

Beoordeling voorspelde trillingen bij intrillen damwanden

dr. ir. Paul Hölcher
Deltares



ing. Peter Kraaijenbrink
Deltares



Inleiding

Bij het installeren van funderingselementen wordt vaak geheid of getrild. Dit is een efficiënte en betrouwbare installatiemethode, maar veroorzaakt wel trillingen in de omgeving, die schade kunnen veroorzaken aan de belendingen. Dat is onwenselijk.

Om de risico's van dergelijke trillingen in te schatten wordt voorafgaand aan de uitvoering een prognose voor het verwachte trillingsniveau gemaakt en worden tijdens de uitvoering continu de trillingen gemeten. Bouwkundige opnames voorafgaand aan en na de werkzaamheden zijn noodzakelijk om na te gaan of de schade werkelijk door trillingen veroorzaakt is.

Hoe goed zijn de prognoses voorafgaand aan de werkzaamheden eigenlijk? Hoe worden de uitkomsten van een prognose beoordeeld in relatie tot de SBR-richtlijn 'Trillingen' [SBR, 2003]? Wat is de relatie tussen trillingen en het ontstaan van

schade? Wanneer zijn (meestal duurdere) trillingsarme inbrengsystemen noodzakelijk? Dit artikel geeft een nieuwe strategie voor deze problematiek.

Verskil tussen meten en rekenen

Het verschil in onzekerheid tussen een meting en een berekening kan aanzienlijk zijn. Een continue meting aan een gebouw bevat met zekerheid de hoogste trilling, waarbij de enige onzekerheid is of de opnemer wel op de locatie met de hoogste trilling gezeten heeft. Bij een berekende trillingssterkte is de onzekerheid groter. Onderzoek in het kader van Delft Cluster [Hölcher, Waarts, 2003] geeft aan dat de betrouwbaarheid van de beschikbare modellen beperkt is en dat daar terdege rekening mee gehouden moet worden.

De SBR-richtlijn is een meet- en beoordelingsrichtlijn. Deze geeft aan hoe een meting beoordeeld moet worden. Er worden toelaatbare trillingsniveaus geven, waarbij de kans op schade 1 %

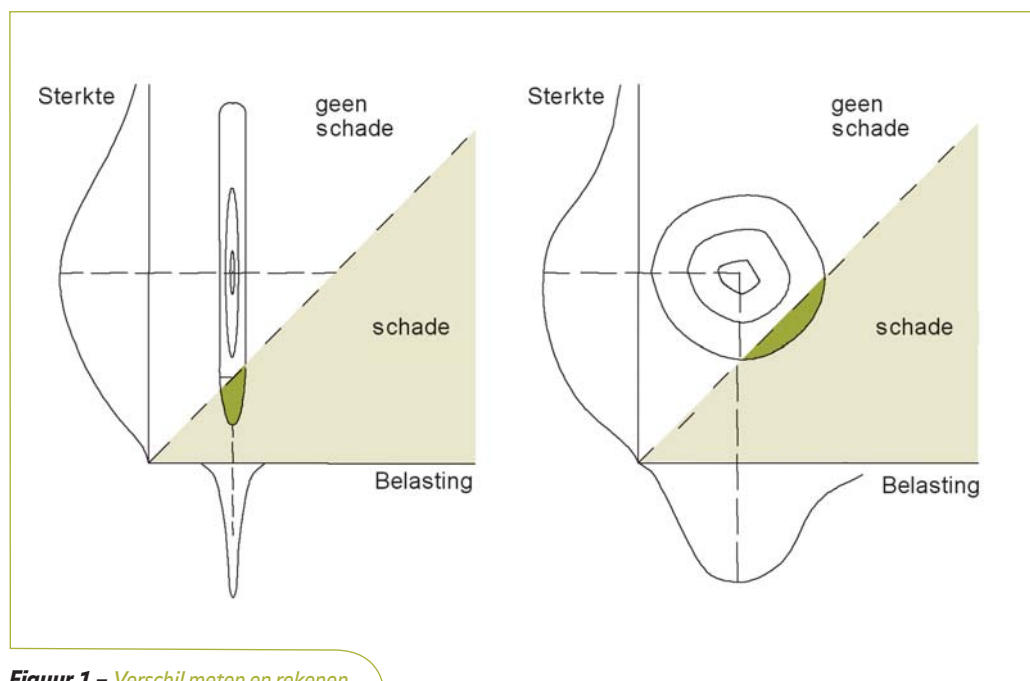
bedraagt. Wat daarbij onder 'schade' verstaan wordt geeft de richtlijn niet aan. De richtlijn kan niet zondermeer toegepast worden op een berekende waarde. Om het verschil tussen de situatie bij een meting en een berekening te begrijpen, wordt nu een probabilistische beschouwing gegeven.

Schade treedt op als de spanningen in de constructie door de trilling groter zijn dan de sterkte van de constructie.

- Bij een meting is de sterkte van het gebouw op te vatten als een stochast; het is immers niet goed bekend hoe sterk het betreffende gebouw precies is, wat de relatie tussen de trillingsbelasting en de door de trilling veroorzaakte spanning in het materiaal is, terwijl mogelijk aanwezige spanningen (door bv. zettingen, temperatuur en belastingsafdracht) ook een rol spelen. De maximale trillingsbelasting is echter goed bekend, deze wordt immers door een meting nauwkeurig vastgesteld. Dan is de 1% ondergrens van de sterkte de waarde waarbij de kans op schade 1% is.
- Bij een berekening zijn zowel de sterkte (van het gebouw) als de belasting (trillingssterkte) een stochast: het gemiddelde is bekend, maar er is een relatief grote spreiding. Dit heeft tot gevolg dat de 1% kans op schade bij een veel hogere trillingsbelasting optreedt dan de 1% ondergrens van de bouwsterkte.

Figuur 1 geeft voor beide situaties een prinsipschets van de kansverdelingen.

Voor twee realistische kansverdelingen voor de sterkte van een gebouw en de prognose van de trillingsbelasting kan uitgerekend worden dat indien, zoals in het meest recente vijfde druk CUR Handboek, CUR [2008] gesuggereerd wordt, de 1% bovengrens van de trillingsprognose voldoet aan de 1% ondergrens van de sterkte, de werkelijke faalkans ongeveer 0.1% is. Dat is tien keer zo klein als de aanvaardbaar geachte 1%. Het is duidelijk dat de grenswaarde uit de SBR-richtlijn niet zomaar toegepast kan worden op een dergelijke



Figuur 1 - Verschil meten en rekenen.

Samenvatting

In het handboek damwanden CUR 166 is een model uitgewerkt, waarmee het trillingsniveau in de omgeving bij het installeren van damwanden berekend kan worden. Ook wordt aangegeven hoe dit trillingsniveau, conform de SBR-richtlijn 'Trillingen', beoordeeld kan worden uit het oogpunt van mogelijke schade in

de omgeving. Het resultaat wordt door velen als conservatief ervaren. Dit artikel geeft aan waarom dat gevoel terecht is en doet een voorstel voor een toekomstige, mogelijk realistischere aanpak op basis van het 'DeltaBrain Bouwtrillingen'. Dit model bevindt zich nog in de ontwikkelingsfase.

prognose conform de vijfde druk CUR Handboek [2008]. Met andere woorden, om een prognose te beoordelen conform de SBR-richtlijn is een grenswaarde nodig die past bij de betrouwbaarheid van het gebruikte prognosemodel. Overigens, in de oudere derde druk van het CUR Handboek [1997] is het wel mogelijk een andere betrouwbaarheidsindex te kiezen, maar daarbij wordt niet aangegeven welke grens dan gebruikt moet worden.

Betrouwbaarheid van de prognoses

Algemeen

De betrouwbaarheid van de prognoses is bij trillingsproblemen niet zo groot. In het Delft Cluster project 'Betrouwbare trillingsprognoses' is de betrouwbaarheid van verschillende prognosemodellen bekeken [Hölscher, Waarts, 2003].

De betrouwbaarheid van een model is op te splitsen in twee componenten:

1. de zuiverheid van een model: het antwoord van het model geeft een correct gemiddelde (Engels: de bias)
2. de spreiding in het model: de karakteristieke bovengrens van de modeluitkomsten ligt dicht bij het gemiddelde of juist ver weg.

[Hölscher, Waarts, 2003] hebben drie modellen geëvalueerd:

- experts, een aantal deskundigen die een schatting van het trillingsniveau maken, op basis van een beperkte hoeveelheid informatie;
- empirische model D11, een semi-empirisch model dat in het kader van COB- onderzoek ontwikkeld is;
- eindige elementen methode.

Het model van het CUR Handboek derde druk [1997] is in deze studie niet meegenomen.

Voor elk model zijn een aantal situaties beoordeeld. Deze situaties zijn geselecteerd uit beschikbare metingen die voor deze beoordeling voldoende gedocumenteerd waren. Van elke situatie waren dus meetresultaten beschikbaar, maar deze waren niet bekend bij de persoon die de prognose uitvoerde. Door voor verschillende situaties de be-

rekenende waarde te vergelijken met de gemeten waarde, kan de betrouwbaarheid van elk model bepaald worden.

De resultaten van de evaluatie zijn weergegeven in tabel 1. Het getal in de kolom zuiverheid geeft aan met welk getal de prognose vermenigvuldigd moet worden zodat het gemiddelde van de prognoses gelijk is aan het gemiddelde van de metingen. Het getal in de kolom spreiding geeft aan met welk getal de prognose vermenigvuldigd moet worden om de 95% bovengrens van de metingen te vinden (de waarde die in 5 % van de gevallen overschreden wordt).

Tabel 1 Betrouwbaarheid van verschillende modellen [de Wit, Galanti, 2003]

| Model | Zuiverheid van het model | Spreiding in het model |
|-------------------|--------------------------|------------------------|
| Expert | 0.6 (model overschat) | 18 |
| D11 | 0.25 (model overschat) | 20 |
| Eindige elementen | 1.3 (model onderschat) | 10 |

Hoe het model met metingen te verbeteren?

Er zijn in beginsel twee methoden om het model te verbeteren.

- De eerste methode is een heel uitgebreide meting van de trillingsbelasting tijdens een proefproject. Deze aanpak eist een groot aantal opnemers en een behoorlijke investering. Deze aanpak is met name geschikt om de invloed van variabelen in een prognosemodel te toetsen: bijvoorbeeld de invloed van de afstand op het trillingsniveau in de omgeving.
- De tweede methode is het verwerken van trillingsmetingen, die vrijwel standaard bij dit type werkzaamheden in de praktijk uitgevoerd worden. Hier is de investering beperkter, alleen de resultaten moeten systematisch in de database gevoerd worden, samen met de benodigde meta-informatie. Meta-informatie is de parameter-informatie die de case beschrijft: bijvoorbeeld het type trillblok, de planklengte, de sondering, de afstand tot het pand. Naast de meta-informatie is natuurlijk ook het resultaat opgenomen: bijvoorbeeld het trillingsniveau en

de opgetreden schade. Voor deze aanpak is in het COB/Delft Cluster project 'de betrouwbare trillingsmaatregel' een interactieve database ontwikkeld: DeltaBrain (zie www.Deltabrain.nl/bouwen/bouwtrilling).

In deze paragraaf worden de mogelijkheden van beide methoden kort besproken.

In de literatuur wordt meestal het type metingen volgens de eerste aanpak besproken. Voorbeelden zijn onder andere [Meijers, 2007; Dekker, Heijmans et al, 1999]. Deze aanpak is geschikt om de afhankelijkheid van de trillingsbelasting met een variabele (bv. de afstand) te beoordelen. Het opvallende in deze metingen is dat vaak de afname van de trillingsbelasting met de afstand aanzienlijk sterker is dan in het CUR handboek aangenomen wordt. Voor de afname van de trillingsbelasting met de afstand bleek voor een aantal praktijkcases de functie 1/afstand beter dan de 1/wortel(afstand), die in het handboek zonder materiaaldemping gebruikt wordt. Mogelijk geeft echter ook een aanpak met een sterkere afname op korte afstand en een 1/afstand met het in rekening brengen van gronddeemping op grotere afstand een hogere betrouwbaarheid. Dit zal nader onderzocht moeten worden. Verder valt op in dergelijke metingen dat op één locatie al een behoorlijke spreiding (orde $\pm 30\%$) optreedt tussen de maximale trillingsbelasting bij verschillende elementen op gelijke afstand.

De tweede aanpak waarbij veel metingen in een database geplaatst worden is minder vaak gevonden. [Fugro, 1996] en [Muller, 2007] zijn hiervan twee voorbeelden. Deze aanpak is bij uitstek geschikt om de invloed van de parameters te bepalen (bloktype, lengte element, verschillen tussen heien en trillen etc.). Bij deze aanpak is de informatie per case in het algemeen beperkt. In een database is bijvoorbeeld alleen het hoogste waargenomen trillingsniveau en de kortste afstand tussen het meetpunt en de betreffende groep van elementen bekend, terwijl onbekend is of bij dat element ook daadwerkelijk de hoogste trillingsbelasting opgetreden is. Ook kan in een database worden opgenomen of er schade is opgetreden en waaruit die bestaan heeft. Zoals

gemeld is de DeltaBrain Bouwtrillingen gebaseerd op deze aanpak.

De aanpak via een database is noodzakelijk om de betrouwbaarheid van een prognose model te beoordelen. Deze volgt immers uit het vergelijken van een aantal prognoses met de werkelijk gemeten trillingsbelasting en opgetreden schades.

Wat is schade?

De SBR-richtlijn stelt dat de kans op schade bij overschrijden ongeveer 1% is. Het is helaas niet goed gedocumenteerd, waarop dit gebaseerd is. Bovendien geeft de SBR-richtlijn niet aan wat onder schade verstaan wordt. In het algemeen is de draagconstructie sterker dan de overige onderdelen van een gebouw, en is het redelijk te verwachten dat bij toenemende trillingsbelasting niet alleen de kans op schade, maar ook de ernst van de schade toeneemt. Anderzijds, het is billijk om te eisen dat de kans op een grote schade kleiner is dan de kans op een kleine schade. De kans op een architectonische schade mag dus groter zijn dan de kans op een constructieve schade.

Probabilistische analyse voor het intrillen van damwanden bij de dijkversterking Nederlek (Krimpenerwaard, circa 300 belendingen) heeft geleid tot een tabel, met schattingen van kansen en typen schade voor belendingen. Zie tabel 2. De onderliggende kansverdelingen zijn globaal geschat op basis van beschikbare literatuurgegevens en engineering judgment. De aangegeven kansen zijn voorzichtige schattingen, bedoeld voor toepassing in het adviesproject.

Een dergelijke tabel biedt de mogelijkheid om de werkzaamheden meer risico gestuurd uit te voeren.

Het is wenselijk dergelijke tabellen in de toekomst uit te breiden en te verbeteren, de vraag daarbij is hoe deze benodigde verbetering het beste is te realiseren. Uitsluitend theoretisch onderzoek lijkt daarbij niet de aangewezen weg: het optreden van schade is afhankelijk van veel factoren, waaronder de staat van de bebouwing en de aanwezige spanningen in de bebouwing. Om een schade-classificatiesysteem voor trillingsschade verder te ontwikkelen dient empirisch en theoretisch onderzoek te worden gecombineerd.

Het opbouwen van een database, Deltabrain Bouwtrillingen, waarin naast de gemeten trillingen ook de geconstateerde schades opgenomen zijn, vormt een basis om in ieder geval de empirische data over trillingsschades te structureren. In combinatie met de verbetering van schadeprognosemodellen voor belendende panden kan een breed toepasbaar schade-classificatiesysteem voor trillingsschade verder ontwikkeld worden.

Specifieke uitwerking voor damwanden

Model keuze

In het kader van de dijkversterking Nederlek zijn over circa 4 km lengte damwanden vlakbij bestaande bebouwing geplaatst. Gezien het aantal woningen (circa 300) was het zinvol het probleem nauwkeurig te beoordelen en, mede vanuit het oogpunt van schade, vooraf te bepalen of heien of trillen mogelijk zou zijn.

Op basis van de ervaringen in het Delft Cluster project is gekozen voor het empirische model uit de derde druk van het CUR-handboek damwanden [1997]. Dit type model heeft een redelijke betrouwbaarheid in relatie tot de complexiteit van de uitwerking. Daarbij is, voor zover mogelijk, de nauwkeurigheid van de prognose verbeterd door

het model, op basis van beschikbare metingen, te kalibreren voor de specifieke situatie van een trillingsbron in een dijk op slappe bodem.

In dit artikel wordt gebruik gemaakt van de berekening op basis van CUR derde druk. In de vierde druk is een praktische aanpassing doorgevoerd die niet correct is. De vijfde druk is in dit aspect identiek aan de vierde druk. In de derde druk wordt eerst de gemiddelde waarde en vervolgens met een coëfficiënt de bovengrens bepaald. In de vierde druk zijn deze twee stappen samengevoegd: er wordt direct een bovengrens berekend, die vergeleken mag worden met de grenswaarde van de SBR. Zoals in dit artikel al getoond is, is deze aanpassing onjuist.

Daarbij is in de uitwerking in de vierde druk een fout gemaakt bij de omrekening van de referentiesnelheid (= de trillingssnelheid op 5 m vanaf de paal). Deze wordt berekend met de volgende formule:

$$v_{ref} = v_o + 0.002 * (F_{slag} - 350)$$

waarin:

v_o referentie trillingssnelheid op 5 m afstand
 F_{slag} slagkracht van het gebruikte trilblok.

Bij de overgang van de derde naar de vierde druk is de waarde voor v_o wel naar de bovengrens gecorrigeerd, maar de coëfficiënt voor slagkracht niet. In de derde druk is de invloed van de slagkracht aanzienlijk, in de vierde druk is deze daarentegen vrijwel verwaarloosbaar. De prognoses met de vierde druk komen daardoor onbedoeld (aanzienlijk) lager uit. De derde druk lijkt in dit opzicht consistentere dan de vierde en vijfde druk.

Bepaling betrouwbaarheid

Figuur 2 geeft de resultaten van 152 metingen bij de dijkversterking Nederlek, die zijn opgenomen in de database DeltaBrain Bouwtrillingen. Verder is in de figuur weergegeven:

- het gemiddelde van het model uit de CUR 166 (enigszins vereenvoudigd);
- de 95% bovengrens op basis van het CUR 166 model;
- het gemiddelde van het aangepaste model met een 1/afstand benadering;
- de 95% bovengrens van het aangepaste model.

De gemiddelde lijnen hebben open symbolen en de 95% bovengrenslijnen hebben gevulde symbolen.

De figuur leidt tot de volgende conclusies:

- Het CUR model is onzuiver, het gemiddelde van model overschat het gemiddelde van de meting met ruim een factor 2.
- De geschatte spreiding in het CUR model is bruikbaar. De 95% bovengrens is een factor 6 boven het gemiddelde, wat redelijk aansluit bij de spreiding in de metingen.

Tabel 2 – Schadeklassen

| Schade-klasse | Omschrijving | Grenswaarde trillingssnelheid bouwwerk categorie 2 (SBR) [mm/s] | Grenswaarde trillingssnelheid bouwwerk categorie 3 (SBR) [mm/s] | Globale schadekans (afhankelijk van trilfrequentie) [%] |
|---------------|--|---|---|---|
| A | voldoet ruim aan SBR | < 4,8 | < 2,6 | < 1 |
| B | voldoet net niet aan SBR | 4,8 - 6,0 | 2,6 - 3,3 | ca. 1 à 2 |
| C | kans op architectonische schade (zeer lichte schade) | 6,0 - 7,6 | 3,3 - 4,2 | 2 - 6 |
| D | grote kans op architectonische schade (lichte tot matige schade, begin constructieve schade) | 7,6 - 10,0 | 4,2 - 5,5 | 6 - 10 |
| E | grote kans op constructieve schade | ≥ 10,0 | ≥ 5,5 | ≥ 10 |

- In het gebied tussen 5 en 10 m loopt de curve van het CUR 166 model erg vlak. Dit suggereert dat de invloed van de afstand niet correct in het model verdisconteerd is.
- Het prognosemodel dat gebruikt maakt van de $1/\text{afstand}$ curve past beter bij deze data.

De resultaten geven aan dat er verbetering mogelijk lijkt. Om het gemiddelde te verbeteren lijkt de afstandinvloed een kansrijke optie. Gedacht kan worden aan het gebruiken van een $1/\text{afstand}$ functie of het toepassen van materiaal-demping in de modelcurve van CUR 166.

In vergelijking met de andere modellen die in het Delft Cluster onderzoek [Hölscher, Waarts, 2003] getest zijn, is de spreiding in het model niet slecht. Om minder spreiding te krijgen moet nagegaan worden welke parameters nog significante invloed hebben. De eerste evaluatie waarbij gezocht is naar een maatgevende extra parameter (bv damwandlengte, trilblok, ondergrond), gaf aan dat de eigenschappen van de bodem de meest waarschijnlijke kandidaat is. Het probleem is echter dat de bodem gekarakteriseerd wordt door de sondering of gelaagdheid en juist deze informatie is niet eenvoudig met een enkel getal te beschrijven. De oplossing van dit probleem vraagt relatief veel empirische gegevens.

Conclusie

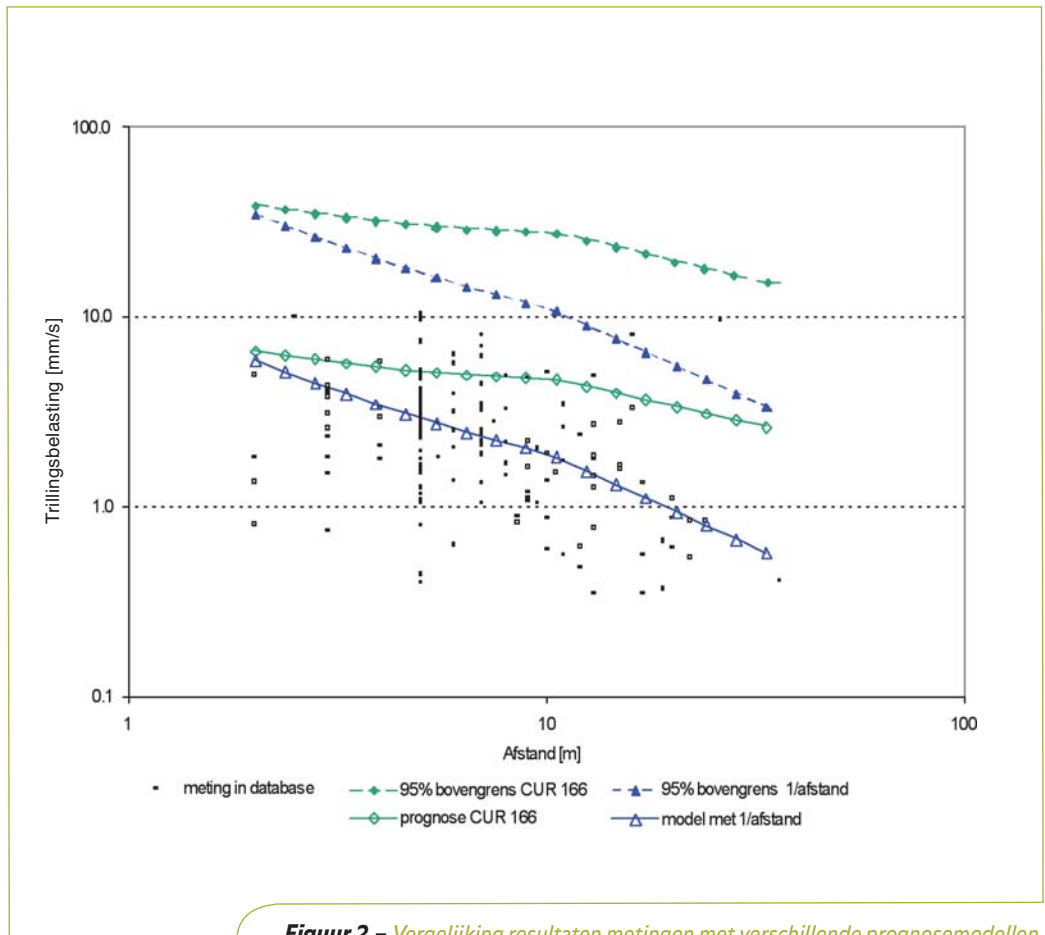
Om berekende trillingen te beoordelen aan de hand van de grenswaarden uit de SBR-richtlijn trillingen moet een aangepaste grenswaarde gebruikt worden of een juiste keuze van de overschrijdingskans. De mate van aanpassing hangt af van de betrouwbaarheid van het model.

Bij een volgende herziening van de SBR-richtlijn moet meer aandacht besteed worden aan de achtergrond van de grenswaarden en de verschillende typen schade.

Als de DeltaBrain Bouwtrillingen voldoende gevuld is, bevat het waardevolle data, die essentieel zijn om een prognosemodel te valideren, de grenswaarden in de richtlijn te actualiseren en een risicogestuurde aanpak voor de beheersing van trillingen tijdens het installeren van funderingselementen te ontwikkelen. Deze ontwikkeling loopt, maar de voortgang is sterk afhankelijk van de snelheid van vullen.

Door aanvulling van deze database met meer praktijkmetingen en ervaringsgegevens, is aanscherping van het voorspellingsmodel en een meer realistische schadeverwachting vooraf in de toekomst mogelijk.

Voor de prognose van de trillingen kan beter



Figuur 2 - Vergelijking resultaten metingen met verschillende prognosemodellen.

de derde druk van het CUR Handboek [1997] gebruikt worden en niet de vierde of de vijfde druk [2008].

Dankwoord

De werkzaamheden voor de dijkversterking Nederlek zijn uitgevoerd in opdracht van het Hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard. Tevens willen de auteurs Dr. Holger Netzel van CRUX Engineering B.V. bedanken voor de waardevolle discussie n.a.v. een concept versie van dit artikel.

Referenties

- CUR, 1997, *Handboek damwandconstructies*, derde druk, CUR, Gouda, 1997.
- CUR, 2008, *Handboek damwandconstructies*, vijfde druk, CUR, Gouda, 2008.
- de Wit, MS, Galanti, F.M.B., *Reliability of vibration predictions; Synthesis of predictions and measurements*, Research report Delft Cluster project 01.05.02, download: www.library.tudelft.nl/ (bezocht februari 2012).
- Dekker, H.R., Heijmans, H.W., Hoefsloot, F.J., *Geslaagde damwandproef in Limburg*, *Geotechniek*, nr. 3, april 1999, pp.12-19.
- Fugro, 1996, *Het heiproces als trillingsbron*,

deelrapport II uitbreiding bronmodel, Fugro rapport voor CUR/COB/L400, nummer M-0419B, 1996.

– Hölscher, P., Waarts, P.H., 2003, *Reliability of vibration predictions and reducing measures*.

Final report on the project. Delft Cluster project 01.05.02, download: <http://www.library.tudelft.nl/> (bezocht september 2011).

– Meijers, P., *Settlement during vibratory sheet pile driving*, Proefschrift TUDelft, 2007, download: www.library.tudelft.nl/collecties/delftse-publicaties/tu-delft-repository.

– Muller, T.K., *Meten, beoordelen en voorspellen van trillingen in de bouw*, *Geotechniek* nr. 4, september 2007, download: www.vakbladgeotechniek.nl.

– Meet- en beoordelingsrichtlijn voor trillingen deel A, SBR, Rotterdam, 2003. ●