

# Wetenschapswinkels


Printversie

## Infrageluid bij het heien van de Betuwelijn

Een artikel voor Faculteitsblad Muon

Frits van den Berg

Een jaar geleden (december 2000) werd in Zevenaar begonnen met het heien van palen voor een spoortunnel in de Betuwelijn. Door grotendeels onder water heien, in de met grondwater gevulde sleuf waarin de tunnel moet komen, was het slaan van het heiblok op de paal niet hoorbaar. Toch leidde dit tot veel klachten van omwonenden. Zelfs de wethouder vond het te gek en stelde tijdelijk een bouwstop in. Het leek erop dat vooral het laagfrequente karakter van het geluid de sensatie zo onaangenaam maakte. Toen er boven water werd geheid, en de heislagen in de wijde omgeving hoorbaar waren, leken de omwonenden dat minder erg te vinden.

Was er bij Zevenaar wat nieuws aan de hand? De Natuurkundewinkel heeft dat in opdracht van de gemeente Zevenaar uitgezocht.

### Bodemgolven door heien

De heipalen zijn niet bedoeld om de tunnelbak te dragen, maar om te voorkomen dat deze gaat opdrijven in het grondwater. Ze worden dan ook niet, zoals gebruikelijk bij gebouwen, een slappe ondergrond in gedreven tot een draagkrachtiger laag is bereikt, maar worden voor een groot deel juist een draagkrachtige (zandige) bodem in geheid. De palen variëren in lengte tot ruim 30 meter; het heien duurt per paal tot ruim een half uur. Met één heislagen per seconde daalt een paal met elke slag gemiddeld dus maar zo'n 1,5 cm. Dat is weinig; het betekent dat de energie van de slag weinig in beweging van de paal wordt omgezet en bovendien in korte tijd wordt afgegeven. Dat zal belangrijk blijken. Overigens waren er eerder zelfs palen kapot geheid door resonantie in de palen.

Tijdens het heien ontstaan, net als bij aardbevingen, golven die door de bodem heen bewegen en golven die zich aan het oppervlak voortplanten. De snelheid van elke golf is afhankelijk van (lokale) bodemeigenschappen zoals watergehalte, samenstelling en compactheid van de bodem. Daarnaast ontstaat er aan de kop van de paal een geluidsgolf die zich door de lucht (of onder water) voortplant. Er zijn meerdere typen golven:

- Als de heipaal tijdens een slag omlaag wordt gedreven ontstaan er in de bodem als eerste de primaire of P-golf, een longitudinale compressiegolf die bestaat uit opeenvolgende verdichtingen en verdunningen in de bodem. De P-golf heeft een veel hogere snelheid dan die van geluid in lucht. De snelheid in water is 1500 m/s, in los zand 1800 m/s. De P-golf breidt zich in de bodem naar alle richtingen uit (dus de energie neemt af met  $1/R^3$ ), net als de transversale golf S-golf of shear-wave (afschuivingsgolf) die langzamer is dan de P-golf. De bodem beweegt op en neer, dwars op de voortplantingsrichting. Voor los zand is de snelheid 500 m/s.
- Als de bodemgolven de oppervlakte bereiken ontstaan er golven die zich, net als golven in water, langs het oppervlak voortbewegen. De belangrijkste oppervlaktegolf, de Rayleigh-golf, veroorzaakt aan het oppervlak een voortgaande, 'rollende' (zowel heen-en-weer als op-en-neer gaande) beweging. Deze golf bevat de meeste energie (70% van de trillingsenergie), bovendien neemt de sterkte ervan minder snel af met de afstand dan bij een bodemgolf, omdat de oppervlaktegolf zich alleen langs het oppervlak uitbreidt (dus afname met  $1/R^2$ ), terwijl de bodemgolf zich ook in de diepte uitbreidt. De oppervlaktegolven lopen relatief langzaam: de Rayleigh-golf loopt zelfs nog iets langzamer dan geluid in lucht. Ook deze snelheid hangt van de lokale bodemeigenschappen af. Door de op-en-neer gaande beweging werkt de bodem in feite als een luidspreker. De geluidsgolven in de bodem worden echter relatief slecht overgedragen aan lucht, zodat maar een gering deel van de energie in luchtgeluid overgaat.
- De geluidsgolf die aan de kop van de paal ontstaat breidt zich (bij heien boven water) naar alle richtingen uit met de geluidssnelheid in lucht, ongeveer 330 m/s. Als het heien onder water plaatsvindt breidt deze zich onder water uit met een snelheid van 1500 m/s. De geluidsgolven in water worden slecht overgedragen aan lucht, zodat maar een gering deel overgaat in luchtgeluid.

### Wat je hoort en voelt bij het heien

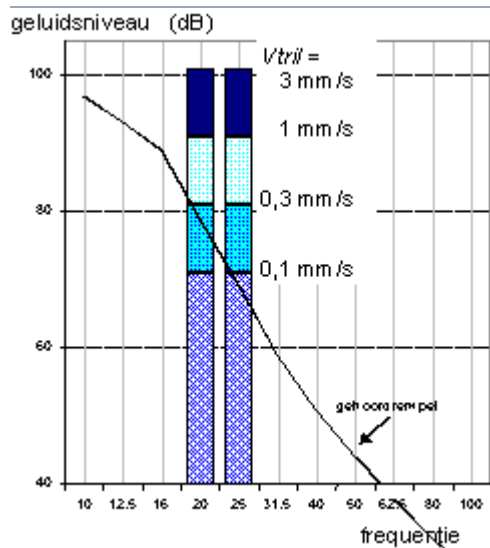
Bij het heien *boven* water voel je dus buiten een trilling in de bodem, gevolgd door het hoorbare, luchtgedragen geluid van de heislagen en nog een bodemtrilling. Vlak bij de heistelling, waar de heislagen oorverdovend zijn, volgen deze gebeurtenissen elkaar zo snel op dat ze moeilijk te onderscheiden zijn. Het tijdsverschil wordt verder van de heistelling echter groter, zodat je ze dan wel afzonderlijk kan waarnemen. Binnenshuis hoor je eerst een kort geluid ('bonk') als de eerste golf passeert. Daarna hoor je het geluid van de heislagen dat door de lucht (en gevel) aankomt, direct daarna (afhankelijk van de afstand tot het heien) gevolgd door een zeer laagtonig geluid en het meertillen van voorwerpen in huis.

Tijdens het heien *onder* water is het heigeluid buitenshuis niet meer hoorbaar; wat vreemd is als je weet dat het eigenlijk zo'n kabaal is. Het geluid reflecteert echter vrijwel geheel op het grensvlak water - lucht en kan dus niet uit het water komen. Wel hoor je de heimachine zwoegen in het tempo van het heien. De bodemtrillingen kun je duidelijk voelen. Ook in een nabije woning zijn de heislagen zelf niet hoorbaar. Wel trilt het huis bij elke slag en hoort men het als het ware 'zuchten': het huis beweegt en maakt geluid op een manier die lastig te beschrijven is, onder andere omdat het (ook voor de onderzoeker) een uiterst ongebruikelijke ervaring is. Bij elke 'zucht' trillen dingen mee (deuren, kasten, servies) of kraakt een constructiedeel zoals een kozijn. Deze geluiden zijn er buiten niet.

### Hoe ontstaat het infrageluid bij het heien

Als een huis trilt zullen de verschillende delen ervan gaan trillen en daardoor geluid afstralen. De hoeveelheid afgestraald geluid is groter bij grotere oppervlakken (wanden, vloeren/plafonds) en bij delen die sterker meertillen. In dat laatste geval komt de eigenfrequentie van het constructiedeel beter overeen met de bodemtrilling. Wanden en vloeren hebben betrekkelijk lage eigenfrequenties (5 - 30 Hz) en zullen daarom vooral bij lage frequenties geluid afstralen. Geluid met frequenties beneden 30 Hz wordt infrageluid

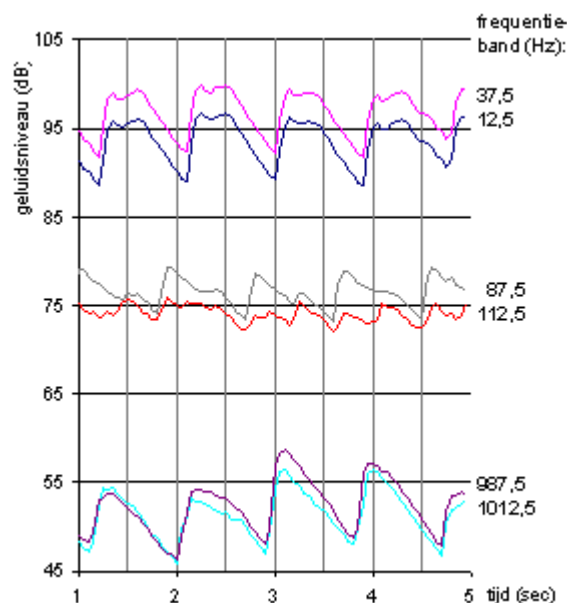
genoemd; het natuurlijk voorkomend infrageluid is bijna nooit zo sterk dat je het kunt horen. Bij een horizontale trilling (vooral bij P-golf) zullen wanden het meest meebewegen, bij een verticale trilling (oppervlaktegolf) de vloeren. Omdat de oppervlaktegolf de sterkste trillingen veroorzaakt en (vooral houten) vloeren relatief slap zijn en daardoor makkelijk meetrillen, kan men verwachten dat de sterkst voelbare trilling ontstaat door de trilling van de vloer en dat daarbij ook relatief veel geluid wordt uitgestraald. Dat geluid heeft dezelfde (lage) frequentie als de vloertrilling. De sterkte van de trillingen en het geluid is daarmee niet alleen afhankelijk van de bodemtrillingen (sterkte en frequentie), maar ook van eigenschappen van het huis, zoals van het type en de grootte van de vloer en wanden. Men kan uitrekenen dat als een vloer trilt met een snelheid van 0,1 mm/s daardoor een geluidsniveau (exclusief nagalm) ontstaat van 71 dB. Bij 1 mm/s zou derhalve een geluidsniveau van 91 dB ontstaan. Mensen kunnen trillingen voelen bij trillingssnelheden vanaf 0,05 mm/s. In figuur 1 is het door een vloertrilling (met maximale snelheid  $V_{tril}$ ) veroorzaakte geluidsniveau gegeven, tegelijk met de gehoordrempel voor een 'normaal' gehoor. Mensen kunnen al last krijgen van infrageluid zogauw dat waarneembaar is, dus als het boven hun gehoordrempel ligt. Dit hangt o.a. samen met het feit dat een kleine toename van het niveau van infrageluid een relatief grote toename in de ervaren geluidssterkte veroorzaakt. Bij deze lage frequenties telt een decibel twee keer zo zwaar als bij hoge frequenties.



Figuur 1 Hoeveelheid geluid binnenshuis in de tertsbanden 20 en 25 Hz (verticale kolommen) veroorzaakt door trilling van vloer met sterkte  $V_{tril}$ ; bij  $V_{tril} = 0,1$  mm/s is een vloer die met 20 Hz trilt niet hoorbaar, bij 25 Hz (net) wel

**Waarnemingen bij het heien**

Figuur 2 geeft resultaten van geluidsmetingen, tijdens heien boven water, in een naburig huis. Na een heislage is eerst een geluid waarneembaar met frequenties rond 100 Hz. Na ongeveer 0,15 seconde wordt dat gevolgd door geluid in een breder en



Figuur 2 Hoeveelheid geluid binnenshuis tijdens heien in enkele 25 Hz brede frequentiebanden bij

lage, midden en hoge frequenties; bij elke heislslag ziet men eerst de midden-frequenties opkomen (P-golf), daarna de hoge frequenties (luchtgeluid), tenslotte het infra-geluid (Rayleigh-golf)

hoger frequentiegebied (vooral 630 - 1600 Hz). Slechts een fractie van een seconde (0,05 seconde) later is infrageluid met veel hogere niveaus waarneembaar. In figuur 2 is het tijdsverloop gegeven van de hoeveelheid geluid in een aantal (25 Hz brede) frequentiebanden in deze drie frequentiegebieden. In elk frequentiegebied blijkt na elke heislslag het geluidsniveau af te nemen met een 'nagalmtijd' (tijd waarin niveau 60 dB daalt) van 4 tot 6 seconden. Bij de laagste frequenties blijft het geluid na een snelle toename eerst ongeveer 0,4 seconden op een hoog niveau om pas daarna weer af te nemen.

Het duurt relatief lang (seconden) voor de vloer c.q. het laagfrequente geluid in de woning is uitgedempt. Als heislagen elkaar snel opvolgen (elke seconde) is het laagfrequente geluid bij de volgende slag dus nog niet uitgedempt. In plaats van afzonderlijke, opeenvolgende geluiden zal men dan een continu geluid horen dat enigszins varieert in luidheid overeenkomstig de slagfrequentie: het huis 'zingt'.

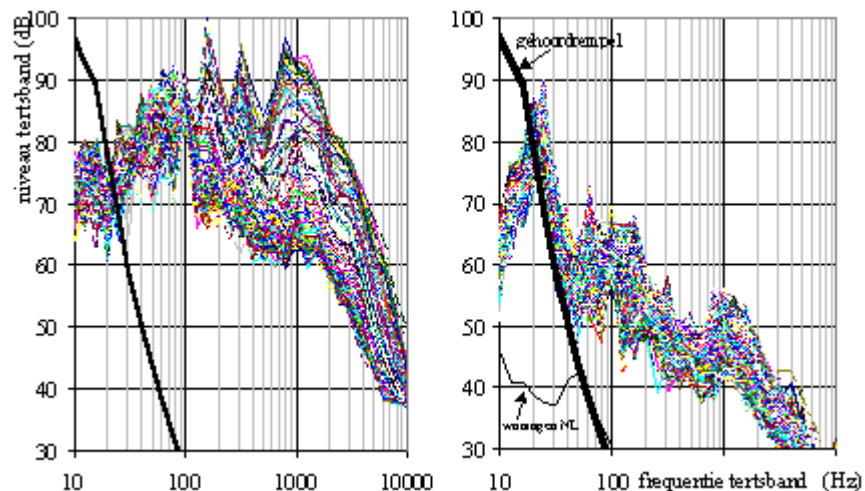
Het eerst aankomende laag- tot middenfrequente geluid correspondeert met de eerst aankomende trilling. Dit is de snelle bodemgolf die het huis passeert. Er moet echter meer aan de hand zijn gezien de dubbele pieken en trage afname in het geluid (zie figuur 2).

Het tweede, hoogfrequente geluid is de door de lucht aangevoerde heislslag die, verzwakt door de gevel, in huis doordringt. Dit geluid is niet in trillingsmetingen zichtbaar.

Het derde, zeer laagfrequente geluid is het gevolg van de tragere en langduriger oppervlaktegolf. Dit is de sterkste golf en bovendien heeft deze een frequentie die juist in het gebied van gebouwresonanties ligt. Bij zowel de trillingen als het geluid merkt men daarom de sterkste respons van het huis. De gemeten geluidssterkte komt goed overeen met de berekende waarde (zoals in figuur 1).

In figuur 3 zijn tertsbandspectra gegeven die elke ééntwintigste seconde tijdens een aantal opeenvolgende

heislagen zijn gemeten (in een tertsband ligt de hoogste frequentie een factor  $2^{1/3}$  boven de laagste). De linker figuur geeft de buitenshuis opgenomen momentane spectra, de rechter binnenshuis op vergelijkbare afstand van de heistelling. Men herkent in de buitenspectra geluidsvariaties van 20 à 30 dB tengevolge van het heien vooral bij frequenties vanaf ongeveer 100 Hz. Deze variaties zijn in de spectra binnenshuis veel kleiner (ca. 10 dB), maar er treden sterk verhoogde niveaus op bij infra-frequenties. Deze niveaus zijn hoger (!) dan buitenshuis.



Figuur 3 Tertsbandspectra van geluid buiten (links) en binnenshuis (rechts) tijdens heien; elk plaatje bevat spectra per 0,05 seconden gedurende ongeveer 6 heislagen; het harde geluid buiten rond 1000 Hz is binnen sterk gedempt (- 40 dB) maar binnen is er méér infrageluid dan buiten (+ 10 dB)

#### Komt laagfrequent geluid niet altijd voor bij heien ?

In principe komt laagfrequent geluid bij heien altijd voor als gevolg van de door het heien veroorzaakte bodembeweging. Als het echter van een lager niveau of een lagere frequentie is, hoeft dit geluid voor mensen niet waarneembaar te zijn.

Dat het geluid hier klachten veroorzaakte kwam doordat er langdurig in zand wordt geheid (en, uiteraard, doordat er woningen in de directe omgeving staan). Langdurig in zand heien is bij 'normaal' heien ongebruikelijk: men heit immers normaliter door een minder draagkrachtige bodemlaag juist tot (net) in het draagkrachtige zand. Zand biedt bij het heien aanmerkelijk meer weerstand dan klei of veen, waardoor 1) de slag korter van duur is, 2) de neergaande beweging van de heipaal minder groot is. Het eerste betekent dat de dominante frequentie van de trillingen hoger is dan gebruikelijk (deze is omgekeerd evenredig met de slagtijd), het tweede dat het heien langer duurt (meer slagen nodig) of dat de slagkracht moet worden vergroot.

Door een hogere frequentie verschuift het geluid naar een beter hoorbaar gebied. Als bijvoorbeeld de slagtijd (vanwege de kortere slaglengte) halveert, verdubbelt de frequentie. In figuur 2 schuift het balkje naar rechts en steekt dan dus verder boven de gehoordrempel uit. Een geluid dat bij 10 Hz net niet hoorbaar zou zijn is dat bij 20 Hz wel en klinkt dan zelfs relatief luid. Ook kan door de frequentieverhoging de frequentie dichter bij een resonantie-frequentie van een vloer komen, waardoor de vloer meer beweegt en dus meer geluid afstraalt. Door de slagkracht te verhogen wordt dit alles versterkt.

Dat het heien bij Zevenaar zulke klachten gaf was niet verwacht, maar blijkt dus met een nieuwe toepassing samen te hangen: normaal heit je niet in zand. De 'pure' blootstelling aan trillingen en infrageluid blijkt uiterst vervelend voor omwonenden, meer nog dan met het 'gewone', meer vertrouwde geluid van heien. Vergelijkbare problemen zullen zich in de toekomst meer gaan voordoen. Er wordt steeds meer ondergronds gebouwd en vooral door lichter bouwen (minder materiaal) stijgen de trillingsfrequenties waardoor de trillingen beter hoorbaar worden.



**RuG**