

# **PROGNOSEMODEL VOOR TRILLINGSHINDER**

**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.

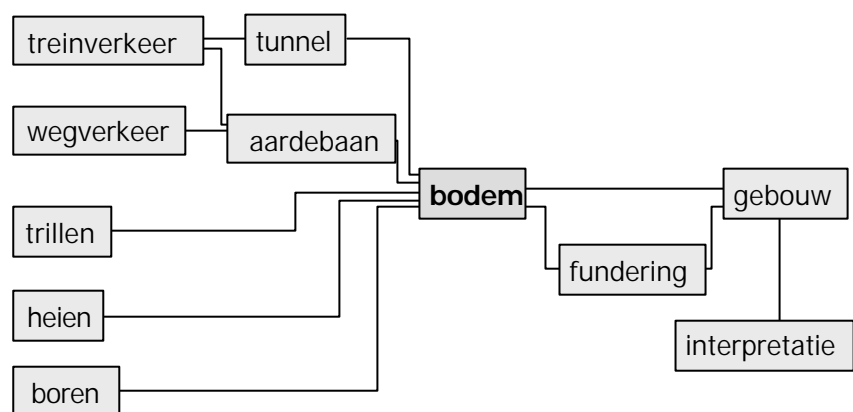
Tevens bleek dat er onvoldoende kennis bestond op het gebied van voorspellen van trillingen. Dit onderwerp werd door de CUR opgepakt door het installeren van de CUR-commissie D11 "Trillingshinder in bebouwde omgeving". De taak van deze commissie was het ontwikkelen van een modulair opgebouwd rekenmodel 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:

- 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



Figuur 1 Structuur L400 prognosemodel

### 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;
- **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, NS RIB, Prepal, RWS-Bouwdienst, Hollandse Beton- en Waterbouw, Ballast Nedam Beton- en Waterbouw, GD, DHV, TNO en TEC/Fugro.

## 1.4 OLS

In het kader van het COB-project OLS-3A is onlangs opdracht verleend voor het uitbreiden en aanpassen van het bestaande prognosemodel en het geschikt maken van dit model voor toepassingen voor ondergrondse transporttechnieken in een stedelijke omgeving. In dit project worden de volgende onderdelen onderscheiden:

1. Creëren van een database voor de opslag van metingen
2. Verzamelen en interpreteren van metingen
3. Analyseren van trillingsbeperkende maatregelen
4. Ontwikkelen module ter toetsing aan richtlijnen en normen
5. Aanvullen en verbeteren van het programma

De in dit project participerende partijen zijn: NSTO, Fugro, HR, TNO, GD, RWS-Bouwdienst, NZ-Lijn, HSL-Zuid, Betuweroute en TU Delft.

## 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.

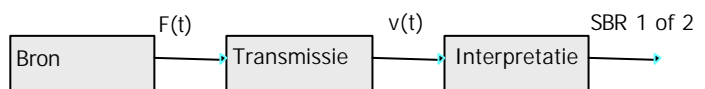
De trillingsbronnen kunnen worden beschreven door een dynamische belasting als functie van de tijd of door een krachtspectrum. Beide opties zijn mogelijk. Het zal duidelijk zijn dat ook het ruimtelijk karakter van een bron moet worden meegenomen: dat is bij een trein wezenlijk anders dan bij een heiwerk.

### 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.

Hier is het van belang de trillingstransmissiekenmerken van de modulen



Figuur 2 Trillingsprognosemodel

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).

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 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 transmissiemodulen) 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, transmissiemodulen e.d. invoeren. De verschillende modulen 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. DATABASE

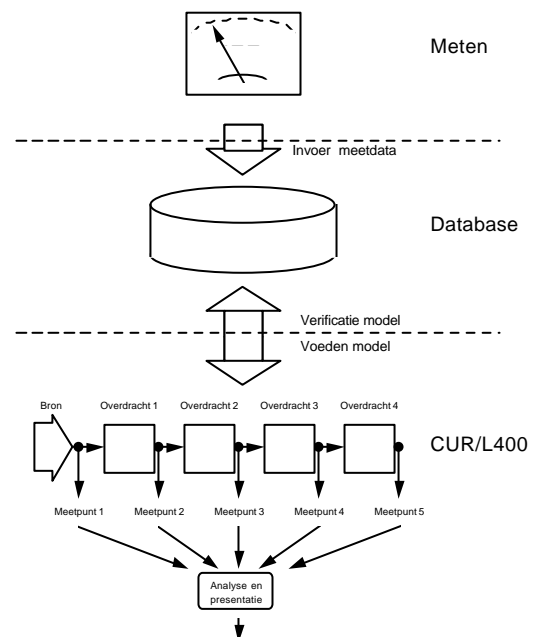
Onlangs is in het kader van het OLS-project gestart met de ontwikkeling van een database voor de opslag van meetgegevens. Deze zullen zodanig worden vastgelegd dat ze verwerkt kunnen worden voor een latere interpretatieslag. Slechts een beperkt aantal gegevens van reeds eerder uitgevoerde metingen zullen 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 3 toont een systeemschets van de database.

Bij het realiseren van de database zijn de volgende drie doelen geformuleerd:

1. Uitkomsten van een berekening van het L400-model moeten kunnen worden vergeleken met de metingen uit de database;
2. De database moet als zelfstandige eenheid kunnen worden gebruikt om inschattingen te kunnen maken;
3. De database moet kunnen fungeren als 'data-inputbank' voor het L400-model.

## 4. SLOTWOORD

Het L400-project, inclusief het OLS-deel, dient uiterlijk 1 november 1999 te worden opgeleverd. Het ligt in de bedoeling om in het vervolgtraject vooral het accent te leggen op een verdere verbetering van de gebruikersvriendelijkheid, 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.



Figuur 3 Systeemschets database