

# SBR-A richtlijn niet eenduidig voor trillinggevoelige funderingen

**ir. Rob van der Salm**  
Afdelingshoofd monitoring,  
Fugro Geoservices B.V.



**dr. ir. Paul Hölscher**  
Senior specialist, Deltares



**ir. Albert Jan Snethlage**  
Senior geotechnisch adviseur  
Fugro Geoservices B.V.



De trend in Nederland is dat steeds meer in binnenstedelijke omgeving wordt gebouwd. Nieuwbouw is vaak hoger en zwaarder dan de bestaande belendingen, waardoor deze in veel gevallen dieper gefundeerd moeten worden. Door gebrek aan parkeerruimte in de binnenstad worden parkeergarages en kelders op zeer korte afstand van bestaande bebouwingen gerealiseerd. De bestaande bebouwing is vaak op staal of korte palen op de eerste zandlaag gefundeerd.

Het uitvoeren van funderingswerken (heien van palen en/of trillen van damwandplanken) in de directe nabijheid van bestaande constructies kan schade opleveren aan de belendingen. Naast de directe schade aan draagconstructies door trillingen, kunnen er secundaire schades ontstaan door verschilzakkingen als gevolg van het verdichten of verkeden van de ondergrond waarop de fundering van de gebouwen in de nabijheid geplaatst is.

Een soortgelijke problematiek treedt ook op bij funderingswerkzaamheden in de nabije omgeving van waterkeringen, kades, (spoor)baanlichamen en ondergrondse kabels en/of leidingen. Door de trillingen bestaat de kans dat de ondergrond zich gaat verdichten waardoor onbeheersbare kruinzakkingen kunnen optreden.

De afgelopen jaren worden beheerders van waterkeringen en constructies steeds vaker met trillingsschades geconfronteerd. Een van de ontwikkelingen is dat er strenger gecontroleerd wordt op overschrijdingen van grenswaarden als gevolg van trillingen. Vaak wordt er door de beheerder verwezen naar de SBR richtlijn A richtlijn om de trillingintensiteit te toetsen. Dit artikel gaat in op het meten en beoordelen van de trillingen conform de SBR richtlijn A in relatie tot het risico van verdichting.

## SBR meet- en beoordelingsrichtlijn Trillingen

De grenswaarden uit deel A van de SBR meet- en beoordelingsrichtlijn Trillingen worden in Nederland steeds vaker voorgeschreven als de toelaatbare trillingen in constructies. De SBR-richtlijn maakt onderscheid tussen de trillingen in de constructie en trillingen in de fundering.

De constructies worden in drie bouwcategorieën ingedeeld afhankelijk van de staat waarin de draagconstructie zich bevindt, het type draagconstructie en/of het een monumentaal pand betreft. De grenswaarde is afhankelijk van het type meting, het type trilling en de dominante frequentie in de trilling. De huidige SBR richtlijn gaat uit van de snelheid (mm/s) als grootte voor het beoordelen van de trillingen. Het type meting en type trilling wordt in de beoordeling verdisconteerd door gebruik te maken van partiële veiligheidscoëfficiënten.

Voor de funderingen wordt onderscheid gemaakt tussen trillinggevoelige funderingen en niet trillinggevoelige funderingen. De volgende funderingen worden als trillinggevoelig aangemerkt:

- Fundering op staal (poeren, stroken of platen), op verdichtbaar of verkneedbaar bodemmateriaal, met uitzondering van funderingen op zeer vaste zandlagen;
- Funderingen met niet-grondverdringende palen (avegaarpalen, boorpalen) met uitzondering van palen waarvan kan worden aangetoond dat deze nauwelijks extra zakking zullen vertonen onder verhoogde negatieve kleeft of verdichting van lagen onder de paalpunt;
- Funderingen met grondverdringende palen die zakkingen kunnen vertonen onder extra negatieve kleeft en verdichten van lagen onder het paalpunt-niveau. Alle kleeftpalen vallen in deze categorie. Kades, dijken en (spoor) baanlichamen kunnen ook

verdichtingen ondergaan als gevolg van opgewekte trillingen. Bij gebrek aan duidelijke richtlijnen hiervoor wordt steeds vaker de SBR-A richtlijn gebruikt voor de bepaling van grenswaarden. De kades, dijken en baanlichamen beschouwt men in dat geval vaak als constructies die conform de verdichting-norm van de SBR mogen worden beoordeeld.

## Beoordeling trillinggevoelige funderingen conform SBR richtlijn A

De SBR richtlijn bevat zowel een procedure voor het meten van trillingen als een procedure voor de beoordeling van de invloed van de trillingen. Uitgangspunt daarbij is dat de invloed van de trillingen gerelateerd wordt aan de optredende snelheid van de trilling, identiek aan de beoordeling van de trillingen aan de draagconstructie. In tegenstelling tot de beoordeling van de trillingen in de constructie dient geen partiële veiligheidsfactor toegepast te worden op de karakteristieke snelheidswaarden voor trillinggevoelige funderingen.

Voor de beoordeling van trillinggevoelige funderingen zijn in de SBR richtlijn A snelheidswaarden (mm/s) als functie van de frequentie opgenomen. Uitgaande van een harmonische bewegingsvergelijking  $v = a/2\pi f$  is deze snelheid (gegeven de frequentie) om te rekenen naar een maximale vaste versnellingswaarde van  $1 \text{ m/s}^2$ . De waarde van  $1 \text{ m/s}^2$  wordt vaak gebruikt omdat het een tiende van de zwaartekracht betreft. Bij dergelijke versnellingen gaan losse delen, zoals bijvoorbeeld verdichtbaar granulaair materiaal, met een wrijvingsfactor 0.1 schuiven. In de praktijk blijkt echter de aanname dat een trilling in de grond uit pure harmonische trillingen bestaat niet op te gaan.

Bij de algemeen aanvaarde beoordeling en toetsing van trillingen in de ondergrond voor risico op ver-

## Samenvatting

Bij het trillen of heien van een funderingselement kan er risico op schade door het verdichten van trillingsgevoelige grondslag onder de fundering zijn. Bij beoordeling volgens de SBR-richtlijnen "Trillingen" mag de trillings-snelheid niet groter zijn dan een frequentie afhankelijke grenswaarde (snelheid). Deze grenswaarde is echter gebaseerd op een oorspronkelijke grenswaarde aan de versnelling.

Dit artikel laat zien dat de beschouwing(en) niet consistent zijn. Bij verschil-

lende situaties staat de SBR richtlijn een versnelling toe die boven de grenswaarde voor de versnelling ligt, en dus tot verdichting kan leiden. Het geeft de achtergrond van een discrepantie weer en laat zien dat er in de praktijk situaties zijn waarin dit ook daadwerkelijk optreedt.

Momenteel biedt de SBR-richtlijn geen oplossing voor dit probleem. Voorzichtigheid is geboden. In een herziene versie van de richtlijn dient dit aspect opgelost worden.

dichting is echter niet de snelheid, maar de versneling van belang. Op basis van conuswaarden wordt met empirische vergelijkingen (o.a. Lunne, Robertson et al) de relatieve dichtheid per grondlaag bepaald. Vervolgens is een drempelwaarde voor de minimale versnelling af te leiden. Deze drempelwaarde is gecorreleerd aan de zwaartekrachtversnelling. Indien de optredende versnelling hoger is dan deze drempelwaarde zal verdichting van die laag optreden. Om een predictie van het effect van de trillingen te verkrijgen is kennis nodig van de pakkingdichtheid en conusweerstand van de aanwezige grond. Deze parameters worden bijvoorbeeld gebruikt voor input van het model van Hergarden, van Tol. Het model maakt gebruik van versnellingen voor de bepaling van de effecten op de omgeving. Grondonderzoek op locatie is noodzakelijk om deze parameters vast te leggen.

## Meetresultaten in verdichtingsgevoelige lagen

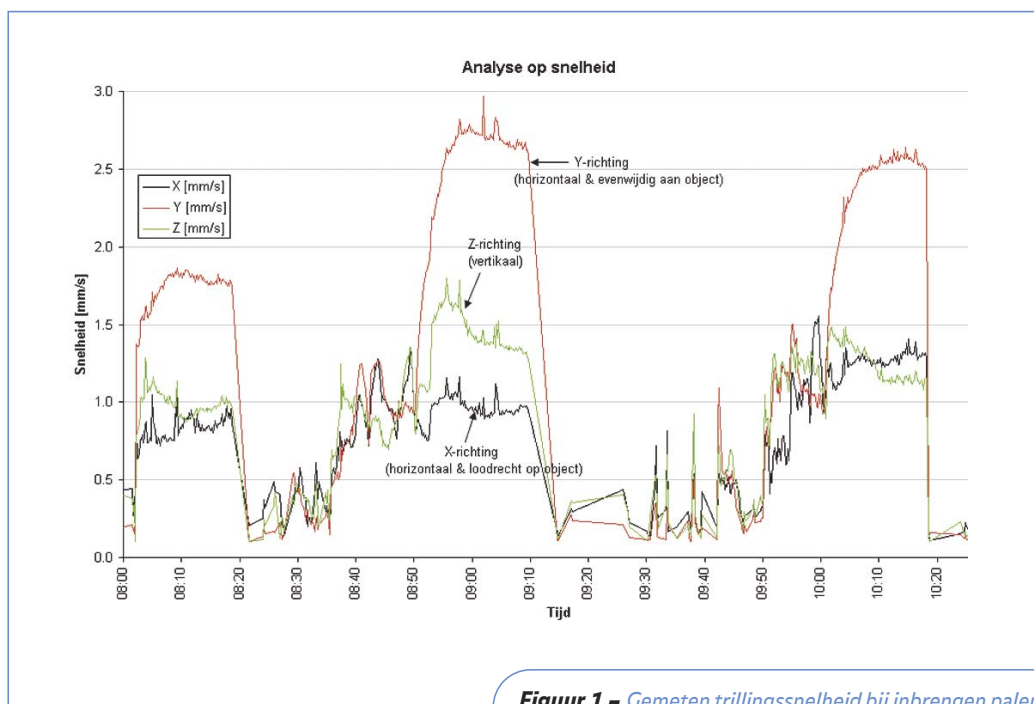
In de periode van juni / juli 2011 heeft Fugro metingen verricht tijdens het inbrengen van vibro palen Ø 609 mm, lengte circa 25 m, in de nabije omgeving van een verhoogd liggend spoorbaanlichaam. De metingen zijn uitgevoerd met het Vibra+ systeem van Profound, waarbij de opnemer (gefofon) in een conus is opgenomen en geplaatst is op circa 3,5 m diepte in een verdichtingsgevoelige zandlaag.

In figuur 1 is het inbrengen van één van de palen weergegeven. In figuur 2 is de beoordeling conform SBR richtlijn A weergegeven.

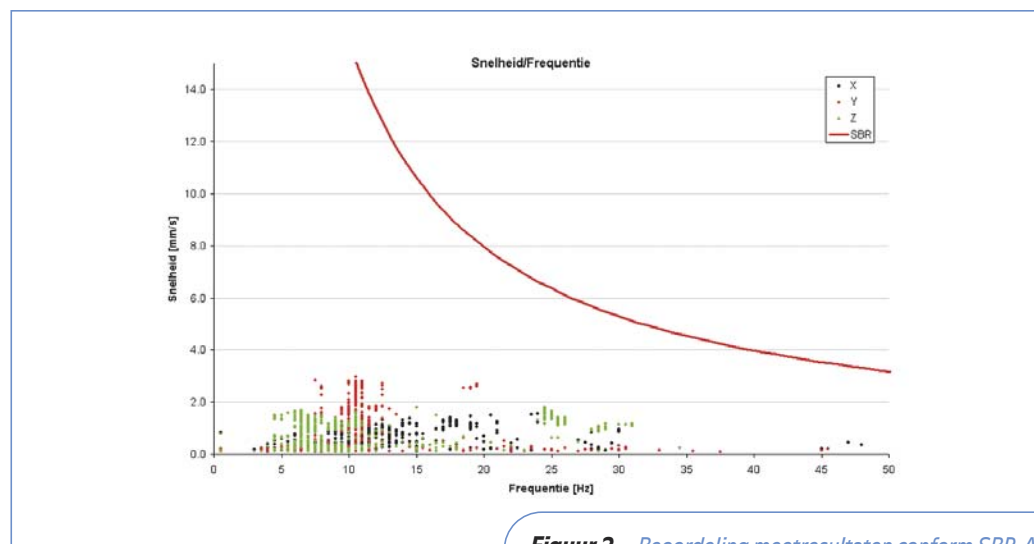
De hoogst gemeten snelheden treden op rondom de 10 Hz tot 15 Hz. Bij vibro palen ligt doorgaans de dominante frequentie rond 20 Hz tot 25 Hz, door reflecties en materiaaldemping treedt faseverschuiving op naar circa 10 Hz tot 15 Hz. Zoals uit figuur 2 valt af te lezen vallen alle relevante metingen ruim binnen het beoordelingscriterium voor de trillingsgevoelige fundering conform SBR richtlijn A.

## Beoordeling op basis van de versnellingen

Het meetstelsel Vibra+ geeft naast de snelheden ook de versnellingen weer. De opnemer (gefofon) is niet direct geschikt voor meten van versnellingen, echter door de sampletijd en samplefrequentie



Figuur 1 – Gemeten trillingsnelheid bij inbrengen palen.



Figuur 2 – Beoordeling meetresultaten conform SBR-A.

dusdanig ruim te kiezen is na differentiatie van de snelheid de versnelling "gemeten". De meetwaarden van de versnellingen kunnen daarom ook in de tijd worden gepresenteerd en daarna worden getoetst aan de afgeleide toetswaarde van  $1 \text{ m/s}^2$  (figuur 3) die als grondslag dient voor de SBR

beoordeling. Het blijkt dat er wel degelijk een overschrijding is opgetreden.

## Controle van de meetunit

Uit voorgaande gegevens blijkt dat er een tegenpraak in de beoordeling van de signalen is opge-

treden. Bij gebruik van de SBR-A beoordelingslijn voor funderingen kan de conclusie worden getrokken dat de optredende trillingen ruim binnen het gestelde criterium vallen. Als er naar versnellingen wordt gekeken kan geconcludeerd worden dat overschrijdingen zijn opgetreden gedurende het inbrengen van de palen.

Omdat het ontstaand euvel zou kunnen liggen in een onjuiste interpretatie van het Vibra+ van Profound, is op verzoek van Fugro door de leverancier van het trilmeetsysteem een test onder geconditioneerde omstandigheden uitgevoerd. Bij een harmonische belasting met een frequentie van 12 Hz en een amplitudesnelheid van 4 mm/s is de afgeleide theoretische versnelling bepaald op: 0.30 m/s<sup>2</sup>. De ingestelde snelheid lag iets onder de gevraagde snelheid, dus de orde van grootte van de versnelling die berekend wordt door de Vibra+ is juist. Aangezien de versnelling bepaald wordt uit de differentiatie van de snelheid in de tijd, mag verondersteld worden dat dit algoritme ook voor willekeurige signalen correct functioneert.

### Theoretische analyse

Om aan te tonen dat de beoordeling van trillingsgevoelige funderingen niet in termen van snelheid uitgevoerd kan of mag worden, wordt hier een trillingssignaal beschouwd dat slechts twee componenten met elk een eigen frequentie bevat. Gedacht kan worden aan de overheersende frequentie in het bron signaal en de resonantie frequentie in de bodem. Eén van deze frequenties zal de dominante frequentie zijn.

De snelheid  $v(t)$  van een trilling is

$$v(t) = v_1 \sin(\omega_1 t) + v_2 \sin(\omega_2 t + \varphi)$$

waarin

- $v_i$  de amplitude van de component met frequentie  $f_i$  is
- $\omega_i$  de hoekfrequentie van de component met frequentie  $f_i$  is ( $\omega_i = 2\pi f_i$ )
- $t$  de tijd
- $\varphi$  een willekeurige fasehoek

De versnelling  $a(t)$  van dit snelheidssignaal is

$$a(t) = \omega_1 v_1 \cos(\omega_1 t) + \omega_2 v_2 \cos(\omega_2 t + \varphi)$$

Bij aanname dat dit signaal juist aan de grenswaarde voldoet, moet voor de amplitude  $a_i$  van de

$$a_1 = \omega_1 v_1 = \alpha a_g$$

$$a_2 = \omega_2 v_2 = (1 - \alpha) a_g$$

waarin  $\alpha$  een constante parameter is, die nog afhangt van de verhouding tussen de twee componenten en  $a_g$  de grensversnelling is.

Wordt het signaal in het snelheidsdomein beoordeeld, dan is de maximale waarde van de snelheid

$$\hat{v} = \frac{\alpha a_g}{\omega_1} + \frac{(1 - \alpha) a_g}{\omega_2} < v_g$$

met  $v_g = a_g / \omega_1$  als component 1 de dominante frequentie is.

Bij een keuze van bijvoorbeeld  $\alpha = 0.5$  en  $f_2 = 2f_1$ , dan ligt het signaal duidelijk onder de grenscurve voor de snelheid, terwijl de versnelling juist gelijk was aan de grenswaarde. Dat betekent dat er een snelheidssignaal geconstrueerd kan worden dat boven de grenswaarde voor de versnelling ligt, maar nog onder de grenscurve voor de snelheid.

Door een andere combinatie van  $\alpha$  en  $\omega$  te kiezen kan het effect ook worden omgedraaid. Figuur 4

geeft een generalisatie van de situatie voor een signaal dat bestaat uit twee sinusvormige signalen met 10 Hz en 19 Hz.

Figuur a (linksboven) geeft aan de afhankelijkheid van de grenswaarde en de trillingsnelheid als functie van de parameter  $\alpha$ . De trillingsnelheid is een lineaire functie van  $\alpha$ , terwijl de grenswaarde plotseling springt, deze is namelijk afhankelijk van de overheersende frequentie. Voor kleine waarden van  $\alpha$  voldoet het signaal beoordeeld in het frequentie domein niet, voor grote waarden van  $\alpha$  voldoet het signaal wel. In figuur d (links onder) staan de twee punten voor  $\alpha = 0.15$  en  $\alpha = 0.85$  aangegeven in de grafiek voor de grensnelheid als functie van de frequentie.

In de overige figuren (b, c en e, f) staan de snelheden en versnellingen als functie van de tijd getoond, waaruit blijkt dat de maximale versnelling in beide gevallen juist 1 m/s<sup>2</sup> is.

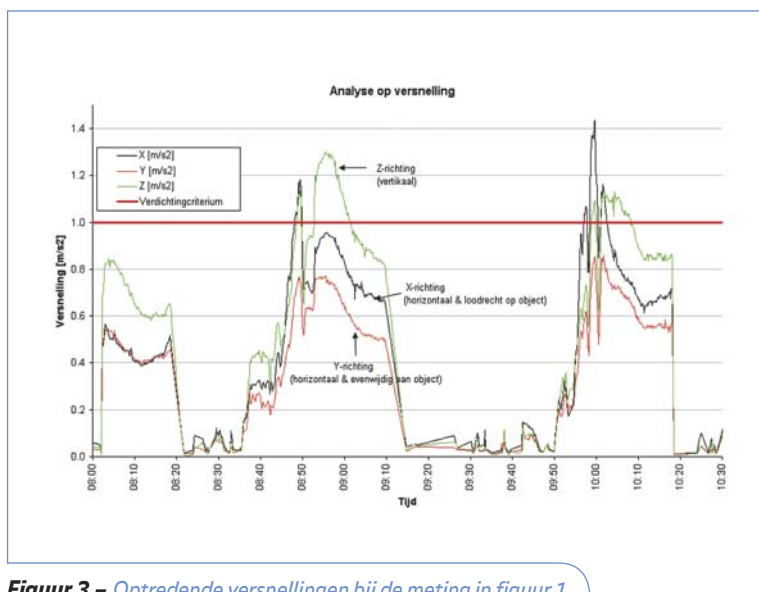
Concluderend mag gesteld worden dat de praktische grenscurve in de SBR-richtlijn niet past bij de theoretische achtergrond.

### Nadere analyse van een niet harmonische trilling

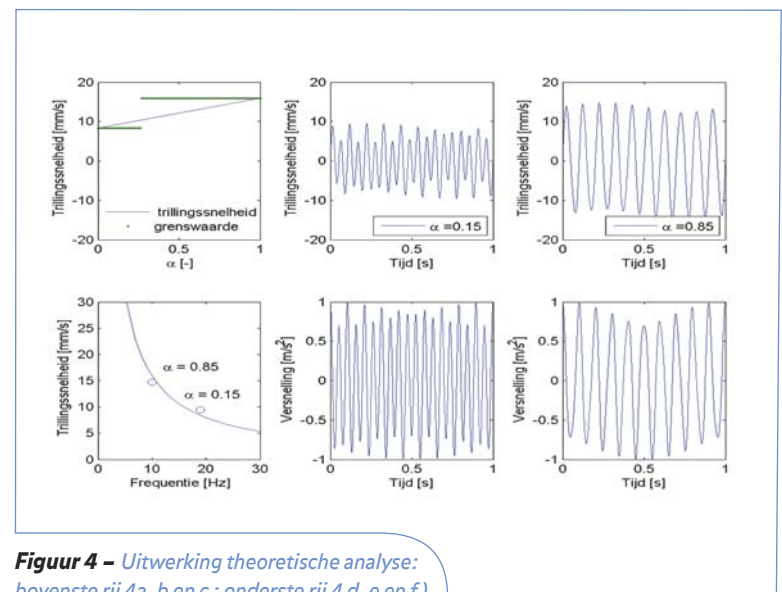
Voor de analyse van de meetgegevens is het snelheidssignaal versus de tijd (figuur 5) nader beschouwd.

Het gemeten signaal uit figuur 5 is in figuur 6 opgesplitst:

- bovenste rij van figuur 6: afzonderlijke snelheidsdelen, x-, y en z-richting. Eerst treedt een hoogfrequente trilling, daarna een laagfrequente trilling;
- middelste rij van figuur 6: spectrumanalyse (na uitvoering FFT). De hoogfrequente trilling heeft



Figuur 3 – Optredende versnellingen bij de meting in figuur 1.



Figuur 4 – Uitwerking theoretische analyse: bovenste rij 4a, b en c; onderste rij 4d, e en f).

een frequentie van circa 25 Hz, de laagfrequente trilling heeft een frequentie van circa 8 Hz. Dit resulteert in twee pieken in het frequentie domein. Dit is in de horizontale trilling in x-richting heel goed te zien. In de figuur in het frequentie domein is ook de vorm van de grenscurve geschetst (niet op schaal).

– Onderste rij van figuur 6: gegeven de frequentie is vervolgens de versnelling bepaald. Het blijkt dat het hoogfrequente deel de hoogste versnelling geeft. De SBR richtlijn koppelt de grenswaarde echter (via de dominante frequentie) aan de laagfrequente piek, die bij het laagfrequente deel van de golfpassage hoort.

### Discussie van de SBR-richtlijn

De SBR richtlijn deel A geeft een grenswaarde voor trillingsgevoelige funderingen (snelheid tegen frequentie). Bij aanname van een harmonische trilling volgt een maximale versnellingswaarde van  $1 \text{ m/s}^2$ . Deze grenswaarde zou moeten gelden voor zowel de fundering als voor verdichting van de onderliggende zandlagen, voor meetsignalen die niet zuiver harmonisch zijn resulteert dit in een inconsistente beoordeling van het signaal. Het gebruik van de dominante frequentie, die gekoppeld is aan de grenswaarde voor schade, is niet verdedigbaar, want het gedrag van de grond onder de fundering is niet afhankelijk van de sterkte karakteristiek van het gebouw dat erop staat.

Ten aanzien van verdichtingproblemen is een betere procedure noodzakelijk. In de huidige literatuur wordt steeds vaker snelheid als criterium voor verdichting gebruikt. Het verschijnsel verdichting is complex waarbij het verschijnsel frequentie afhankelijk is. Bij lage frequenties zou mogelijk

de snelheid als maatgevend mogen worden beschouwd, bij hoge frequenties kan de versnelling als maatgevend worden beschouwd. Het is wenselijk dit aspect verder uit te diepen in een literatuur studie, laboratoriumonderzoek en een praktijkproef.

Een ander meer praktisch aspect is de vraag in hoeverre het daadwerkelijk voorkomt in de Nederlandse praktijk en of een meetsignaal aan de fundering beoordeeld mag/moet worden aan de grenswaarde voor verdichting van het granulaire materiaal onder de fundering. Daarvoor moeten veel praktijkgegevens verzameld worden. Recent is een Deltabrain opgeleverd dat bij uitstek geschikt is om deze praktijk informatie te genereren. Omdat individuele bedrijven meestal te weinig cases met verdichtingproblemen krijgen om statistisch significant te zijn, is het van belang om dit in een gemeenschappelijke inspanning te doen.

### Conclusie

Het is in het algemeen niet mogelijk om de harmonische versnellingswaarde van  $1 \text{ m/s}^2$  bij trillingsgevoelige funderingen te beoordelen aan de hand van een grenscurve voor de snelheid/frequentie, zoals deze is opgenomen in SBR richtlijn A. Tijdens heikwerkzaamheden zijn de trillingen in de grond namelijk niet harmonisch van vorm en houdt de theoretische omrekening van versnellingen naar snelheden geen stand.

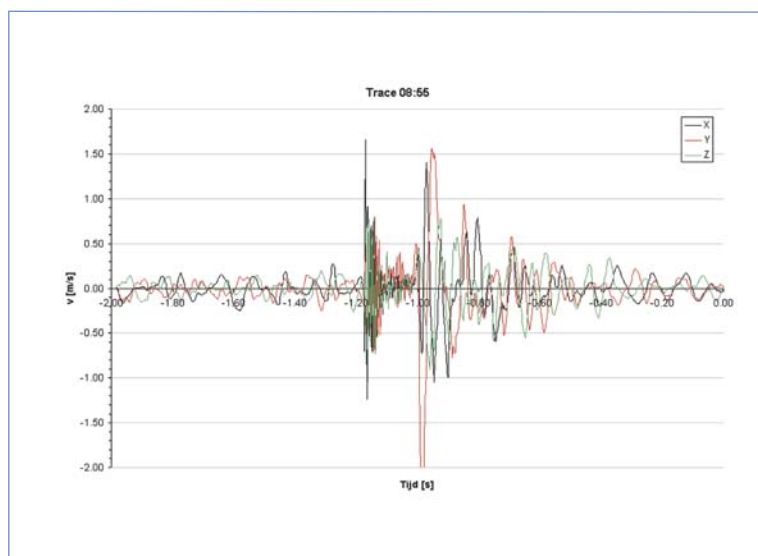
Door toepassing van de huidige interpretatie regels van de SBR richtlijn A bestaat de kans dat er onacceptabele risico's worden genomen op het gebied van verdichtingen of dat er trilling veroorzakende activiteiten worden gestaakt terwijl de kritieke situatie nog lang niet bereikt is.

Het verdichtingsaspect is niet correct uitgewerkt in de SBR richtlijn A en moet in een herziene versie aangepast worden om tot een betrouwbare beoordeling te komen. Onderzocht moet worden of de beoordeling van trillingsgevoelige funderingen uitsluitend in het termen van versnelling of uitsluitend in termen van snelheid / frequentie uitgevoerd kan worden en welke variabele hiertoe het meest geschikt is. Mogelijk bestaat er een situatie waarbij lage frequenties op snelheid en bij hogere frequenties op de versnelling moet worden beoordeeld.

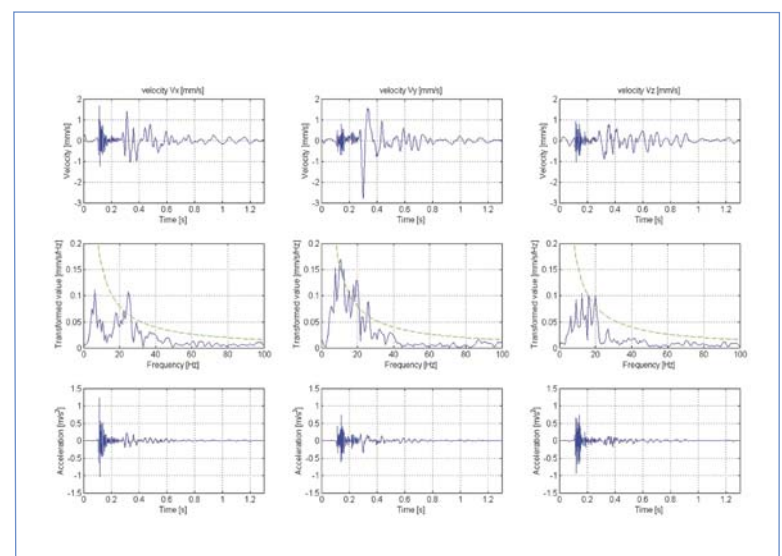
Naast de herziening van de SBR richtlijn A met een betere theoretische onderbouwing, zal er meer praktijk informatie moeten worden verzameld om de werkelijke kans op schade als gevolg van verdichten te bepalen. Een nationale database zoals bijvoorbeeld Geobrain zo daarbij kunnen ondersteunen.

### Referenties

- [1] SBR Meet en beoordelingsrichtlijn, deel A *Trillingen*, SBR Rotterdam 2006
- [2] T. Lunne, P.K. Robertson, J.J.M. Powell, *Cone penetration testing in geotechnical practice*, London, Blackie, 1997.
- [3] R.H. Hergarden, A.F. van Tol, *Zakkingen tijdens het trillend trekken van damwanden*, Geotechniek, juli 2001, pp 85-90.
- [4] [www.deltabrain.nl/bouwen/bouwtrillingen](http://www.deltabrain.nl/bouwen/bouwtrillingen). Geraadpleegd op 26 september 2011. ■



Figuur 5 – Tijdsignaal van één klap tijdens het inbrengen van een paal.



Figuur 6 – Analyse per richting.