

**Samenvatting:**  
Invloed inbrengen en  
verwijderen van  
damwanden op omgeving

Tijdens het in- en uittrillen van damwandplanken in een zandige grondslag treden regelmatig verzakkingen in de omgeving op. Zakkingen van meer dan 0,5 m kunnen optreden. In de internationale literatuur wordt een aantal modellen beschreven die bedoeld zijn om deze zakkingen te voorspellen. De resultaten vertonen onderling een grote spreiding. Om meer inzicht te krijgen in de problematiek worden de diverse optredende mechanismen bij de damwand en in de ondergrond kwalitatief beschreven. Op basis daarvan wordt een model ontwikkeld wat het gehele proces beschrijft. Voor validatie en verbetering van het model zal in 2004 een proef worden uitgevoerd.

# INVLOED INBRENGEN EN VERWIJDEREN VAN DAMWANDEN OP OMGEVING

■ ir. P. Meijers, GeoDelft en Technische Universiteit Delft

## Inleiding

De meest eenvoudige vorm van een bouwput is het graven van een put met taluds. Bij diepe bouwputten is hiervoor veel ruimte nodig die in ons kleine en drukbevolkte land meestal niet beschikbaar is. Een verticale begrenzing van de bouwput beperkt het ruimtebeslag aanzienlijk. Voor deze verticale begrenzing zijn diverse methoden beschikbaar, zoals diepwanden, palenwanden, een Berliner wand, e.d. De meest gekozen



■ **Figuur 1:** Intrillen van een damwand in een stedelijke omgeving

oplossing is echter een damwand. Dit is niet vreemd gezien de snelheid van werken en de kosten. De techniek heeft ook een paar nadelen zoals het risico van uit het slot lopen van de planken (met lekkage en uitspoeling van de grond achter de wand als gevolg) en invloed op de omgeving door trillingen en verzakkingen. Momenteel loopt er aan de Technische Universiteit Delft onderzoek naar het mechanisme van verdichting bij het in en uit de grond trillen van damwanden. Het doel van dit onderzoek is om een betrouwbaar voorspellingsmodel voor de zakkingen te krijgen. In deze bijdrage wordt een overzicht van de mogelijke mechanismen gegeven en een aanzet voor modelvorming.

### Probleemschets

Damwanden worden meestal geplaatst en verwijderd door trillen. Voor de omgeving kan dit twee soorten schade tot gevolg hebben.

De eerste is directe gebouwschade door trillingen. Het tweede effect is verdichting van de ondergrond door de opgewekte trillingen, met zakkingen als gevolg. Inzicht in de grootte van de trillingen en verdichting is noodzakelijk om te bepalen of de damwanden middels trillen geplaatst en verwijderd kunnen worden.

Gevolgen van verdichting van de ondergrond kunnen zijn:

- zakking van bestaande funderingen, met als gevolg schade aan bestaande bebouwing
- zakking van nieuw gebouwde constructies binnen de bouwput
- bij pers- en ontvangstuipen verschil van zakking van de leiding binnen en buiten de kuip
- opdrijven van leidingen in verweekte grond
- zakking van wegen en spoorwegen, met als gevolg dat deze tijdelijk moeten worden afgesloten
- (verschil-)zakking van leidingen in de omgeving van de damwand
- verlies van draagkracht van funderingen door een tijdelijke wateroverspanning in de ondergrond

Om enig inzicht in de grootte van het probleem te krijgen, zijn de gegevens in de database van Geobrain funderingstechnieken geanalyseerd. Deze database is opgezet door het platform funderingstechnieken ([www.geobrain.nl](http://www.geobrain.nl)). In de database worden ervaringen bij damwandprojecten in Nederland systematisch verzameld, met als doel de risico's beter in kaart te brengen. Medio 2004 waren in de pilot-versie 72 ervaringen van 35 projecten verzameld. Bij 7 projecten (20%) is het optreden van zakkingen gemeld. Bij 2 projecten (6%) was de zakking zelfs meer dan 0,5 m. Mogelijk zijn bij meer projecten zakkingen opge-



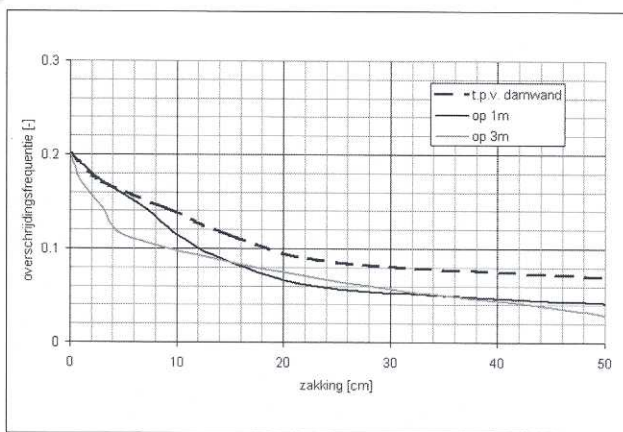
■ **Figuur 2:** Voorbeeld van opgetreden zakkingen bij het intrillen van damwanden

reden, maar die waren dan dusdanig beperkt dat ze tijdens de uitvoering niet werden opgemerkt of niet vermeldenswaard werden gevonden. *Figuur 3* toont de overschrijdingsfrequentie van de zakking bij de damwand en op 1 m en 3 m afstand.

De komende jaren zullen meer ervaringen worden toegevoegd en zal er een beter kwantitatief beeld ontstaan van de optredende zakkingen in de praktijk. De eerste resultaten maken wel duidelijk dat grote zakkingen met enige regelmaat zullen voorkomen.

### Beschrijving proces

Om de grootte van de verdichting tijdens het trillen van damwandplanken te bepalen, moet het totale proces in beschouwing worden genomen.



■ **Figuur 3:** Overschrijdingsfrequentie zakking maaiveld, volgens gegevens in de pilot-ervaringsdatabase Geobrain funderingstechnieken

Figuur 4 schetst de situatie tijdens het in- of uittrillen van damwandplanken.

De reden dat zand wil verdichten, zijn de trillingen. Het gehele proces begint dan ook met een trillingsbron. In dit geval is dat de damwand met trilblok. Vanaf de damwand verspreiden trillingen zich in de omgeving. Deze trillingen geven een wisselende belasting van de ondergrond. In droog zand is het resultaat verdichting; in met water verzadigd zand zal er in eerste instantie wateroverspanning ontstaan. Afstroming van dit overspannen water geeft vervolgens alsnog verdichting. Deze verdichting wordt aan het maaiveld zichtbaar als een zakking. Hiermee is het totale proces opgesplitst in een aantal deelprocessen:

- een trillingsbron, in dit geval een damwand met trilblok
- uitstraling van trillingen naar de omgeving
- reactie van de grond op deze trillingen (verdichting, verweking)
- sommatie van deze verdichting, resulterend in een maaiveldzakking.

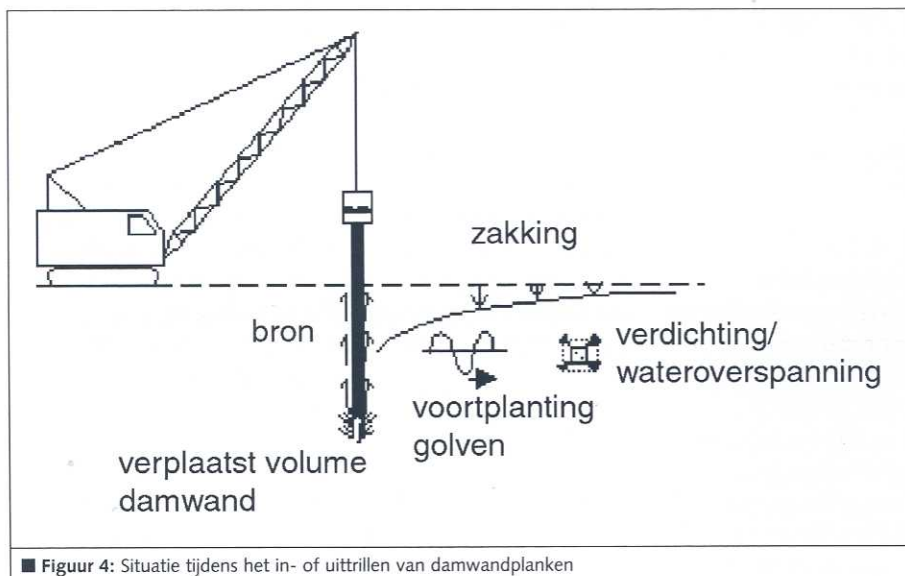
Deze processen zullen hierna elk apart worden beschreven.

### Trillingsbron

Waardoor ontstaan de trillingen? Mogelijke bronnen zijn:

- schuifspanning tussen damwand en de grond; dit is waarschijnlijk de grootste bijdrage
- drukgolven vanuit de punt
- horizontaal bewegen van de plank

In de ideale situatie, het trilblok staat centrisch op de damwand en de damwand beweegt perfect verticaal, zal de belasting naast de damwand een soort afschuifgolf zijn.



Figuur 5 toont het resultaat van een berekening met PLAXIS waar dit wordt geïllustreerd.

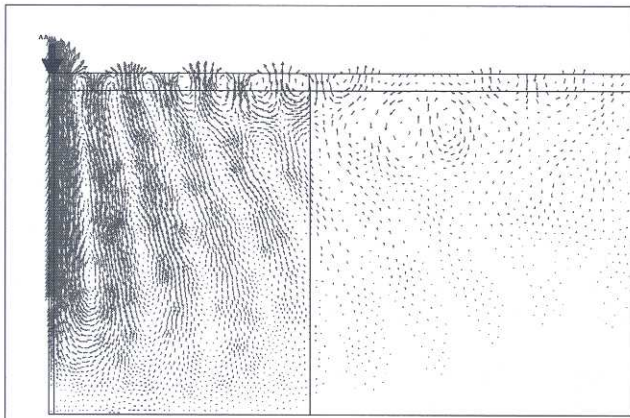
De punt heeft een zeker oppervlak. Hier zal bij in- en uittrillen een wisselende kracht tussen de teen van de damwand en de ondergrond worden opgewekt. De bijdrage hiervan aan de verdichting is waarschijnlijk beperkt. De dikte van een damwand is gering waardoor deze trillingen snel zullen uitdempem. Hierdoor wordt slechts een beperkte zone rond de punt beïnvloed.

Horizontaal bewegen van de wand is zeker mogelijk. Dat dit zal gebeuren, is duidelijk als men bedenkt waar het trilblok op de damwand wordt geplaatst. Meestal worden daaraan geen eisen gesteld. Gebruikelijk is om het trilblok ter plaatse van het slot te plaatsen. Bij een dubbel Z-profiel is het aangrijpingspunt dus excentrisch ten opzichte van de neutrale lijn van de damwand. Naast een verticale belasting oefent het blok dus ook een momentbelasting uit. In de grond zal deze momentbelasting moeten worden opgenomen door horizontale steundruk van de grond. Tijdens metingen bij het intrillen van enkele U-profielen vond Viking (Viking 2002) dat voor het gedeelte boven maaiveld de horizontale trillingsamplitude ongeveer even groot was als de verticale trillingsamplitude. Voor het gedeelte van de plank in de grond was de trillingsamplitude aanzienlijk kleiner. Verwacht wordt dat daar horizontale drukgolven vanuit de plank de grond ingaan.

Een aandachtspunt is nog de slotwrijving. Via de slotwrijving kunnen al geplaatste planken ook in trilling komen. Een slechte kwaliteit van de sloten, bijvoorbeeld bij enigszins beschadigde planken, heeft een ongunstig effect. De planken komen slechter in of uit de grond. Ook wordt via de sloten een groter oppervlak aan damwand in trilling brengen.

### Optredende belasting-amplitude in de grond

De laatste jaren is veel onderzoek gedaan naar het voorspellen en beoordelen van trillingen, onder andere in Delft Cluster verband. Voor het voorspellen van het trillingsniveau zijn diverse methoden beschikbaar, variërend van relatief eenvoudig tot zeer geavanceerd. De bekendste is waarschijnlijk de methode die in CUR-handboek Damwandconstructies (C166) wordt genoemd. Dit is een puur empirische methode. Momenteel wordt dit handboek herzien. Op welke wijze daarbij de methodiek voor



■ **Figuur 5:** Beweging van de grond naast een trillende damwand; de grondstijfheid neemt toe met de diepte

het voorspellen van trillingen wordt herzien, was tijdens het schrijven van dit artikel nog niet bekend. Een meer geavanceerde methode is de zogenaamde L400-methode die gebruik maakt van de karakteristieke methode. Een andere aanpak is om het trillingsniveau met een eindige elementen model te voorspellen. Moderne EEM-pakketten, zoals PLAXIS, hebben vaak de mogelijkheid om dit te doen. Schematisering van de trillingsbron en parameterkeuze worden dan belangrijk.

Door Delft Cluster is onderzoek gedaan naar de betrouwbaarheid van de trillingsvoorspellingen. Daaruit kwam naar voren dat gemiddeld genomen de methoden een goede voorspelling geven, maar dat de spreiding groot is (De Wit et al. 2003).

Op deze problematiek zal hier niet verder worden ingegaan. Belangrijk is wel dat de trillingsamplitude afneemt naarmate men verder van de bron, in dit geval de damwandplank, komt. Hiervoor zijn twee redenen:

- de damwand is, op enige afstand, op te vatten als een lijnbron; aangezien het golffrontoppervlak toeneemt met toenemende afstand, neemt de energiedichtheid af en daarmee ook de trillingsamplitude (geometrische spreiding)
- door materiaaldemping wordt energie gedissipeerd, waardoor de amplitude eveneens afneemt

### Mechanisme verdichting

Bekend is dat door trillen zand verdicht kan worden. Maar hoe komt het dat zand bij een wisselende belasting zal verdichten? Formeler gesteld: hoe komt het dat een korrelskelet bij een wisselende belasting een dichtere pakking wil aannemen? Om hier inzicht in te krijgen, moet naar het gedrag van afzonderlijke korrels worden gekeken. Zand bestaat uit een zeer groot aantal korrels die op de één of andere manier op en tegen elkaar rusten. De meeste korrels zullen een stabiele ligging hebben. Er zullen ook korrels zijn die maar een klein zetje nodig hebben om ten

opzichte van hun burens te verschuiven. Bij losgepakt zand zullen dit er meer zijn dan bij vastgepakt zand. Bij een wisselende belasting wordt dit 'zetje' gegeven en kunnen de korrels iets ten opzichte van elkaar gaan verschuiven. De korrels zullen daarbij zoeken naar een stabielere stapeling dan waar ze eerst in zaten. Bij een groot aantal korrels zal de oude situatie stabielere zijn dan de situatie bij een kleine verschuiving. Bij de teruggaande beweging zullen ze naar hun oorspronkelijke positie terugkeren. Voor een aantal korrels zal de nieuwe situatie stabielere zijn dan de oude situatie. Deze zullen netto wel verschuiven. Hierdoor verandert er iets in het gehele spel van korrels en krachten. Een aantal korrels die eerst een stabiele ligging hadden, zullen nu minder stabiel zijn. Bij een volgende belasting zullen ze gaan verschuiven. In droog zand zal het totale volume daarbij iets willen toe- of afnemen. Het netto-effect is meestal dat de korrels een iets dichtere pakking aannemen. Dat het korrelskelet losser wordt onder een wisselende belasting wordt in laboratoriumproeven zelden, en alleen onder speciale belastingcondities, gevonden.

Het voorgaande beschrijft de situatie bij droog zand. In Nederland hebben we vaak te maken met verzadigd zand. Bij snelle belastingen zal het water in de poriën niet kunnen afstromen. Netto zal er dan geen volumeverandering kunnen optreden. Toch zal het korrelskelet willen verdichten. Dit vertaalt zich dan als een tijdelijke wateroverspanning. Het is deze wateroverspanning waardoor het in- en uittrillen van damwanden succesvol is. Echter als deze wateroverspanning wegstroomt, zal de zakkings zich alsnog manifesteren.

Het voorgaande geeft als belangrijkste grondparameters die de mate van verdichting bepalen:

- de (relatieve) dichtheid van de grond
- de belastingamplitude
- het aantal belastingwisselingen

Uit laboratoriumproeven blijkt ook dat er ook nog een wat ongreepbare factor is die in sterke mate de verdichting bepaalt. Deze parameter wordt vaak aangeduid met termen als 'structuur', 'geschiedeniseffect' of 'pre-shearing'. Hiermee wordt het verschijnsel aangeduid dat zand met dezelfde dichtheid onder dezelfde belasting een sterk afwijkend gedrag bij cyclische belasting vertoont. De wijze van afzetten bepaalt mede dit aspect. Ook eerdere wisselende belastingen van de grond kunnen invloed hebben. Oudere zanden zullen dit verschijnsel in sterkere mate vertonen dan ophoogzanden.

### Groote invloedszone

Als gesproken wordt over de invloedszone moet onderscheid worden gemaakt in twee soorten invloed. De eerste invloedszone is de zone waarin daadwerkelijk verdichting

zal optreden. Deze zone lijkt beperkt te zijn tot 1 à 5 m. Metingen in Den Haag en Alkmaar (Nijs 2003) toonden aan dat in een zone van 1 à 2 m de conusweerstand verandert. Sonderingen bij de praktijkproef combiwanden (Havinga, Visser 2001) gaven aan dat op 2 m afstand een duidelijke invloed van het trekken van de combiwanden aanwezig is. Op 5 m afstand veranderde de gemiddelde conusweerstand niet. Berekeningen met inmiddels opgestelde modellen geven een vergelijkbare invloedzone.

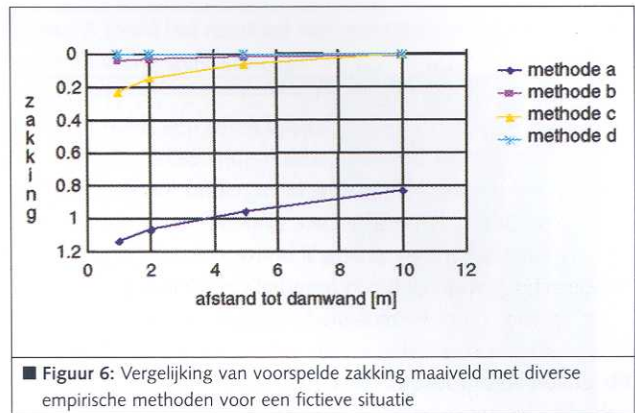
De zone waarin maaiveldzakkingen optreden is echter groter. Dit komt door spreiding van de verdichte zone naar boven. Voor de praktijk blijkt deze invloedzone vrij aardig te kunnen worden gekarakteriseerd door te stellen dat binnen een zone gelijk aan de helft van de damwandlengte significante zakkingen kunnen optreden. Dit komt ongeveer overeen met een actief glijvlak vanaf de punt van de damwand. Op een afstand van meer dan 1 maal de damwandlengte worden praktisch geen zakkingen meer gevonden. Een veilige benadering voor de invloedzone van zakkingen is 3 m + hoogteverschil tussen onderkant damwand en beschouwd object. Het beschouwde object kan zijn de staalfundering van een huis, de paalpunt van een naastgelegen gebouw, een riolering e.d.

Wateroverspanningen ontstaan in de zone waar verdichting optreedt. Door drainage zullen de wateroverspanningen afnemen. Door deze drainage zal ook buiten de verdichtingszone de waterspanning tijdelijk toenemen. Het is niet ongewoon dat in een zone van 10 m een tijdelijke toename van de waterspanning wordt gevonden. Binnen een smalle damwandkuip is de mogelijkheid om af te stromen beperkt en zal de wateroverspanning sterker kunnen oplopen dan buiten de kuip of bij een vrijstaande wand.

### Verskil tussen intrillen en uittrillen

Een regelmatig gestelde vraag is of er bij het uittrillen van damwanden meer zakking optreedt dan tijdens het intrillen. Dit hangt af van de situatie. Als de damwand alleen wordt ingetrild en vervolgens uitgetrild, is de verdichting bij het uittrillen waarschijnlijk beperkt. De meeste verdichting is dan al bij het intrillen opgetreden. Wel zal er nog enige extra zakking kunnen optreden doordat een staalvolume uit de grond wordt verwijderd.

In de meeste gevallen zal er aan één zijde van de damwand zijn ontgraven en daarna weer aangevuld. Aan de aangevulde zijde is in ieder geval maagdelijk zand aanwezig, wat nog een grote verdichting kan ondergaan. Bij het ontgraven zal de damwand enigszins vervormen. Ook de grond achter de damwand zal vervormen. Deze vervorming verandert de 'structuur' van de grond achter de damwand, waardoor deze verder kan verdichten. Bovendien betekent een vervormde wand meer slotwrijving en daarmee dus ook



■ Figuur 6: Vergelijking van voorspelde zakking maaiveld met diverse empirische methoden voor een fictieve situatie

een hoger trillingsniveau.

Het is nog niet mogelijk om deze hypothese numeriek te onderbouwen. Goed gedocumenteerde praktijkervaringen zijn schaars. Uit de wel beschikbare gegevens blijkt dat bij het uittrillen grotere zakkingen kunnen optreden dan bij het intrillen.

### Lopend onderzoek

Door diverse onderzoekers zijn modellen opgesteld om de verdichting bij het intrillen van damwanden te bepalen (Massarch 1992, Drabkin et al. 1996, Bement 1997, Hergarden 2001). De modellen zijn sterk empirisch en pragmatisch. De basis is meestal dat op de één of andere manier de trillingsamplitude moet worden bepaald (op welke wijze wordt vaak niet vermeld) en vervolgens via een eenvoudige relatie de volumerek. Niet verwonderlijk is dat de verschillende methoden ook sterk verschillende voorspellingen geven. In *figuur 6* is voor een fictieve situatie de berekende zakking volgens vier verschillende modellen weergegeven.

In Nederland zijn acceptabele ervaringen opgedaan met het model van Hergarden. Deze methode voorspelt de mate van verdichting op basis van de relatieve dichtheid van het zand en de versnellingsamplitude. Wel voorspelt deze methode tamelijk grote zakkingen bij het gebruik van een hoogfrequent trilblok.

Momenteel loopt er binnen Delft Cluster onderzoek om tot een betere voorspellingsmethode te komen. Een eerste versie van een model dat het hele proces, zoals hiervoor beschreven, modelleert is inmiddels opgesteld (Meijers, Van Tol 2004). Narekenen van een aantal situaties, waar redelijk bekend is hoeveel zakking is opgetreden, geeft bemoedigende resultaten. In de meeste gevallen betreft dit echter situaties waarbij schade is opgetreden. Veel relevante gegevens voor een volledige validatie ontbreken daarbij. Om het opgestelde model te valideren, zal in het najaar van 2004 een proef worden uitgevoerd om inzicht te krijgen in alle relevante deelprocessen. De resultaten van deze proef

kunnen worden gebruikt om het opgestelde aan te passen en daarmee de overeenstemming tussen theorie en praktijk verder te verbeteren.

### Conclusies

- vele parameters spelen een rol bij het proces van verdichting tijdens het in- en uittrillen van damwanden
- het gedrag van het korrel skelet onder wisselende belasting wordt bepaald door vele parameters, waarvan sommige moeilijk te kwantificeren zijn
- bestaande methoden om de zakking te voorspellen geven een grote spreiding in de resultaten
- er is een model opgesteld dat het totale proces beschrijft; voor validatie en verbetering van het model zal in 2004 een proef worden uitgevoerd

### Referenties

- [1] Bement, R.A.P., Selby, A.R., (1997) *Compaction of granular soils by uniform vibration equivalent to vibrodriving of piles* Geotechnical and Geological Engineering, 15, 1997, pagina 121-143
- [2] CUR (1997) *Handboek damwandconstructies* CUR publicatie 166, Gouda 1997
- [3] Drabkin, S., Lacy, H., Kim, D.S., (1996) *Estimating settlement of sand caused by construction vibration*. Journal of Geotechnical Engineering, November 1996

- [4] Havinga, H.R., Visser, H.J., (2001) *Trekken van lange combiwanden* Land+Water, nummer 1/2, 2001
- [5] Hergarden, R.H., Tol, A.F. van (2001) *Zakkingen tijdens het trillend trekken van damwanden*. Geotechniek, juli 2001, pagina 84 - 90
- [6] Massarch, K.R. (1992) *Static and dynamic soil displacements caused by pile driving*. Proceedings 4th Int. Conference Application of Stress-wave Theory to Piles, Den Haag 1992
- [7] Meijers, P., Tol, A.F. van (2004) *Densification of sand caused by vibratory sheetpiling* In Th. Triantafyllidis (ed.), *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*, Proceedings CBS04, Bochum 2004, pagina 523-532
- [8] Nijs, R.E.P. de (2003) *Het trillen van damwanden in granulaire bodem* Geotechniek, oktober 2003, pagina 56-64
- [9] Viking, K. (2002) *Vibro-driveability, a field study of vibratory driven sheet piles in non-cohesive soils*. Dissertatie Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm mei 2002
- [10] Wit, M.S. de, Waarts, P.H., Hölscher, P., Stuit, H.G. (2003) *Reliability of vibration predictions in civil engineering applications* Proceedings European Safety and Reliability Conference, ESREL 2003, Maastricht, juni 2003