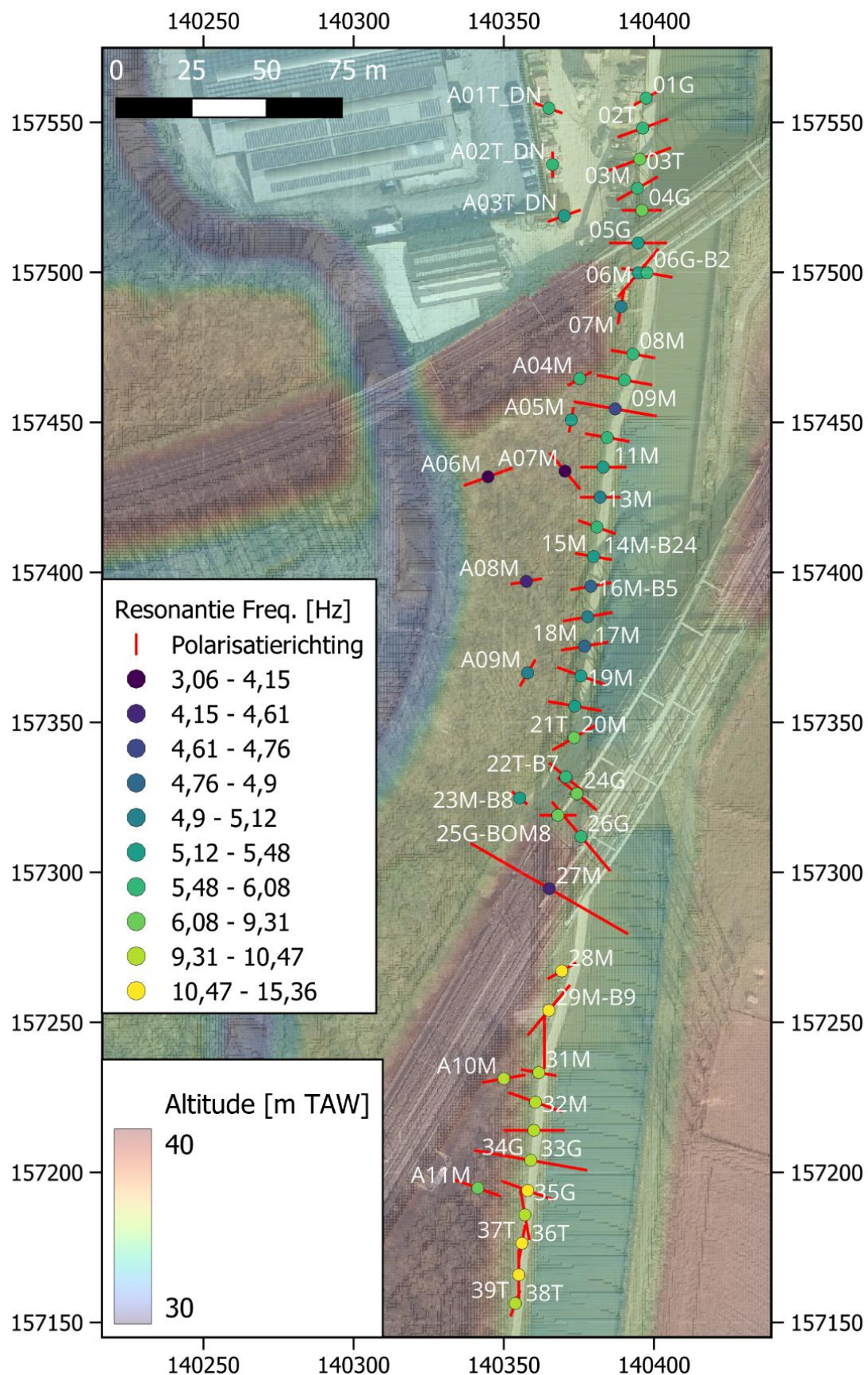
3.1. Metingen en kaarten



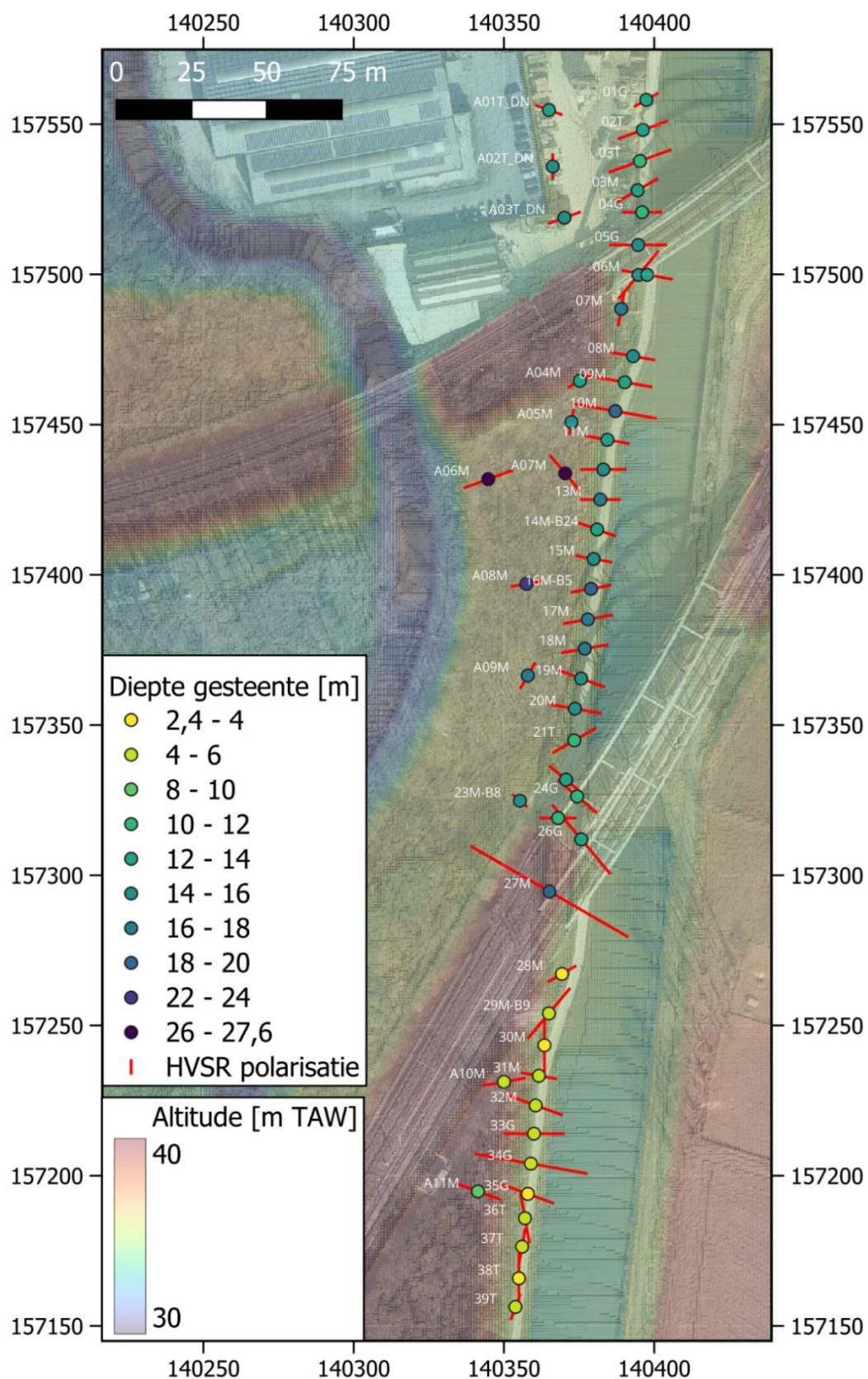
Figuur 11 : Enkele overzichtsfoto's van sensoren tijdens de meetcampagne tussen de spoorwegbruggen.



Figuur 12 : Ruwe data gerangschikt per toenemende afstand van sensor 01G van noord naar zuid.



Figuur 13: HVSR meetresultaten per meting. Kleuren geven de resonantiefrequentie weer. Rode lijnen geven de polarisatierichting van f_0 weer. Zie bijlagen 1 en 2 voor de ruwe HVSR-data.



Figuur 14 : HVSR meetresultaten omgezet naar de diepte. Kleuren geven diepte tot verweerd gesteente weer. Rode lijnen geven de polarisatierichting van f_0 weer. Zie bijlagen voor de omzetting van HVSR naar diepte voor elk punt.

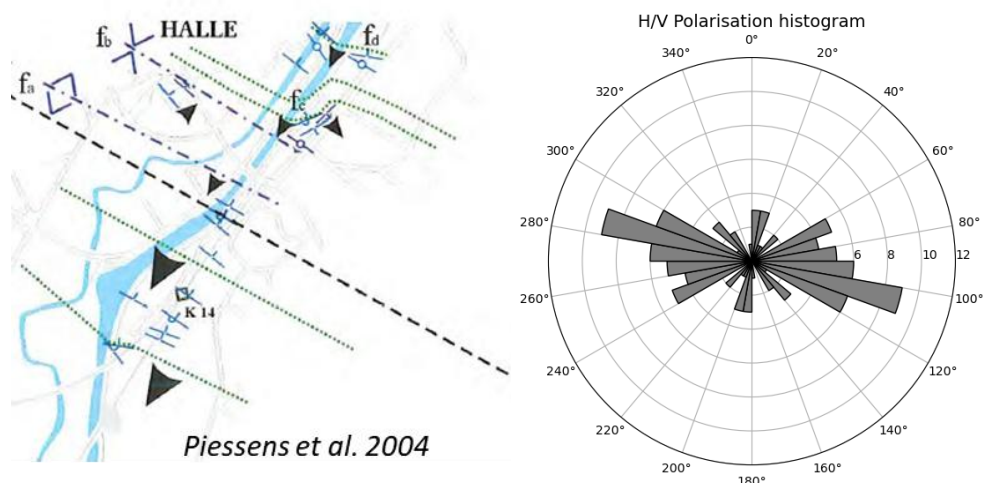
Het profiel start naast het terrein van Denayer (meting 01G) en eindigt ten zuiden van de tweede spoorwegbrug (meting 39T). Spatiëring tussen de sensoren is 10 m. Overzichtsfoto's worden getoond in Figuur 11. Ruwe data worden getoond in Figuur 12. Voor elke meting werd een HVSR-analyse uitgevoerd. Resultaten van de resonantiefrequentie werden op Figuur 13 uitgezet. Toepassing van de powerlaw relatie en omzetting van de HVSR-resultaten naar de diepte wordt getoond op Figuur 14.

3.2. Polarisatierichting van de HVSR-metingen

De resonantiefrequentie tussen de spoorwegbruggen is sterk gepolariseerd in een OZO-WNW richting. In de HVSR-analyse is rekening gehouden deze polarisatie en is telkens de richting geselecteerd waarin f_0 maximaal is. We kunnen 2 oorzaken bedenken waarom deze polarisatie optreedt:

1/ De OZO-WNW richting is quasi loodrecht op de richting van het kanaal. Dit kan mogelijks de voortplanting van trillingen beïnvloeden en de resonantie in de richting loodrecht op het kanaal verklaren. Dit fenomeen is bijvoorbeeld ook gekend in de resonantie van kliffen in gebergtes waarbij resonantie loodrecht op een klif optreedt. Vergelijkbare observaties werden ook rondom de Bospoortbrug gedaan (Van Noten & Deplaen, 2024).

2/ 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. 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. De polarisatie kan dan worden verklaard doordat seismische golven zich meer energetisch langsheen de oriëntatie van de gesteentebanken voortplanten. Bij gebrek aan oriëntatie gegevens hoe de gesteentelagen zich uitstrekken in de ondergrond, blijft deze hypothese moeilijk aan te tonen, maar er dient wel rekening mee worden gehouden tijdens de werken. 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. In de kaart hieronder wordt de polarisatierichting getoond (rechts). De linkse kaart toont de structurele kaart van Piessens et al. (2004). Let op de WNW-OZO gesteente oriëntatie onderaan de kaart.



Figuur 15 : Links) Structurele kaart van Piessens et al. (2004) ter hoogte van Halle opgemaakt tijdens de bouw van de HST. Rechts) Polarisatierichting van de HVSR-metingen tussen de spoorwegbruggen.

3.3. HVSR-profiel langsheen het jaagpad

Figuur 16 toont de opeenvolging van de HVSR-curves in het frequentiedomein (boven) en virtuele boorgaten (onder) langsheen het gemeten profiel. Figuur 17 en Figuur 18 tonen hetzelfde profiel maar hier zijn de HVSR-curves en virtuele boorgaten horizontaal overdreven door een overdrijvingsfactor (respectievelijk 50x en 125x) toe te passen op de H/V amplitude. Deze voorstelling heeft als voordeel dat de pieken en dalen in de HVSR-curves veel duidelijker zichtbaar zijn. Opgelet, in deze visualisatie ligt de locatie van de piek niet meer op de juiste locatie langsheen het profiel. De resonantiefrequentie is telkens aangeduid met een rode bol. De blauwe horizontale lijnen duiden de onzekerheid (standaarddeviatie) aan op f_0 . Door de f_{0_min} en f_{0_max} waardes (zie Bijlage 1) om te zetten naar de diepte, gebruikmakend van de powerlaw relatie, werd deze onzekerheid ook in het diepteprofiel meegenomen.

In de HVSR-metingen en de omgezette virtuele boorgaten (zie bijlagen 1 en 2) werd er telkens voor de gekozen om de waarde van de eerste resonantiepiek te rapporteren. Reden voor deze keuze werd al in de introductie aangehaald, namelijk dat bij de overgang van sediment naar gesteente de dichtheitsverandering de grootste impact heeft op de HVSR-curve. Het effect van deze beslissing is bijvoorbeeld duidelijk te zien in meting 02T of 03M (zie bijlage 2) waar de eerste piek rond 5.7 Hz werd geselecteerd, hoewel de 2^e piek een hogere H/V amplitude heeft. Zoals in de beschrijving der boorgaten werd aangetoond, kan deze 2^e piek mogelijks gelinkt worden aan de overgang naar het niet-verweerde gesteente, maar bij gebrek aan schuifgolfmetingen dit blijft speculatief.

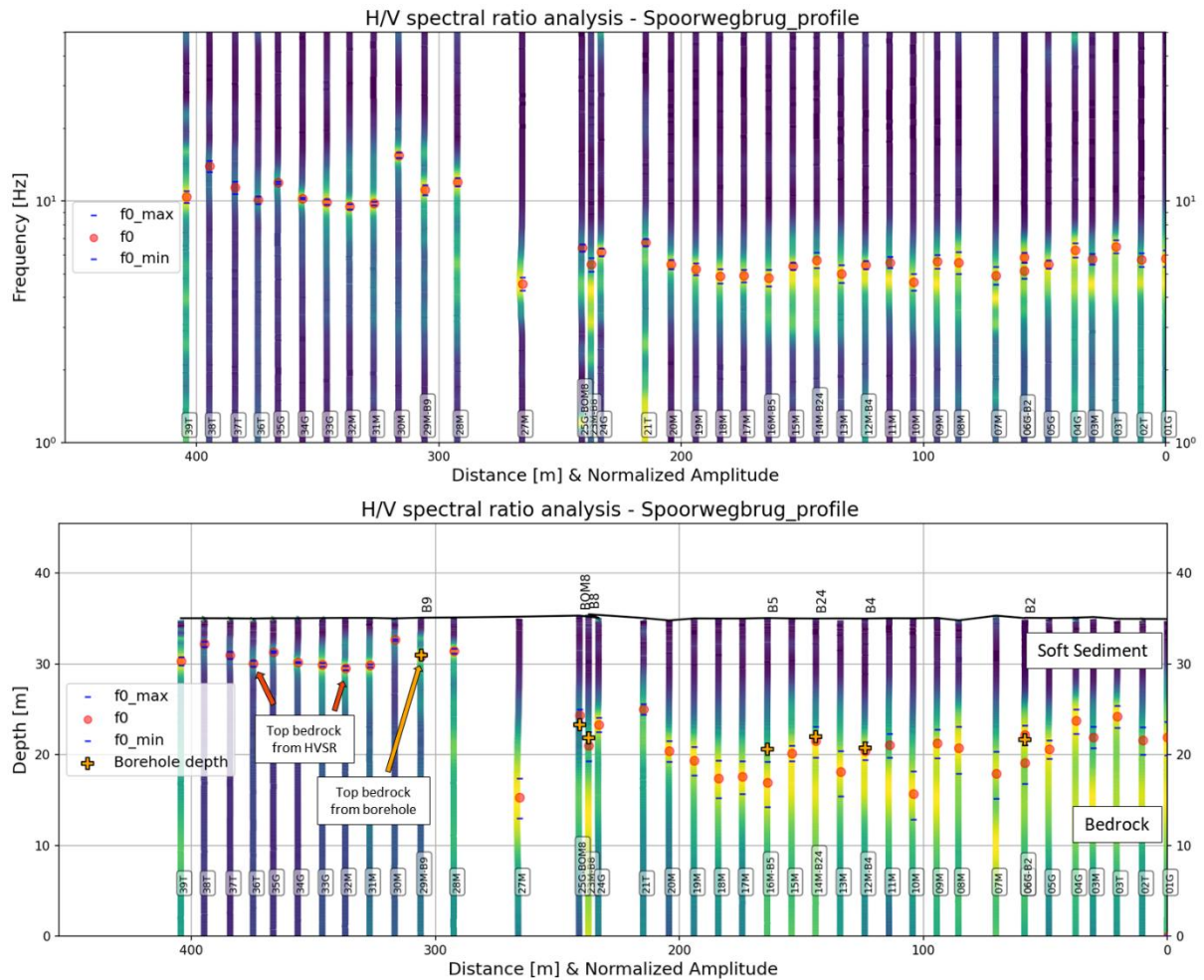
Op het frequentie-afstand profiel blijft f_0 relatief constant tussen metingen 01G en 21T en schommelt ze tussen 4.5 en 6.5 Hz. Omgezet naar de diepte komt dit overeen met een sedimentdikte van 10.7 m tot 19.3 m. Enkel meting 10M wijkt af van de andere metingen en hier is de sediment-verweerd gesteente overgang minder duidelijk. Mogelijks is de overgang al te zien rond 6 Hz waar een kleine knik in de HVSR-curve te zien is.

In meting 16M-B5 wijkt de resonantiepiekwaarde af van wat in de boring wordt vermeld. De resonantiepiek van 4.794 Hz geeft een verweerde top op 18.4 m terwijl ze op 14.45 m werd gerapporteerd in de boring. Mogelijks is dit een overdrijving van de diepte en zou de overgang al vroeger rond 6 Hz in de HVSR-piek kunnen plaatsvinden, maar dit is moeilijk te bevestigen.

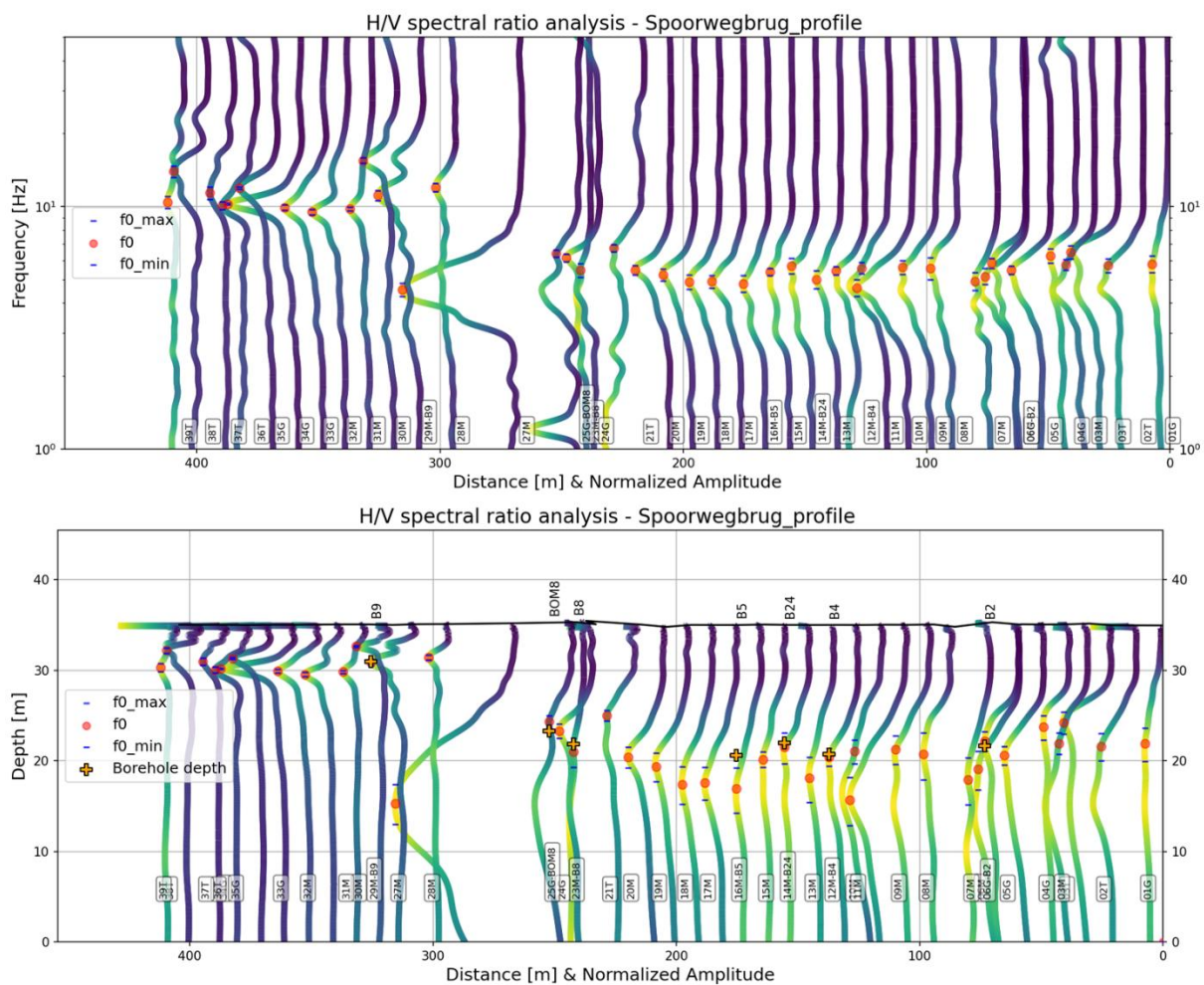
Tussen meting 22T en 27M dient enige voorzichtigheid te worden ingebouwd aangezien we hier dicht meten tegen het landhoofd van de 2^e brug. Meerdere pieken zijn zichtbaar in de HVSR-profielen. Vooral meting 27M lijkt niet betrouwbaar aangezien de H/V amplitude bijna driedubbel zo groot is dan de H/V amplitude van de resonantiepiek van alle andere metingen. Deze meting werd quasi op het landhoofd gemeten. Ondanks de ingebouwde voorzichtigheid, blijft de diepte tot het gesteente afgeleid uit de metingen onder de brug gelijkaardig aan de andere metingen tussen de spoorwegbruggen.

Vanaf meting 28M, treedt een grote verandering op en stijgt de resonantiefrequentie sterk t.o.v. de vorige metingen. Tussen meting 28M en 39T schommelt f_0 tussen 15.47 Hz en 9.48 Hz. Omgezet naar de diepte bevindt de overgang naar het verweerde gesteente zich tussen 2.36 m en 5.5 m ten zuiden van de 2^e spoorwegbrug. Deze overgang wordt duidelijk bevestigd door boring B9 waar de overgang op 4.1 m wordt aangetroffen en het niet-verweerde gesteente op 5.3 m.

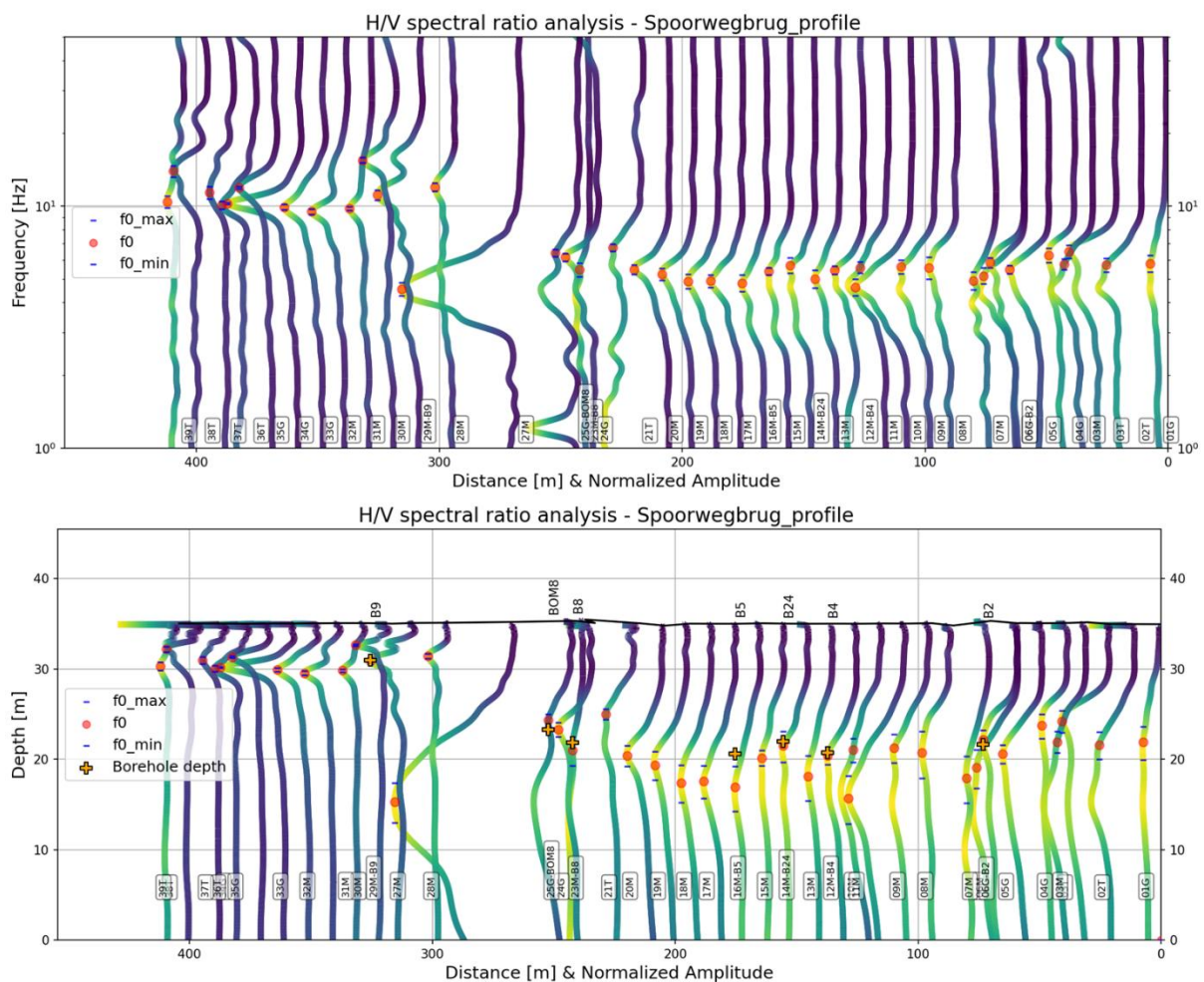
Algemeen vindt er dus een lichte verdieping van de verweerde sokkel plaats van N naar Z tot aan de tweede spoorwegbrug. Voorbij de 2^e spoorwegbrug springt het gesteente omhoog en bevindt het zich ondieper.



Figuur 16 : Resonantiefrequentie profiel van Z naar N weergegeven, langs het Zennekanaal. Afstanden zijn absolute afstanden van elk virtueel boorgat tot het eerste meetpunt 01G. Kleuren van het frequentieprofiel (boven) of het diepteprofiel (onder) geven de H/V amplitude weer, genormaliseerd naar de grootste H/V amplitude (27M). Elke verticale lijn geeft een virtueel boorgat weer, zoals gerapporteerd in bijlage 2.



Figuur 17 : Resonantiefrequentie profiel van Z naar N weergegeven, langs het Zennekanaal. Afstanden zijn absolute afstanden van elk virtueel boorgat tot het eerste meetpunt 01G. Kleuren van het frequentieprofiel (boven) of het diepteprofiel (onder) geven de H/V amplitude weer, genormaliseerd naar de grootste H/V amplitude (27M). Elke verticale lijn geeft een virtueel boorgat weer met een horizontale overdrijving (x50).



Figuur 18 : Resonantiefrequentie profiel van Z naar N weergegeven, langsheen het Zennekanaal. Afstanden zijn absolute afstanden van elk virtueel boorgat tot het eerste meetpunt 01G. Kleuren van het frequentieprofiel (boven) of het diepte-profiel (onder) geven de H/V amplitude weer, genormaliseerd naar de grootste H/V amplitude (27M). Elke verticale lijn geeft een virtueel boorgat weer met een horizontale overdrijving (x125).

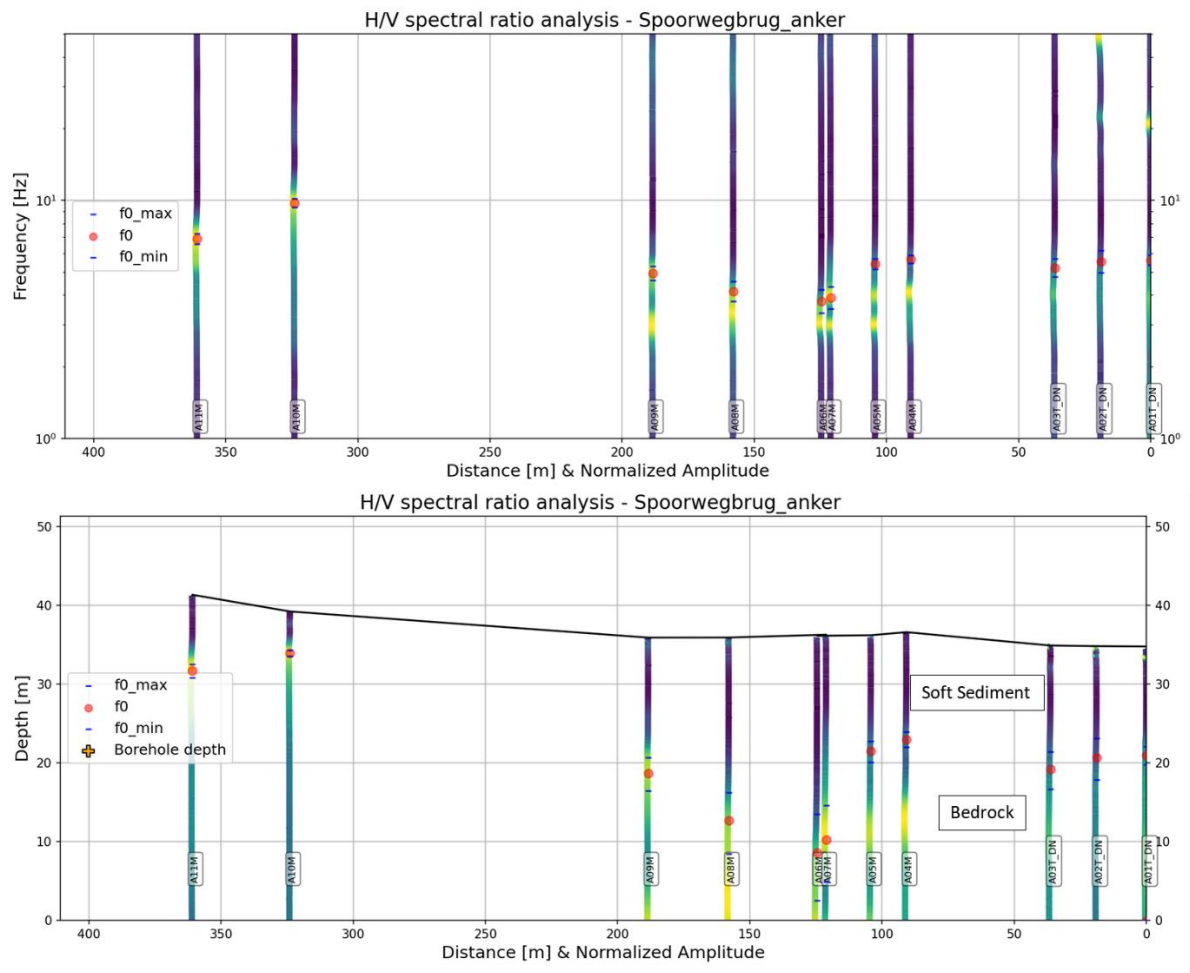
3.4. HVSR “anker’ profiel

Parallel met het profiel langsheen het jaagpad, werden ook extra ruismetingen uitgevoerd daar waar mogelijks ankers worden geplaatst. Zowel op het terrein van Denayer (A01T_DN → A03T_DN) als in het bos parallel met het jaagpad (A04M → A09M) werden sensoren geplaatst. De HVSR-resultaten werden eveneens geanalyseerd, maar zijn iets moeilijker te interpreteren dan langsheen het profiel daar waar de boringen voor controle zorgden. Hoewel eveneens een profiel werd opgemaakt voor de ankers, wordt hier best niet te veel rekening mee gehouden en zullen de individuele virtuele boorgaten (A01T_DN → A11M) waarschijnlijk meer info bieden.

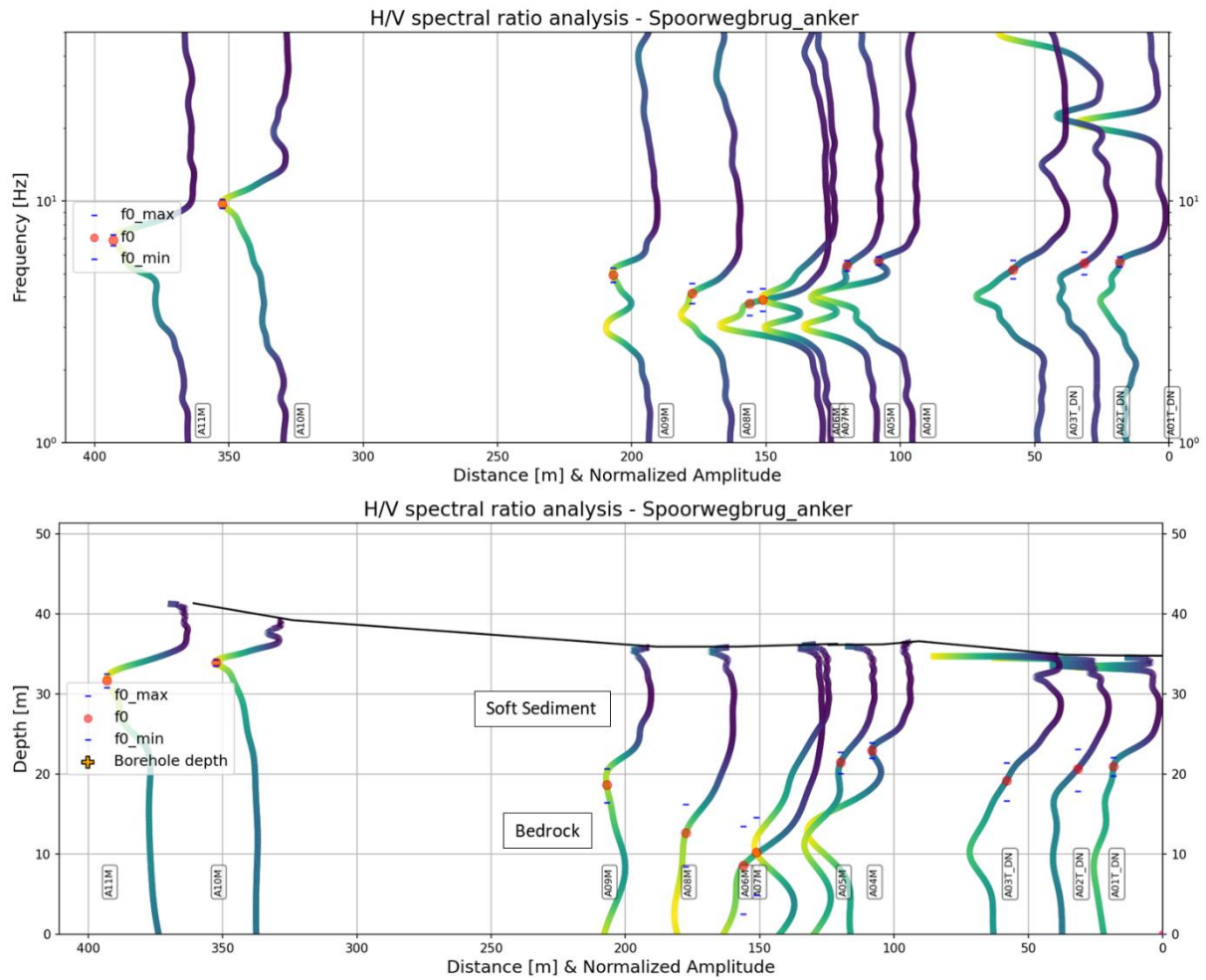
Onder Denayer lijkt de overgang sediment – verweerd gesteente zich op vergelijkbare diepte te bevinden dan onder het jaagpad. Resonantie schommelt tussen 5.2 Hz en 5.6 Hz. Omgezet naar diepte geeft dit dieptes tussen 13.8 en 15.7 m.

In het bos tussen spoorwegbruggen (metingen A06M → A09M) bevindt het gesteente zich iets dieper dan langsheen het jaagpad: 23.3 m tot 27.6 m. Metingen A04M en A05M tonen zelfde waarden als langsheen het jaagpad, maar de HVSR-curve is complexer. A04M werd dicht tegen de spoorwegberm genomen en voorzichtigheid is geboden in het interpreteren van deze curve.

Metingen A10M en A11M werden bovenaan de berm ten zuiden van de 2^e spoorwegbrug genomen. De grond was erg los waardoor een goede koppeling tussen sensor en bodem moeilijk was. Ook hier is voorzichtigheid geboden in het interpreteren van de data. Vooral voor A10M, waar het gesteente zich op dezelfde hoogte zou bevinden (na omzetting van de resonantiefrequentie) dan de absolute hoogte van het jaagpad, betrouwen we de meting niet. A11M toont een gelijkaardige diepte dan elders naast het jaagpad.



Figuur 19: Resonantiefrequentie profiel van Z naar N weergegeven, langsheen het Zennekanaal. Afstanden zijn absolute afstanden van elk virtueel boorgat tot het eerste meetpunt A01T_DN. Kleuren van het frequentieprofiel (boven) of het diepte-profiel (onder) geven de H/V amplitude weer, genormaliseerd naar de grootste H/V amplitude. Elke verticale lijn geeft een virtueel boorgat weer, zoals gerapporteerd in bijlage 2.



Figuur 20: Resonantiefrequentie profiel van Z naar N weergegeven, langs het Zennekanaal. Afstanden zijn absolute afstanden van elk virtueel boorgat tot het eerste meetpunt A01T_DN. Kleuren van het frequentieprofiel (boven) of het diepteprofiel (onder) geven de H/V amplitude weer, genormaliseerd naar de grootste H/V amplitude. Elke verticale lijn geeft een virtueel boorgat weer met een horizontale overdrijving (x50).

4. Conclusies

Deze studie toont aan dat de toepassing van Horizontale-over-Verticale Spectraal Ratio (HVSr) analyse van seismische ruis werkt in een stedelijk gebied. Meettijden van 3 tot 4 uur waren voldoende om een stabiele en statistische HVSr-curve te krijgen. Voornamelijk de SmartSolo 5 s IGU-BD3C-5 geofonen en de SmartSolo 5 Hz IGU-16HR-3C ingegraven in de berm geven goede resultaten. Wanneer deze resultaten verder worden gebruikt in een vergelijking met de boorgaten en andere geofysische methoden, raden we aan om **meer gewicht** te geven aan de resultaten bekomen met de SmartSolo 5 s IGU-BD3C-5 geofonen (notatie G) en ingegraven SmartSolo 5 Hz IGU-16HR-3C (notatie M) dan aan de SmartSolo 5 Hz IGU-16HR-3C geofonen geïnstalleerd op een driepikkel (notatie T).

Er werd een aparte empirische formule opgesteld voor het gebied rondom de spoorwegbruggen om resonantiefrequentie (f_0) om te zetten naar sokkeldiepte (h). Deze formule is maar beperkt bruikbaar en meer metingen dienen te gebeuren in de regio Halle om een meer algemene formule te kunnen gebruiken. 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.

De HVSr-polarisatie geeft interessante resultaten en toont dat f_0 sterk gepolariseerd is in een WNW-OZO richting. Helaas, net zoals bij de Bospoortbrug kan het niet worden bepaald of deze polarisatie kan worden gelinkt met de structurele oriëntatie van de steil- tot rechtopstaande gesteentelagen van de Tubize Formatie, zoals geobserveerd bij het station van Halle of in de nabijgelegen groeve van Rodenem, of dat de polarisatie wordt veroorzaakt door een resonantie loodrecht op het kanaalbekken. Mogelijks hebben beide hypothesen een invloed. 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.

We concluderen dat het afbraak/erosie vlak van het Brabant Massief vrij horizontaal is en dat vooral de dikte van de verwerking van de sokkel een bepalende factor is voor de sterkte van de ondergrond. Ongeacht de variabele dikte van het verweerde gesteente, wordt de overgang van sediment naar het verweringsoppervlak van de Brabant Massief duidelijk aangetoond met de HVSr-techniek en uit ze zich meestal vrij duidelijk met 1 resonantiepiek in de HVSr-curve. Echter, het blijft een interpretatie dat de eerste piek de overgang tussen sediment en het verweerde gesteente weergeeft en schuifgolfsnelheidsmetingen en seismische netwerkmetingen zouden moeten worden uitgevoerd om dit te bevestigen.

Het grind dat regelmatig wordt aangetroffen boven het verweerde gesteente, wijst erop dat ook in dit gebied deze afzettingen kunnen worden gerelateerd met een oude Weichseliaan (Kwartair) terras of afzettingen van de Kwartaire paleo-Zenne. De resultaten en boorkernen zijn interessant voor bijkomende Paleozoïsche en Kwartairgeologische studies, en het is dan ook aangeraden om de boorstalen, na afloop, over te dragen aan de Geologische Dienst van België.

5. 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.
- 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.
- Petitclercq, E., Van Noten, K., Van Lysebetten, G., Van der Veken, J., Van Breusegem, M., Beyene, A., Duren, T., Orban, P., 2024. GeoCamb – Geothermal Energy Potential in Cambrian rocks focusing on public buildings (No. Final Report" Brussels: Belgian Science Policy Office 2024. BRAIN-be 2.0-(Belgian Research Action through Interdisciplinary Networks)). Brussels, Belgium.
- 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.
- Van Noten, K., De Plaen, R.S.M., 2024. Bepaling van de sokkeldiepte van het Brabant Massief met behulp van seismische ruismetingen ter hoogte van de Bospoortbrug te Halle (No. ROB-DVW2024-01). Royal Observatory of Belgium, Ukkel, Belgium.
- 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>
- Zeckra, M., Noten, K.V., Lecocq, T., 2022. Sensitivity, Accuracy and Limits of the Lightweight Three-Component SmartSolo Geophone Sensor (5 Hz) for Seismological Applications.

Bijlage 1: HVSR metingen en resultaten

Zie bijgevoegde *HVSR_database_Spoorwegbrug.csv* file:

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 indivuale 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

Bijlage 2: HVSR metingen en Virtuele boorgaten

In bijlage 2 worden alle virtuele boorgaten getoond. Deze zijn gerangschikt van noord naar zuid en genummerd met hun ID nummer. De omzetting van resonantiefrequentie naar diepte gebeurde met de powerlaw relatie: $h = 277.787 * f_0^{-1.741}$.

De virtuele boorgaten werden ook in numeriek formaat opgeleverd (.csv formaat) zodat ze elders kunnen worden geplot. In deze csv files worden volgende kolommen gerapporteerd:

Freq: frequentie van 1 tot 50 Hz

h: omzetting van Freq naar diepte met behulp van de powerlaw relatie

A: H/V amplitude

A_min en **A_max:** onzekerheid op H/V amplitude

De codes achter de meetpunten wijzen op de manier waarop de seismische instrumenten werden geplaatst (zie duiding in rapport):

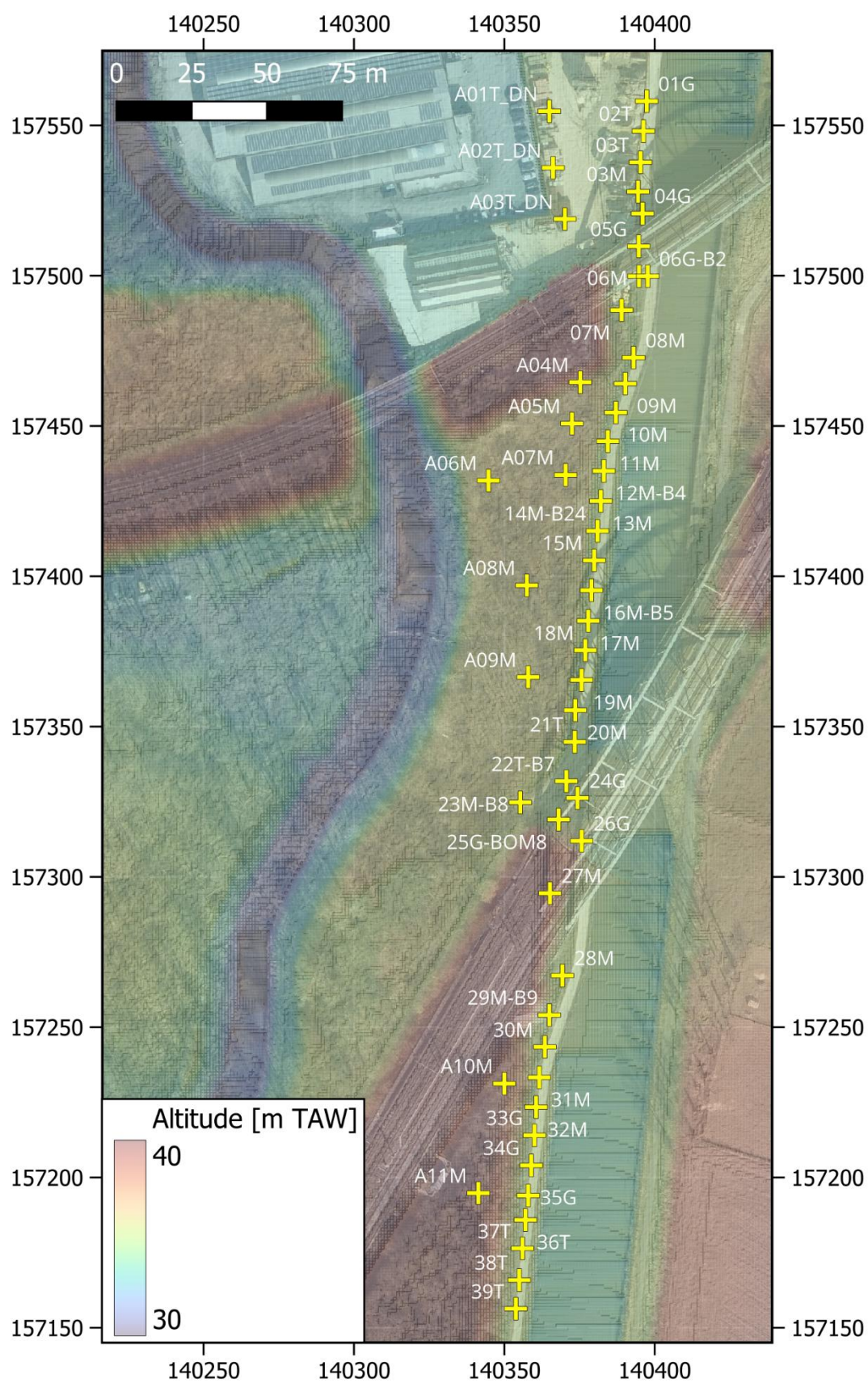
M: SmartSolo 5 Hz IGU-16HR 3C ingegraven met spike

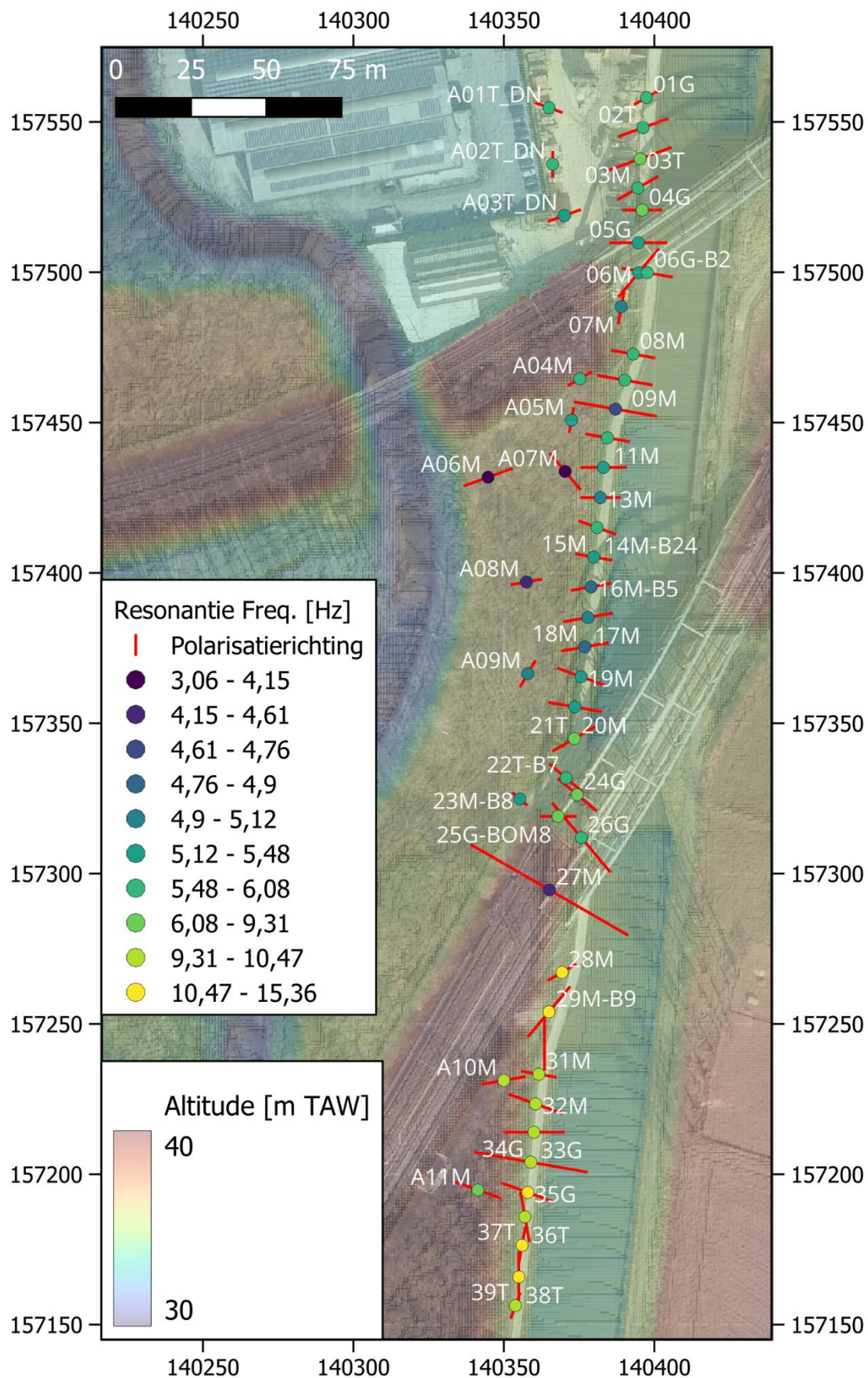
T: SmartSolo 5 Hz IGU-16HR 3C op een driepikkel op het jaagpad

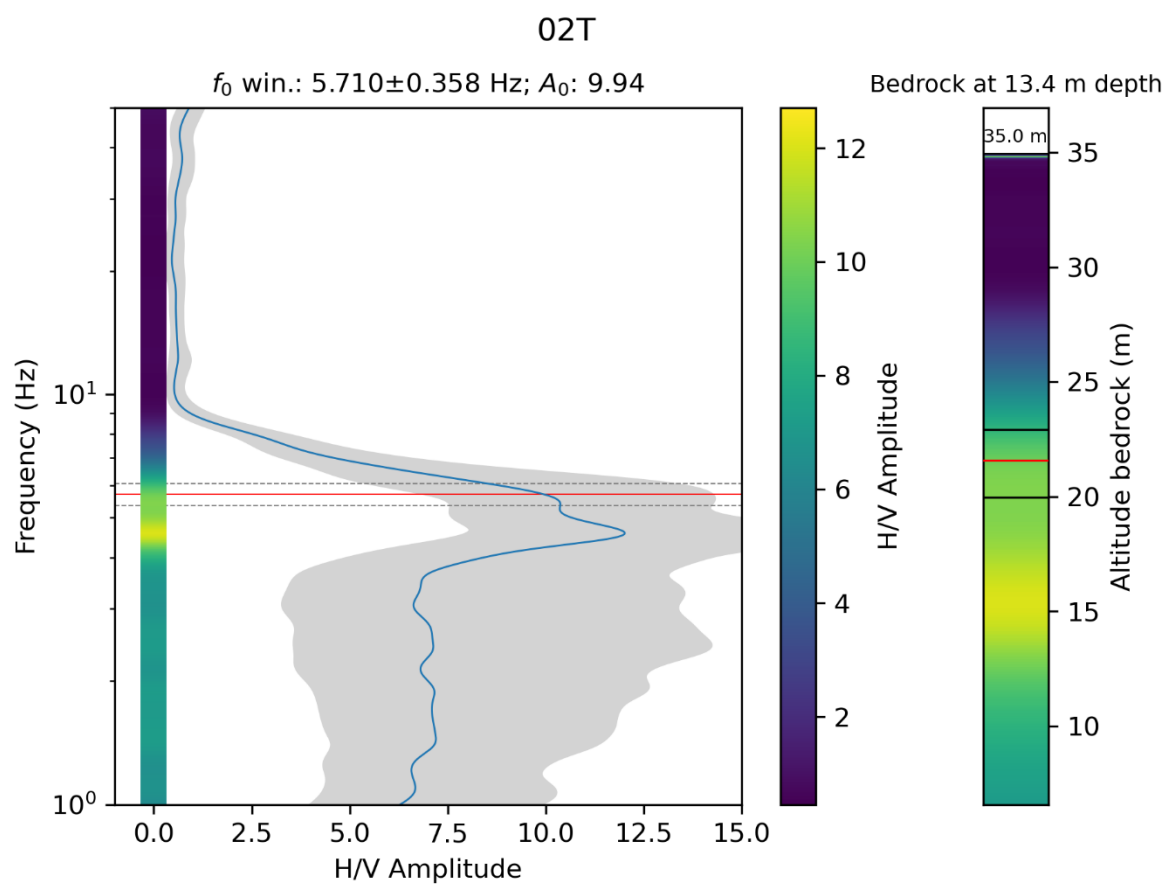
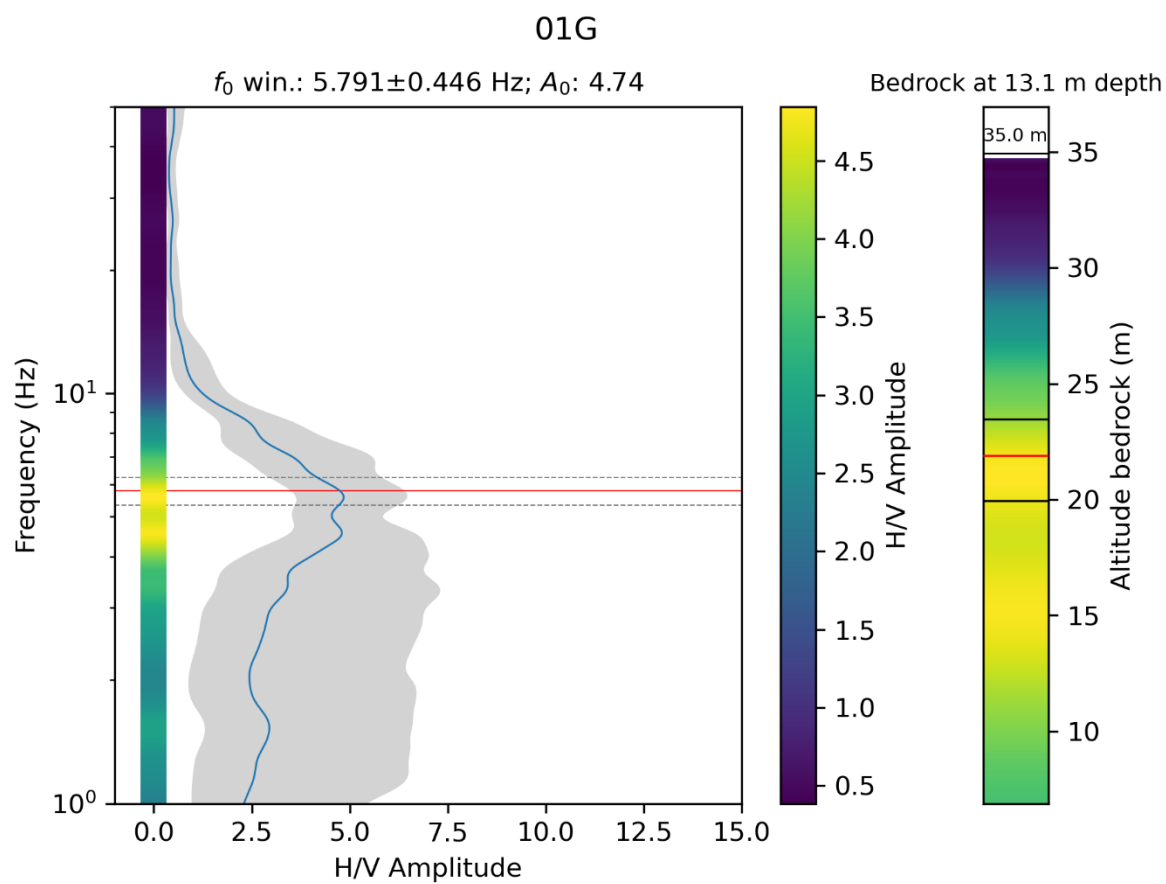
G: SmartSolo 5 s IGU-BD3C-5 op het jaagpad

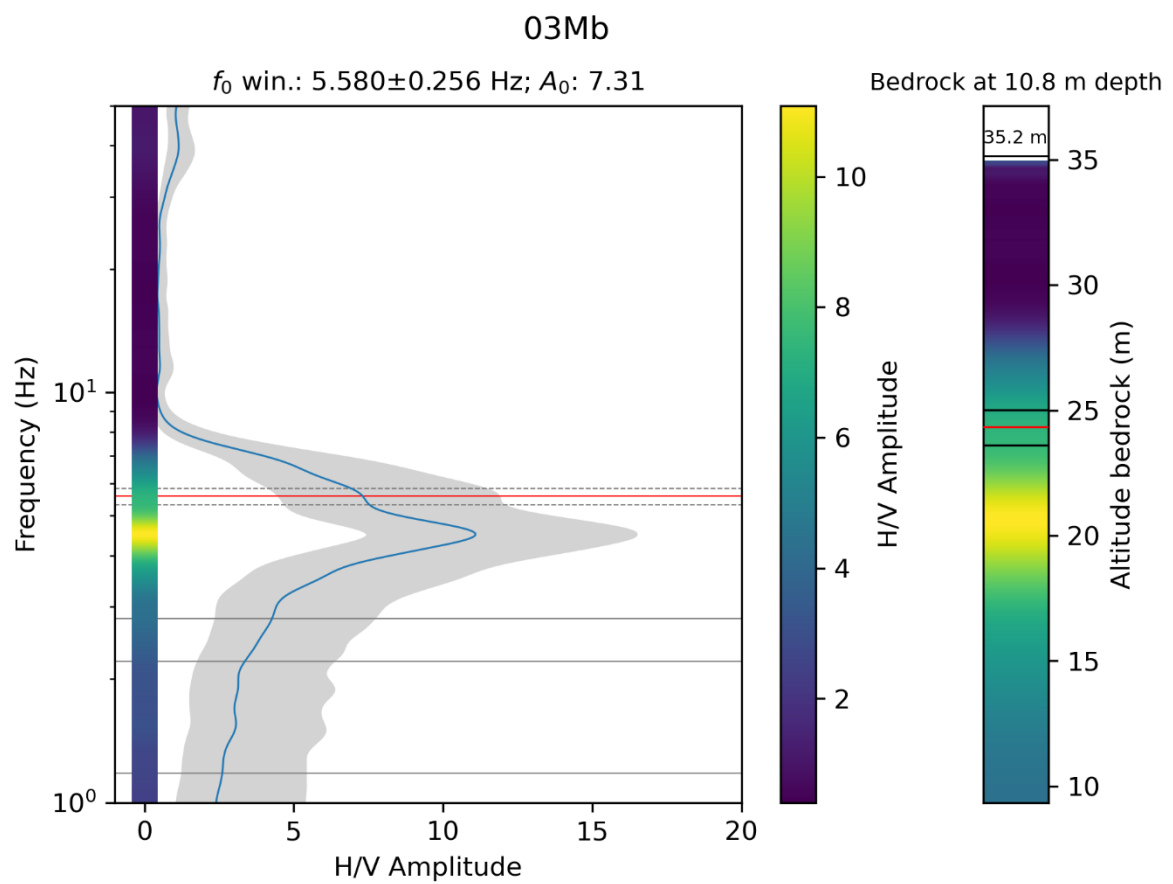
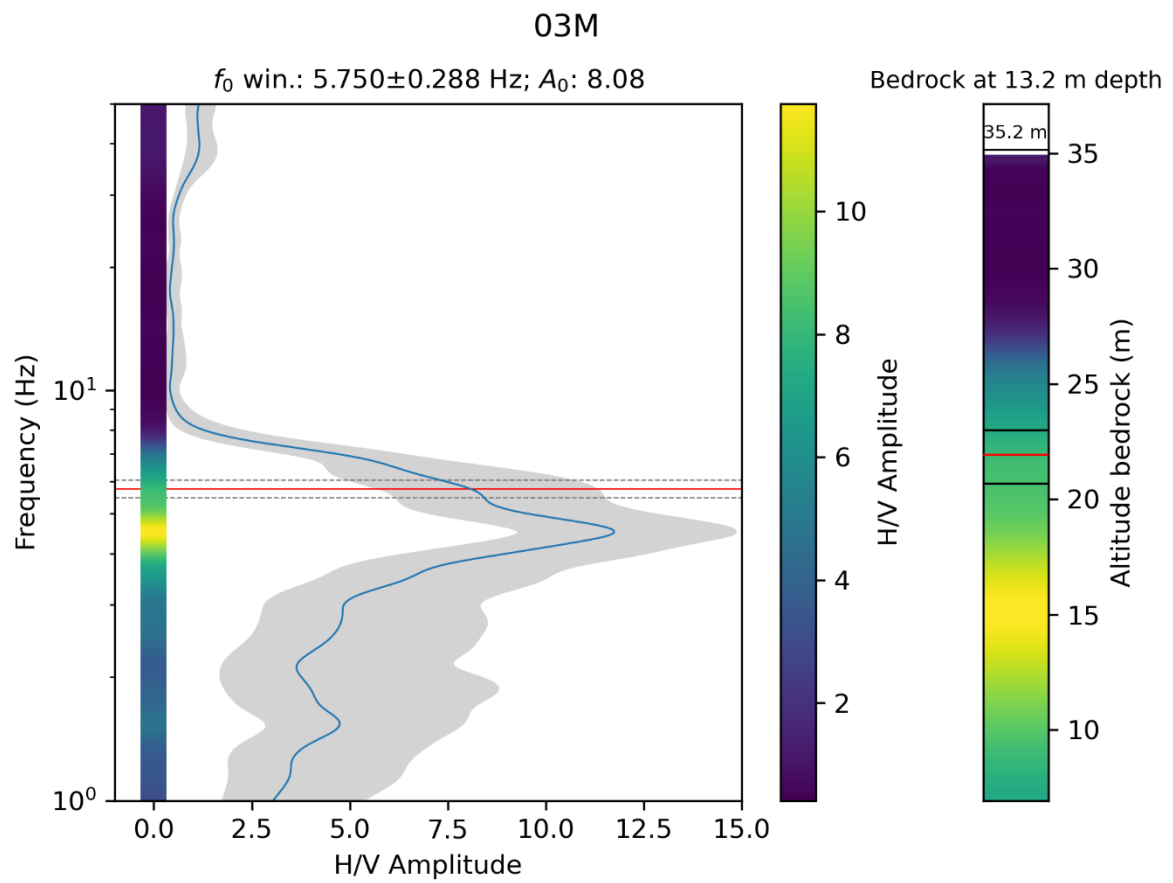


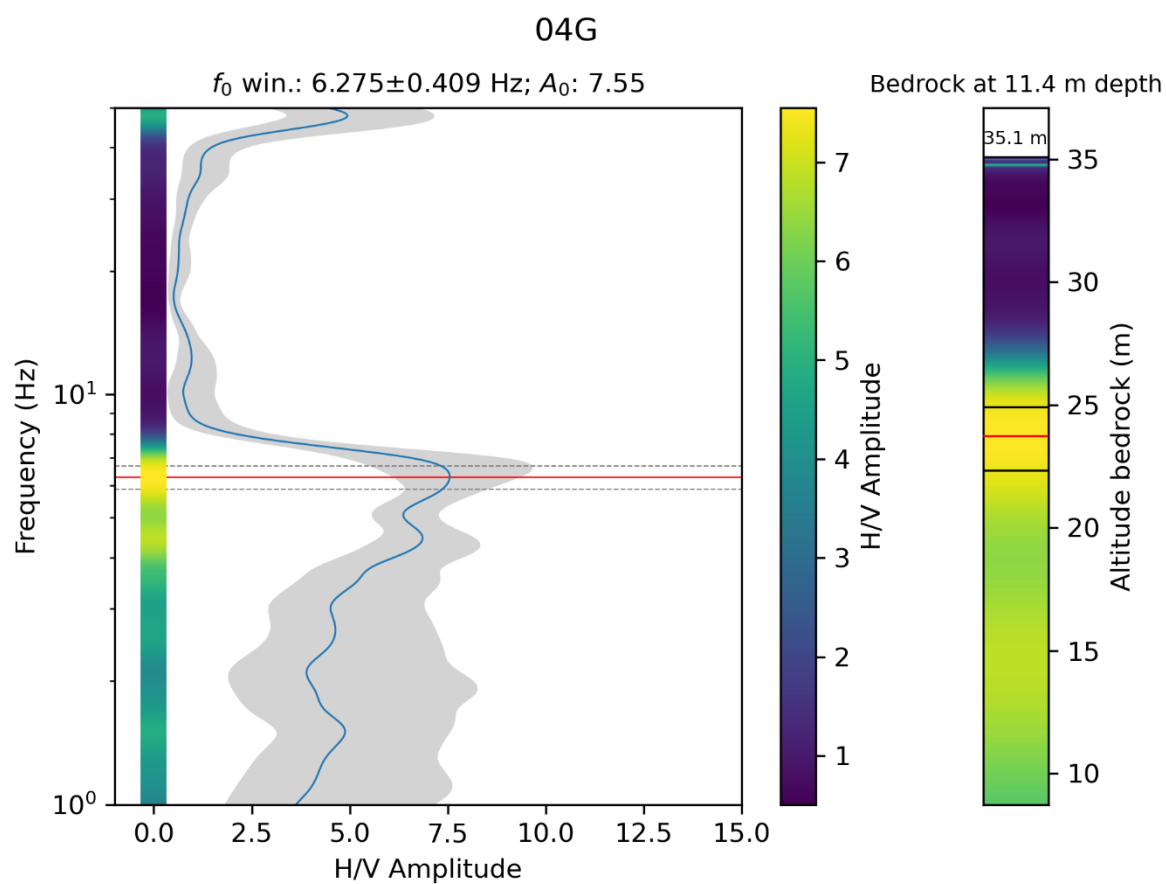
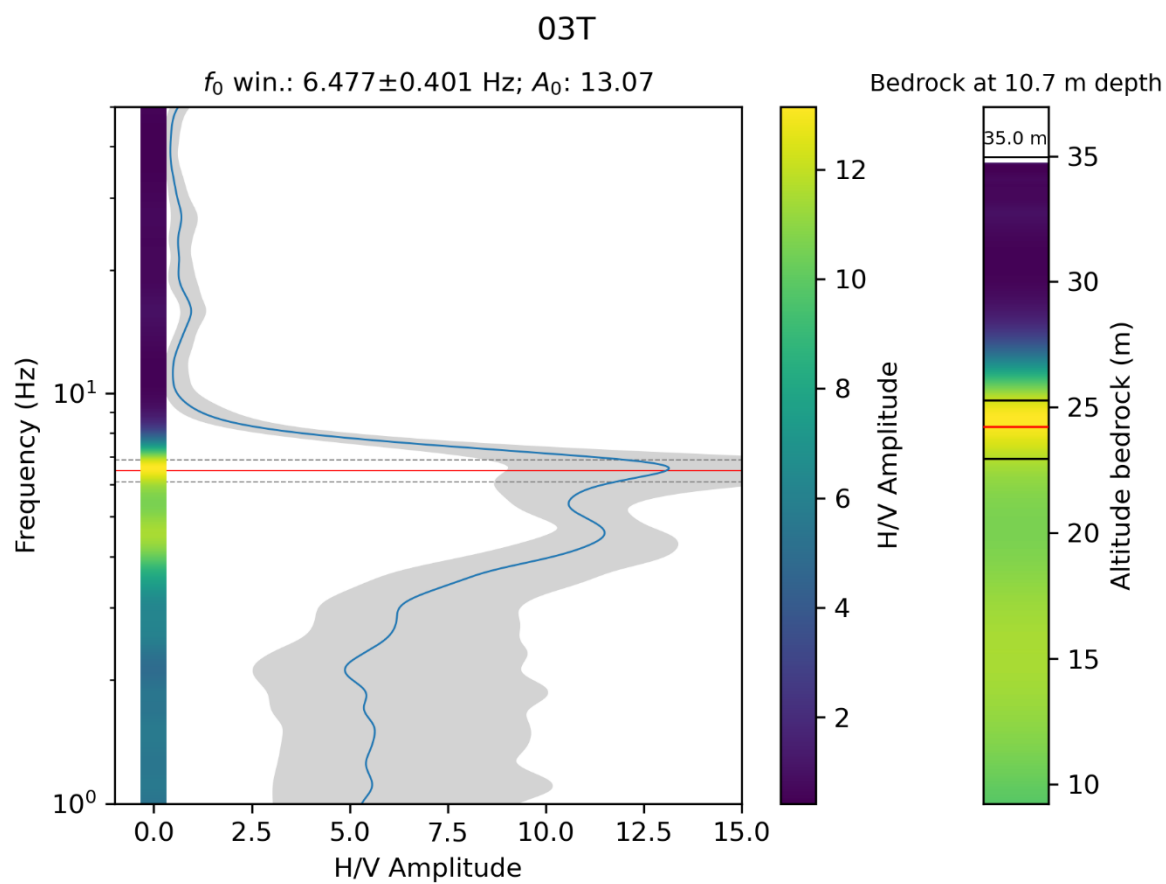
Coördinaten vermeld op onderstaande kaarten zijn in Lambert72.

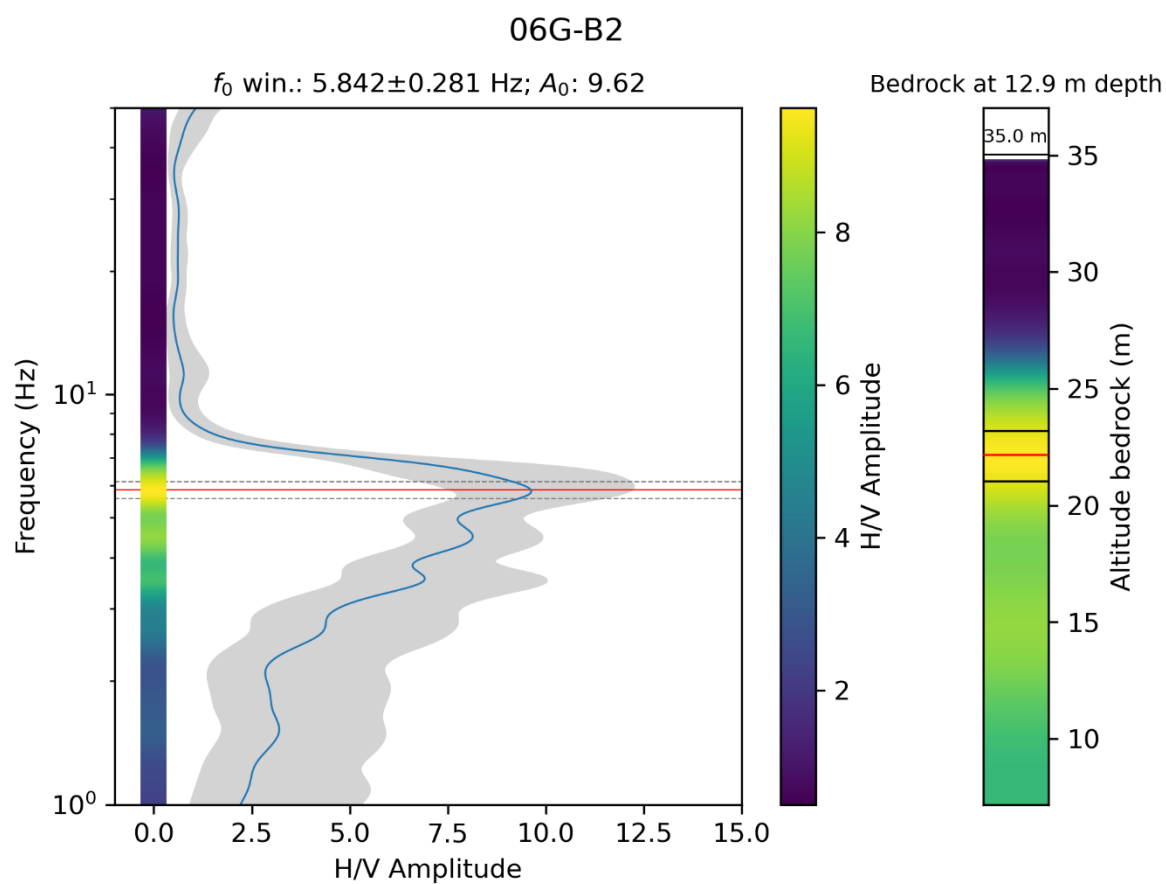
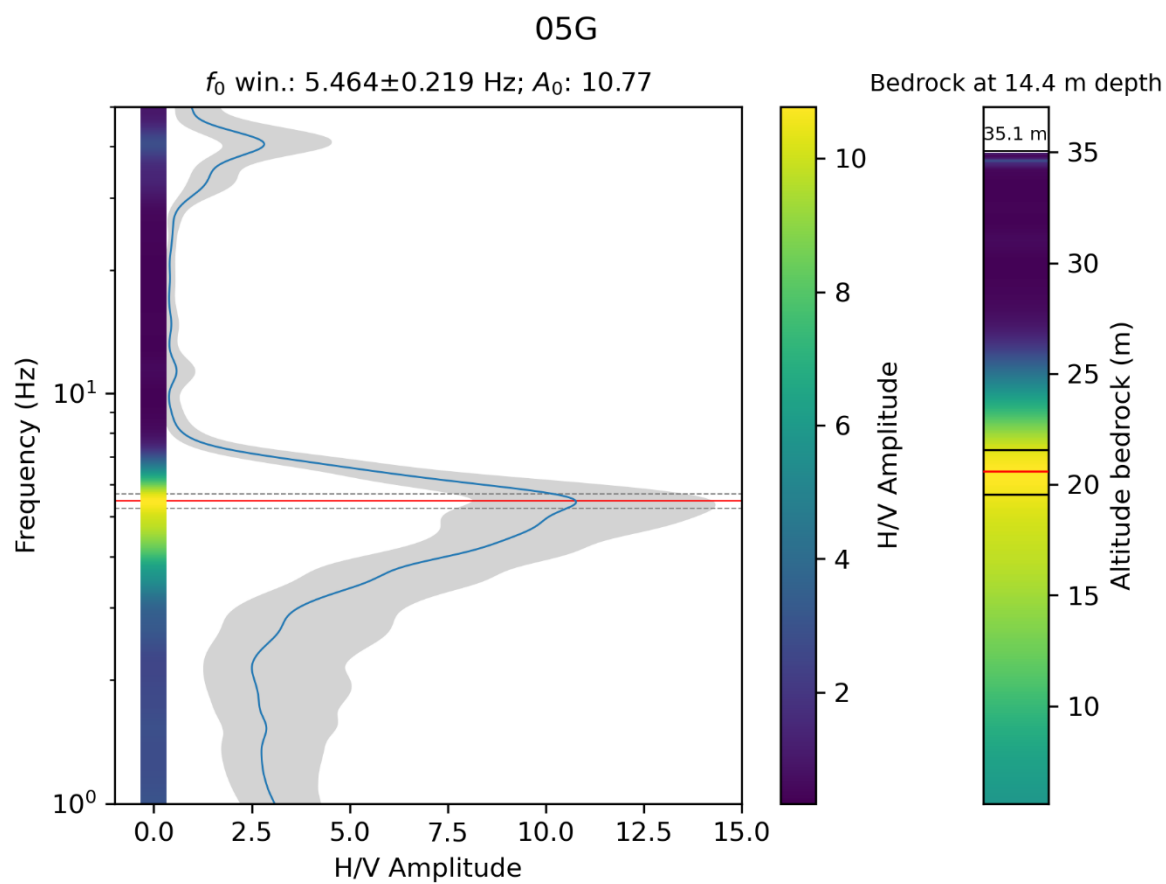


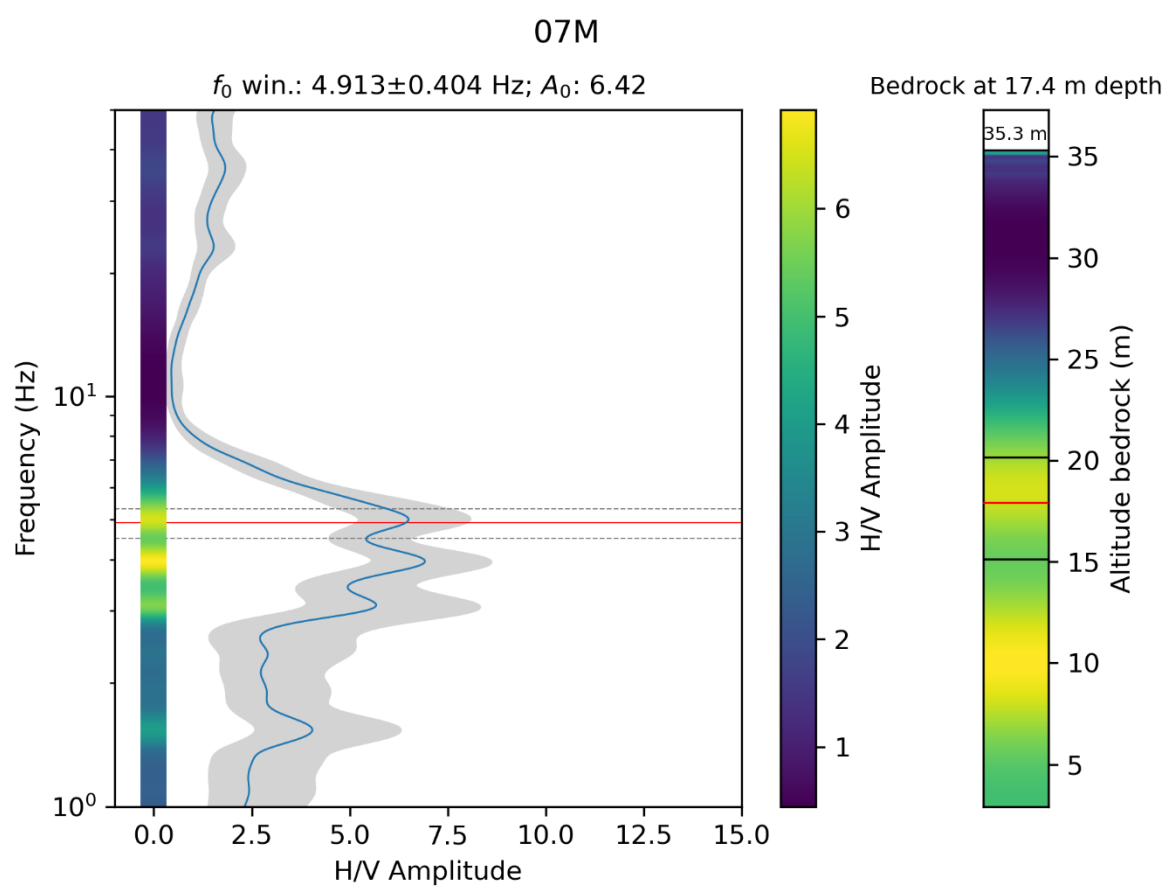
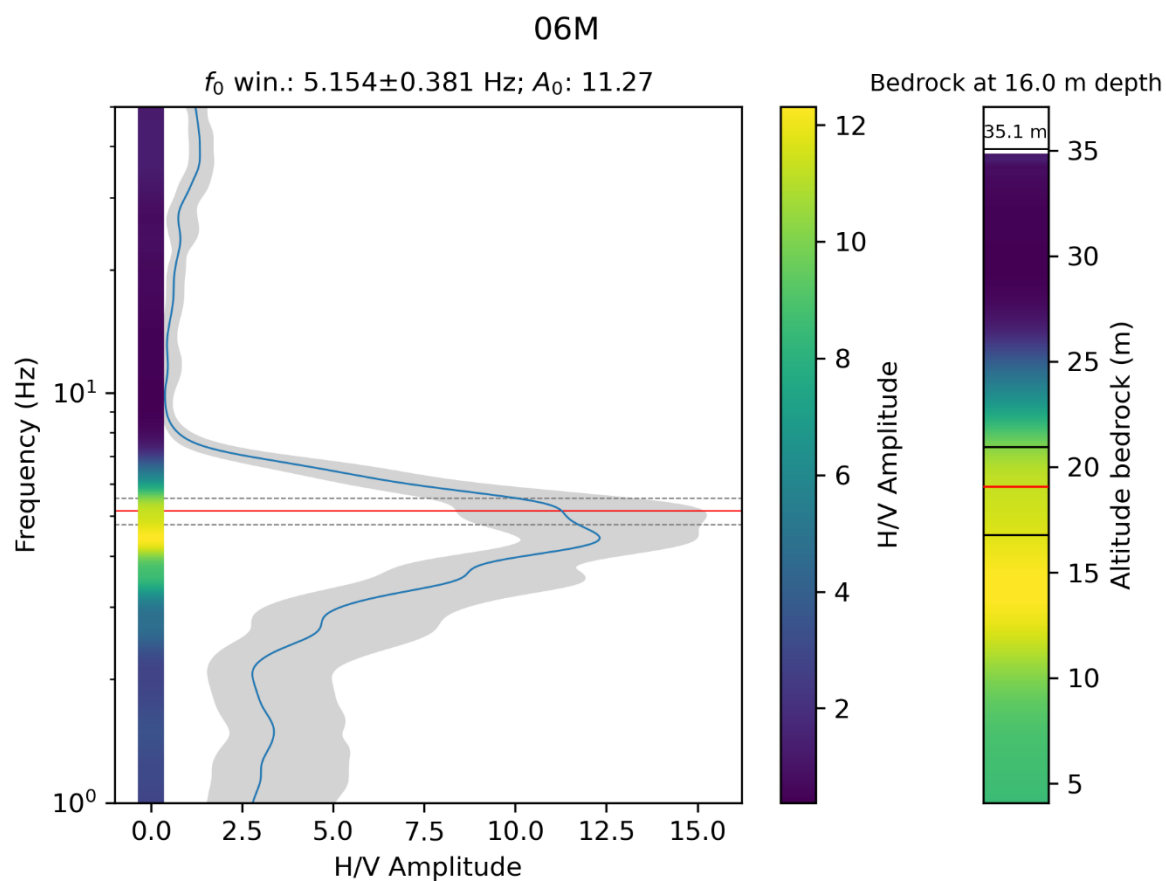


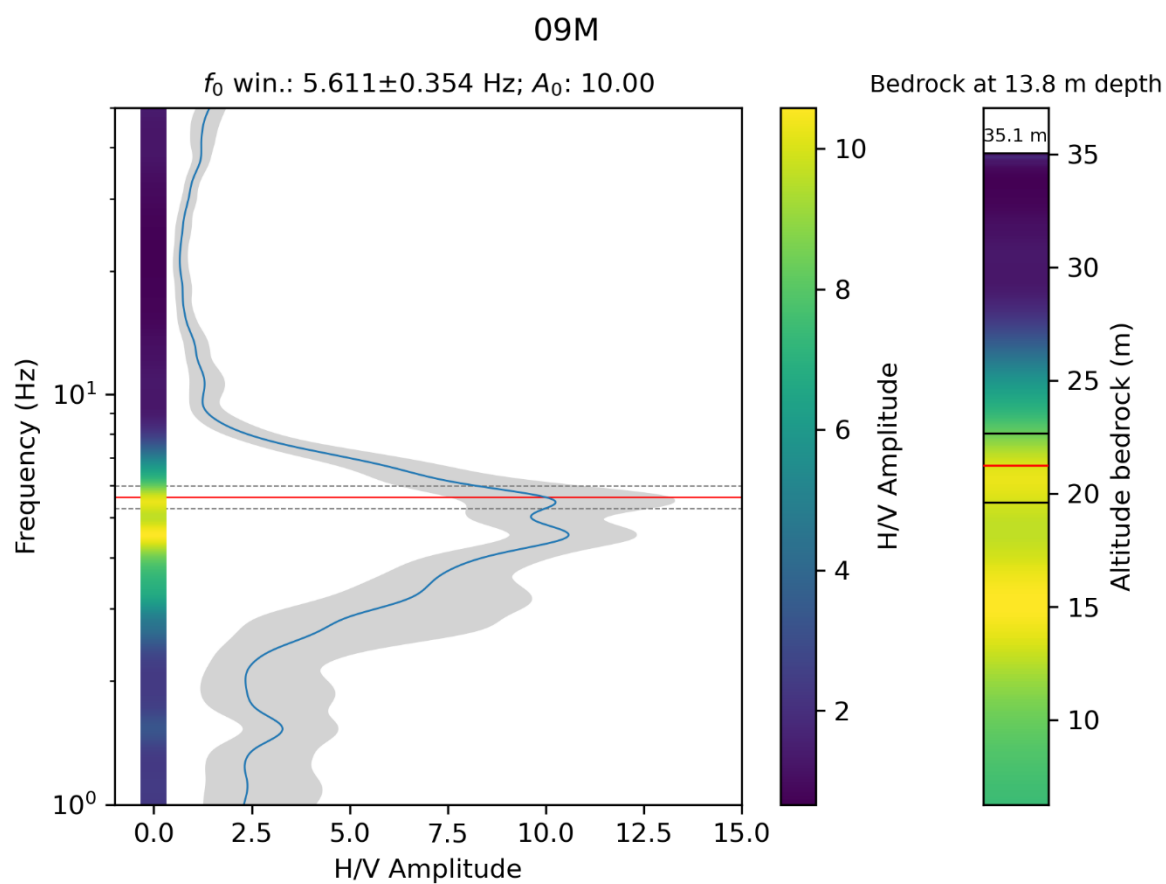
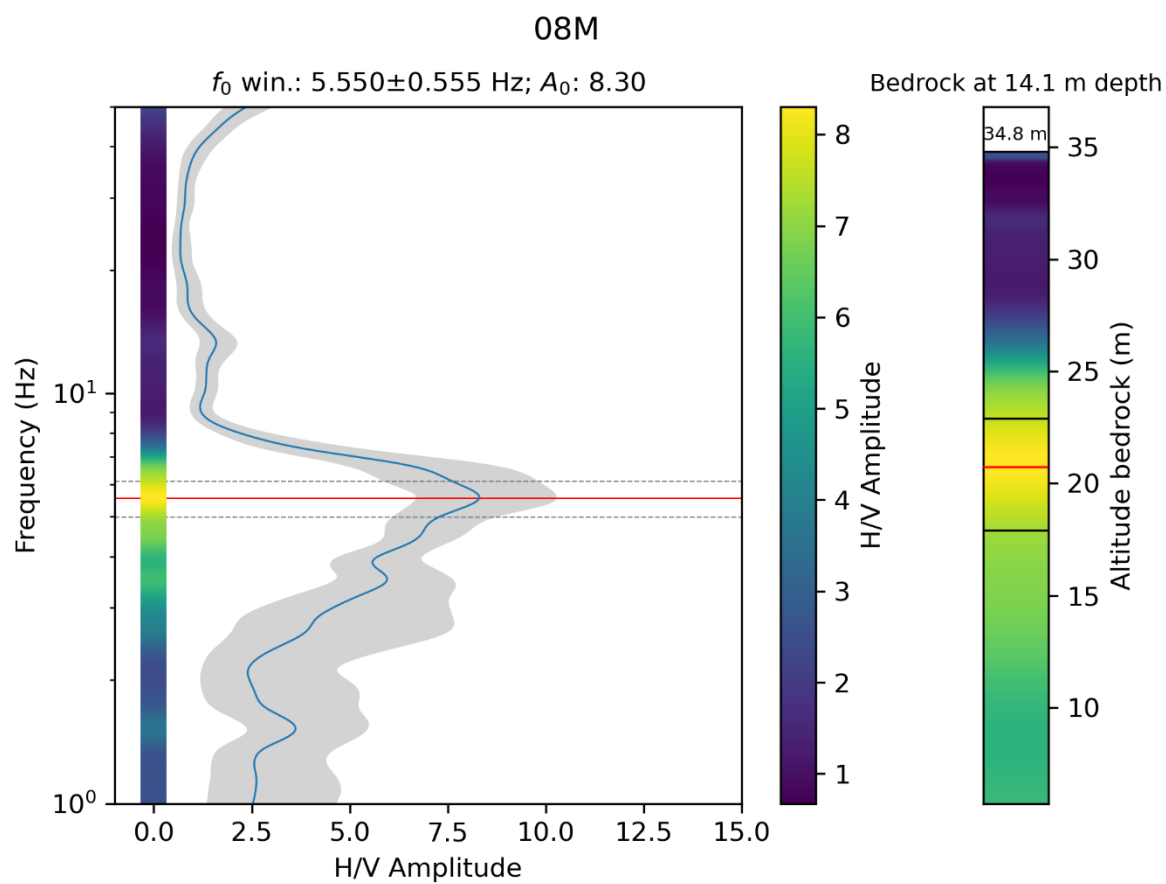


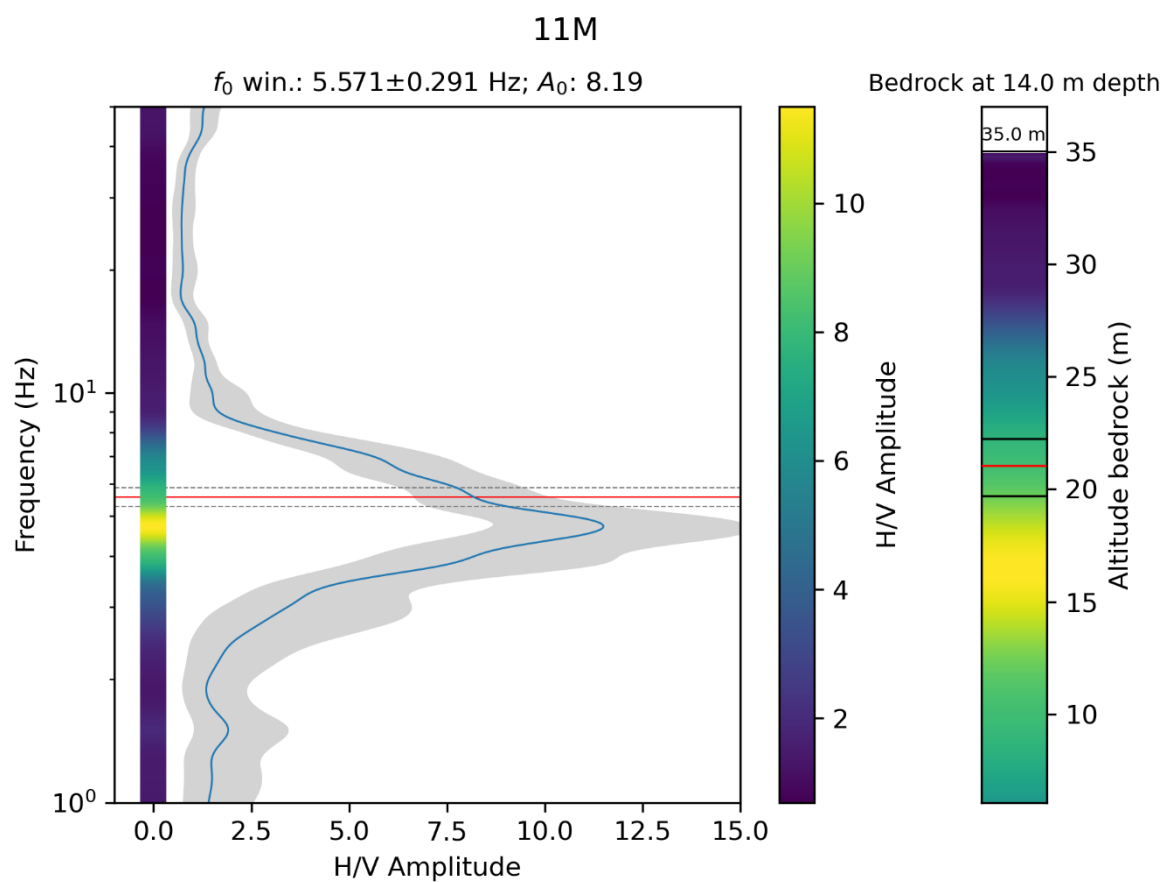
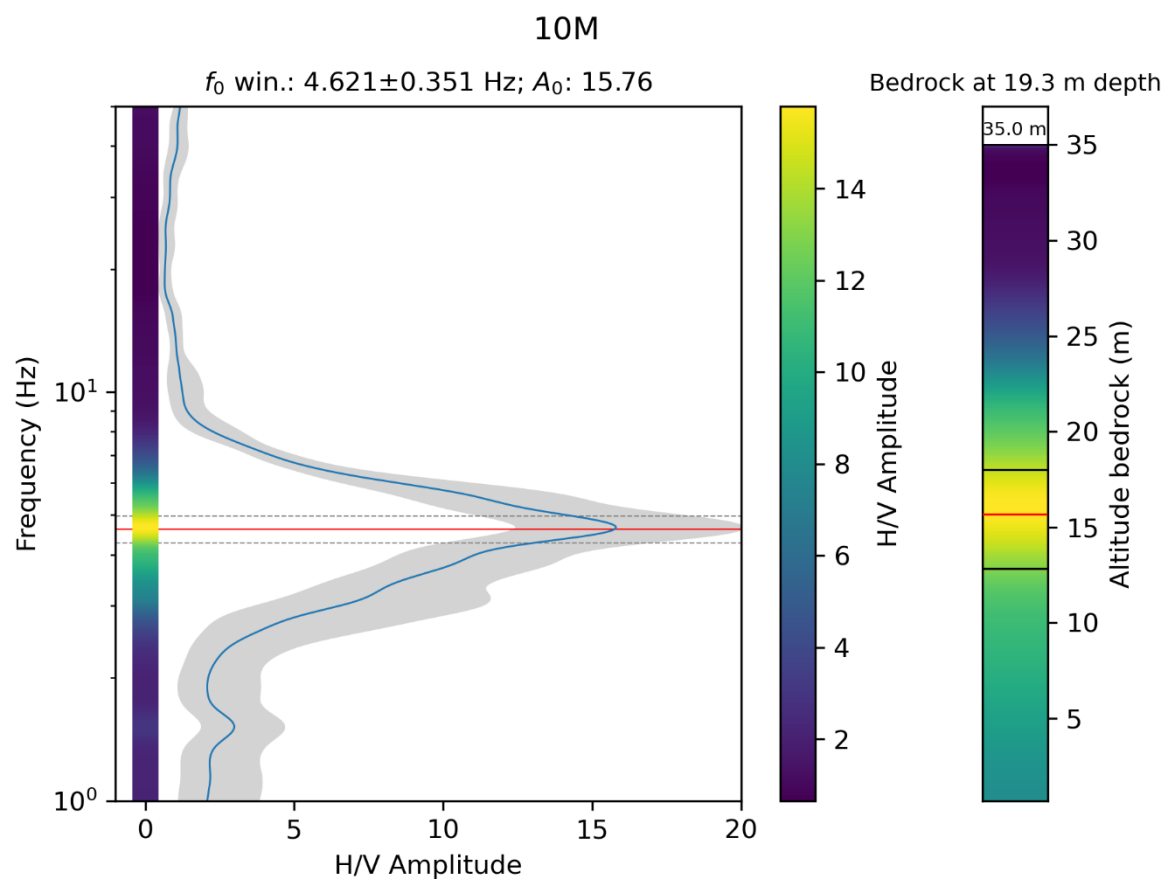


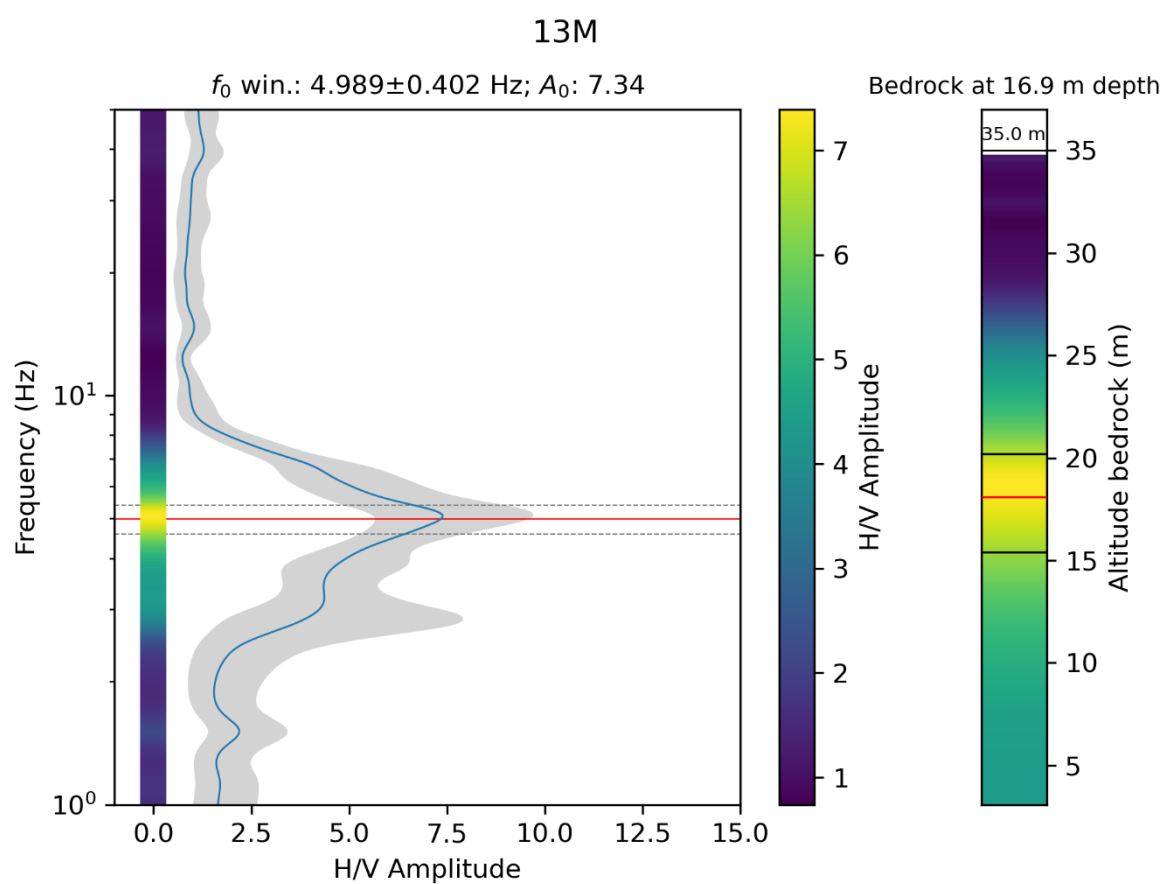
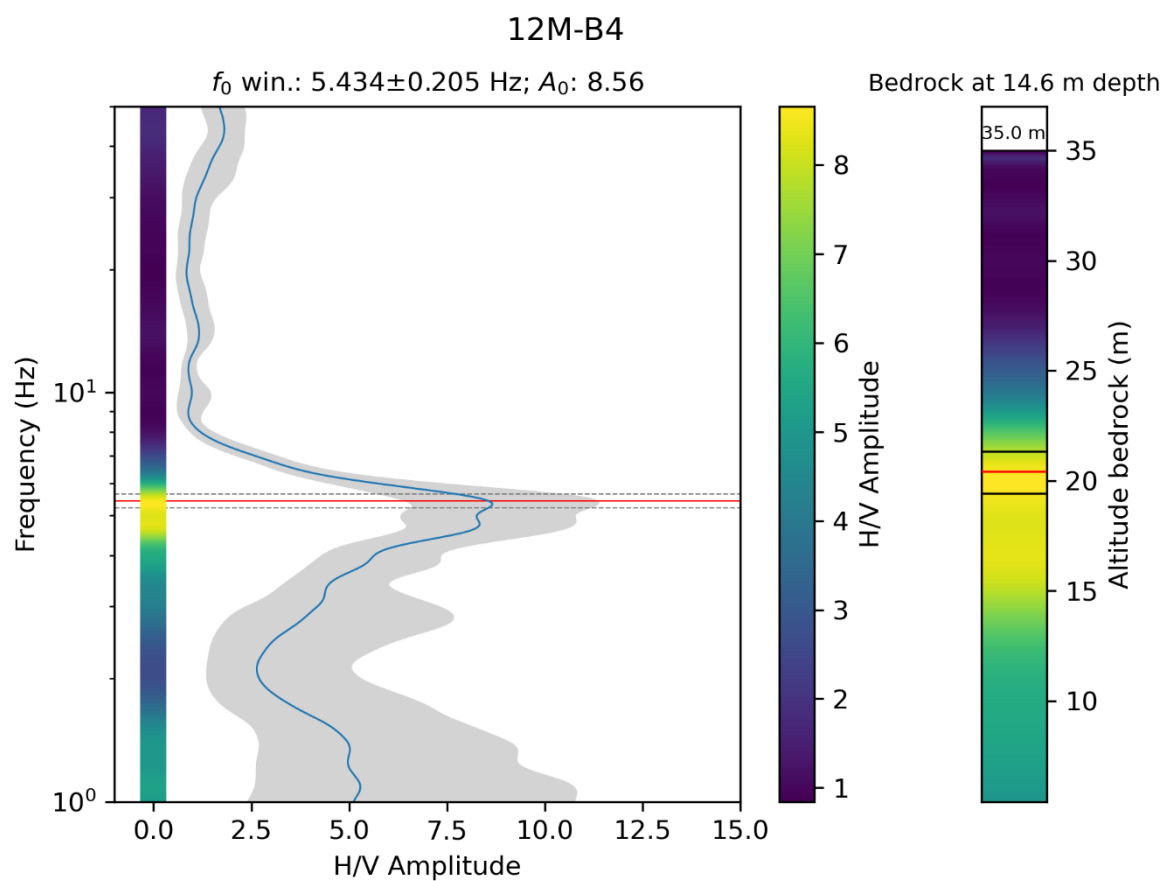


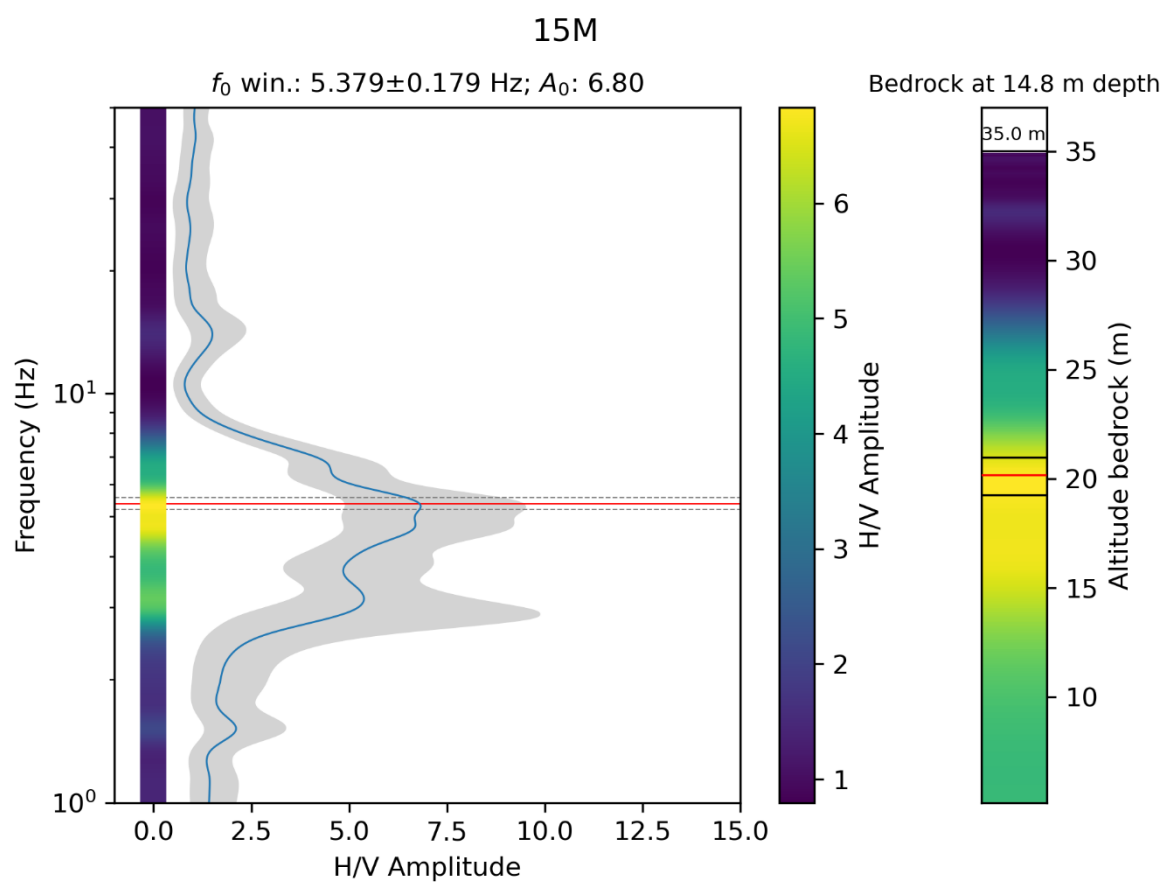
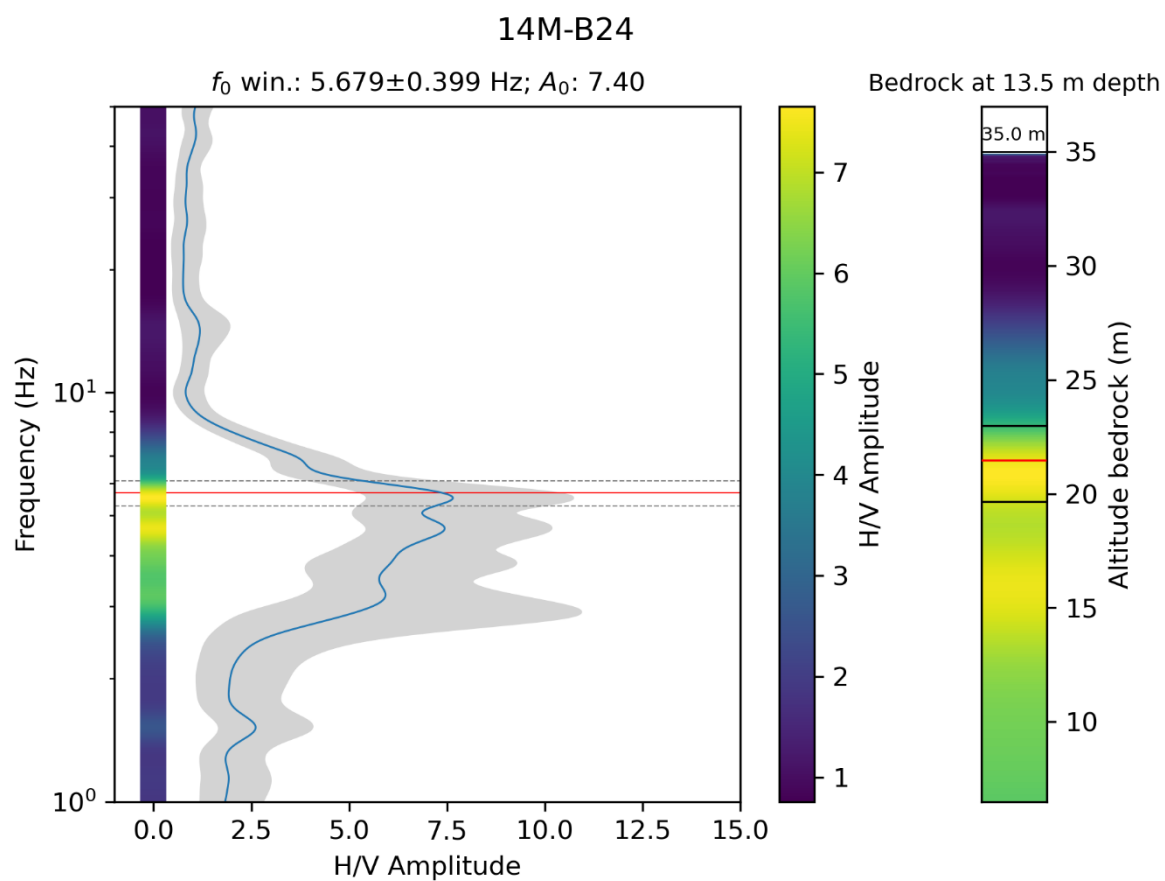


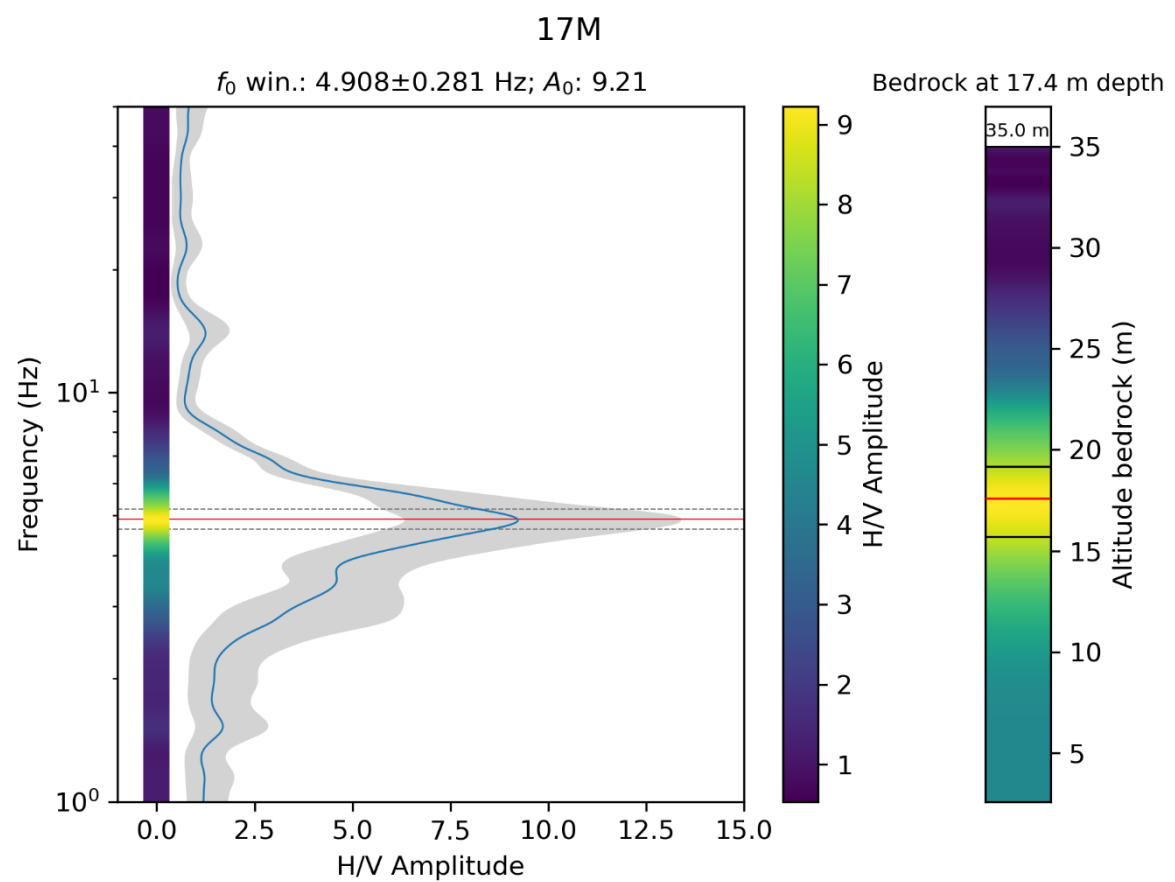
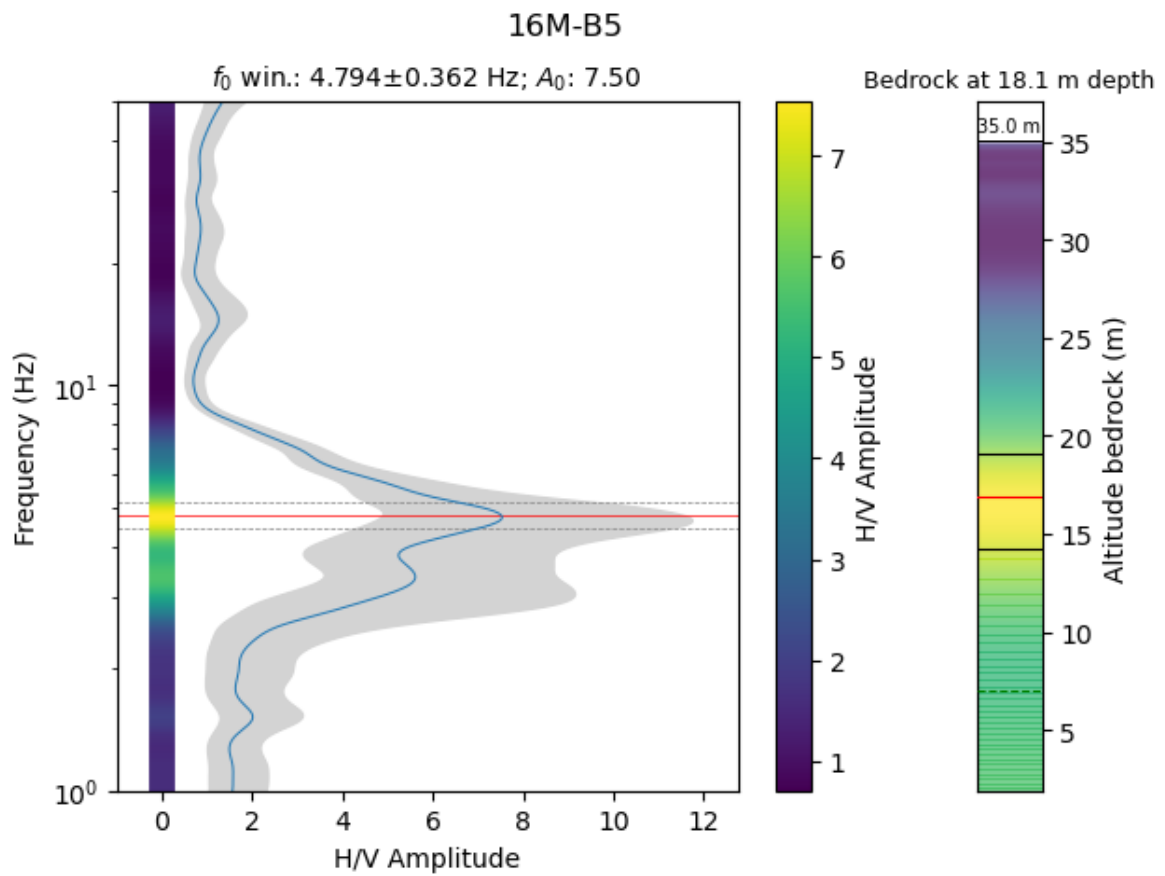


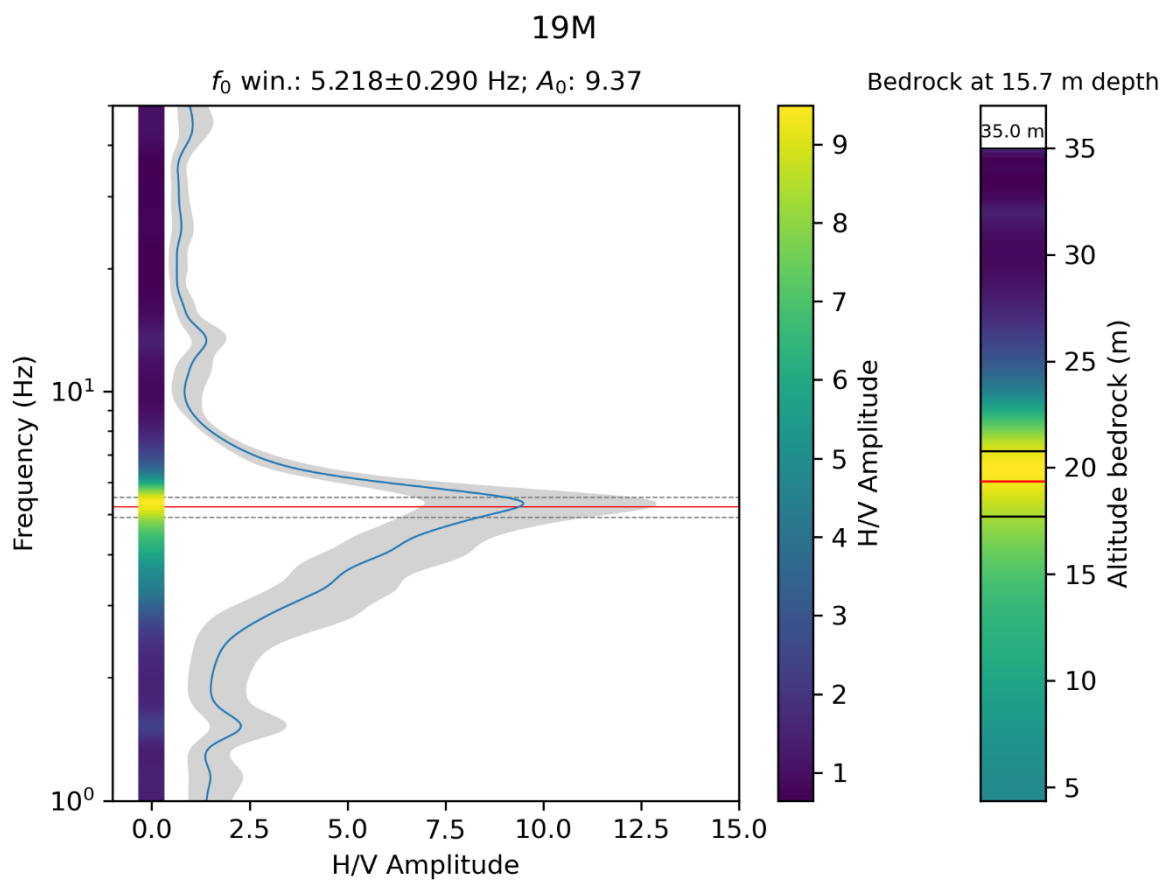
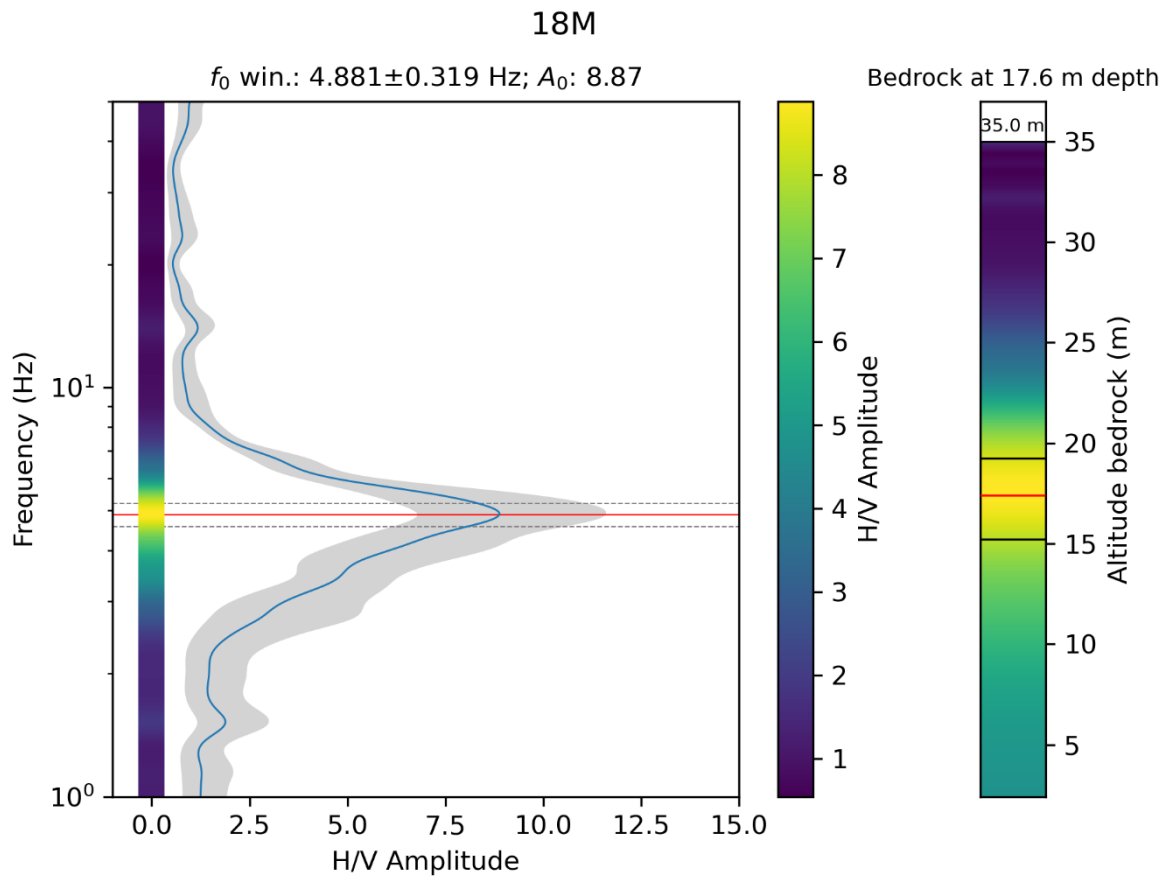


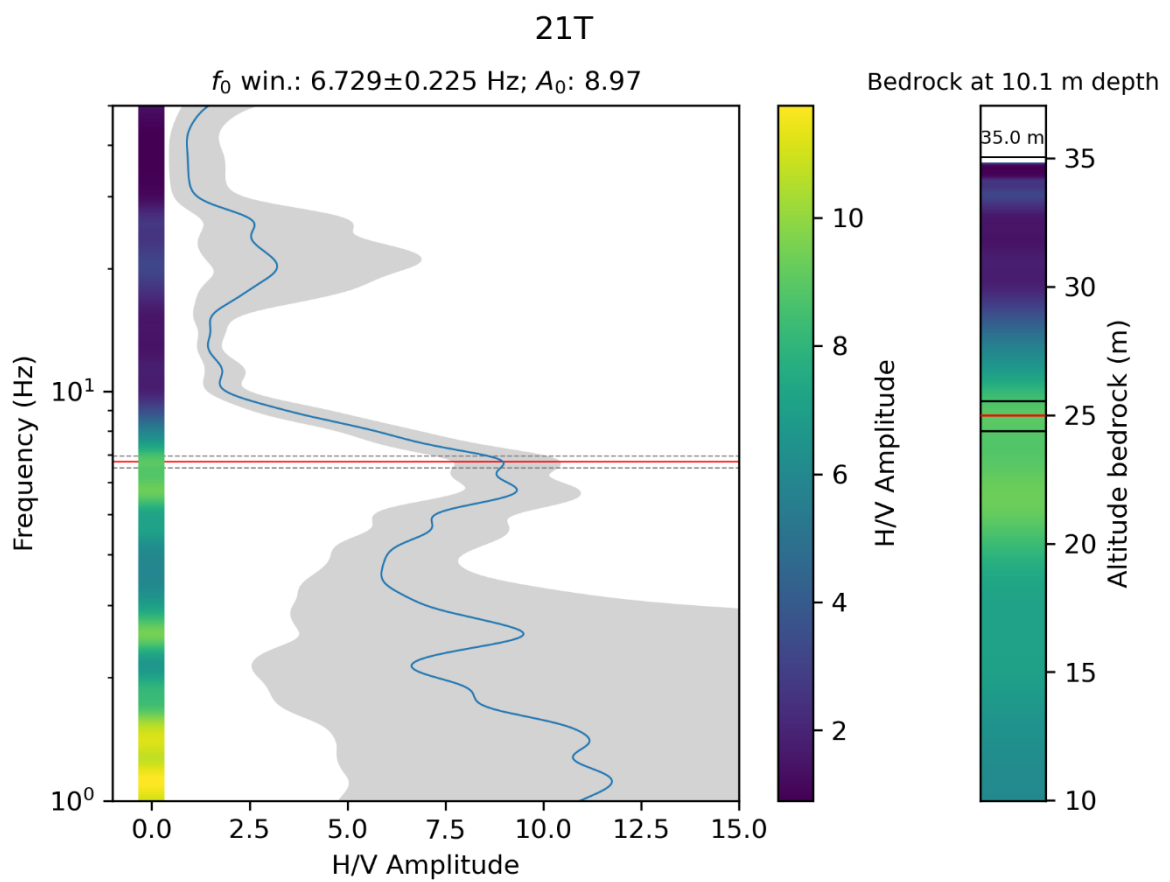
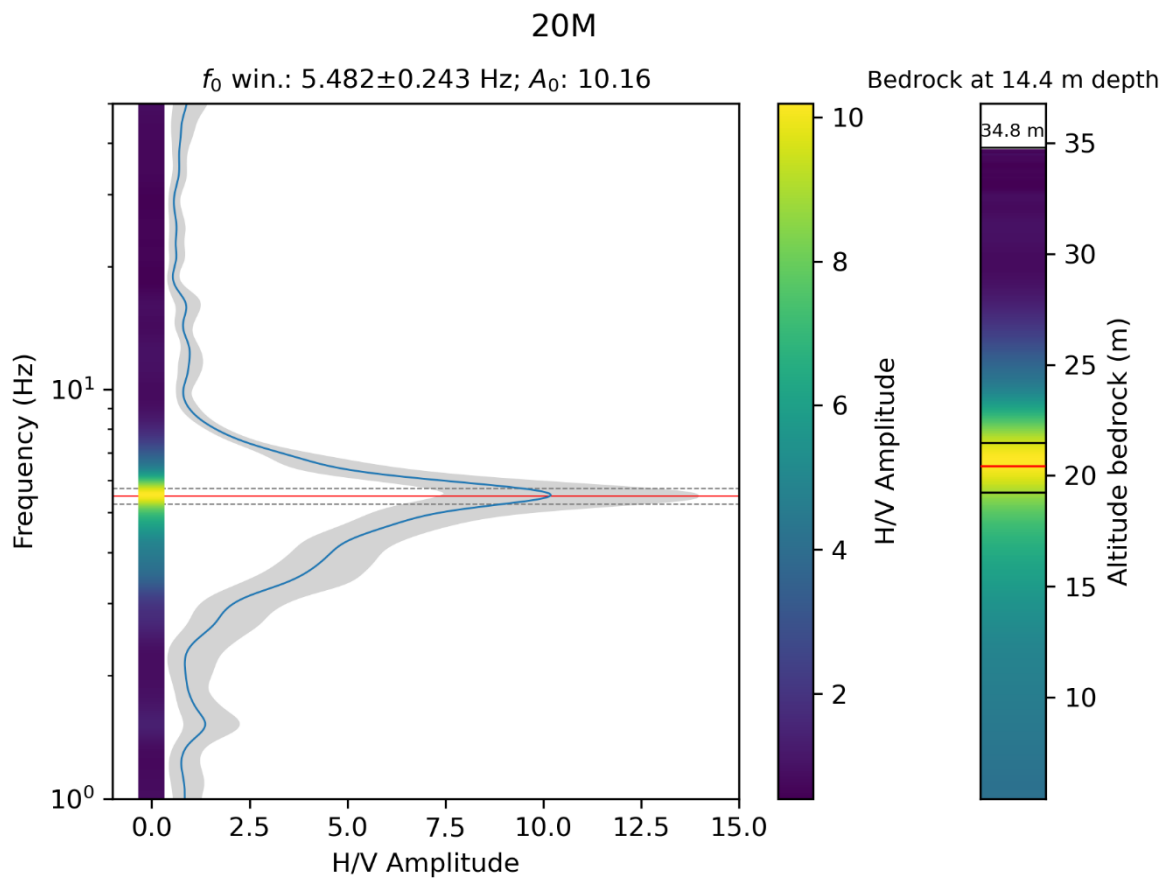


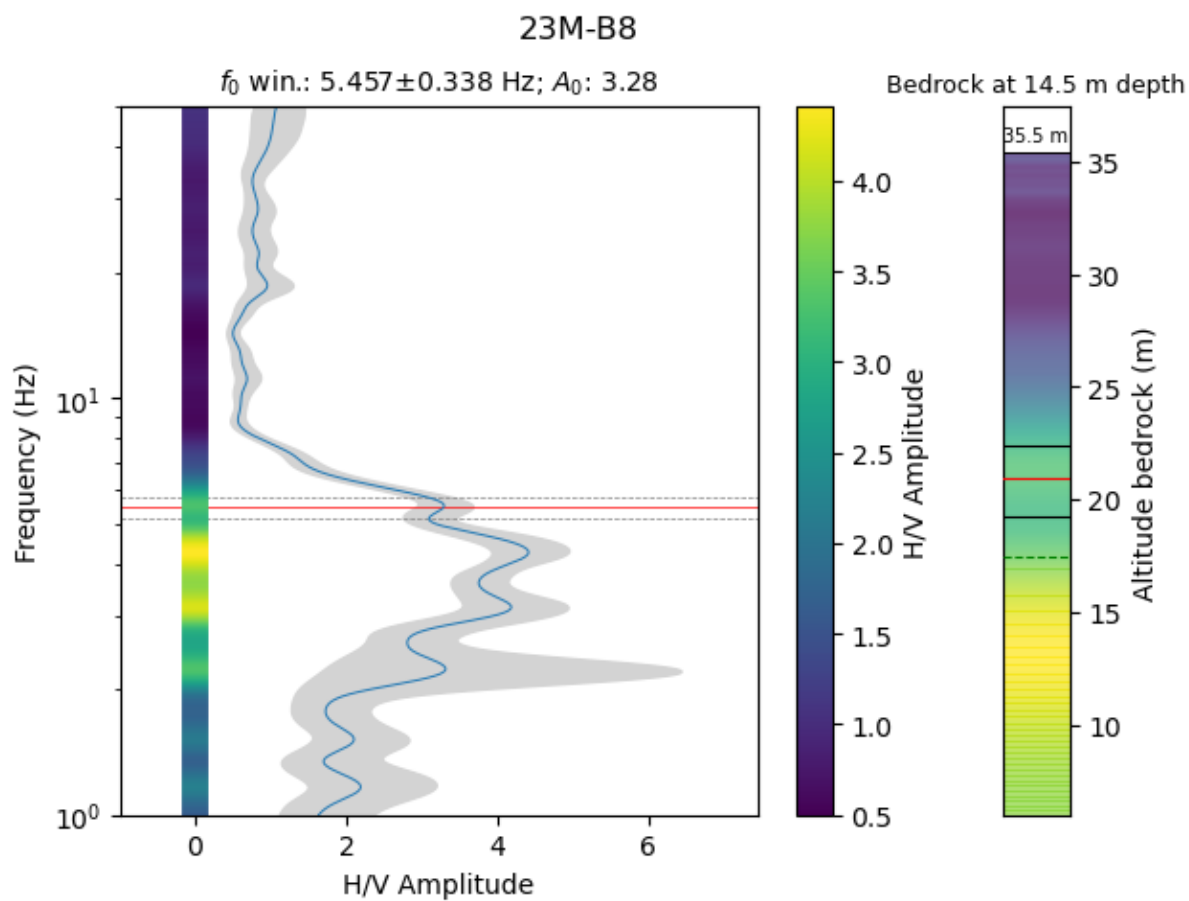
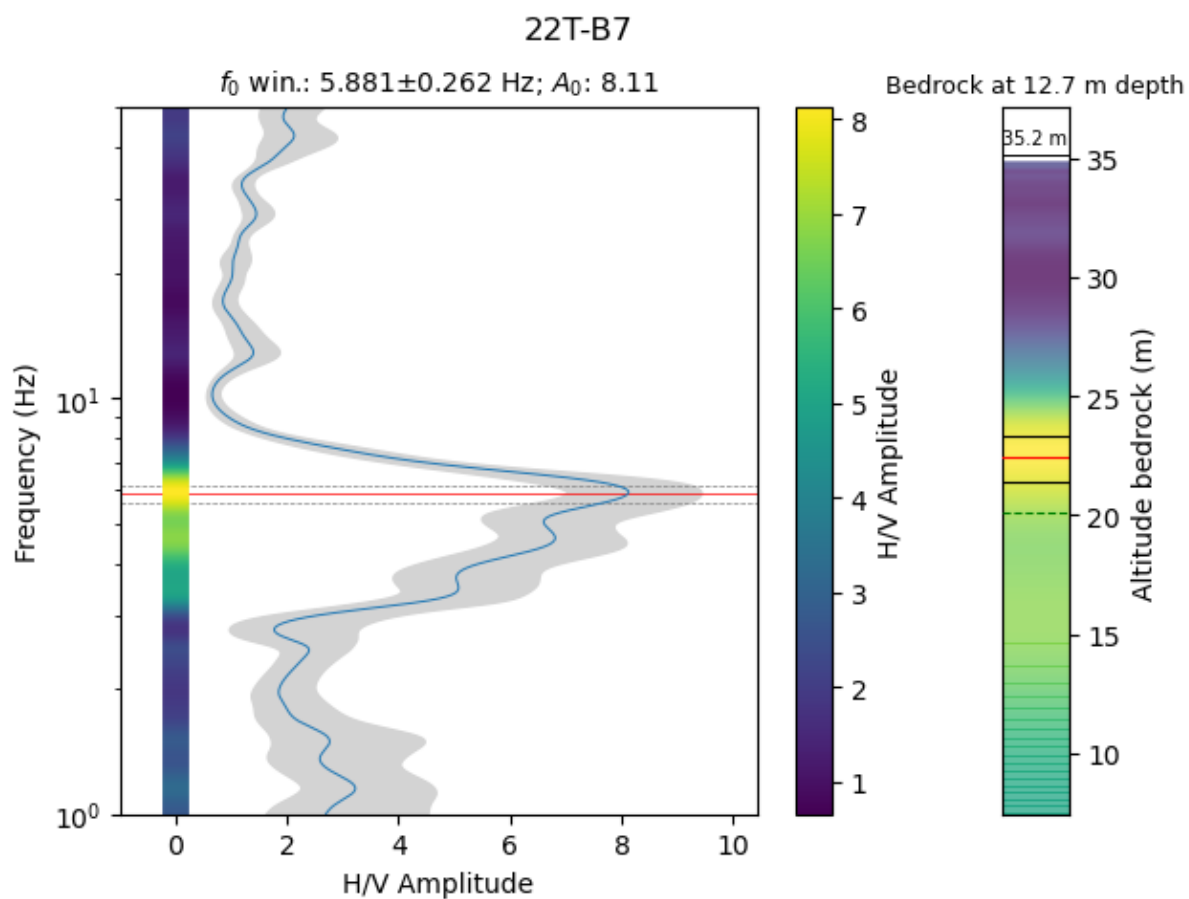


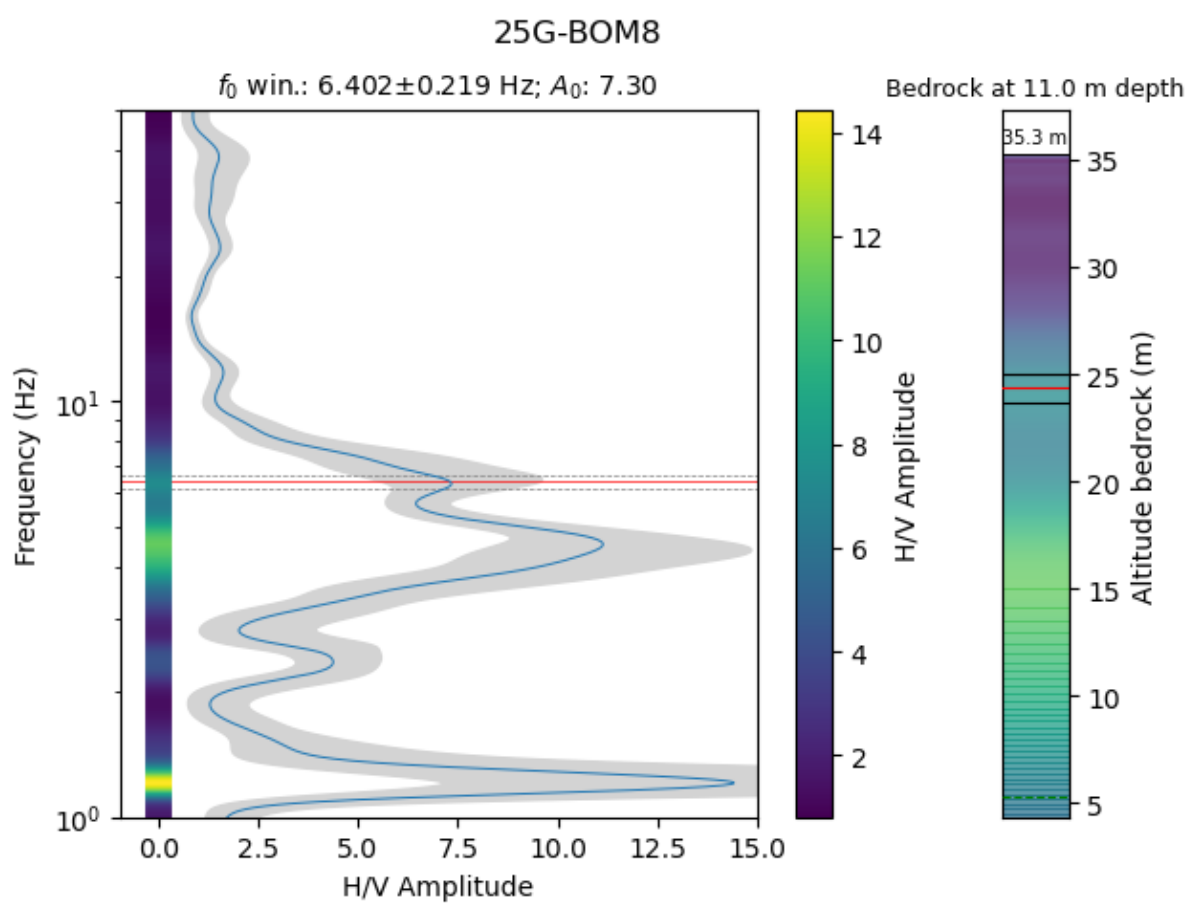
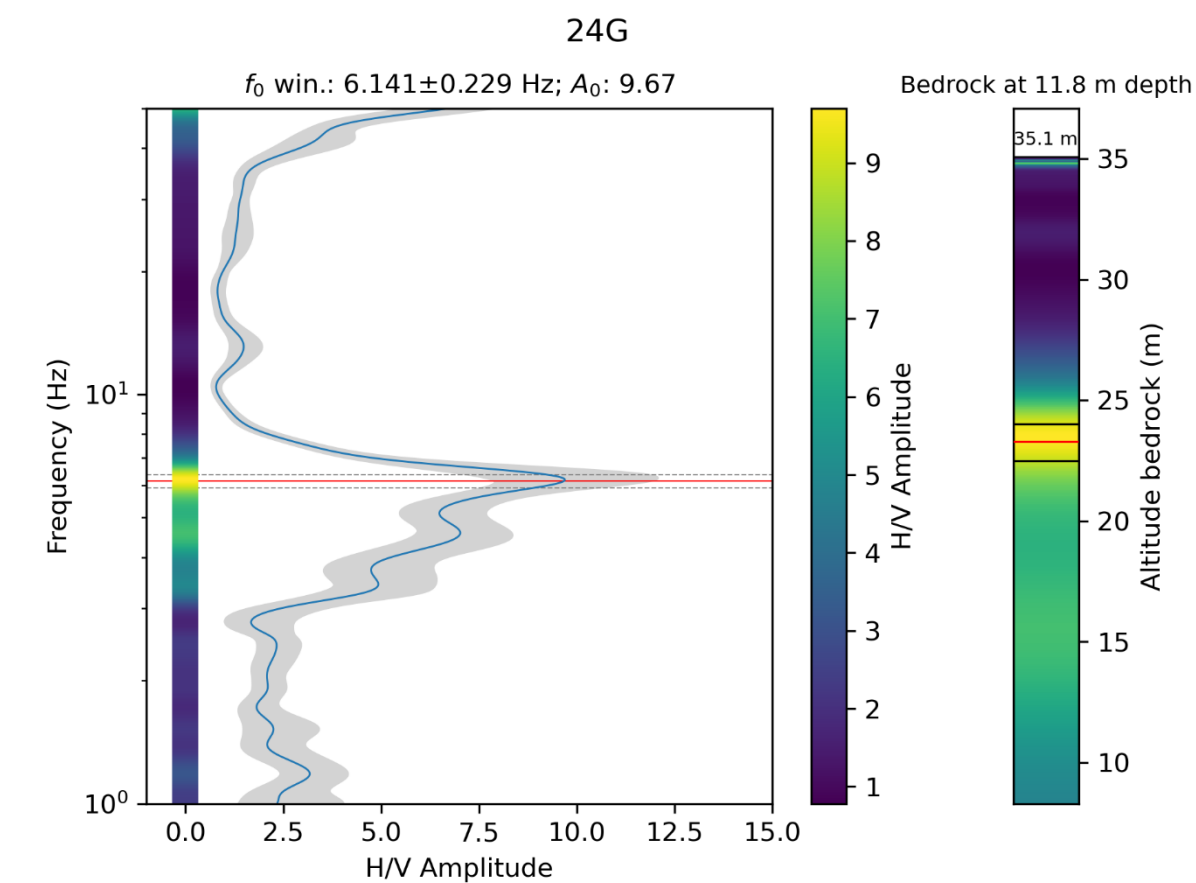


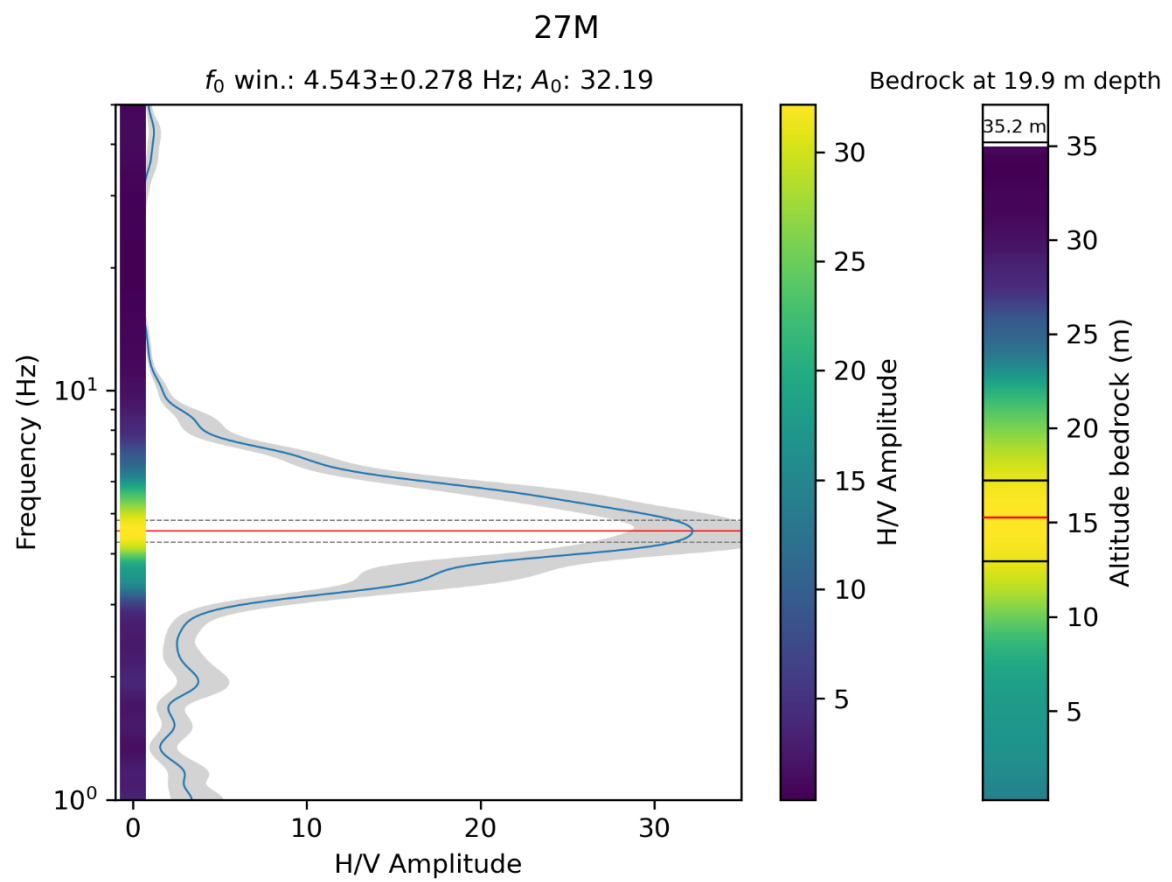
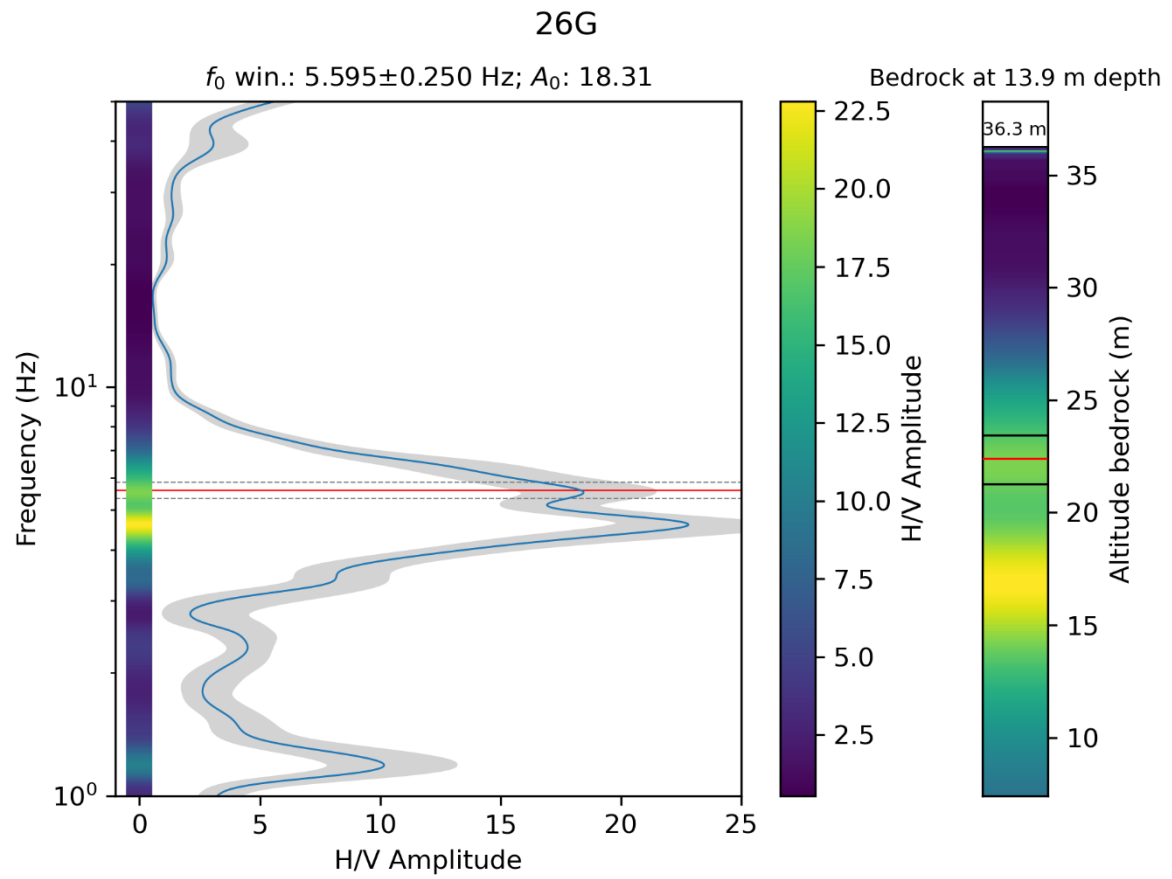


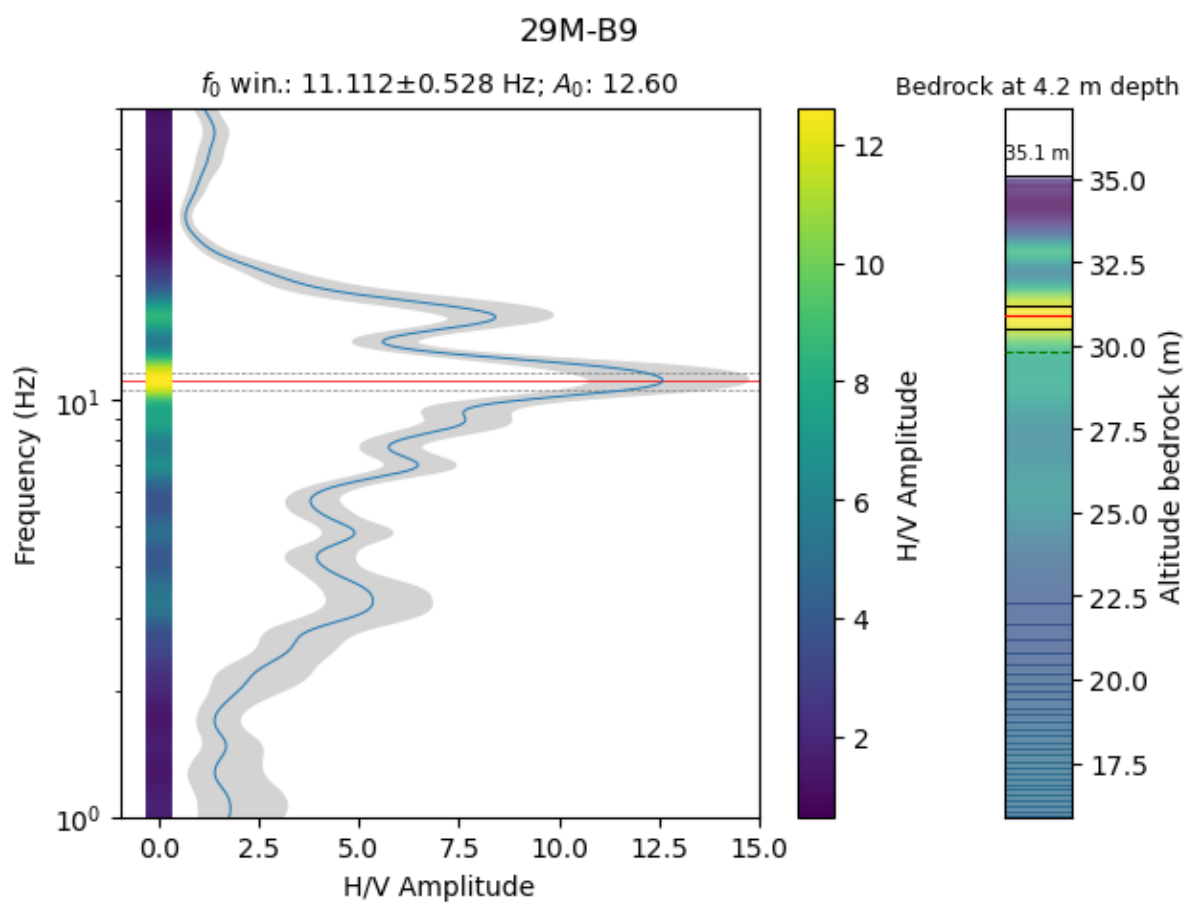
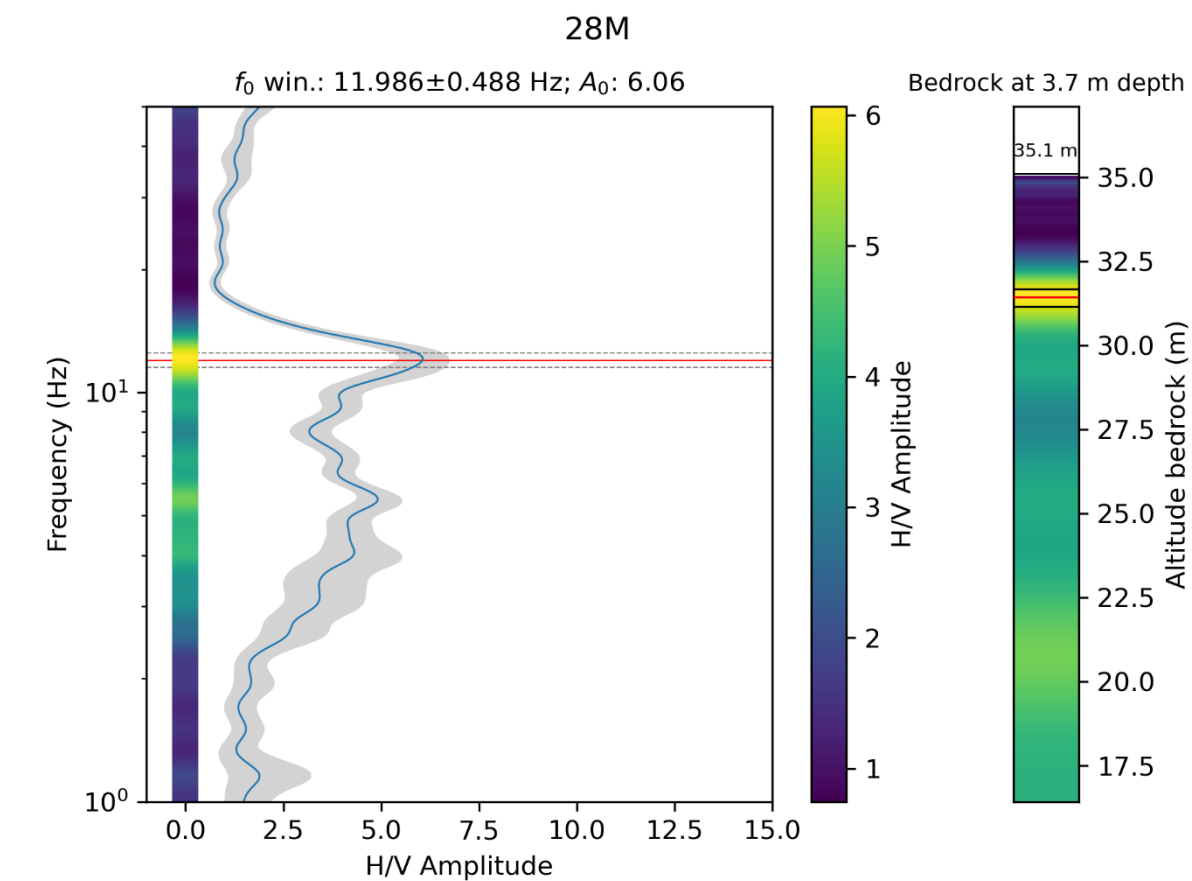


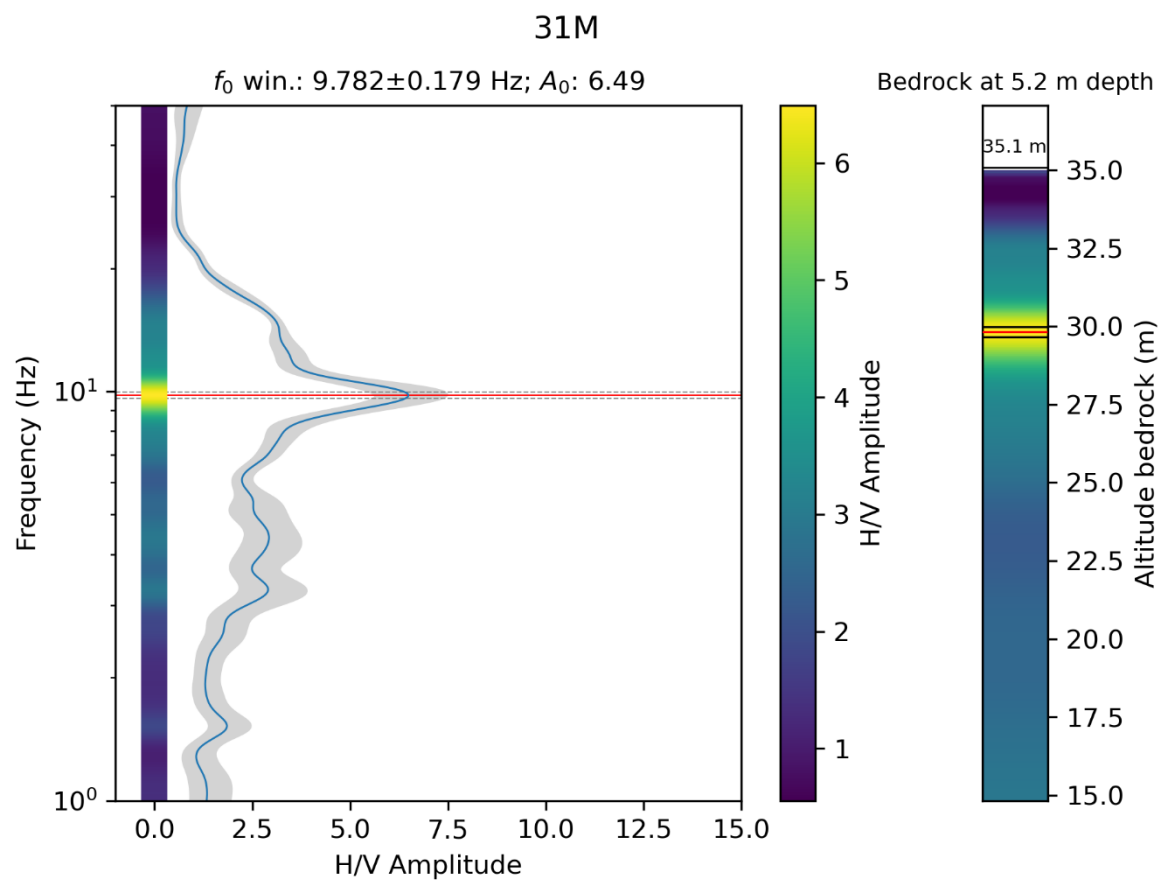
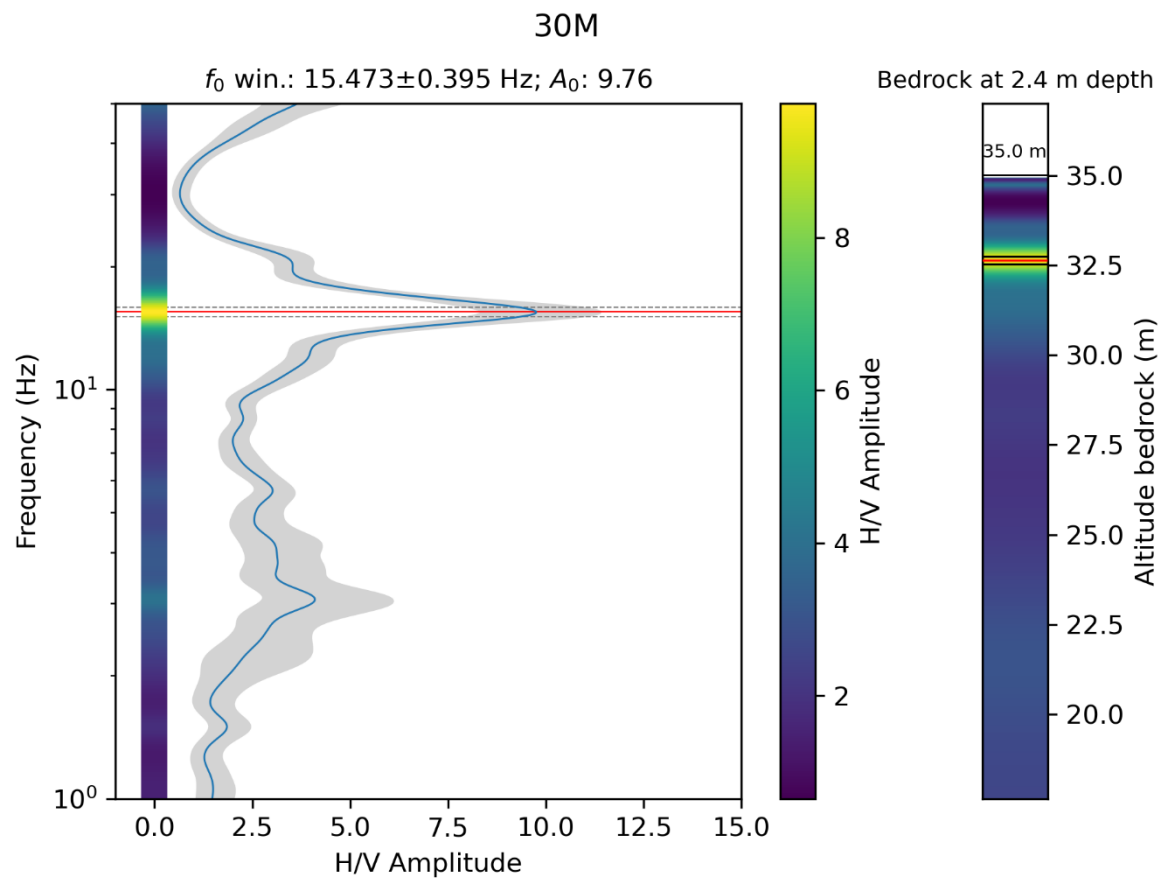


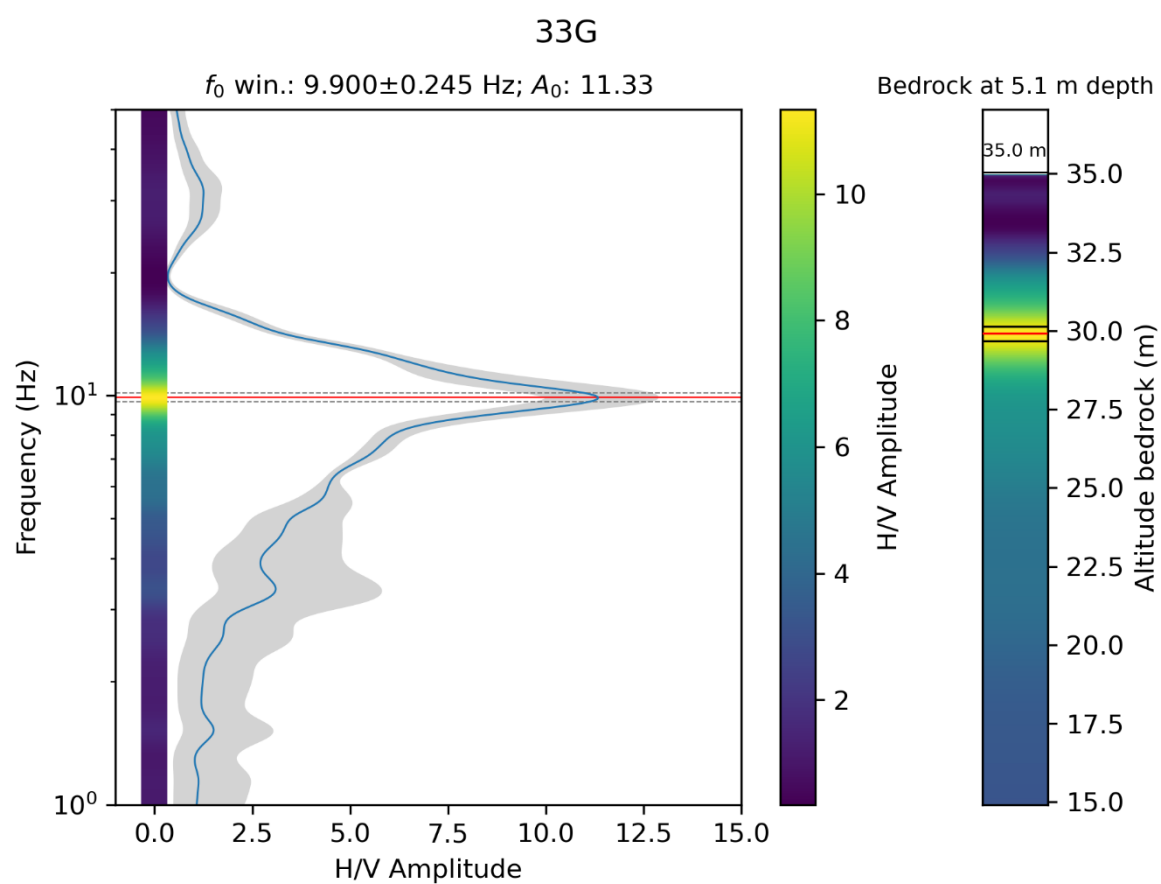
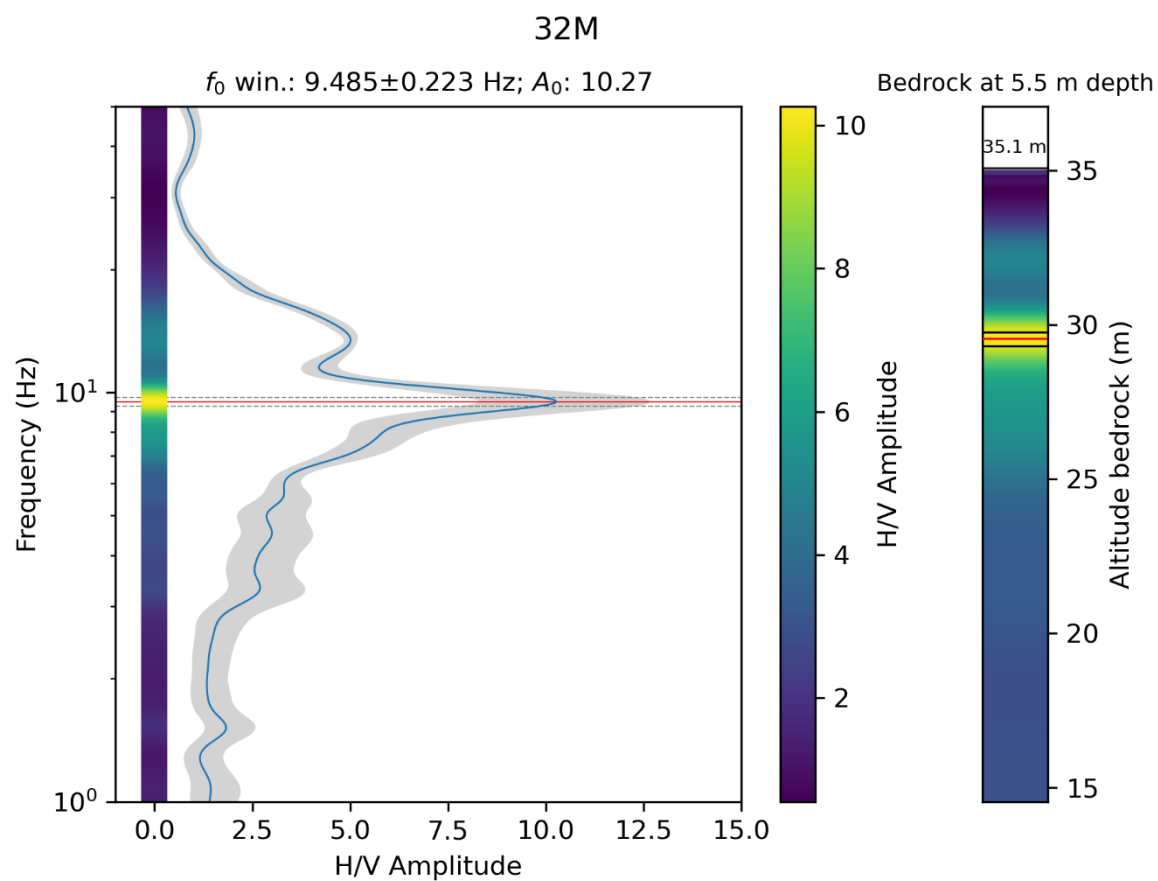


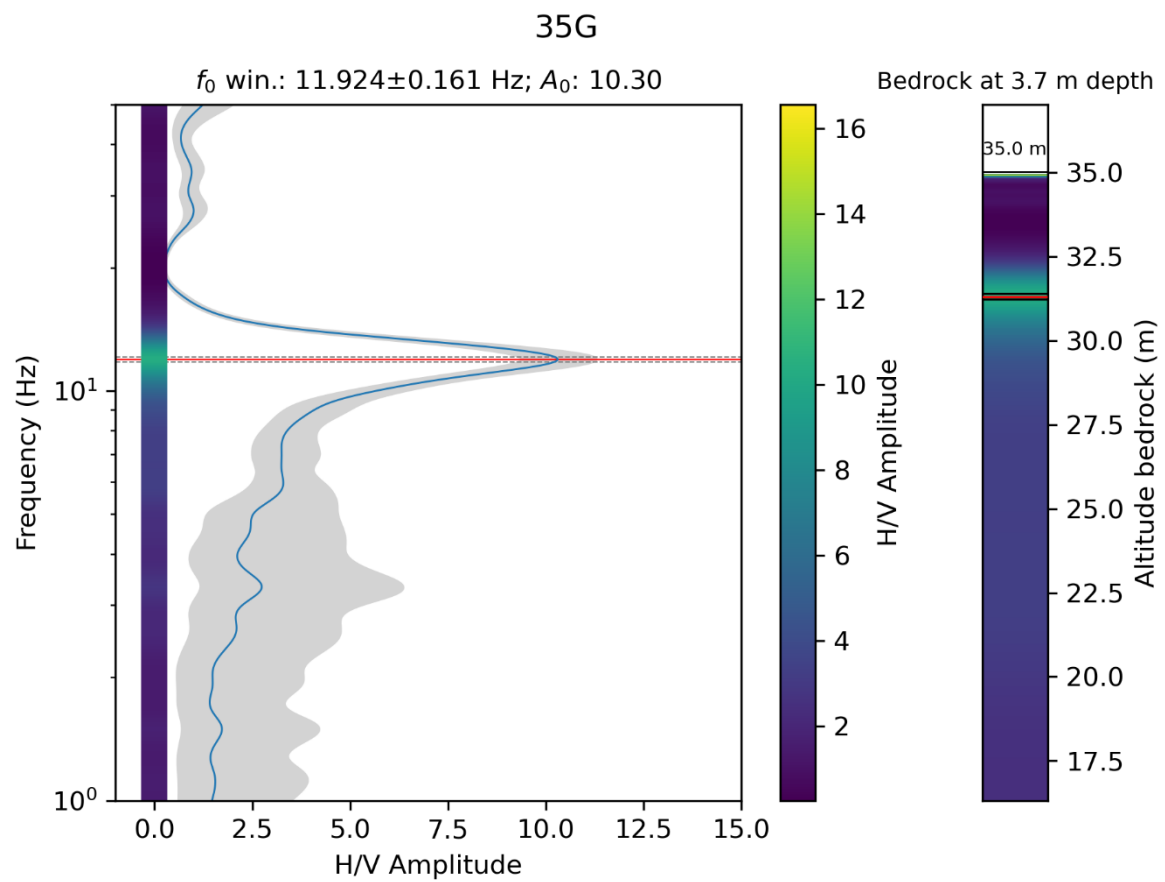
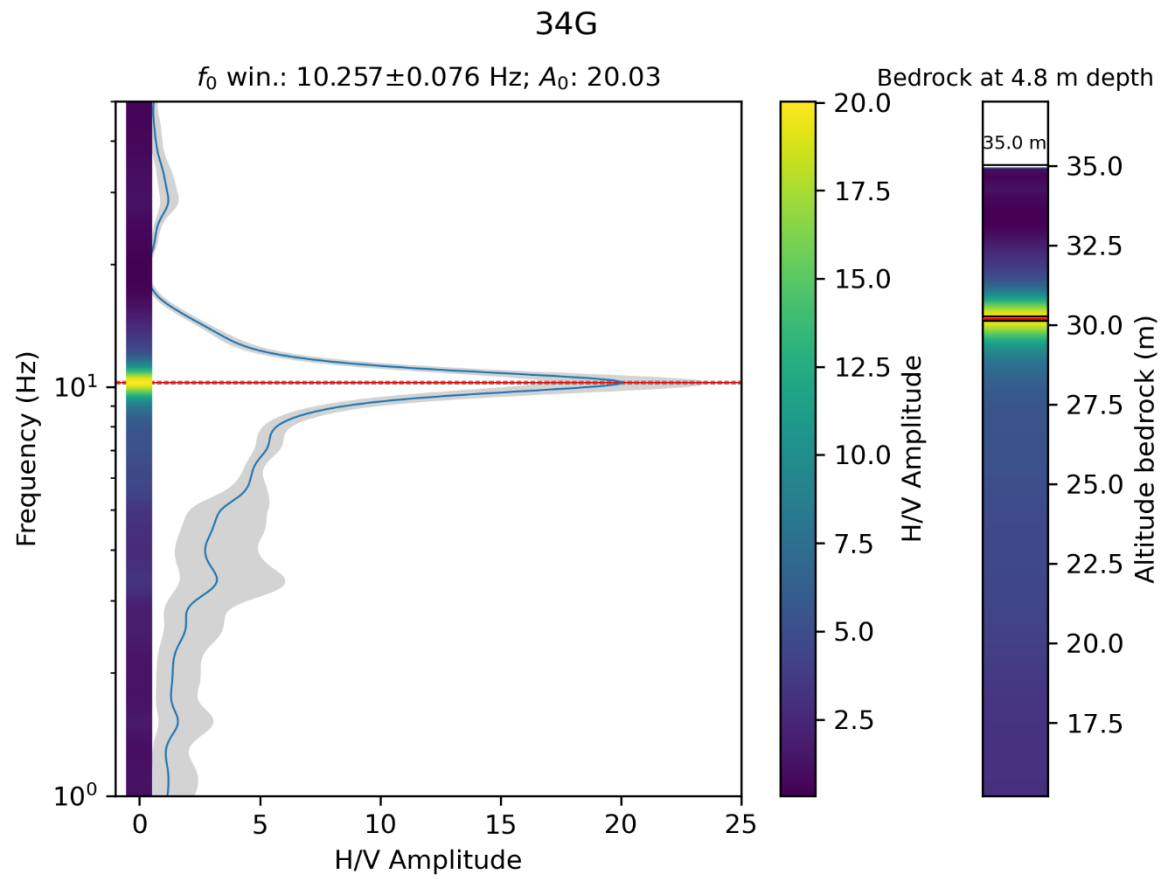


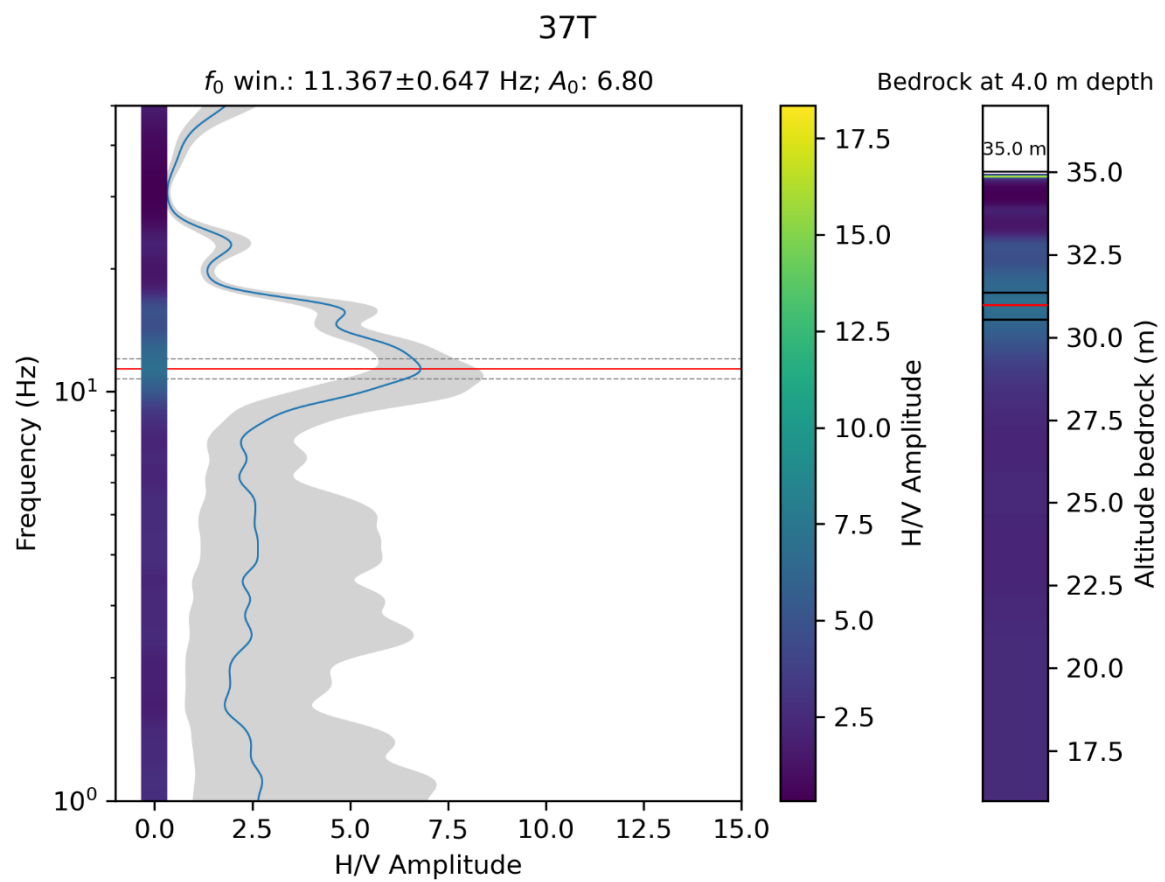
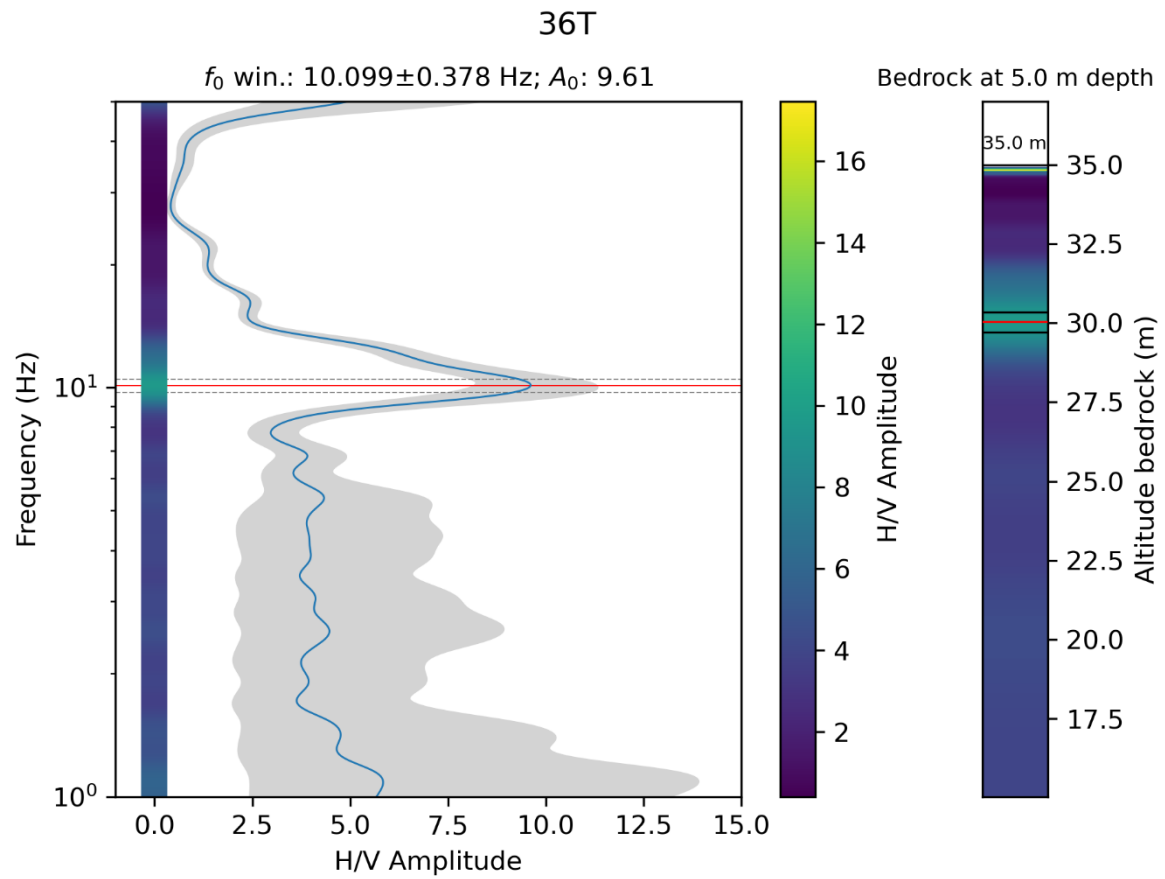


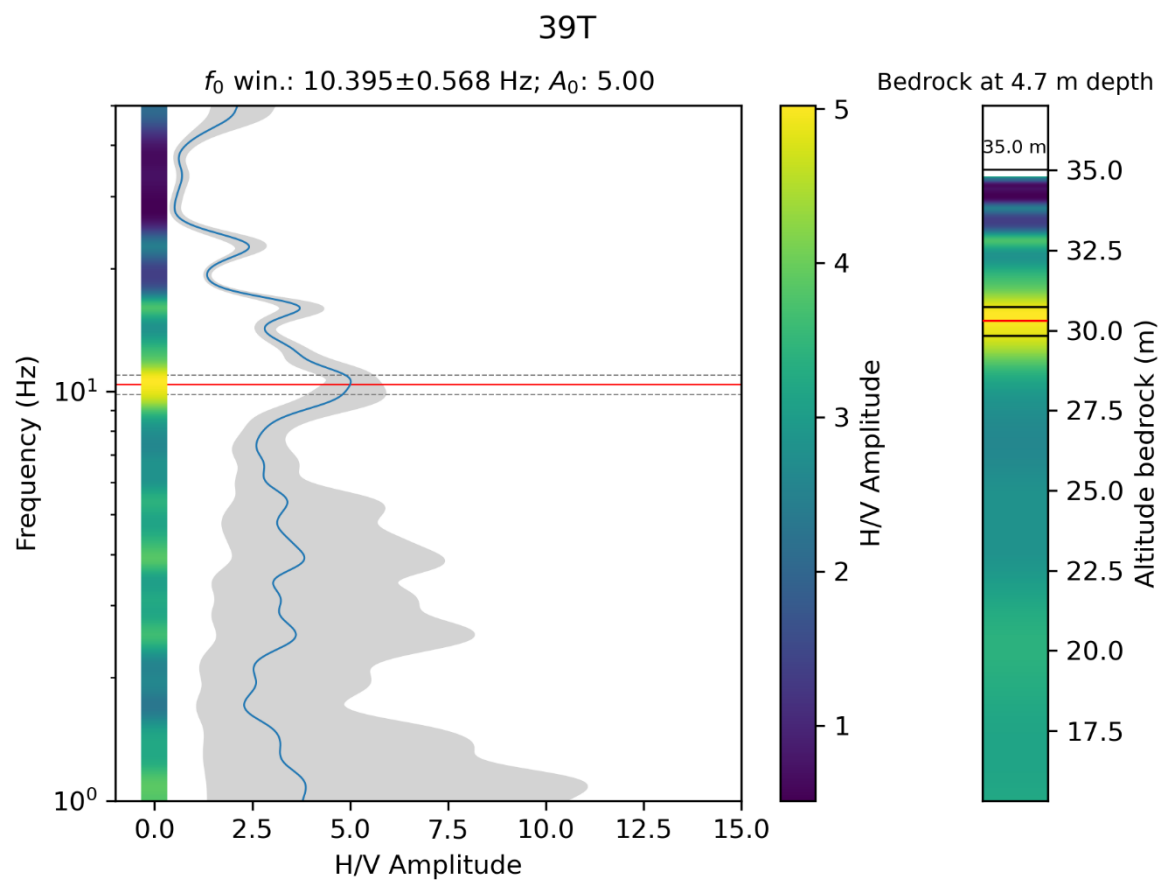
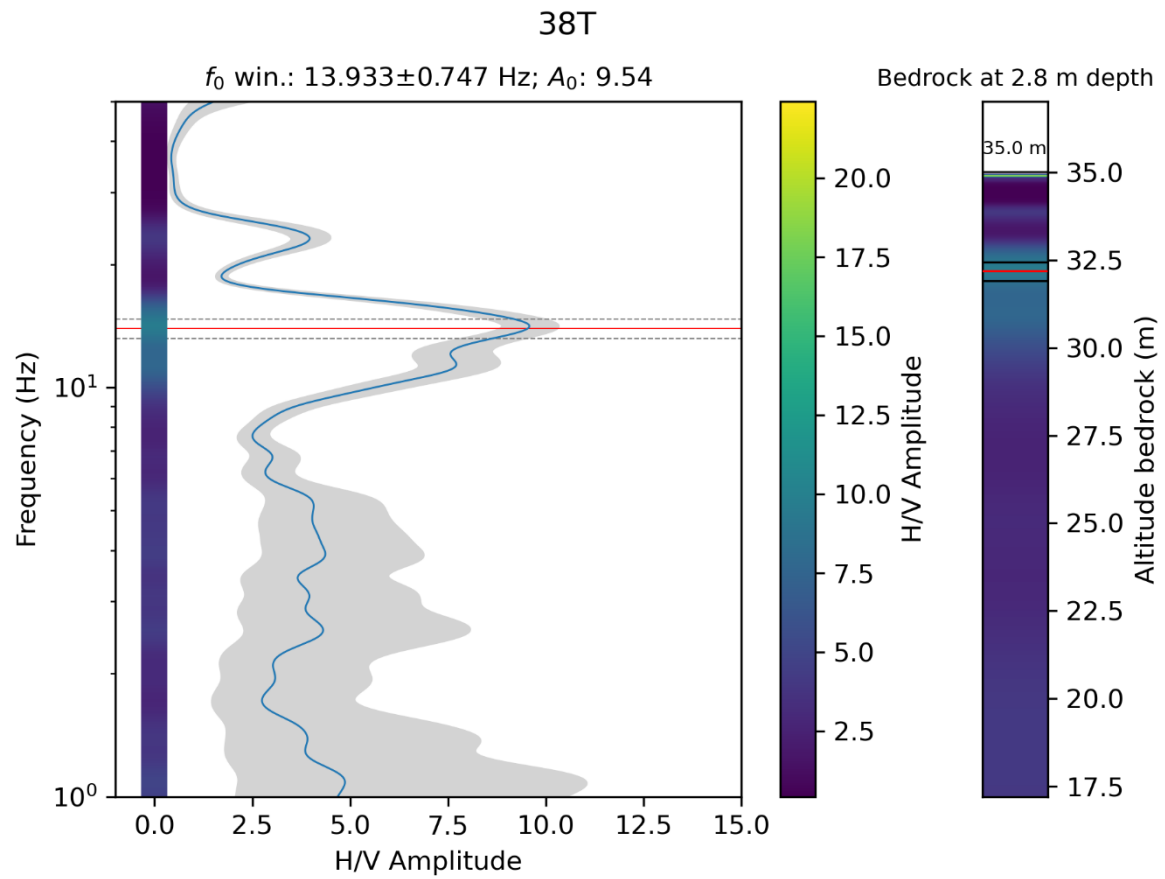








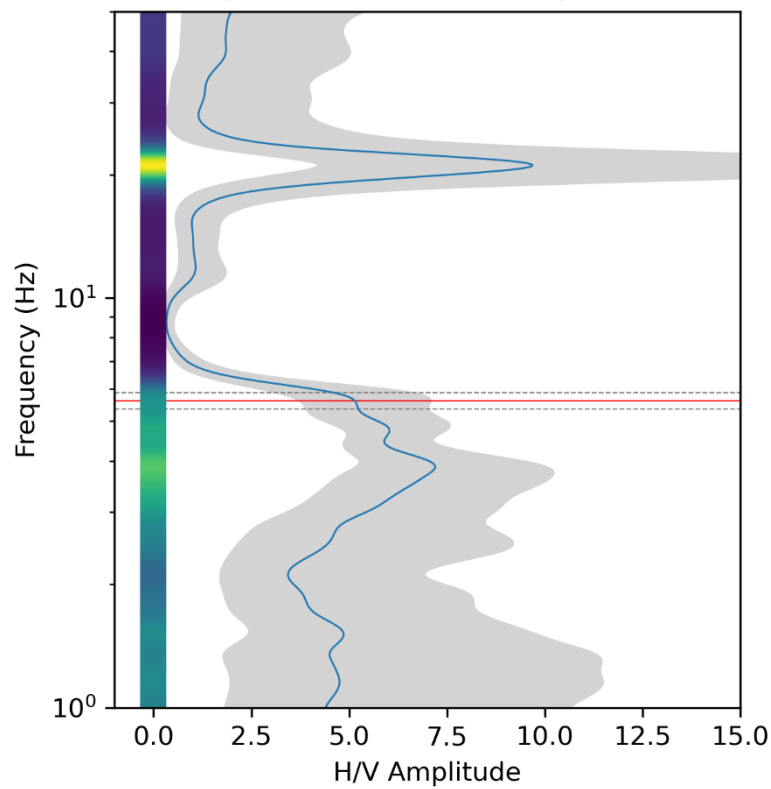




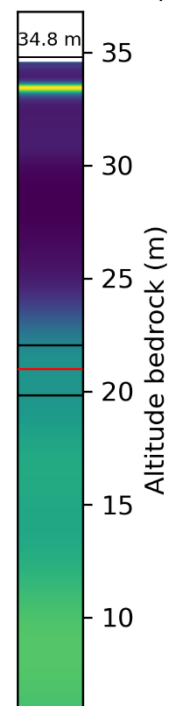
Anker metingen

A01T_DN

f_0 win.: 5.610 ± 0.259 Hz; A_0 : 5.15

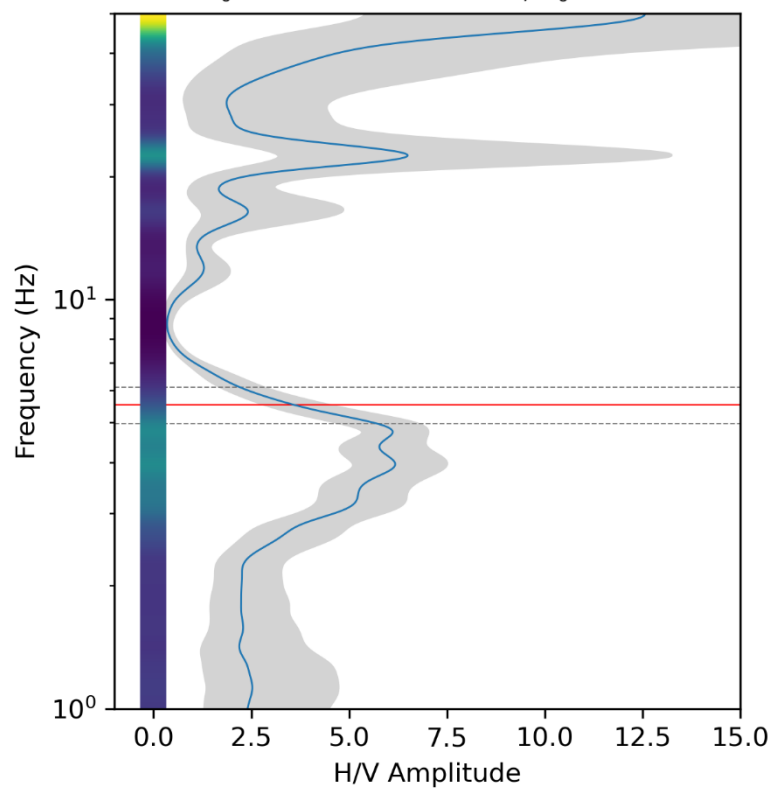


Bedrock at 13.8 m depth

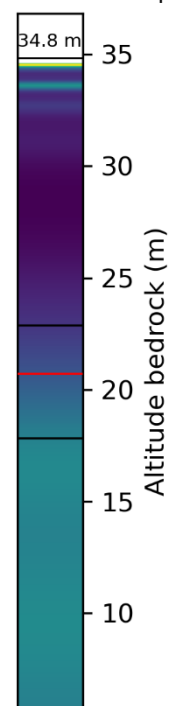


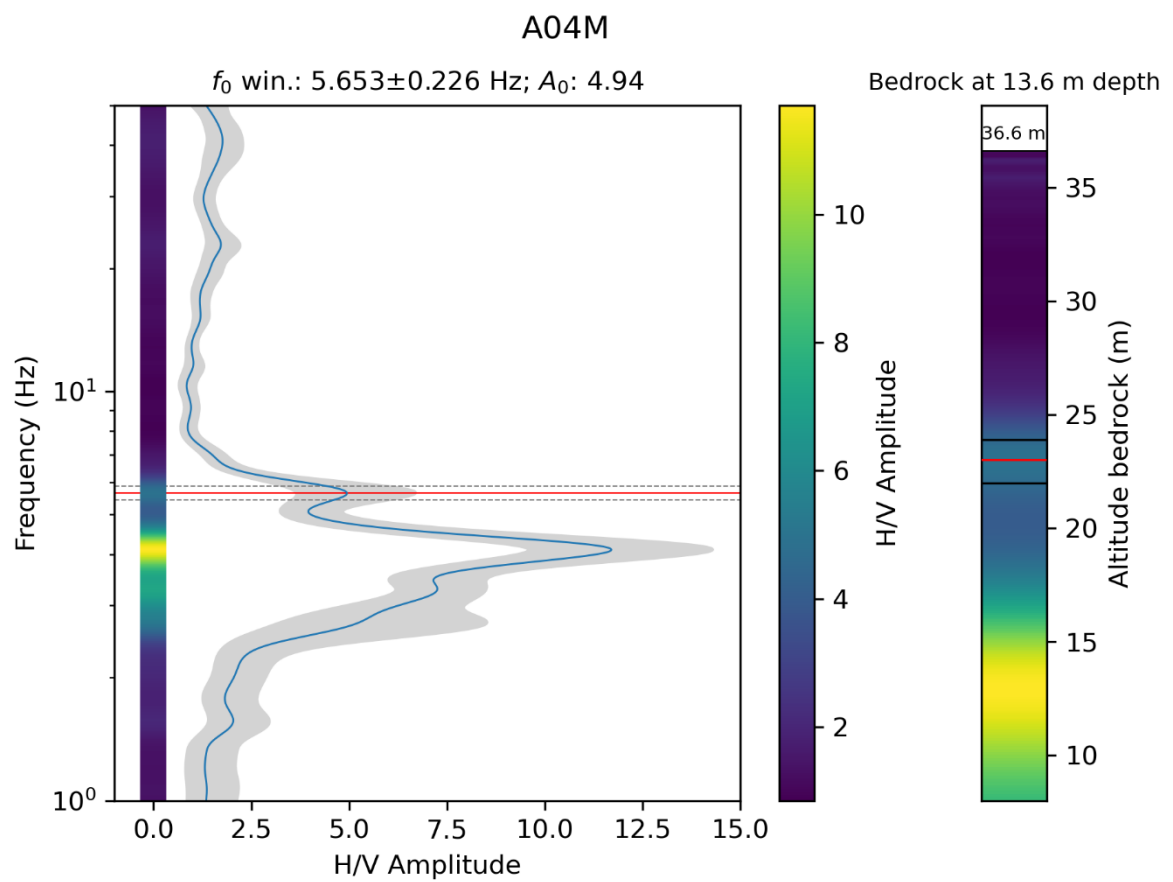
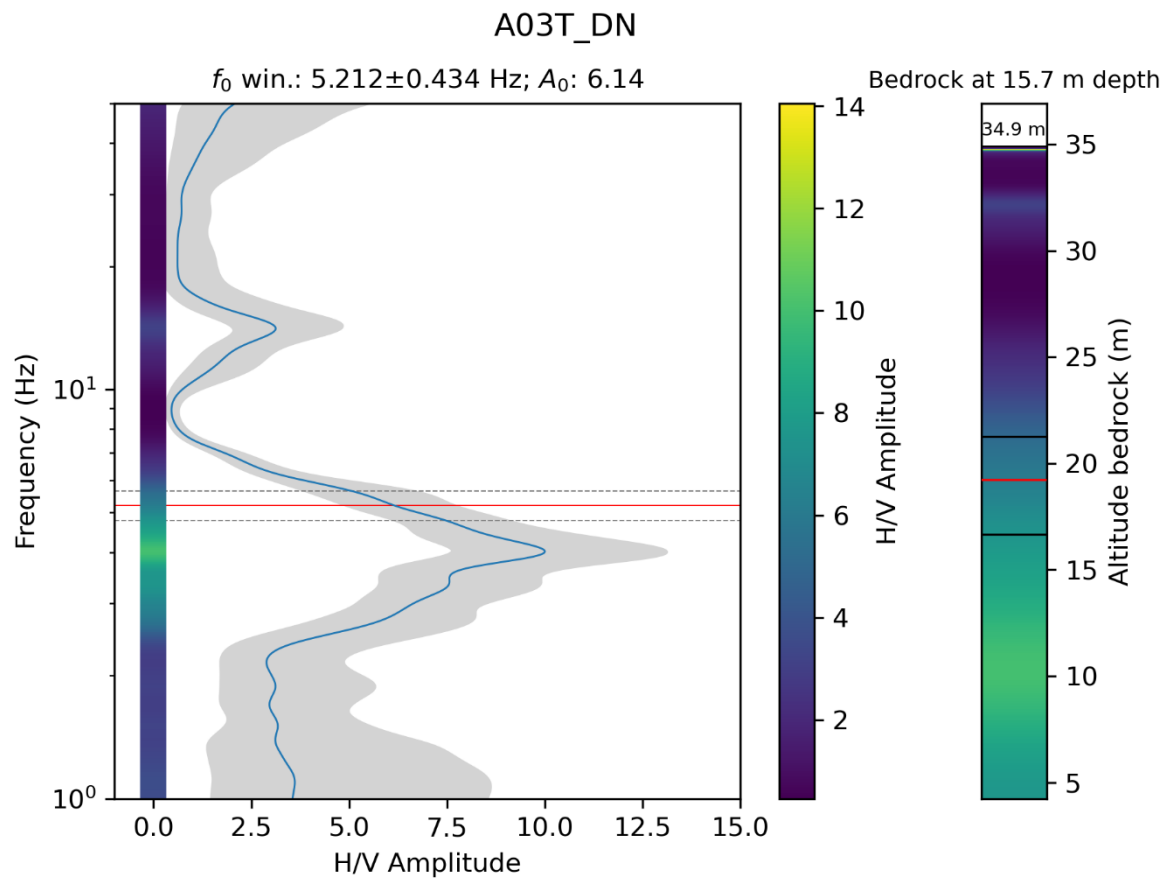
A02T_DN

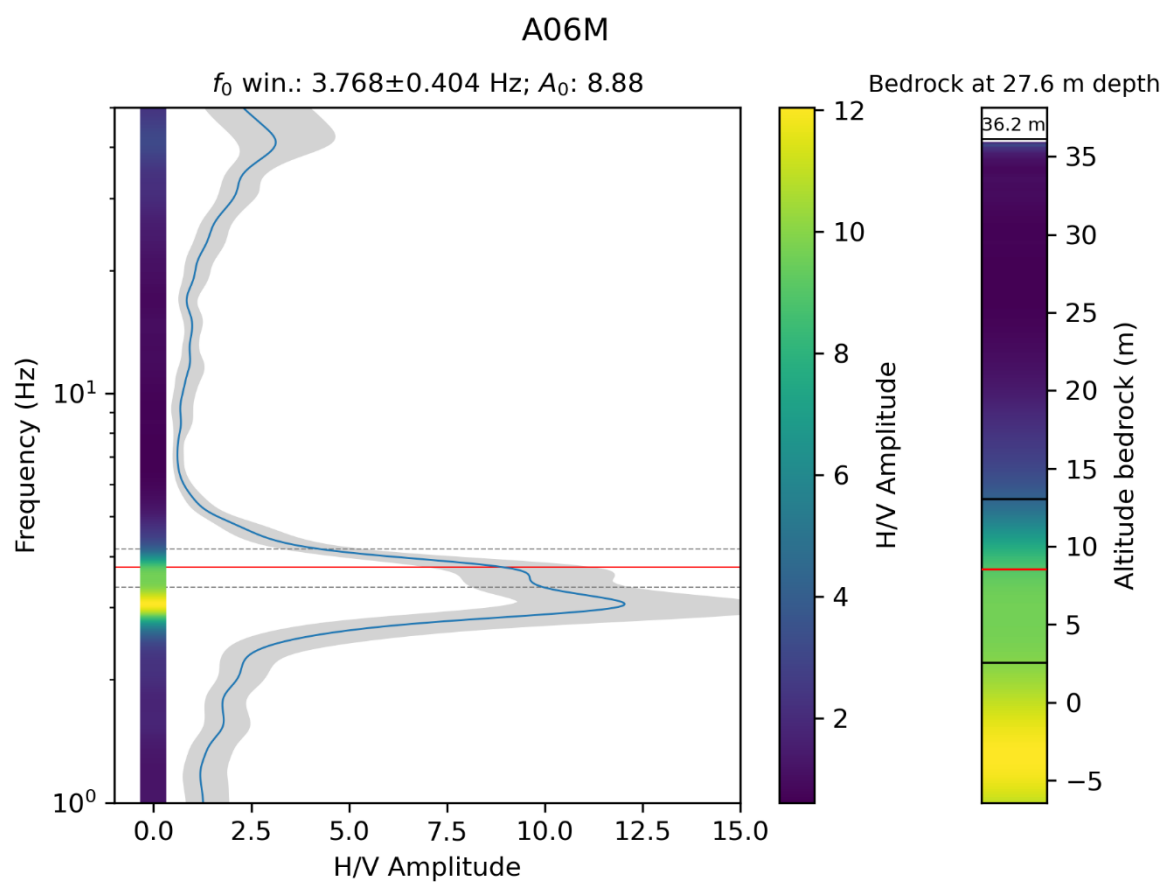
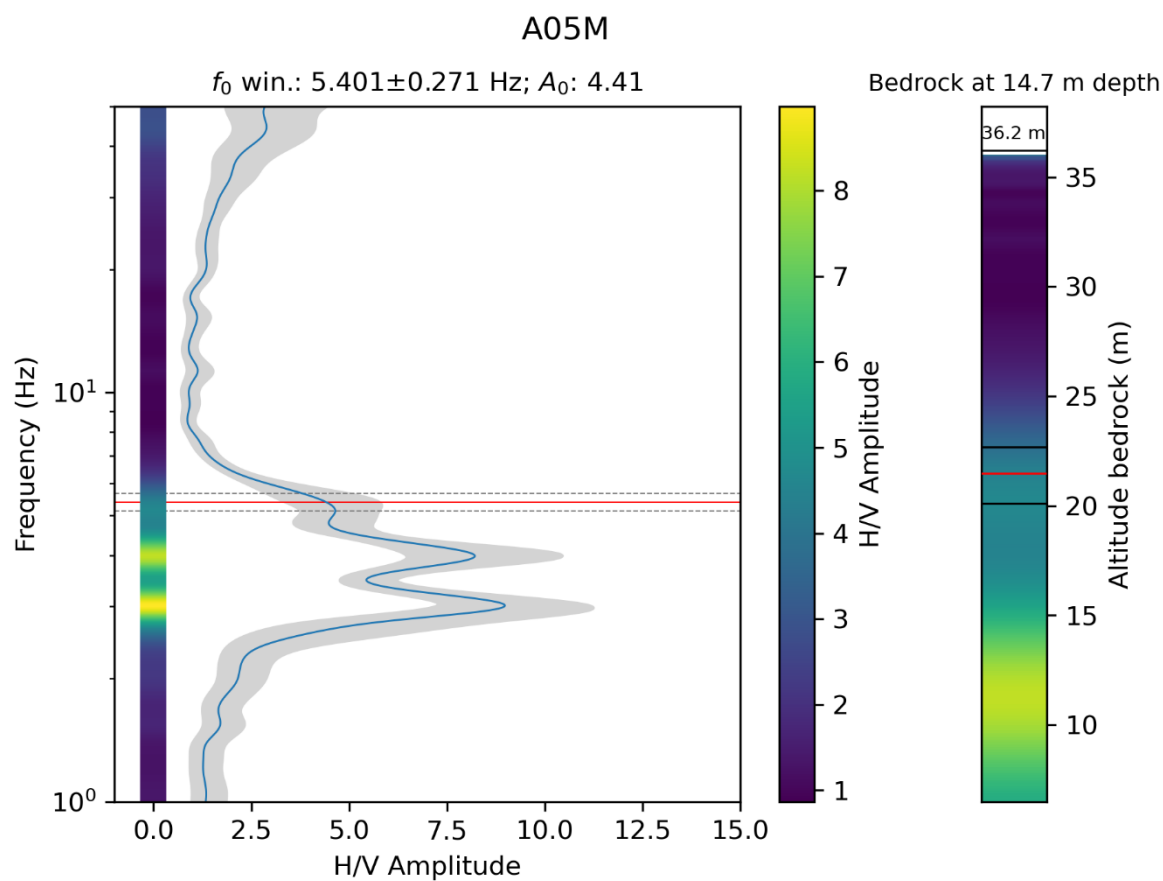
f_0 win.: 5.536 ± 0.559 Hz; A_0 : 3.56

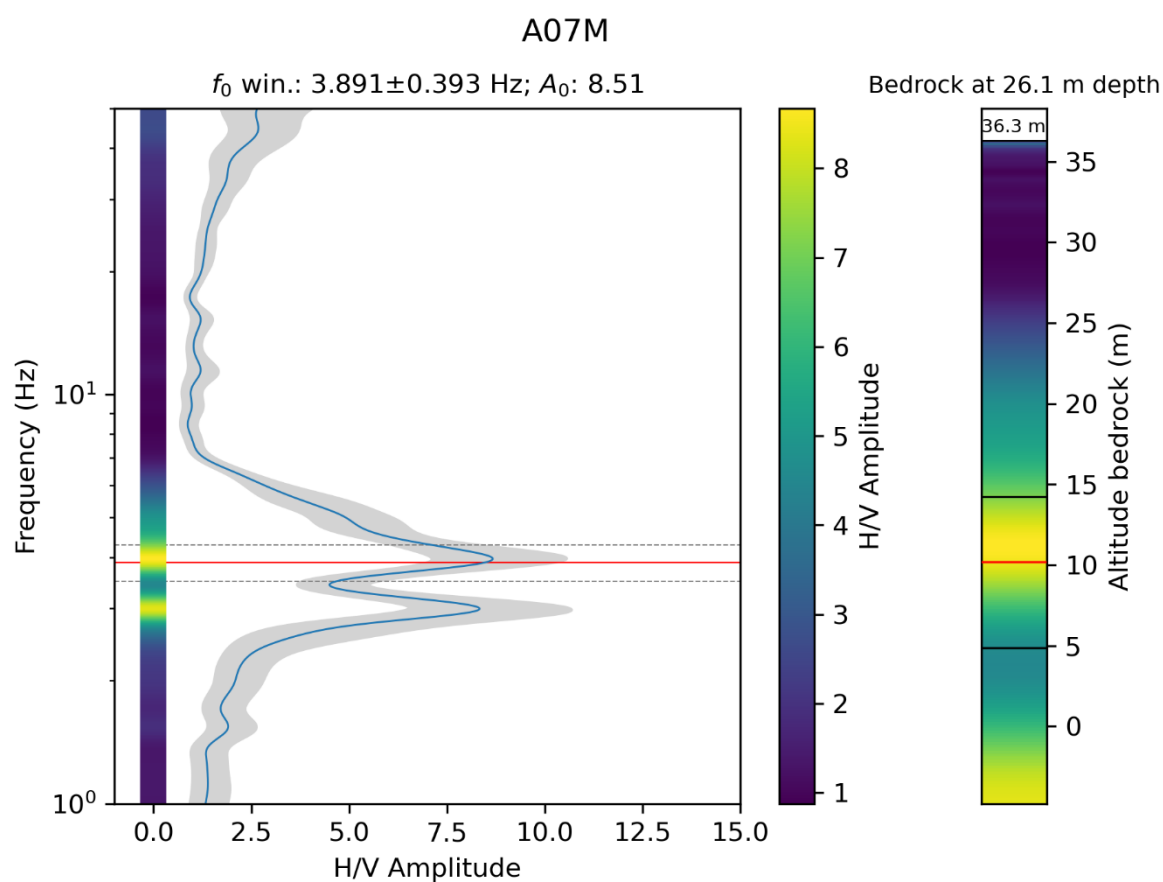
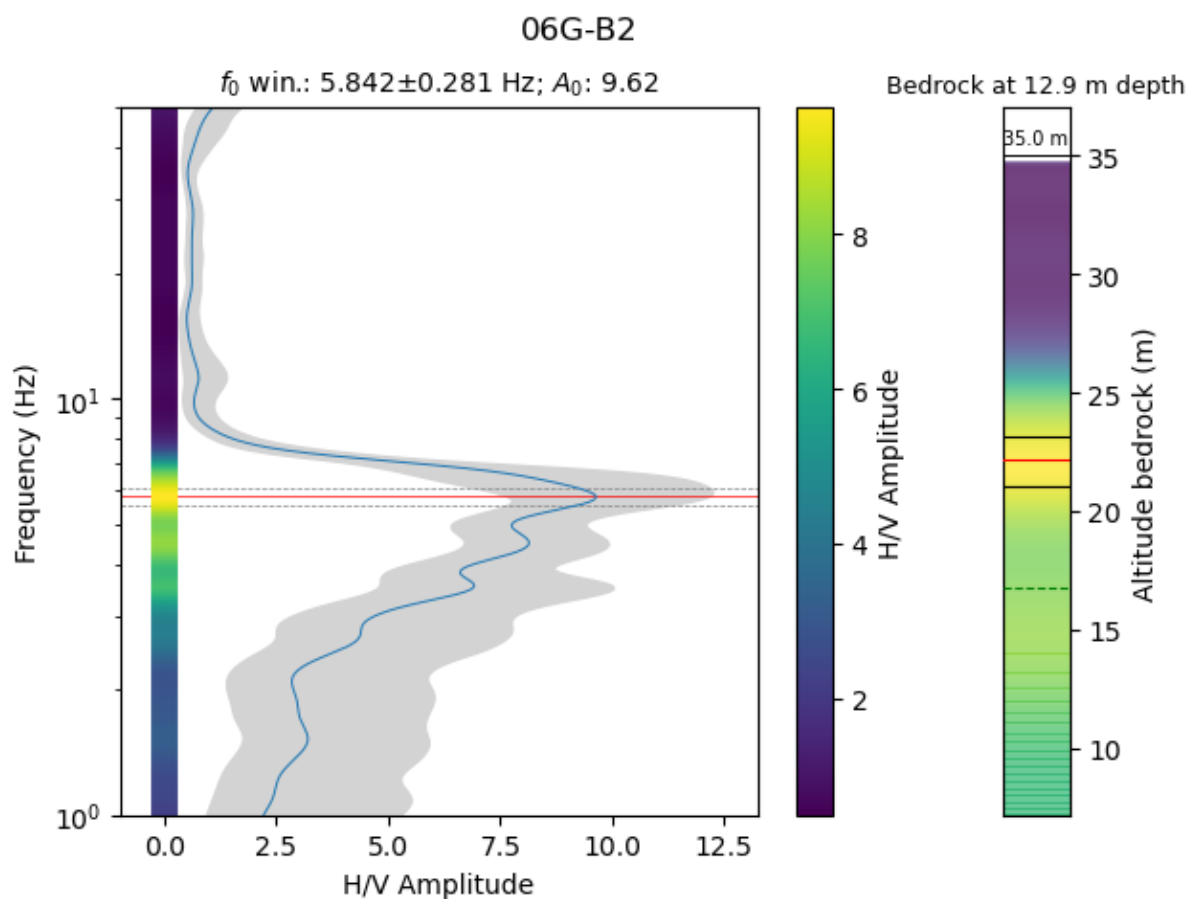


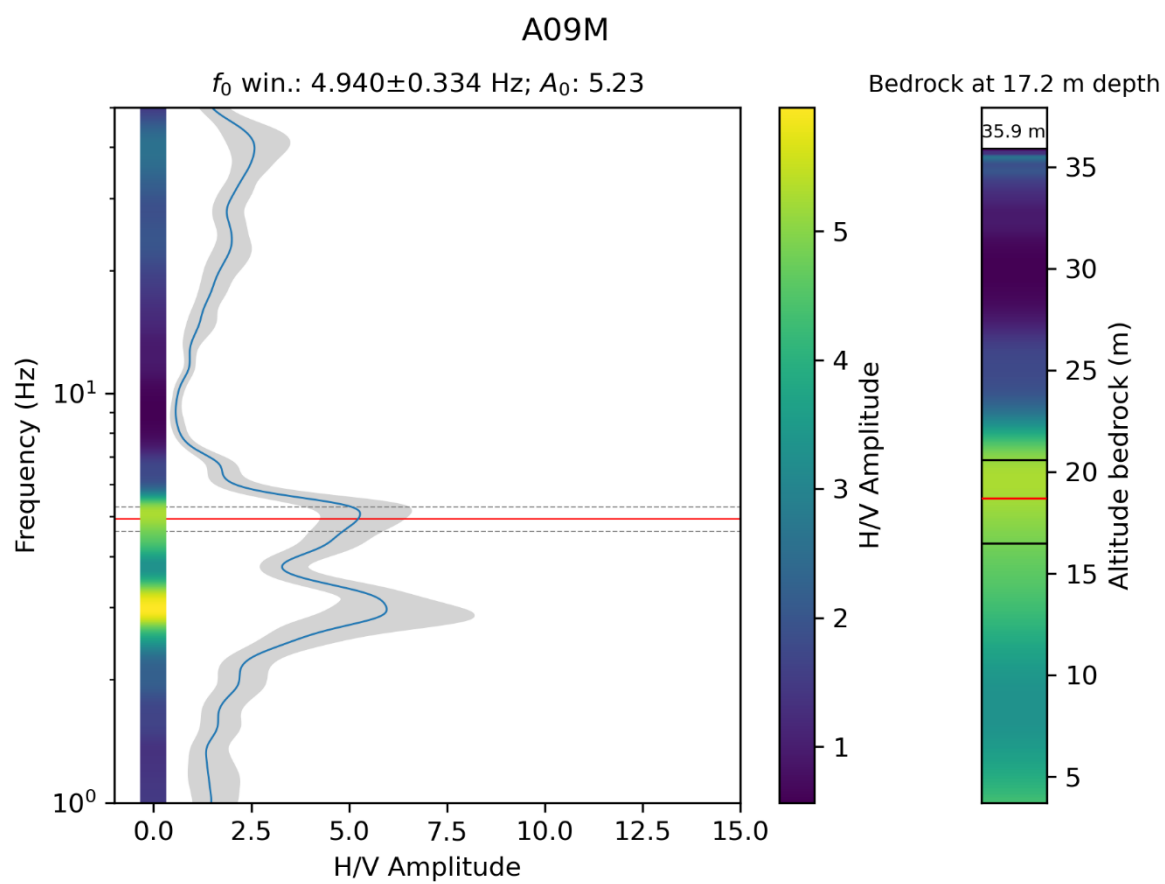
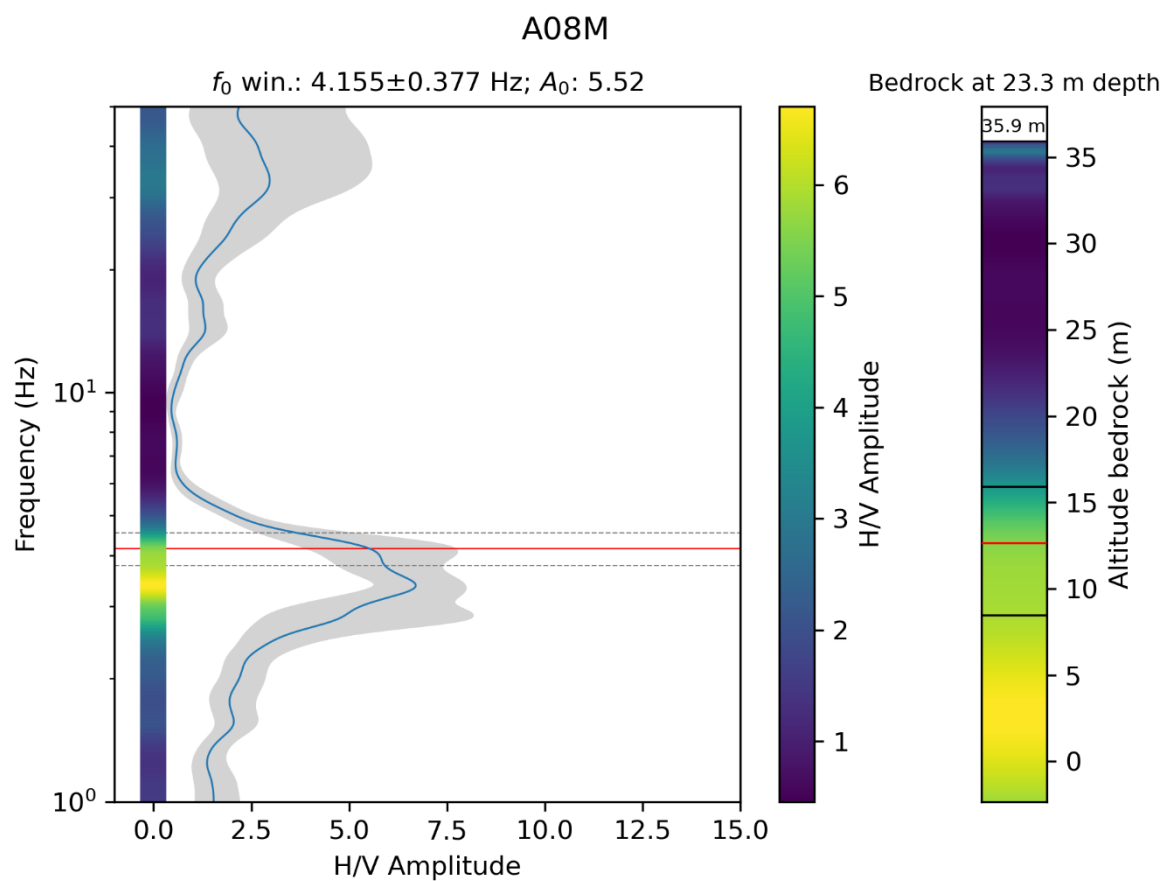
Bedrock at 14.1 m depth

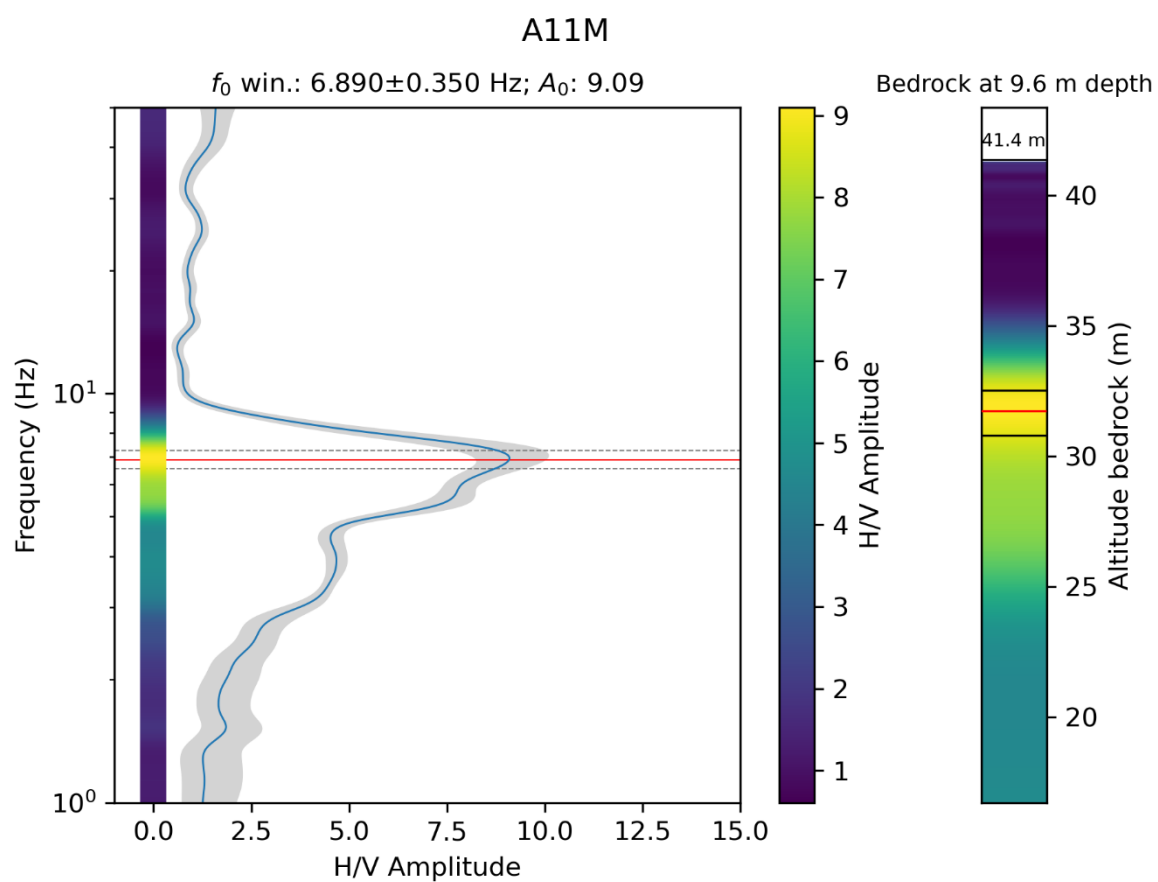
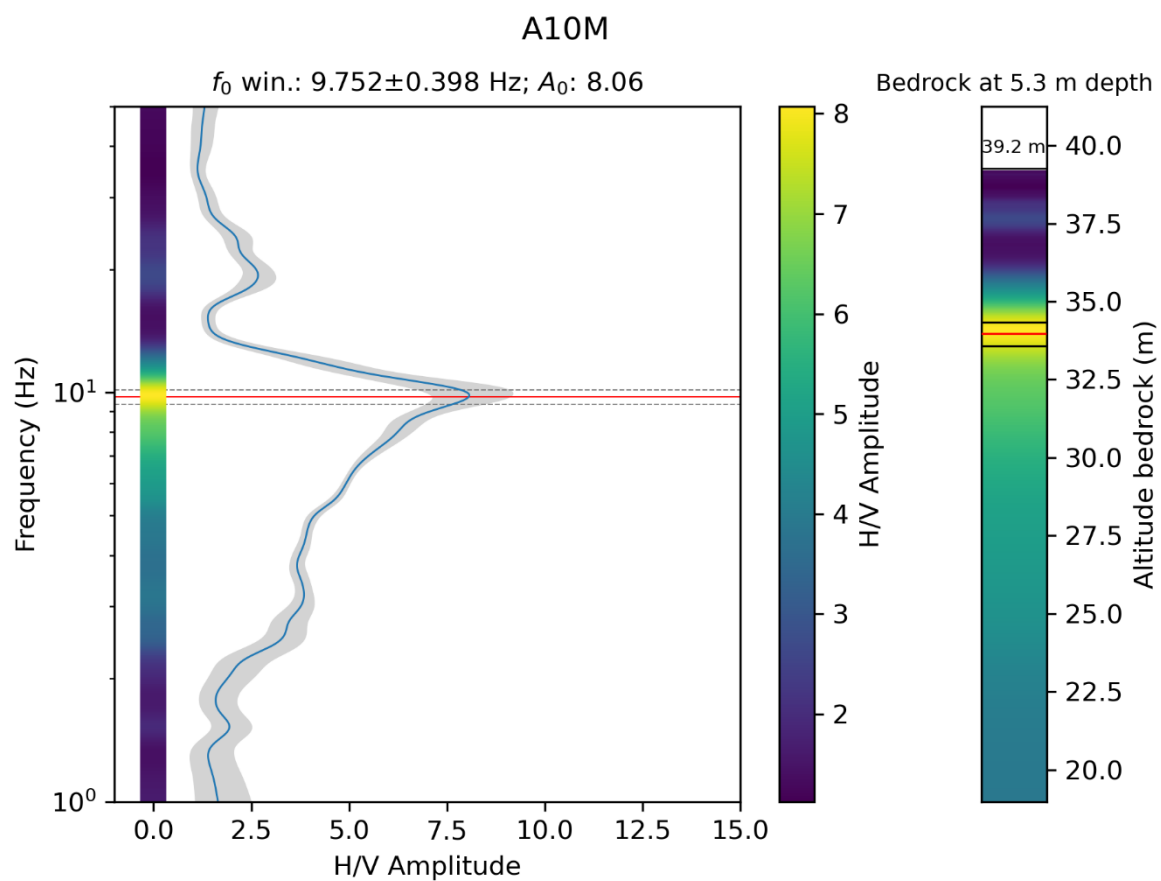












Bijlage 3 : HVSR polarisatie analyse

De Virtuele Boorgaten in Bijlage 2 werden berekend op basis van een analyse van de polarisering van de HVSR-curve. Dit wil zeggen dat de HVSR-curve werd herrekend in de richting waarin de amplitude van de fundamentele resonantiefrequentie (f_0) maximaal is. De figuren hieronder tonen deze polarisatie-richting voor alle meetpunten. De kleurenschaal geeft de H/V amplitude weer. De rode bollen geven de richting weer waarin de resonantiefrequentie maximaal is. De witte bollen geven de richting aan waar de amplitude van de resonantiefrequentie minimaal is.

