

TRILLINGEN DOOR TBM EN DOOR GEBRUIK

Coenraad Esveld

Hoogleraar Railbouwkunde, TU Delft
Voorzitter CUR/COB L400

1. ACHTERGRONDEN L400 ONDERZOEK

1.1 Voorgeschiedenis

Recent onderzoek in Nederland wijst uit dat ca. 10% van de bevolking hinder ondervindt van trillingen bij verblijf in gebouwen ten gevolge van menselijke activiteiten in de naaste omgeving. Om meer inzicht in de problematiek te verkrijgen is enige jaren geleden door CUR en Stichting Bouw Research (SBR) een onderzoek gestart naar het verschijnsel trillingen. Na een verkennende studie bleek er behoefte te bestaan aan richtlijnen voor toelaatbare trillingsniveaus. Dit is door SBR opgepakt en heeft geresulteerd in een drietal richtlijnen die in 1993 zijn verschenen. Deze zijn:

- meet- en beoordelingsrichtlijnen van schade aan bouwwerken door trillingen;
- hinder van personen in gebouwen door trillingen;
- storing aan apparaten door trillingen.

Tevens bleek dat er onvoldoende kennis bestond op het gebied van voorspellen van trillingen. Dit onderwerp werd door de CUR opgepakt door het installeren van de CUR-commissie D11 "Trillingshinder in bebouwde omgeving". De taak van deze commissie was het ontwikkelen van een modulair opgebouwd rekenmodel ter voorspelling van trillingen in de bebouwde omgeving en het geschikt maken van het model voor praktisch gebruik. Deze studie heeft geresulteerd in een computerprogramma dat beschreven is in CUR-rapport 95-2 "Prognosemodel Trillingshinder" van februari 1995.

1.2 Het L400 project

De D11 studie vormde de basis voor het prognosemodel L400 dat door uitbreiding en verbetering moest leiden tot een, voor praktisch gebruik, geschikt programma. Aansluiting werd gevonden bij COB omdat zowel het transmissiemodul "bodem" als de bronnen "boren van tunnels" en "trein in tunnel" voor beide partijen van groot belang werden geacht.

De algemene doelstelling van het onderzoek kan als volgt worden samengevat: het tot stand brengen van een gevalideerd prognosemodel waarmee trillingseffecten kunnen worden voorspeld en beoordeeld en het effect van trillingsreducerende maatregelen kan worden berekend. Samenvattend is het totale onderzoek verdeeld in vier fasen:

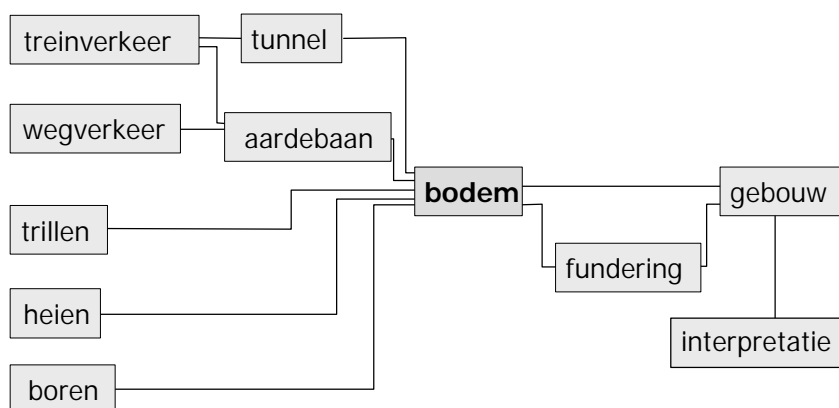
De algemene doelstelling van het onderzoek kan als volgt worden samengevat: het tot stand brengen van een gevalideerd prognosemodel waarmee trillingseffecten kunnen worden voorspeld en beoordeeld en het effect van trillingsreducerende maatregelen kan worden berekend. Samenvattend is het totale onderzoek verdeeld in vier fasen:

- fase I
Opstellen van een modulair computermodel, zijnde het product van Commissie D11;
- fase II
Simulatiemodel trillingshinder en validatie- en verificatieonderzoek, zijnde het onderwerp van de huidige commissie L400
- fase III
Gebruikersvriendelijk predictiemodel voor trillingshinder
- fase IV
Uitvoering businessplan om predictiemodel te onderhouden

1.3 Modulair systeem

Het prognosemodel is modulair opgebouwd en bestaat uit de volgende onderdelen (zie ook figuur 1):

- **Bronmodules voor:**
wegverkeer, spoorwegverkeer, heien, trillen van funderingspalen en damwandelementen, boren van tunnels;
- **Overdracht van:**
aardebaan en tunnel naar omgeving en van bodem naar fundering;



Figuur 1 Structuur L400 prognosemodel

- **Bodemmodule voor:**
gelaagde bodem;
- **Gebouwenmoduul voor:**
gebouwen gefundeerd op staal en op palen.
- **Meetmoduul voor:**
de statistische verwerking van meetgegevens uit de praktijk.

Bij de ontwikkeling van het prognosemodel L 400 zijn de volgende partijen betrokken:

- TU Delft
- Gemeentewerken Rotterdam
- Nederlandse Spoorwegen
- Prepal
- Bouwdienst Rijkswaterstaat
- Hollandse Beton- en Waterbouw
- Ballast Nedam Beton- en Waterbouw
- Grondmechanica Delft
- DHV
- TNO Bouw
- TEC/Fugro Ingenieursbureau BV

2. L400 PROGNOSEMODEL

Het prognosemodel vormt de kern van het onderzoek van CUR/COB-project L400. Omdat het doel van L400 het ontwikkelen van een systeem is dat op een Personal Computer kan werken, en dat met een beperkte rekentijd een probleem kan oplossen, wordt in het project de toevlucht genomen tot een macro-elementen beschrijving. Dit houdt in dat het complexe gedrag van een constructie zeer beknopt wordt beschreven door het indikken van alle vrijheidsgraden waar de eindige elementenmethode normaal gesproken mee rekent tot een beperkte aantal karakteristieke vrijheidsgraden. In de filosofie van de macro-elementen wordt het trillingsprobleem geschematiseerd tot in essentie drie onderdelen:

- bron;
- transmissiemedium;
- ontvanger.

2.1 Bron

Bij de bron is het zaak op een voldoende realistische wijze de eigenschappen van de trillingsbron te beschrijven. In L400 wordt een aantal uiteenlopende trillingsbronnen gemodelleerd, zoals:

- hei- en trilwerkzaamheden;
- wegverkeer;
- railverkeer;
- boren van een tunnel.

De trillingsbronnen kunnen worden beschreven door een dynamische belasting als functie van de tijd of door een krachtspectrum. Beide opties zijn mogelijk. Het zal duidelijk zijn dat ook het ruimtelijk karakter van een bron moet worden meegenomen: dat is bij een trein wezenlijk anders dan bij een heiwerk.

2.2 Transmissiemedium

Het transmissiemedium kan worden gevormd door een aaneenschakeling van deel-transmissiemodulen. Dit kan zijn:

- een tunnel of een aardebaan;
- de bodem
- een paalfundering;
- een gebouw.



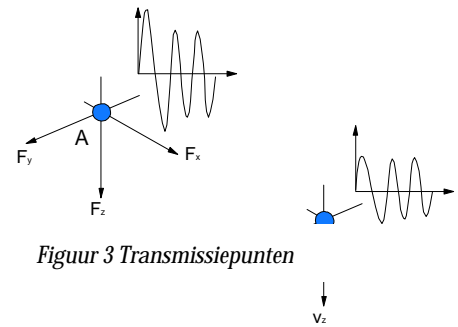
Figuur 2 Trillingsprognosemodel

Hier is het van belang de trillingstransmissiekenmerken van de modulen goed te beschrijven. In de filosofie van de macro-elementenmethode wordt een transmissiemoduul geschematiseerd tot een systeem met input- en outputvrijheidsgraden.

De beschrijving van de karakteristieken van het systeem gebeurt in de vorm van een impedantiematrix, waarmee een relatie kan worden gelegd tussen de dynamische belasting en de responsie in de vrijheidsgraden van het systeem (zie figuur 2).

Omdat het hier trillingen betreft is de impedantiematrix een vertaling van de massa-, dempings- en stijfheidseigenschappen van een systeem. De responsie wordt beschreven in termen van trillingsnelheid. In de eenvoudigste representatie wordt een transmissiemodule beschreven door een matrix:

$$\begin{bmatrix} F_a \\ F_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} \\ Z_{ba} & Z_{bb} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix}$$



Hierin is dan a het punt waarin de belasting op het transmissiemodule aangrijpt en b het punt aan de ontvangerzijde van het module. F is een kracht, Z is de impedantiematrix en v is de trillingsnelheid (zie figuur 3).

$$\text{Elk element } F_a^T = [F_{ax}, F_{ay}, F_{az}], Z_{aa} = \begin{bmatrix} Z_{ax,ax} & Z_{ax,ay} & Z_{ax,az} \\ Z_{ay,ax} & Z_{ay,ay} & Z_{ay,az} \\ Z_{az,ax} & Z_{az,ay} & Z_{az,az} \end{bmatrix}, v_a^T = [v_{ax}, v_{ay}, v_{az}]$$

Hetzelfde geldt voor de elementen F_b , Z_{ab} , Z_{bb} , Z_{ba} , en v_b .

Een transmissiemodule kan meerdere vrijheidsgraden a of b hebben, maar wel zeer beperkt. Bij gegeven F_a en F_b , volgend uit de beschrijving van de trillingsbron, kunnen v_a en v_b worden opgelost. Net als bij de elementenmethode kunnen bij deze aanpak meerdere macro-elementen (transmissie-modules) aan elkaar geschakeld worden, zoals bijvoorbeeld bij een bodem en een fundering. Stel de overdracht tussen een punt b en een punt c is beschreven door:

$$\begin{bmatrix} F_b \\ F_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Als voorbeeld wordt de impedantiematrix opgesteld tussen een punt a en een punt c via een gecombineerd stelsel van impedantiematrices tussen punten a en b en punten b en c.

$$\begin{bmatrix} F_a^1 \\ F_b^1 + F_b^2 \\ F_c^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa}^1 & Z_{ab}^1 & \\ Z_{ba}^1 & Z_{bb}^1 + Z_{bb}^2 & Z_{bc}^2 \\ & Z_{cb}^2 & Z_{cc}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Hierin refereert de index 1 naar de overdracht tussen punt a en punt b, en de index 2 naar de overdracht tussen punt b en punt c. Daar de krachtsvector bekend is (bijvoorbeeld: F_a^1 is de belasting, $F_b^1 + F_b^2 = 0$, $F_c^2 = 0$) kan dus de snelheidsvector uit dit stelsel worden opgelost.

Het naar believen aan elkaar kunnen schakelen van macro-elementen maakt het prognosemodel modulair.

Intern wordt in het frequentiedomein gerekend. Het frequentiebereik gaat tot 100 Hz, waarmee praktisch alle trillingsbronnen in de civiele techniek kunnen worden afgedekt. De beschrijving in het frequentiedomein betekent dat dynamische belastingen die als functie van de tijd worden gegenereerd, eerst worden Fouriergetransformeerd. De resultaten van de berekening (v_a , v_b en v_c) komen per frequentie beschikbaar en worden vervolgens teruggetransformeerd voor verdere interpretatie als functie van de tijd.

2.3 Ontvanger

De ontvanger van trillingen is doorgaans een onderdeel van een gebouw, een persoon in een gebouw, of een punt op het maaiveld. De trillingen die daar berekend worden, kunnen getoetst worden aan normen of richtlijnen, zoals de SBR-Richtlijn 1 (voor trillingschade) en SBR-Richtlijn 2 (voor trillingshinder).

De sluitsteen van de berekening wordt gevormd door een rekenroutine, die uit de spectra weer tijdfuncties van trillingen genereert en zo direct de gevraagde beoordeling kan uitvoeren. Dit is inclusief de weging van trillingen, zoals voor de beoordeling van hinder volgens SBR-Richtlijn 2 moet gebeuren.

Het simulatiemodel bevat tenslotte een module, waarmee de onzekerheid in de uitkomst van de berekening kan worden bepaald op basis van per onderdeel (bron- en transmissiemodules) opgegeven onzekerheden. Het is ook mogelijk direct meetresultaten (bijvoorbeeld uit trillingsmetingen) in het simulatiemodel in te voeren.

De hierboven geschetste structuur leidt tot een open simulatiemodel dat op een PC moet kunnen functioneren. In dit model kan een gebruiker naar believen ingrijpen en eigen bronnen, transmissiemodules e.d. invoeren. De verschillende modules communiceren via data-files. De open structuur van het model betekent anderzijds wel dat strikt de hand gehouden moet worden aan voorgeschreven file-formats en invoerconventies.

3. TRANSMISSIEMODULEN

3.1 Transmissiemodules aardebaan en tunnel

In het kader van het onderzoek van L400 zijn ook de transmissiemodules voor aardebanen en tunnels ontwikkeld. Dit zijn belangrijke onderdelen van een trillingsprognose, omdat zij door hun stijfheid de dynamische belasting van weg- of railverkeer over een relatief grote oppervlakte kunnen spreiden. Daarnaast speelt ook de massa een belangrijke rol. Met name bij tunnels bepaalt de combinatie van massa en buigstijfheid van wanden en vloeren in belangrijke mate bij welke frequenties de trillingen eventueel versterkt worden door resonantie van de wanden en vloeren. De transmissiemodules voor aardebaan en tunnel zijn, net als bij het gebouw, opgesteld met behulp van een substructuring-techniek op basis van een eindig-elementenmodel in DIANA.

Bij tunnels is verder sprake van een complexe wisselwerking tussen bodem en tunnel. De tunnel verdeelt een dynamische belasting in de tunnel over zijn omtrek en in zijn lengterichting. Voor een goede aansluiting tussen bodem en tunnel zou men bij voorkeur de bewegingen van bodem en tunnel op een zo groot mogelijk aantal punten koppelen. Aan de andere kant vereist een efficiënt rekenmodel dat het aantal punten zo beperkt mogelijk wordt gehouden. Om nog tijdens de ontwikkeling van tunnelmoduul en bodemmoduul een validatie te kunnen uitvoeren op de gehanteerde schematiseringen, worden o.a. metingen gebruikt welke zijn uitgevoerd in eerste tunnelbuis van de Tweede Heinenoordtunnel.

3.2 Transmissie door de bodem

In de gangbare praktijk wordt vaak gebruik gemaakt van de formule van Barkan. Deze formule is in het voorgaande onderzoek (CUR D11) als uitgangspunt gebruikt. Het berekenen van amplitudes met de formule van Barkan gaat redelijk, het berekenen van de fase van de trilling is complex. Deze formule bevat twee parameters: één voor de beschrijving van de ruimtelijke spreiding en één voor de materiaaldemping. Uit het onderzoek bleek dat de eerste parameter bij gelaagde bodem sterk frequentie afhankelijk is en daardoor moeilijk te schatten. Bovendien kan deze formule alleen in een horizontale laag (meestal langs het maaiveld) toegepast worden.

In het huidige prognosemodel is het wenselijk om de trillingen in de bodem op een andere diepte dan uitsluitend de brondiepte te bepalen. De hiervoor in de literatuur beschikbare rekentechnieken zijn tijdrovend en vragen een grote computer. Daardoor zijn deze niet geschikt voor de toepassing in een pc-model.

Dit probleem is opgelost door de methode der karakteristieken te gebruiken. Deze methode is de gulden middenweg tussen rekentijd en nauwkeurigheid. De methode berust op het feit dat de volumegolven in een homogeen elastisch medium zich langs een rechte lijn met een bekende snelheid en een bekende amplitude-afname voortplanten.

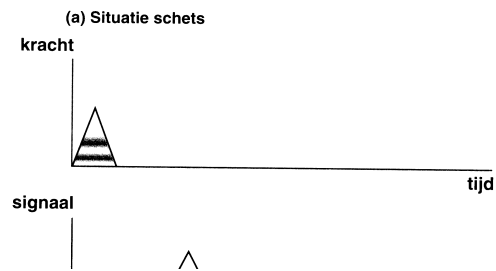
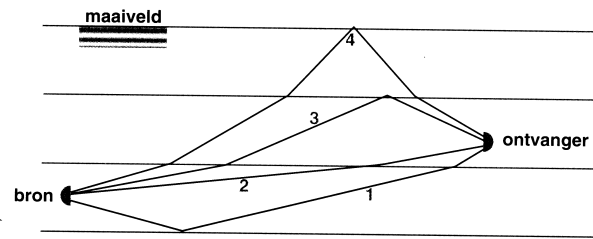
Ten gevolge van een dynamische belasting planten zich in de bodem allerlei golven voort, met als belangrijkste de drukgolf, de schuifgolf en de Rayleighgolf. De volumegolven (drukgolven en schuifgolven) planten zich in een homogene bodem voort langs een rechte lijn: het pad of de "karakteristiek". Als zij een laagseparatie bereiken, dan ontstaat er een complex patroon van doorlating, weerkaatsing en typeconversie.

De belangrijkste oppervlaktegolf is de Rayleighgolf, die langs het maaiveld loopt. Deze heeft een groot aandeel in het energietransport en dempt relatief langzaam uit. De voortplantingssnelheid bedraagt ongeveer 90 % van de afschuifsnellheid $\sqrt{G/r}$. De grootte van de deeltjesbeweging neemt af met de afstand tot het oppervlak. Rayleigh-golven ontstaan bij een bron op maaiveld, of als volumegolven aan het maaiveld weerkaatsen. Op

diepere laagseparaties kunnen vergelijkbare oppervlaktegolven ontstaan, maar die zijn doorgaans verwaarloosbaar en derhalve niet in het model meegenomen.

3.2.1 Methode der karakteristieken

Het principe van de methode der karakteristieken kan het beste uitgelegd worden aan de hand van een voorbeeld. Er wordt uitgegaan van een gelaagde bodem. De bron en de ontvanger bevinden zich in verschillende lagen. In onderstaand figuur 4 is een aantal paden getekend, waarlangs een golf kan lopen om van de bron naar de ontvanger te gaan. Ter plaatse van laagseparaties treden knikken in de karakteristieken op. Als de bron nu bestaat uit een korte, felle tik, dan komen de signalen langs de vier geschetste paden bij de ontvanger aan. De signalen arriveren op verschillende tijdstippen, omdat de padlengte voor elk pad anders is. De signalen verschillen in sterkte, omdat de padlengte, de beginwaarde en de amplitudedemping voor elk pad anders is. Het onderste gedeelte van figuur 4 geeft aan wat er ter plaatse van de ontvanger waargenomen wordt als het signaal de ontvanger langs de vier geschetste paden kan bereiken.



Figuur 4 Principe methode der karakteristieken

(b) Signalen bij bron en ontvanger

Deze werkwijze geldt voor drukgolven en voor schuifgolven. In beginsel zijn er oneindig veel golfpaden, maar in het algemeen is het voldoende alleen de belangrijkste (kortste) paden te beschouwen. Uit recent onderzoek is gebleken dat de typeconversie op de laagseparaties in het algemeen niet verwaarloosd kan worden.

3.2.2 De Rayleighgolf

De Rayleighgolf speelt in veel trillingsproblemen een belangrijke rol. Deze oppervlaktegolven planten zich niet langs een karakteristiek voort, maar langs een oppervlak. Daarom is in het model een afwijkende behandeling van de Rayleighgolf nodig.

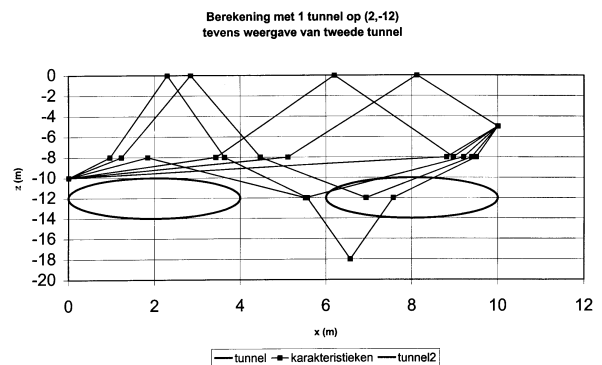
De berekening van de Rayleighgolf bestaat uit twee stappen:

- Het ontstaan van de Rayleighgolf is gerelateerd aan de volumegolven die het maaiveld bereiken. Deze worden deels weerkaats en deels in Rayleighgolven omgezet. De verdeling tussen deze golven is afhankelijk van de hoek van inval en de frequentie;
- De voortplanting van de aldus ontstane Rayleighgolf wordt met 'een verre veld' benadering uitgewerkt. Hierbij zijn de golfsnelheid en de indringingsdiepte frequentie afhankelijk.

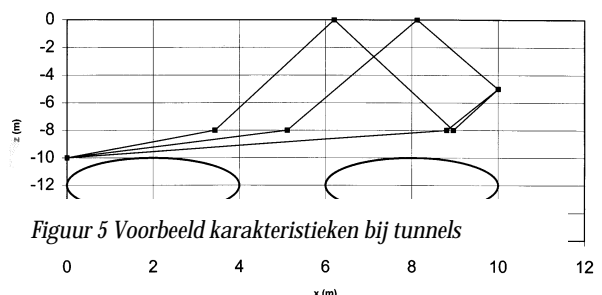
3.2.3 Tunnel als diepe bron

In de transmissie module voor golfvoortplanting in een horizontaal gelaagde bodem, is een routine geïmplementeerd voor de invloed van horizontaal liggende tunnelgaten. Deze invloed komt tot uiting in de verandering van de admittantie matrix. Er zijn zowel tunnels met een cirkelvormige als rechthoekige doorsnede geïmplementeerd.

De off-diagonaaltermen worden berekend uitgaande van de karakteristieken die door de reeds bestaande module zijn berekend. Als een karakteristiek snijdt met een tunnelgat dan wordt deze verwijderd en levert geen bijdrage aan de admittantie matrix. Als een trillende tunnel gesimuleerd wordt, dan ligt de bron op de wand van een tunnel en hebben de karakteristieken een twee maal zo



Berekening met twee tunnels



Figuur 5 Voorbeeld karakteristieken bij tunnels

grote bijdrage. In figuur 5 wordt deze aanpak geïllustreerd.

Ook is een plane strain geometrie geïmplementeerd. Deze is gebaseerd op de bestaande axiaalsymmetrische oplossing, waarin de afstandsafhankelijkheid veranderd is.

3.3 Transmissiemodul gebouwd

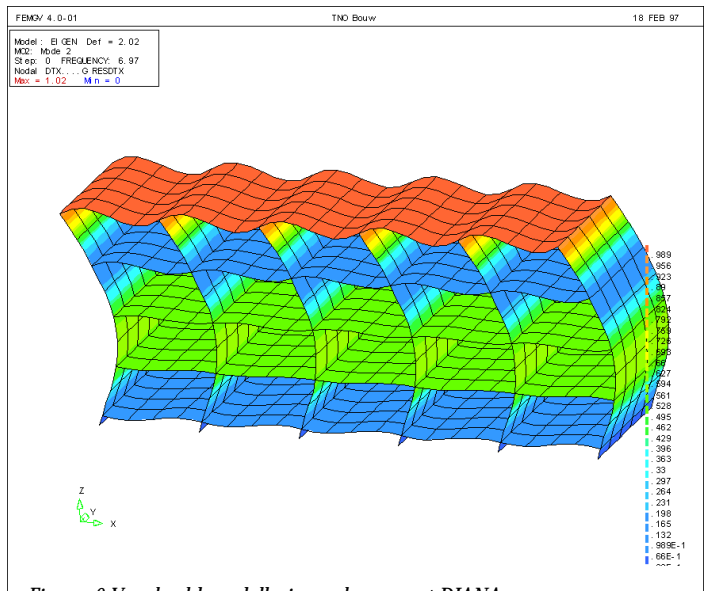
Het gebouw vormt doorgaans de laatste schakel in het transmissiepad van trillingen, bijvoorbeeld: trein-aardebaan-bodem-fundering-gebouwd. De doelstelling van dit modul is het vaststellen van de relatie tussen optredende dynamische snelheden tussen de bovenkant van de fundering en de vloeren, wanden van het gebouw.

Door de commissie L400 is besloten de transmissiemodule gebouwd uit te werken voor een set "standaard gebouwd". Deze gebouwd zijn:

- twee onder één kap;
- rijtjeswoning;
- woongebouwd 4 hoog;
- woongebouwd 8 hoog;
- kantoor, 2 hoog + kelder.

Deze lijst gebouwd kan in principe nog verder uitgebreid worden. Mogelijke funderingstypen waar het transmissiemodul GEBOUWD op aansluit zijn: een fundering op staal en een fundering op palen. Het modul is echter zo flexibel dat eventueel ook direct op een tunnel gefundeerd zou kunnen worden.

De gebouwd zijn gemodelleerd met de eindige elementenprogramma DIANA, waarvan figuur 6 een voorbeeld geeft. De modul richt zich op gebruik van het prognosemodel in combinatie met de SBR richtlijn I en II voor respectievelijk trillingsschade en -hinder. Dat betekent dat in geval van schadeprognose de trillingsnelheden bepaald kunnen worden op enkele stijve plekken in de constructie (wanden, vloeren, kolommen) en in het midden van vloeren en wanden. In het geval van hinderprognose zijn alleen de snelheden die optreden in het midden van vloeren van belang.



Figuur 6 Voorbeeld modellering gebouwd met DIANA

4. VALIDATIE METINGEN

Binnen het CUR/COB project L400 is hoge prioriteit gegeven aan validatie van het prognosemodel door middel van metingen. Voor de trillingsbronnen "heien", "intrillen", "wegverkeer" en "railverkeer" kon hierbij in ruime mate geput worden uit reeds in het verleden uitgevoerde metingen. Daar waar het gaat om trillingsbronnen die specifiek betrekking hebben op geboorde tunnels voor rail- of wegverkeer ontbreekt deze noodzakelijke database voor Nederlandse omstandigheden. Om deze reden streeft L400 er naar om in de vervolgfase III in te spelen op de dan beschikbaar trillingsmetingen, met als doel het inzicht te vergroten in de trillingsuitstraling van geboorde tunnels, zowel tijdens het boren als na ingebruikname.

4.1 Metingen Heinenoordtunnel

Op 3, 4 en 5 november 1997 zijn trillingsmetingen uitgevoerd aan de zuidzijde van de Oude Maas ter plaatse van de Heinenoordtunnel, zowel op maaiveld als in de TBM.

De door de TBM gegenereerde trillingen zijn uitgewerkt voor wat betreft frequentie en maximale trillingsnelheid (figuur 7). De resultaten zijn getoetst aan een empirische formule en vergeleken met enkele eerder uitgevoerde metingen bij andere projecten. Geconstateerd is, dat de trilling een tweeledig karakter kent. Er zijn

twee duidelijke frequenties te onderscheiden, te weten: een sterk fluctuerende frequentie met een gemiddelde waarde van 40 Hz en een zeer constant en duidelijk aanwezige puls met een herhalingsfrequentie van 4 Hz.

Uitgaande van de bovengrenswaarde voor de maximale amplitude van de deeltjessnelheid wordt geconcludeerd, dat onderstaande empirische formule zeer goed de bovengrenswaarde benadert. De maximale trillingsnelheid "RPPV" is dan:

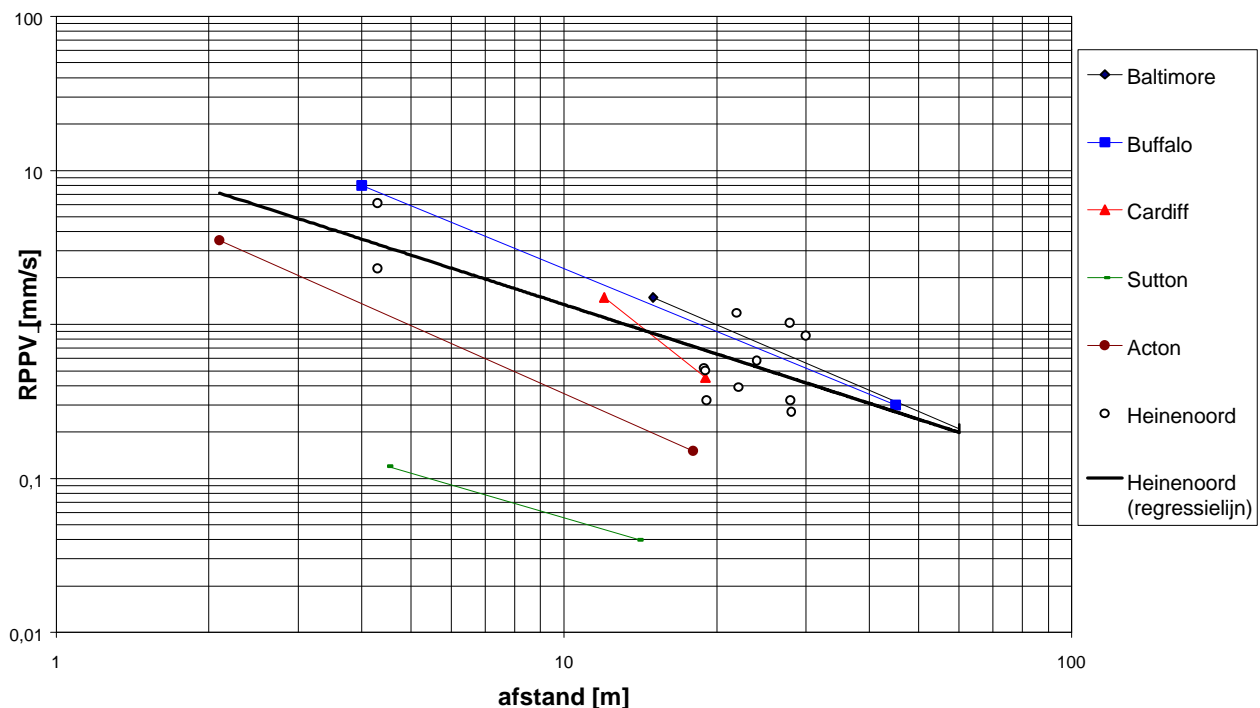
$$RPPV = 10 \cdot b \cdot D \cdot r^n \quad [\text{mm/s}]$$

waarin:

RPPV	maximale deeltjessnelheid	[mm/s]
β	factor voor bodeminvloed	[-]
	$\beta = 0,25$ voor slappe grond met $q_c < 5$ MPa	
	$\beta = 1,00$ voor stijve grond met $q_c > 15$ MPa	
	lineaire interpolatie voor β als $5 < q_c < 15$ MPa	
D	tunneldiameter	[m]
r	afstand tot boorkop	[m]
n	dempingsmaat	[-]

Voor de slappe grond, zoals die aanwezig is op de zuidoever bij de Heinenoordtunnel, is de grondfactor (β) gelijk aan 0.30 en de dempingsmaat (n) gelijk aan -0.96. Hieruit volgt, dat trillingen met een amplitude hoger dan 1 mm/s niet meer voorkomen op een afstand meer dan 3 maal de diameter van de tunnelas.

Bij de noordoever is de grond zanderiger. Daar zal, op basis van de bovenstaande empirische formule, een hoger trillingsniveau worden verwacht. Dit lijkt in overeenstemming met de gevoelsmatige waarnemingen bij



Figuur 7 Vergelijking Heinenoord metingen met vergelijkbare projecten

het boren onder de noordoever.