

PROGNOSEMODEL VOOR TRILLINGSHINDER

Coenraad Esveld

Hoogleraar Railbouwkunde, TU Delft
Voorzitter CUR/COB Commissie L400

Bijdrage PAO-cursus Trillingshinder in de bebouwde omgeving, 8 en 9 december 1999

Samenvatting

Binnen de CUR/COB-commissie L400 is een model ontwikkeld waarmee trillingseffecten kunnen worden voorspeld en beoordeeld en de effecten van trillingsreducerende maatregelen kunnen worden berekend. Omdat het model op een PC moet draaien, met aanvaardbare reketijden, is gebruik gemaakt van macro-elementen. Het trillingsprobleem is geschematiseerd tot in essentie drie onderdelen: bron, transmissiemedium en ontvanger. Trillingsbronnen zijn beschikbaar voor: heien en trillen, wegverkeer en railverkeer. Transmissie modulen zijn ontwikkeld voor: tunnels, aardebaan, bodem, paalfundering en gebouwen.

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:

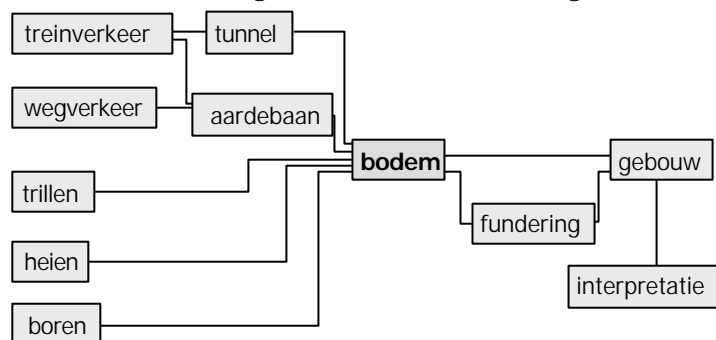
- meet- en beoordelingsrichtlijnen van schade aan bouwwerken door trillingen;
- hinder van personen in gebouwen door trillingen;
- storing aan apparaten door trillingen.

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. Deze D11-studie vormde de basis voor het thans ontwikkelde prognosemodel L400, als eindproduct van de studie L400 inzake trillingshinder in de bebouwde omgeving.

2. HET MODULAIRE SYSTEEM VAN HET PROGNOSEMODEL L400

Het prognosemodel L400 is modulair opgebouwd en bestaat uit de volgende onderdelen (zie ook figuur 1):

- **Bronmodules** voor: wegverkeer, railverkeer, heien, trillen van funderingspalen en damwandelementen, boren van tunnels;
- **Transmissiemodules** voor:
 - aardebaan en tunnel naar omgeving en van bodem naar fundering;
 - Bodemmoduul voor een gelaagde bodem
- **Gebouwenmoduul** voor: gebouwen gefundeerd op staal en op palen.



Figuur 1 Structuur van het prognosemodel L400

3. HET L400 PROGNOSEMODEL

De ontwikkeling van het prognosemodel vormde de kern van het onderzoek van CUR/COB-project L400. Vanwege verwerking op een PC en het beperken van de rekestijd is gebruik gemaakt van zogenaamde macro-elementen. 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 beperkt aantal karakteristieke vrijheidsgraden. In de filosofie van de macro-elementen wordt het trillingsprobleem geschematiseerd tot in essentie drie onderdelen:

- bron;
- transmissiemedium;
- ontvanger.

Tevens kan in het model gebruik gemaakt worden van meetresultaten. Zo is het mogelijk een gemeten excitatie als spectrale waarde in te voeren, maar ook kunnen overdrachtsfuncties, afgeleid uit meetwaarden, in principe als macro-element worden ingevoegd.

3.1 De bron

Bij de bron is het zaak op een voldoende realistische wijze de eigenschappen van de trillingsbron te beschrijven. In I400 is een aantal relevante trillingsbronnen gemodelleerd, namelijk:

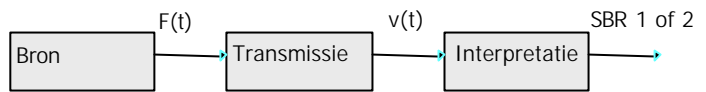
- hei- en trilwerkzaamheden;
- wegverkeer;
- railverkeer;
- boren van een tunnel.

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

3.2 Transmissiemedium

Het transmissiemedium wordt gevormd door een aaneenschakeling van deel-transmissiemodulen, zoals:

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



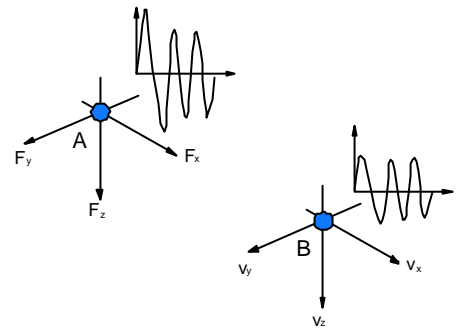
Figuur 2 Trillingsprognosemodel

Hier is het van belang de trillingstransmissiekenmerken van de modulen goed te beschrijven. In de macro-elementenmethode wordt een transmissiemodul 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).



Figuur 3 Transmissiepunten

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_{bh} , 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.

$$\begin{bmatrix} F_a^1 \\ F_b^1 + F_b^2 \\ F_c^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa}^1 & Z_{ab}^1 & 0 \\ Z_{ba}^1 & Z_{bb}^1 + Z_{bb}^2 & Z_{bc}^2 \\ 0 & Z_{cb}^2 & Z_{cc}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

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.

Binnen het systeem wordt in het frequentiedomein gerekend. Het frequentiebereik ligt tussen 5 en 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 Fourier-getransformeerd worden. 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.

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

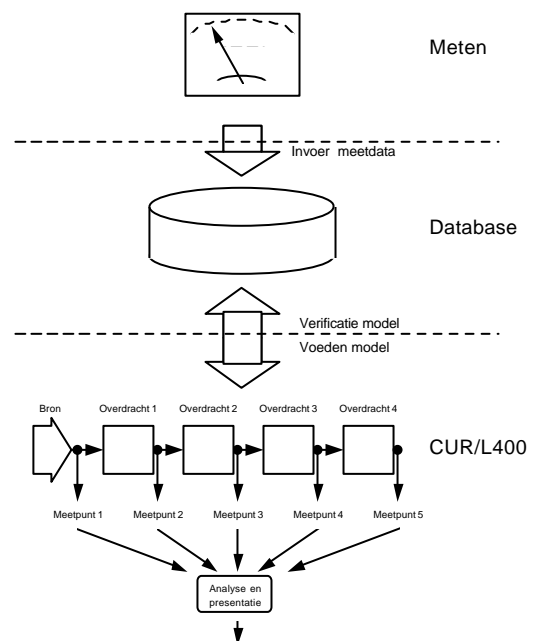
De hierboven geschetste structuur heeft geleid tot een open prognosemodel dat op een PC draait. Een gebruiker kan naar believen ingrijpen en eigen bronnen, transmissiemodulen e.d. invoeren. De verschillende modules communiceren via data-files. De open structuur van het model betekent anderzijds wel dat strikt de hand gehouden moet worden aan voorgeschreven file-formats en invoerconventies.

4. DATABASE

In het kader van het OLS-project is een database voor de opslag van meetgegevens ontwikkeld. Deze meetgegevens worden zodanig vastgelegd dat ze verwerkt kunnen worden voor een latere interpretatieslag. Slechts een beperkt aantal gegevens van reeds eerder uitgevoerde metingen zullen onmiddellijk passen in de database. Gebruikers van het programma zullen eerst na verloop van tijd de database verder vullen met de gewenste meetgegevens. Derhalve zal een protocol voor het vullen van de database worden opgezet. Tevens zal de database gekoppeld worden aan het L 400 model. Figuur 4 toont een systeemsschets van de database.

De database heeft de volgende doelen:

1. Opslaan van metingen en berekeningsresultaten op een uniforme wijze, met aandacht voor de vastlegging van de meetomstandigheden.
2. Het bieden van een infrastructuur voor het uitwisselen van metingen en berekeningsresultaten.
3. Uitkomsten van berekeningen van het L400-model vergelijken met metingen uit de database.
4. De database als zelfstandige eenheid gebruiken voor empirische prognoses.



Figuur 4 Systeemsschets database

5. Opgeslagen metingen gebruiken als alternatief voor L400-modules.

Bij het invoeren van de gegevens maakt de database, met behulp van de L400-software, een snapshot van de meetresultaten. Deze snapshot bevat kenmerken waarden en een frequentieverdeling. Door de snapshot op een identieke manier te creëren wordt de vergelijkbaarheid van de snapshots gewaarborgd.

5. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN EINDRAPPORT L400

5.1 Inleiding

Partners binnen CUR/COB hebben in de commissie L 400 “Trillingshinder in de bebouwde omgeving” een modulaair systeem ontwikkeld waarmee trillingshinder kan worden voorspeld. Het prognosemodel bevat verschillende bronmodulen, modulen voor de transmissie van de trillingen door de bodem en modulen voor de respons van gebouwen.

Ten aanzien van de nauwkeurigheid moet onderscheid worden gemaakt in de nauwkeurigheid van de respectieve modulen en in die van het prognosemodel als geheel. Het is zinvol om te streven naar gelijkwaardigheid in de nauwkeurigheid van alle onderdelen. Ook moet worden opgemerkt dat een finale uitspraak omtrent de nauwkeurigheid van software pas kan worden gedaan, nadat een (groot) aantal cases met het model is doorgerekend en de resultaten zijn gevalideerd aan de hand van metingen.

De uitgevoerde verificaties geven wel enig inzicht in de juiste werking van de afzonderlijke modulen. In de schematisering van de bronnen, de bodem en de gebouwen tot berekenbare modellen zitten uiteraard vele parameters, die moeten worden gekozen. Met de toename van ervaring met het prognosemodel en analyse van de verkregen resultaten kunnen deze parameters steeds worden verbeterd. Daarmede zal de nauwkeurigheid met het verloop van de tijd worden verhoogd. Het is duidelijk dat aan dat traject nog moet worden begonnen met het heden gereedgekomen prognosemodel.

5.2 Conclusies

5.2.1 Conclusies algemeen

Thans is een werkende versie van het prognosemodel beschikbaar, hetgeen in detail wordt toegelicht en onderbouwd in de deelrapporten, die zijn vermeld in de literatuurverwijzingen.

De rekenmodules van het model zijn geverifieerd en in zeer beperkte mate gevalideerd. Hoewel typeconversie van de golven is geïmplementeerd in het bodemmoduul, zal nog verdere aandacht dienen te worden besteed aan de interactie met oppervlaktegolven.

Het computermodel is relatief eenvoudig te gebruiken. De gebruiksinstructies in de handleiding bieden voldoende houvast om relatief snel berekeningen te kunnen maken.

5.2.2 Conclusies heien en trillen

Deze deelstudie heeft geresulteerd in een algemeen bruikbaar bronmodel, waarin op basis van een aantal eenvoudig te verkrijgen en doorzichtige invoerparameters een breed scala aan heitrillingsproblemen kan worden geanalyseerd. Door hierbij uit te gaan van een relatief eenvoudige modellering zal het inzicht in de belangrijkste invloedsparameters, die de trillingsniveaus bepalen, worden vergroot.

Binnen CUR/COB L400 is voor het “bronmoduul” bepaald dat ten behoeve van de aansluiting op het bodemmoduul, het eindresultaat zal worden geformuleerd als een krachtbron op het aansluitvlak tussen de funderingspaal of het damwandelement en de omringende bodem.

5.2.3 Conclusies wegverkeer

Ten aanzien van het moduul wegverkeer kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Uit kwalitatieve en kwantitatieve berekeningen zijn geen onduidelijkheden naar voren gekomen, zodat geconcludeerd wordt dat met het moduul de gewenste berekeningen kunnen worden uitgevoerd. Ook de berekeningen met het funderingsmoduul blijken in orde.
- De beschrijving van het moduul voor de berekening van belasting door wegverkeer, en de overdracht daarvan door de wegfundering is duidelijk beschreven.
- Het moduul laat zich eenvoudig gebruiken.
- Voor het genereren van een continu oneffenheidsprofiel moet gebruik worden gemaakt van een programma binnen het moduul railverkeer, hetgeen onhandig is en een mogelijke bron van fouten.
- De formulering van de geometrieparameters voor discrete oneffenheden, zoals verkeersdrempels, is gevoelig voor fouten.
- De modellering van het moduul wegfundering is gebaseerd op een analyse van de dynamische eigenschappen van het wegverkeer bij een frequentie van 10 Hz. De dominante frequenties van trillingen door wegverkeer liggen in het frequentiegebied van 4-16 Hz. De dynamische eigenschappen van de wegfundering zijn wellicht anders bij een frequentie van 4 Hz.

5.2.4 Conclusies railverkeer

Het doel van dit bronmodel is het vaststellen van de dynamische belastingen op de ondergrond van een spoorweg bij treinpassage. De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- Door modellering van een voertuig in afzonderlijke deelsystemen, te weten wielen, draaistellen en bak blijkt een goede voorspelling van de dynamische belasting van een voertuig te worden gegeven;
- De belasting van een trein kan worden bepaald door de belasting van afzonderlijke voertuigen en onderdelen te superponeren.
- Belasting effecten van discrete rail oneffenheid, wielonrondheid, statische aspassage en rail doorbuiging kunnen eenvoudig in rekening worden gebracht door deze te superponeren op de dynamische effecten van een treinpassage over een random verdeelde onvlakheid.
- de dynamische belastingen ten gevolge van rail doorbuiging zijn lineair afhankelijk van de snelheid van de trein en zijn daardoor lager frequent bij snelheden van 30-70 km/h en hoger frequent bij snelheden van 120-300 km/h. Voor trillingshinder en schade zijn derhalve de lagere snelheden van belang.
- De parametrisering heeft tot een model geleid dat geringe rekentijd van de computer vereist.
- De resultaten van het spoorwegmoduul zijn vergeleken met de resultaten van een bestaand geïntegreerd model voor railverkeer van TNO Bouw en bleken daarmee goed overeen te komen.

De numerieke resultaten van berekeningen met het moduul zijn goed te interpreteren en stemmen overeen met hetgeen verwacht mag worden, ook als belangrijke invoerparameters worden gevarieerd.

5.2.5 Conclusies gebouw

Voor het moduul "gebouw" is gebruik gemaakt van 'sub-structuring' technieken afkomstig uit de Eindige Elementen Methode om het dynamisch gedrag van een 5 tal verschillende bouwwerken te bepalen en direct inzetbaar te maken in het prognosemodel voor L400.

De rapportage van het gebouwmoduul geeft in zijn algemeenheid een duidelijke beschrijving van de wijze waarop de impedantiematrix van een zestal vooraf gedefinieerde gebouwtypen zijn bepaald.

De vooraf gedefinieerde set gebouwtypen blijken een belangrijke beperking van de bruikbaarheid van het moduul in te houden. Bij iedere analyse van mogelijke trillingen in gebouwen met het gebouwmoduul moet één van de gemodelleerde typen als representatief worden verondersteld. Het gevolg hiervan is dat voor bepaalde concrete praktijkgevallen niet meer dan een indruk van de orde van grootte van de mogelijk optredende trillingsniveaus kan worden bepaald, tenzij de beschouwde constructie aanvullend gemodelleerd wordt en de massa- en stijfheidsmatrices worden bepaald. De genoemde beperking is overigens niet te vermijden gegeven een belangrijke basisrandvoorwaarde dat het prognosemodel hanteerbaar van omvang dient te blijven en op een PC moet kunnen draaien.

De numerieke resultaten van het gebouwmoduul zijn voor het gebouwtype 'rij eengezinswoningen' vrij uitvoerig geverifieerd. Deze resultaten geven veel vertrouwen in de juistheid van de modellering van de dynamische eigenschappen van de gebouwen in het algemeen. Wel wordt hier direct aan toegevoegd dat dit nog niet zegt dat de resultaten voor de niet beschouwde gebouwtypen daarmee per definitie ook in orde zijn. Binnen de verificatiestudie

is het echter niet mogelijk gebleken de nogal bewerkelijke numerieke analyse voor meer gebouwtypen uit te voeren.

Het is mogelijk gebleken om de gevraagde transmissiematrices voor de vijf funderingen op de beschreven wijze te bepalen. Uit de verificatie blijkt dat de ontwikkelde rekenmethodiek correct is.

5.2.6 Conclusies fundering

Het moduul fundering laat zich met de aanwijzingen in de gebruiksinstructies van het prognosemodel eenvoudig gebruiken. De numerieke resultaten lijken op basis van een beperkte verificatie goed te voldoen.

Om het grote aantal vrijheidsgraden van de funderingen te beperken kunnen binnen het moduul de vrijheidsgraden van tussenpalen in een rij worden gekoppeld aan de vrijheidsgraden van de buitenste palen in een rij (condensatie). De invloed hiervan op de nauwkeurigheid van het moduul blijkt beperkt.

5.2.7 Conclusies boren van tunnels

Voor de ontwikkeling van een bronmoduul voor het boren van tunnels is gebruik gemaakt van literatuur over gemeten trillingen. Op basis van in het buitenland uitgevoerde metingen bij kleine en middelgrote boringen met behulp van een tunnelboormachine is globaal een formulering afgeleid voor de maximale trillingsintensiteit welke afhankelijk is gesteld van de tunneldiameter, grondgesteldheid en afstand tot het waarnemingspunt.

Er is geen moduul ontwikkeld dat aansluiting vindt bij de overige bronmodules.

5.2.8 Conclusies aardebaan / tunnel

Het eindresultaat van dit deelproject is een beschrijving van de stijfheids- en massaeigenschappen van een aantal tunnel- en aardebaanconstructies in de vorm van een impedantiematrix. Met de impedantiematrices van de verschillende constructies wordt op een eenvoudige manier het dynamische gedrag van het totale model, dus met interactie tussen tunnel of aardebaan enerzijds en de bodem anderzijds, vastgesteld.

De volgende doorsneden zijn beschouwd:

- Tunnels met rechthoekige en ronde doorsnede
- Aardebaan en dubbelspoor met respectievelijke dikten van 2,4 en 6 m
- Viersporige aardebaan met respectievelijke dikten van 2,4 en 6 m

De set aardebaan- en tunnelconstructies waarvan de dynamische eigenschappen zijn bepaald is vooraf gedefinieerd. Bij iedere analyse van transmissie van trillingen door dit type constructies moet derhalve één van de gemedelende constructies als representatief worden verondersteld. Naar verwachting is deze beperking praktisch gezien het meest relevant voor de geboorde tunnel. Deze tunnel is namelijk relatief slap, en kent in de praktijk meer variatie in constructieve uitvoering dan de overige beschouwde constructies.

De controle op de gestelde randvoorwaarden, de symmetrie van de respons, de kwalitatieve invloed van demping, en de kwalitatieve invloed van andere dimensies leverde onverklaarbare resultaten op. Een meer kwantitatieve verificatie van berekende respons bleek erg lastig. De orde van grootte van de resultaten bleek weliswaar overeen te komen met die van een analytische benadering, maar waarschijnlijk door met name de lastig vast te stellen stijfheid van de uit verschillende elementen met verschillende eigenschappen samengestelde constructies was een scherpere controle dan alleen op orde van grootte binnen deze studie niet mogelijk.

5.2.9 Conclusies tunnel als diepe bron

In deze paragraaf is de simulatie van golfvoortplanting uit een tunnel beschreven. Dit wordt gedaan door de eerder gevonden karakteristieken van golven door de bodem te controleren op snijden met een tunnel. Sniijdt een karakteristiek met een tunnel, dan levert deze geen bijdrage aan de transmissiematrix. Een trillingsbron kan zich zowel op als buiten de tunnelwand bevinden. Ligt de trillingsbron op de tunnelwand, dan wordt een trillende tunnel gesimuleerd. Er zijn tunnels met cirkelvormige en rechthoekige doorsneden geïmplementeerd.

5.2.10 Conclusies bodem

Het doel van het transmissiemoduul bodem is het leggen van een relatie tussen een bronbelasting in de bodem, en de respons daarop in een punt op een zekere afstand van de bron. Het moduul beschrijft de voortplanting van

volumegolven in de bodem, daarbij rekening houdend met afbuiging, reflectie en mogelijke typeconversie op laagscheidingen, en met het ontstaan van oppervlaktegolven bij reflectie van volumegolven aan het maaiveld.

Het transmissiemodul is gebaseerd op de methode der karakteristieken. In essentie berust deze methode op het feit dat de ruimtelijke spreiding van golven in een homogeen medium langs rechte lijnen verloopt (de karakteristieken). Oppervlaktegolven lopen niet langs een karakteristiek, maar langs een oppervlak. Algemeen kan gesteld worden dat het nieuwe bodemmodul is geverifieerd voor een aantal eenvoudige gevallen, waaruit blijkt dat de typeconversie correct geïmplementeerd is.

De theorie volgens welke de Rayleighgolven zijn geïmplementeerd, kent een aantal beperkingen, waardoor predicties van trillingsgedrag, waarbij oppervlaktegolven dominant zijn, met de nodige voorzichtigheid dienen te worden geïnterpreteerd. Aan verder onderzoek ter verbetering van dit onderdeel zal prioriteit moeten worden gegeven.

5.2.11 Macro-elementen

Met behulp van 'sub-structuring' kan op succesvolle wijze een gereduceerde massa- en stijfheidsmatrix bepaald worden. De nauwkeurigheid van de daaruit afgeleide impedantiematrix is vergelijkbaar met die van het oorspronkelijke Eindige Elementen Model.

De toegepaste substructuringtechniek blijkt succesvol en is in principe inzetbaar voor verschillende onderdelen van het L400 prognose model, zoals, gebouw, tunnel, aardebaan, alsmede weg- en spoorwegconstructies.

5.2.12 Conclusies OLS

In het kader van het project Ondergrondse Logistieke Systemen (OLS) werd dit model uitgebreid en geschikt gemaakt voor ondergrondse logistieke systemen. Daartoe werd een database voor metingen ontwikkeld, werden trillingsbeperkende maatregelen voor dergelijke systemen geanalyseerd en werd een module ter toetsing aan richtlijnen en normen gecreëerd. Tevens werd een eerste validatie van het prognosemodel uitgevoerd en kon het model worden uitgebreid met componenten voor tunnels en voertuigen voor ondergrondse logistieke systemen. Het bodemmodul kon substantieel worden verbeterd door de implementatie van typeconversie van volumegolven.

5.3 Aanbevelingen

5.3.1 Korte termijn aanpassingen

Doordat in fase II vooral de nadruk heeft gelegen op de rekenkernen van het prognosemodel, zal in het vervolgtraject het accent vooral dienen te liggen op de gebruikersvriendelijkheid. Enkele aspecten daarvan zijn:

1. Afstemmen invoergegevens op de aard en het kennisniveau van de gebruiker, waarbij zoveel mogelijk gegevens direct via een database kunnen worden ingelezen. Als voorbeeld geldt dat voor voertuigen veel gegevens nodig zijn om een prognose te kunnen uitvoeren. Een voertuig kan echter gekoppeld zijn aan een gegeven als "locomotief 1600 serie", wat voor een gebruiker veel inzichtelijker is. Hetzelfde geldt voor andere bronnen (heien, trillen, wegverkeer) en het transmissiemodul bodem;
2. Ontwerpen van een Windows georiënteerd gebruikersinterface ter vervanging van de huidige invoer / uitvoer;
3. Ontwerpen van een foutafhandelingsysteem;
4. Ontwerpen van een help-systeem;
5. Herstructurering en stroomlijning van de modulen, zodat deze geschikt worden gemaakt voor 32 bits structuren in een WINDOWS-omgeving. Verplaatsing van functies uit .EXE bestanden naar .DLL bestanden. Bepaalde functies komen in verschillende varianten meer keren voor. Onderzoeken of deze niet veralgemeend kunnen worden (ten koste van de performance, maar eenvoudiger te onderhouden);
6. Vervanging van de wijze van communiceren tussen de modulen. Nu verloopt dit nog via ASCII files. Handig in een ontwikkelstadium doch traag. Vervanging is gewenst door middel van binaire files of direct in core.

5.3.2 Validatie

In de thans afgesloten fase II is op slechts zeer beperkte schaal aandacht besteed aan validatieonderzoek. Nadrukkelijk wordt aanbevolen hieraan prioriteit te geven, zowel voor wat betreft validatie van de verschillende onderdelen, als validatie van het prognosemodel als geheel.

5.3.3 Bodemmoduul

Er zijn aanwijzingen dat de modellering van de Rayleighgolf in het bodemmodule verbeterd kan worden. Hiertoe moet onderzocht worden of:

- het invoeren van een γ -factor voor de volumegolven, alsmede
- het relateren van de γ -factor aan de hoek van inval en de afgelegde weg een verbetering van de resultaten geeft.

Het diabolomodel zou beter geëvalueerd moeten worden, waarbij nagegaan kan worden of het zinvol is het diabolomodel met meer grondlagen uit te breiden.

5.3.4 Vervolgtraject lange termijn

In het vervolgtraject zal aandacht moeten worden besteed aan de te kiezen organisatievorm voor de exploitatie van het binnen commissie L 400 ontwikkelde prognosemodel. De wens is dat deze software breed zal worden toegepast. Daartoe zullen voorzieningen moeten worden getroffen om de gebruikers te ondersteunen, om het programma te onderhouden, en te verbeteren. Om een voortdurende goede werking van het programma te kunnen garanderen moeten goede afspraken worden gemaakt ten aanzien van organisatie en werkwijze, procedures voor kwaliteitsborging, opleidingen alsmede gebruiks- en eigendomsrechten.

6. SLOTWOORD

Het L400-project, inclusief het OLS-deel, is 1 november 1999 opgeleverd. Het ligt in de bedoeling om in het vervolgtraject vooral het accent te leggen op vergroten van de gebruikersvriendelijkheid, het verder valideren van het model aan de hand van praktijkmetingen, alsmede het terugkoppelen van ervaringen en het daarop afstemmen van aanpassingen en uitbreidingen. Tevens zal er een businessplan moeten worden ontwikkeld voor gebruik, onderhoud en verbetering van het prognosemodel.

7. LITERATUUR

- | | | |
|---|--------------------|----------|
| [1] Eindrapport trillingshinder voor ondergrondse logistieke systemen | CUR/COB rapport 44 | 25.10.99 |
| [2] Eindrapport trillingshinder in de bebouwde omgeving | CUR/COB rapport 45 | 25.10.99 |