



Civiele Infrastructuur
Van Mourik Broekmanweg 6
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T 015 276 30 00

F 015 276 30 18

TNO-rapport

2002-CI-R2129

**Prognoses van trillingen en laagfrequent geluid als
gevolg van de TBM passage in en om de woning
Patrimoniumpark 26 in Leiderdorp**

Datum	16 mei 2003
Auteur(s)	Ir. D.J. Molenaar (TNO Bouw) M.Sc. G. Esposito (TNO Bouw) Ir. E. Klaver (HSL Zuid) Ir. W. Gardien (Holland Railconsult)
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	87
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	COB F511
Projectnaam	Prognoses Patrimoniumpark
Projectnummer	006.22113/01.03

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksovereenkomsten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2003 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding — 4
1.1	Inleiding — 4
1.2	Deelproject D — 5
1.3	Doel — 5
1.4	Uitgangspunten — 5
1.5	Referenties — 6
2	Predicties van trillingen door een TBM algemeen, Bijdrage HSL Zuid — 7
2.1	Inleiding — 7
2.2	Predictiemodel. Numeriek versus Empirie — 7
2.3	Trillingsmetingen — 8
2.3.1	Algemeen (Protocol) — 8
2.3.2	Predicties op basis van trillingsmetingen — 10
2.3.3	Predicties Groene Hart tunnel bij Patrimonium Park — 15
2.4	Conclusies / Samenvatting ten aanzien van de Groene Hart tunnel — 17
3	Modellering op basis van EEM, bijdrage HR — 20
3.1	Aanpak — 20
3.1.1	Bepaling bron van trillingen — 20
3.1.2	Trillingsniveau in de woning — 22
3.1.3	Afgestraald laagfrequent geluid — 24
3.2	Materiaal parameters — 25
3.2.1	Gegevens bodem — 25
3.2.2	Gegevens tunnel — 26
3.2.3	Gegevens woning — 26
3.3	Modelbeschrijving — 26
3.3.1	Axisymmetrisch 2D model — 26
3.3.2	3D model van tunnel — 29
3.4	Resultaten — 30
3.4.1	Axisymmetrische modellering — 30
3.4.2	3D modellering — 38
3.4.3	Trillingen op maaiveld en in de grond — 40
3.4.4	Trillingen in de woning — 42
3.4.5	Laagfrequent geluid — 42
3.5	Literatuur — 45
4	Modellering op basis van EEM, bijdrage TNO Bouw — 46
4.1	Inleiding — 46
4.2	Aanpak — 46
4.2.1	Gebruikte meetpunten — 46
4.2.2	Selectie meetfile — 47
4.2.3	Trillingsniveau in de woning — 48
4.2.4	Materiaal parameters — 48
4.2.5	Modelbeschrijving — 49
4.3	Resultaten — 51
4.4	Referenties — 52
5	Modellering op basis van BOR – Bijdrage TNO Bouw — 53
5.1	Modelleringstrategie — 53

5.1.1	Inleiding — 53
5.1.2	Informatie uit de voormeting en de beschikbare gegevens — 53
5.1.3	Dynamisch grondmodel en funderingsstijfheid: het BOR model — 56
5.1.4	Dynamisch huismodel — 57
5.1.5	Globale aanpak — 58
5.2	Resultaten — 61
5.2.1	Inleiding — 61
5.2.2	TBM kracht — 61
5.2.3	Prognose Patrimoniumpark — 62
5.2.4	Woning eigenfrequenties — 65
5.2.5	Funderingstijfheden — 66
5.2.6	Trillingsterkte in de woning — 67
5.3	Conclusies modellering met behulp van BOR — 70
5.4	Referenties — 70
6	Samenvatting en conclusies — 72

Bijlage(n)

A Resultaten

1 Inleiding

1.1 Inleiding

In het deelproject F511 “Trillingen; Boortunnel Groene Hart” wordt een methodiek vastgelegd waarbij door metingen vooraf een indruk kan worden verkregen van de trillingen van de Tunnelboormachine.

Het deelonderzoek trillingen sluit aan bij voorafgaande COB praktijkonderzoeken Tweede Heinenoordtunnel (K100), Botlekspoortunnel (F300) en Sophiaspoortunnel (F200). Tevens sluit het onderzoek aan op het CUR/COB onderzoek L400 ‘prognosemodel trillingen’ en het COB onderzoek G106 ‘afrendend onderzoek prognosemodel trillingshinder’. Verder sluit het onderzoek aan op het Delft Cluster 1 onderzoek trillingen en betrouwbaarheid.

Bovenstaande onderzoeken zijn uitgangspunten voor het deelproject F511 ‘Trillingen’ bij het praktijkonderzoek Boortunnel Groene Hart. Ten aanzien van validatie van predictiemodellen kan het praktijkonderzoek een waardevolle bijdrage leveren door trillingsmetingen te verrichten in panden nabij het tunneltracé. De Groene Hart tunnel leent zich hier prima voor, omdat op een aantal plaatsen de tunnel in de buurt van bebouwing komt.

Daarnaast is het uitwerken van een methodiek om de trillingen van de trillingsbron tunnelboormachine te voorspellen een belangrijk experiment. Net als bij heiwerkzaamheden dienen de optredende trillingen geëvalueerd te worden, bijvoorbeeld aan de hand van SBR richtlijnen A tot en met C. Hiervoor dient de trillingsemissie ten gevolge van een tunnelboormachine onderzocht te worden.

Groot manco bij voorspellingen hieromtrent is dat er geen behoorlijk bronmodel beschikbaar is van een tunnelboormachine. Gezien de complexiteit van een tunnelboormachine mag niet verwacht worden dat er een generiek bronmodel voor een tunnelboormachine ontwikkeld kan worden. Om toch voorspellingen te kunnen doen van de trillingen ten gevolge van tunnelboren zal per project gerichte metingen aan de tunnelboormachine moeten plaatsvinden, die dusdanig de bron beschrijven zodat daarmee nauwkeurige voorspellingen van de trillingen verderop het tracé kunnen worden gemaakt.

Het doel van dit onderzoek is niet om een vergelijking te maken tussen de voorspellende capaciteiten van de verschillende participanten. Ook is het niet de bedoeling om een gevoeligheidsanalyse te doen naar de mate waarin de parameters de prognoses beïnvloeden. Dit soort onderzoeken zijn in het kader van Delft Cluster uitgevoerd.

De doelstelling van het onderzoek is om een protocol te ontwikkelen waarmee met redelijke nauwkeurigheid voorspellingen kunnen worden uitgevoerd voor kritieke locaties. Met predicties gebaseerd op metingen in het begin van het tunneltracé worden de trillingen berekend voor kritische locaties. De in werkelijkheid optredende trillingen ter plaatse van zo’n kritische locatie worden vergeleken met de vooraf berekende trillingen.

Dit rapport doet verslag van prognoses uitgevoerd voor de locatie Patrimoniumpark 26.

De basis van het onderzoek wordt gevormd door de in het deelprojectplan “Trillingen; Boortunnel Groene Hart”, versie 2.0, d.d. 19 juni 2002, omschreven werkzaamheden. Dit deelprojectplan is door de deelcommissie F511 vastgesteld.

1.2 Deelproject D

Deelproject D omvat de vierde fase van praktijkonderzoek ‘Groene Hart tunnel’, deelproject ‘Trillingen’: “opstellen van predicties fase 2”. De voorgaande fasen bestonden respectievelijk uit het opstellen van een samenvatting van trillingsmetingen bij boortunnelprojecten uit het verleden [1], het opstellen van een meetprotocol [2] en een meetplan [3] en het uitvoeren van een voormeting [4].

Dit deelproject is in samenwerking met Holland Railconsult en HSL Zuid tot stand gekomen met TNO Bouw als hoofdaannemer en Holland Railconsult en HSL Zuid als onderaannemer. Dit rapport is een bundeling van de resultaten van de verschillende participanten.

De basis van de predicties wordt gevormd door de in het deelprojectplan ‘Trillingen; Boortunnel Groene Hart’; versie 2.0 d.d. 19 juni 2002 omschreven werkzaamheden. Dit deelprojectplan is door de deelcommissie F511 vastgesteld.

1.3 Doel

Het doel van het deelonderzoek is een predictie te doen van de trillingen tijdens de passage van de TBM bij de definitieve meetlocatie en het laagfrequente geluidsniveau in de bebouwing.

1.4 Uitgangspunten

Bij de aanpak van de werkzaamheden werd zoveel mogelijk voortgeborduurd op de resultaten van eerdere COB onderzoeken aan tunnels en de resultaten van Delft Cluster onderzoek 01.05.02 “Trillingen en betrouwbaarheid”.

De locaties van de opnemers die tijdens de voormeting volgens het protocol de “schil” moesten vormen, zijn enigszins gewijzigd vanwege beperkingen die de tunnelbouwer heeft gesteld. Het meetveld van de voormeting was daarom iets anders dan het in het meetprotocol gegeven meetveld. De trillingspredicties worden gedaan voor punten die op de zelfde posities ten opzichte van de TBM liggen als bij het meetveld tijdens de voormeting. Dit zijn tevens de posities die bij de hoofdmeting bij het Patrimoniumpark zullen worden gekozen.

Bij de verschillende predicties is een best guess 50 % waarde gegeven (naar schatting van de modelleur blijft de trillingssterkte in 50 % van de gevallen onder deze waarde) en een 95 % bovengrens waarde (in 95 % van de gevallen blijft de trillingssterkte onder deze waarde). Deze waarden zijn gebaseerd op een combinatie van modelonzekerheid, parameteronzekerheid en variatie van de trillingssterkte van de bron. Deze bronnen van onzekerheid zijn niet uitgesplitst.

Prognosemethodes

De volgende prognosemethoden zijn door de verschillende participanten gebruikt:

Methode	Deelnemer		
	TNO Bouw	Holland Railconsult	HSL Zuid
Database			X
2D EEM		X	
3D EEM	X	X	
BOR	X		

Om de resultaten van de verschillende modellen goed met elkaar te kunnen vergelijken, worden alle voorspelde trillingsterktes gepresenteerd in mm/s. De bijdragen van de verschillende participanten zijn in afzonderlijke hoofdstukken gerapporteerd. Aan het einde van elk van deze hoofdstukken zijn de resultaten tevens grafisch gepresenteerd. Hierbij zijn de trillingssterktes uitgezet als functie van de afstand tot de tunnelas. Hierbij wordt de werkelijke afstand door de bodem bedoeld en niet de op het maaiveld geprojecteerde afstand.

Daarnaast staan de resultaten van de eindige elementenmodellen op een CD-ROM als bijlage bij dit rapport in een format compatibel met Trilbase.

1.5 Referenties

- [1] W. Gardien, Samenvatting verleden
- [2] A. Koopman, D.J. Molenaar, "Meetprotocol voor omgevingstrillingen van het tunnelboorproces, concept", 12 maart 2002, TNO rapport 2002-CI-R-2040
- [3] M.J. Profittlich, "Meetplan trillingsmetingen Boortunnel Groene Hart COB F511", Fugro rapport Opdrachtnummer: M-0962
- [4] D.J. Molenaar, "Meetrapport trillingsmetingen Groene Hart Tunnel – Voormeting", TNO rapport 14 juni 2002

2 Predicties van trillingen door een TBM algemeen, Bijdrage HSL Zuid

2.1 Inleiding

Trillingen ten gevolge van het boren van een tunnel en het daarbij benodigde bouwtransport hierin, vormen naast de mogelijkheid van zettingen aan het maaiveld een belangrijk aandachtspunt bij het ontwerp van tunnels. Trillingen kunnen immers schade en/of hinder veroorzaken in nabijgelegen woningen. In een vroegtijdig stadium is kennis over de te verwachten trillingen via een predictie gewenst opdat zonodig nog maatregelen kunnen worden getroffen.

Met een dergelijke predictie willen we van tevoren, ruim op tijd, schatten wat het trillingsniveau ten gevolge van het boren van de tunnel en het bouwtransport in de tunnel ter plaatse van kritieke punten zal zijn.

In deze bijdrage aan de studie “predictie fase 2” komt vooral de predictie van trillingen die ten gevolge van booractiviteiten (onderscheiden in boren, plaatsen van elementen en onderhoud) ontstaan, aan de orde. Daartoe wordt uit gegaan van reeds beschikbare meetresultaten. Trillingen ten gevolge van bouwtransport worden niet besproken. In het geval van de tunnel onder het Groene Hart zijn deze hoogstwaarschijnlijk ook niet maatgevend.

Doelstelling. Predicties van trillingen door booractiviteiten

Via een predictie willen we weten wat de trillingen ten gevolge van booractiviteiten (tijdelijk, bijvoorbeeld over tien dagen) zullen zijn. Waar het gaat om de mogelijkheid van schade is vooral de topwaarde van de (deeltjes)snelheid V_{top} (SBR deel A, [1]) van belang. Voor de beoordeling van trillingshinder gaat de aandacht vooral naar $V_{eff,max}$ en V_{per} (SBR deel B [2]).

In principe betreft het trillingsniveaus op het maaiveld. In geval van woningen op staal gefundeerd zal nog rekening moeten gehouden met een eventuele verhoging van trillingsniveaus ten gevolge van de dynamische eigenschappen van vloeren e.d. en de overgang van trillingen van de bodem naar de fundatie. Indien het gaat om woningen op palen gefundeerd dan zijn mogelijk ook trillingswaarden op het niveau van de paalpunten nodig.

2.2 Predictiemodel. Numeriek versus Empirie

Uit reeds vergaarde informatie (metingen) (ref [3], zie figuur 1) weten we dat schade ten gevolge van trillingen die tijdens het boren optreden zeer waarschijnlijk geen rol speelt. Gemeten maximale trillingsniveaus in termen van deeltjessnelheid aan het maaiveld, op 20 à 30 meter van de tunnel, bevinden zich veelal tussen 0,2 en 1,0 mm/s, ruim beneden de grenswaarden die SBR deel A noemt.

De trillingen die ten gevolge van het bouwtransport ontstaan zijn sterk afhankelijk van de wijze waarop dat plaatsvindt. In ieder geval zijn hiervoor maatregelen te treffen die maken dat deze trillingsbron niet maatgevend wordt.

Wetende dat schade aan nabijgelegen woningen tengevolge van trillingen door booractiviteiten vrijwel zeker geen rol van betekenis speelt komt de nadruk te liggen op de prognose van (tijdelijke) trillingshinder tijdens de passage van de TBM.

Er zijn in principe twee methoden om het trillingsniveau ten gevolge van het boren van een tunnel te bepalen:

- Numerieke predictie (bijvoorbeeld via een 2D of 3D EEM model of BOR)
- Empirisch gebruik van metingen in vergelijkbare omstandigheden.

Een numerieke predictie vraagt onder andere een bronmodel voor het boren. Op dit moment is echter zo'n bronmodel niet bekend. Bovendien is er niet voldoende informatie om een betrouwbaar numeriek predictie model te valideren. Wat de metingen (Voormeting aannemer) leren is dat er grote variatie is in de tijd bij overigens nominaal gelijke omstandigheden (gelijk bodemprofiel, diameter TBM enz). Sommige metingen laten zelfs maatgevende trillingsniveau's zien terwijl de TBM stil staat. Kennelijk kunnen er tijdens het onderhoud of aanbrengen van de lining maatgevende toestanden optreden. Dit alles maakt het ontwikkelen van een bronmodel ten behoeve van een numerieke predictie tot een moeilijke zaak.

De ervaring leert dat aan de betrouwbaarheid van numerieke predicties, zelfs afgezien van de onzekerheden van een nog te ontwikkelen bronmodel, niet al te grote waarde moet worden gehecht. Vele berekeningen, zelfs die uitgevoerd met de eindige elementenmethode op min of meer nominaal gelijke situaties laten soms grote onderlinge verschillen zien. Een factor 3,0 à 5,0 is mogelijk. Een en ander is mogelijk nog te verbeteren door steeds meer gedetailleerde informatie mee te nemen, doch het is niet zeker dat in een nieuwe situatie mag worden verwacht dat er steeds zulke gedetailleerde informatie beschikbaar is.

Metingen laten zien dat in het algemeen de maximale trillingsniveau's (RPPV) aan het maaiveld op een afstand van de TBM-as van 20 m à 30 m zich tussen 0,2 en 1,0 mm/s bevinden. Als we zouden uitgaan van een gemiddelde van 0,45 mm/s dan zouden de afwijkingen al minder zijn dan de huidige variaties van de op numerieke wijze verkregen predicties. Het vermoeden is aanwezig dat met het meenemen van de diameter van de TBM en een classificatie van de bodem in bijvoorbeeld de categorieën stijf, gemiddeld en slap, een verdere reductie van de onzekerheden is te behalen. Dit is de reden dat in deze bijdrage gekozen is voor een empirisch predictiemodel. Het verdere voordeel van een empirisch model is dat de validatie inherent is.

2.3 Trillingsmetingen

2.3.1 Algemeen (Protocol)

De predicties in deze bijdrage zijn gebaseerd op:

- 1) Metingen uit het verleden (Algemene database)
- 2) Metingen tijdens de uitvoering (Voormetingen)

Tijdens het *ontwerp* van een tunnel dient een predictie van V_{top} , $V_{eff,max}$ en V_{per} te worden gemaakt, rekening houdend met de kleinste afstand tussen de as van de TBM en de dichtbijzijnde bouwwerken.

Momenteel is er weinig informatie in termen van $V_{\text{eff,max}}$ en V_{per} . Er zijn hiervan weinig directe metingen bekend. Alleen in de voormeting van de aannemer, [4], worden waarden gegeven. Meer informatie zou kunnen worden afgeleid van eerder gedane metingen uit het verleden en de voormeting bij Achthoven, doch dat is hier niet gedaan. In eerste benadering kan op basis van de voormeting van de aannemer veilig worden gesteld dat $V_{\text{eff,max}} = V_{\text{top}}/\sqrt{2}$.

In het geval dat het voorspelde trillingsniveau in termen van $V_{\text{eff,max}}$ zodanig is dat trillingshinder mag worden verwacht zal al tijdens het ontwerp rekening moeten worden gehouden met maatregelen waarbij ook een goed overleg met potentieel gehinderden een grote rol speelt.

Elke *uitvoering* van een tunnel geeft een mogelijkheid extra gegevens aan de algemene database van trillingen uit het verleden toe te voegen. Diameter en type van de TBM zijn dan gekozen en specifieke bodemopbouw is beschikbaar.

Denk daarbij aan het meten van de trillingen aan het maaiveld, op één of meer afstanden van de as van de TBM, bijvoorbeeld op 20 tot 50 meter, op een goed gekozen plek langs het tracé en wel zodanig, dat de resultaten van een dergelijke voormeting ook nog kunnen worden gebruikt bij het kiezen van eventuele maatregelen. Begonnen wordt op een strategische plaats langs het tracé. Tijdens de passage van het boorfront kunnen de maximale deeltjessnelheid (topwaarde) en de maximale effectieve waarde van deze snelheid worden bepaald. Zelfs kan hieruit informatie over een V_{per} worden afgeleid. Onderscheid dient daarbij te worden gemaakt in drie situaties: boren, het plaatsen van elementen en het onderhoud. Voor elk van deze situaties dienen dan V_{top} en $V_{\text{eff,max}}$ te worden bepaald en vastgelegd.

Opm.: Indien grote variatie in de bodemgesteldheid optreden is te overwegen het aantal plekken langs het tracé waar een voormeting wordt verricht uit te breiden.

Bij nog niet voldoende onderbouwde relaties tussen trillingsniveau (V_{top}), afstand, bodem en type en diameter TBM is het goed de meetresultaten in een tabel op te nemen en elke gelegenheid (tijdens de uitvoering van een boortunnel) te gebruiken om hieraan extra informatie toe te voegen daarbij noterend:

Nr.
 Werk
 Type TMB
 Diameter TBM
 Bodem (stijf, gemiddeld, slap), beschrijving of β *)
 Diepteligging van de tunnel
 Afstand TBM-as - meetpunt
 V_{top} in mm/s
 $V_{\text{eff,max}}$ in mm/s
 V_{per}

Opmerkingen:

Een dergelijke tabel laat al snel zien in hoeverre V_{top} afhankelijk is van de genoemde grootheden zoals type en diameter TBM, bodemgesteldheid en afstand.

*) Volgens [3] geldt voor β :

$\beta=0.25$ voor slappe grond met $q_c < 5\text{Mpa}$

$\beta=1.00$ voor stijve grond met $q_c > 15\text{Mpa}$

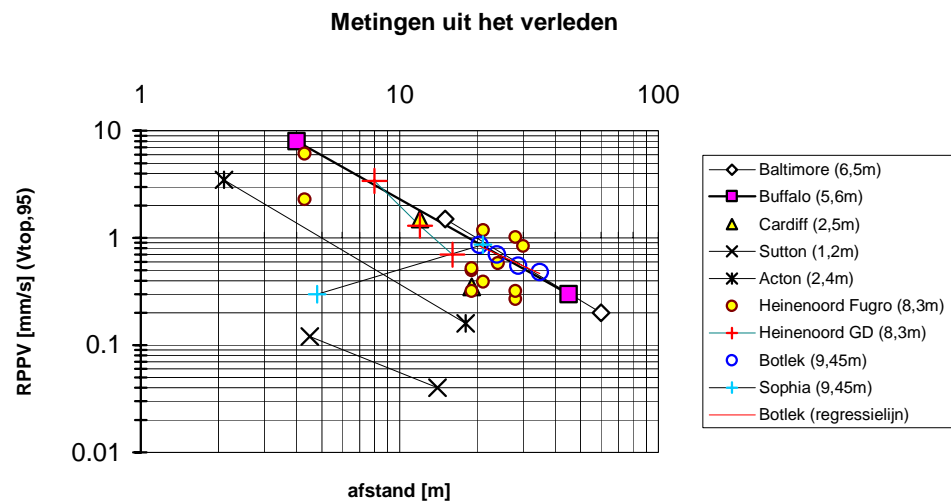
lineaire interpolatie voor β als $5 < q_c < 15\text{Mpa}$

Op de wat langere termijn kunnen dergelijke stukjes inzicht cumuleren tot een empirisch prognosemodel dat in staat is tijdens de ontwerpfase reeds een redelijk betrouwbare voorspelling te doen van de trillingen ten gevolge van booractiviteiten (boren, plaatsen segmenten, onderhoud).

2.3.2 Predicties op basis van trillingsmetingen

a) Metingen uit het verleden

Eerste informatiebron leveren de metingen uit het verleden. In de hieronder aangegeven figuur 1, ontleend aan het rapport van Holland Railconsult “Trillingen Boortunnels Bouwfase” d.d. 23 juli 2002, referentie [3], zijn voor een aantal tunnels de gemeten maximale deeltjessnelheid (RPPV) aan het maaiveld uitgezet als functie van de afstand (schuin door de grond) tot de as van de TBM. De diameters van de tunnels lopen van 1,8 m tot 9,45 m. Boven een diameter van ca 6 m is beperkte invloed van de grootte van de diameter te bespeuren. Er is geen onderscheid gemaakt naar type TBM en de bodemeigenschappen.



Figuur 2-1 Metingen uit het verleden. Ontleend aan [3]

Reeds bij een korte beschouwing van figuur 1 is te zien dat de maximale deeltjessnelheid (RPPV) die in het volgende verloop gelijk wordt gesteld aan trillingssterkte volgens SBR deel A (V_{top}) op een relevante afstand van 20 à 30 m vanaf de as van de TBM voor het overgrote deel van de gevallen (95%) beneden 1 mm/s zal blijven. Dit trillingsniveau ligt ruim beneden de grenswaarden van SBR deel A. Schade ten gevolge van deze trillingen is daarmee niet te verwachten.

De maximale voortschrijdende effectieve waarde (SBR 2) van de bewegingen aan het maaiveld (V_{\max}) wordt geschat op 0,70 mm/s. Deze treedt vermoedelijk zelden op. Meestal zal het niveau van V_{\max} van de orde 0,5 mm/s zijn.

Een tweede informatiebron zijn de voormetingen. Daarvan zijn er in het geval van de tunnel onder het Groene Hart, twee. Te weten: de voormeting uitgevoerd door de aannemer [3]. [4] en die welke is uitgevoerd bij Achthoven (F511) [5].

b) Voormeting Groene Hart tunnel door de aannemer

Van 25 maart 2002 tot en met 5 april 2002 zijn bij de Groene Hart tunnel trillingsmetingen uitgevoerd [4]. Deze metingen zijn uitgevoerd aan het maaiveld op een punt aan het maaiveld, ca 41 meter vanuit de as van de tunnel, in drie onderling loodrechte richtingen. Volgens [3] werd voor elk tijdsinterval van 16,6 seconde onder andere de piekwaarde van de trillingssnelheid opgeslagen, tezamen met de dominante frequentie.

In bijlage van [3] worden de dataplots gegeven.

Aan deze dataplots is de volgende tabel ontleend. Per dag is het maximum bepaald.

Tabel 1, Maximale trillingssnelheid V_{top} [mm/s] [3] [4]

Datum	Meetpunt 1V	Meetpunt 1H1	Meetpunt 1H2	Vtop	Situatie
	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	
25-03-02	0.16	0.03	0.32	0.32	Onderhoud
26-03-02	0.39	0.03	0.52	0.52	Boren
27-03-02	0.11	0.03	0.20	0.20	Boren
28-03-02	0.99	0.03	0.42	0.99	Boren
29-03-02	0.19	0.03	0.23	0.23	Elementen
30-03-02	0.17	0.03	0.34	0.34	Boren
31-03-02	0.12	0.03	0.21	0.21	Boren
01-04-02	0.22	0.03	0.46	0.46	Elementen
02-04-02	0.39	0.03	0.25	0.40	Boren
03-03-02	0.19	0.03	0.15	0.19	Elementen

Opmerkingen

1V Verticaal

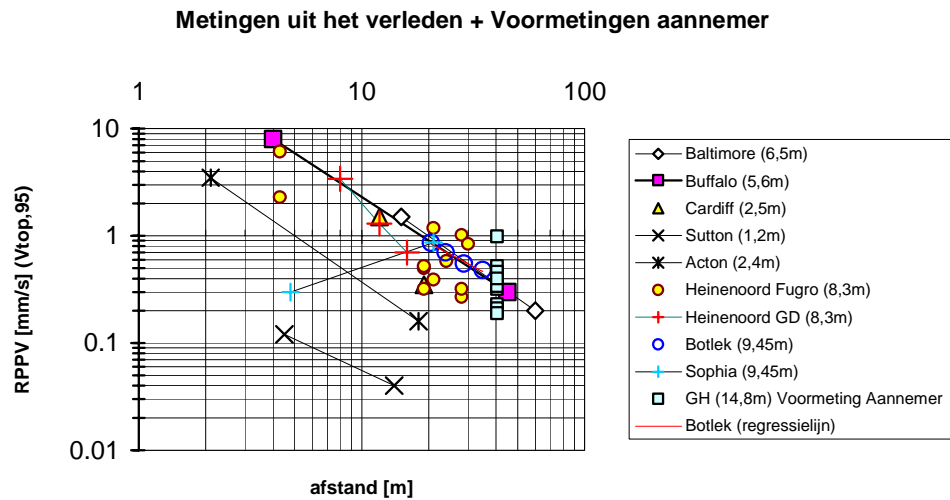
1H1 Horizontaal loodrecht op de tunnelas

1H2 Horizontaal evenwijdig aan de tunnelas

Meetpunt 1H1 levert steeds dezelfde lage maximale waarden. De meting in deze richting wordt niet vertrouwd.

Op 28 maart 2002 kwamen, tijdens het onderhoud, uitzonderlijk hoge waarden voor ten opzichte van de andere dagen. V_{top} bereikte 2,10 mm/s! Het is niet duidelijk wat er toen gebeurde. Ondanks de relatief hoge waarde blijft het trillingsniveau nog steeds onder de grenswaarden genoemd in de SBR, deel A.

In figuur 2 zijn de waarden V_{top} grafisch aangegeven. Daarbij is de uitschieter op 28 maart tijdens het onderhoud ($V_{\text{top}}=2,10$ mm/s), niet gebruikt.



Figuur 2-2, Metingen uit het verleden uitgebreid met voormetingen door aannemer

Reeds bij een korte beschouwing is te zien dat, ook na toevoeging van (voor)metingen [4], de maximale deeltjessnelheid (RPPV) die in het volgende verloop steeds gelijk kan worden gesteld aan trillingssterkte volgens SBR, deel A (V_{top}), op een afstand van 30 meter vanaf de as TBM voor het overgrote deel van de gevallen beneden 1 mm/s zal blijven. Dit trillingsniveau ligt ruim beneden de grenswaarden van SBR, deel A. Schade ten gevolge van deze trillingen is daarmee niet te verwachten.

De maximale voortschrijdende effectieve waarde (SBR, deel B) van de bewegingen aan het maaiveld (V_{max}) blijft ook na toevoeging van de metingen [4] geschat op ca 0,70 mm/s. Dit treedt vermoedelijk zelden op. Meestal zal het niveau van V_{max} van de orde 0,5 mm/s zijn.

In het rapport [4] zijn ook gemeten waarden van $V_{eff,max}$ opgenomen

In de volgende tabel (tabel 2) is hiervan een samenvatting gegeven onderscheiden naar activiteit (boren, plaatsn van elementen en onderhoud) en periode (dag, avond en nacht).

Tabel 2, $V_{eff,max}$ [mm/s]

Situatie	Dag 07.00-19.00	Avond 19.00-23.00	Nacht 23.00-07.00
Boren	0.65	0.15	0.15
Elementen	0.13	0.30	0.20
Onderhoud	1.32	0.19	?

Op basis van bovenstaande cijfers wordt niet voldaan aan de streefwaarden van SBR deel B waar het gaat om woningen. Dit omdat $V_{eff,max} > A_2 = 0,15$ gedurende de nacht. Wel wordt voldaan aan de richtlijn HSL607 ($V_{eff,max} < A_2 = 0,4$).

De niveaus overdag vormen geen probleem daar het hier gaat om continue of herhaald voorkomende trillingen over een korte periode.

In [4] is ook vanuit de meetgegevens de trillingssterkte V_{per} berekend. Onderscheid is gemaakt naar de beoordelingsperiode volgens SBR deel B (dag, avond en nacht). Voor elke meetdag (25 maart t/m 3 april 2002) is in onderstaande tabel het maximum genoteerd.

Tabel 3, V_{per} [mm/s]

Datum	Dag 07.00-19.00	Avond 19.00-23.00	Nacht 23.00-07.00
25-03-02	0.02	0.02	0.02
26-03-02	0.03	0.04	0.03
27-03-02	0.02	0.07	0.04
28-03-02	0.07	0.02	0.03
29-03-02	0.04	0.04	0.05
30-03-02	0.04	0.03	0.04
31-03-02	0.03	0.03	0.02
01-04-02	0.02	0.03	0.02
02-04-02	0.02	0.02	0.02
03-04-02	0.01	0.01	0.01

Met bovenstaande gegevens is niet uit te sluiten dat hinder in woningen optreedt. Het gaat daarbij om de lichte overschrijding gedurende de avond op 27 maart 2002.

Opm.: Bij een dynamische vergroting van de bewegingen van vloeren ten opzichte van "free-field" bewegingen aan het maaiveld geldt deze conclusie in sterkere mate.

c) Voormeting Groene Hart tunnel bij Achthoven (F511)

In het Meetrapport trillingsmetingen Groene Hart Tunnel van TNO d.d. 14 juni 2002, referentie [5] is verslag gedaan van een dagmeting nabij Achthoven. Gedurende deze dag is vanaf 13.00u om de minuut, over een tijdsinterval van 32 seconden, de maximale snelheid bepaald in 42 kanalen. De meetresultaten in de kanalen 1 t/m 12 en 16 t/m 27 lijken betrouwbaar en zijn hieronder gebruikt.

Van elk meetpunt is de locatie in x- en y-coördinaten gegeven. De horizontale afstand tussen het meetpunt en de as van de TBM is berekend uit de afstand van het betreffende meetpunt tot een lijn die de zijkant van de TBM gedurende de meetdag doorliep van (x_{begin}, y_{begin}) tot (x_{eind}, y_{eind}) , vermeerderd met de halve diameter.

In tabel 4 zijn van de betrouwbaar geachte metingen de maxima aangegeven.

Tabel 4 Maximale pieksnelheid V_{top} [mm/s] in respectievelijk Z-, Y- en X-richting. Dagmeting

kanaal	meetpunt	Z-ri mm/s	Y-ri mm/s	X-ri mm/s	V_{top} mm/s	R_{hor} m	R m
1-3	M1	0.55	0.94	1.11	1.11	48.85	56.30
4-6	M2	0.22	0.75	0.56	0.75	47.28	54.95
7-9	M3	0.16	0.48	0.56	0.56	49.28	56.68
10-12	M4	0.12	0.18	0.24	0.24	77.33	82.34
13-15	M5	3.46	4.42	5.56	5.56	17.37	

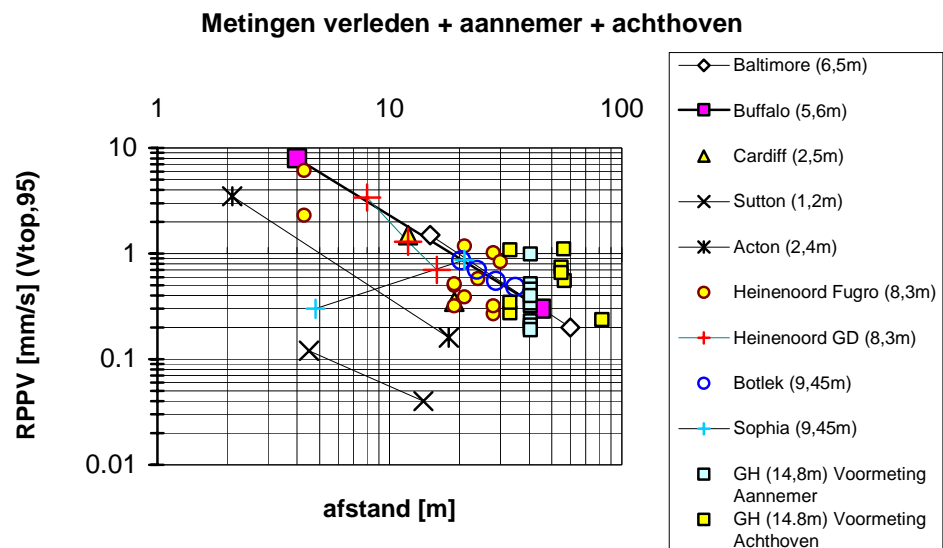
kanaal	meetpunt	Z-ri	Y-ri	X-ri	V _{top}	R _{hor}	R
		mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	m	m
16-18	M6	0.17	0.66	0.40	0.66	47.42	54.90
19-21	M7	1.08	0.96	0.52	1.08	17.45	32.99
22-24	M8	0.18	0.22	0.27	0.27	17.45	32.99
25-27	M9	0.18	0.00	0.34	0.34	17.45	32.99
28-30	M10	8.09	8.46	6.92	8.46	47.43	
31-33	D1	2.74	5.45	8.85	8.85	47.28	
34-36	D2	11.20	8.08	2.65	8.08	77.33	
37-39	D3	1.84	6.36	11.48	11.48	27.01	
40-42	D4	15.14	15.06	10.66	15.14	27.43	

Opmerkingen:

- Meetpunten M5, M10 en D1 t/m D4 vervallen
- Z-ri Verticaal
- Y-ri Horizontaal loodrecht op tunnel as
- X-ri Horizontaal evenwijdig aan tunnelas
- R_{hor} Lengte van de horizontale projectie van de afstand R
(De as van de TBM ligt 28m onder maaiveld)

Er is geen onderscheid gemaakt naar de situaties boren, plaatsen van elementen en het onderhoud. Wel is uit de voormeting gebleken dat de grootste trillingssterktes worden gemeten tijdens het plaatsen van de segmenten. De grootste waarde die tijdens het plaatsen van segmenten is gemeten, bedraagt 1,11 mm/s. Ook hier blijkt weer dat voor schade volgens SBR deel A niet hoeft te worden gevreesd.

In figuur 2 - 3 zijn de meetresultaten verkregen bij Achthoven grafisch toegevoegd.



Figuur 2-3, Metingen uit het verleden + voormetingen van aannemer en bij Achthoven

Er is in figuur 2-3 geen onderscheid gemaakt naar type TBM en bodemgesteldheid.

2.3.3 Predicties Groene Hart tunnel bij Patrimonium Park

Maximale snelheid V_{top} of $V_{top,95}$, $V_{eff,max}$ en V_{per}

Uit figuur 3 kan onder de veronderstelling dat er geen verschil tussen de bewegingen van een fundatie ten opzichte van die aan het vrije maaiveld (bij afwezigheid van de woning) bestaat, direct worden gezien dat op een afstand van 20 m of meer de maximale snelheid V_{top} beneden 1,2 mm/s blijft. Praktisch wordt hier gesteld dat 95% kans aanwezig is dat V_{top} onder de snelheid van 1,2 mm/s blijft. Vandaar de aanduiding $V_{top,95}$.

Uit de verzamelde meetgegevens kan ook een formule worden afgeleid die een snelheidsgrens aangeeft met 95% overschrijdingskans. In [6] en [7] is reeds een dergelijke formule genoemd.

$$V_{top,95} = 10 * \beta * D * R^{-n} \quad (1)$$

De factor β hangt af van de bodemeigenschappen. (0,25 voor een slappe bodem en 1,00 voor een stijve bodem). D is de uitwendige diameter van de TBM, R is de afstand in meter en de exponent n is ongeveer gelijk aan 1,0.

Een bezwaar van deze formule is onduidelijkheid met betrekking tot dimensies. Hier wordt tentatief de volgende (predictie) formule voorgesteld:

$$V_{top,95} = \beta * \left(\frac{R}{D}\right)^{-1.36} * \gamma_{TYP} * \gamma_{dyn} * 10 \text{ mm/s} \quad (2)$$

Hierin is:

$V_{top,95}$ 5% overschrijdingsgrens van V_{top}

β een factor die de bodemgesteldheid meeneemt. Neem vooralsnog $\beta=0.40$ als een goed gemiddelde bij gebrek aan voldoende onderscheidende informatie;

R de afstand in meters tussen as van de tunnel en het beschouwd punt op mv. Hierin is de diepteligging van de TBM meegenomen;

D de (uitwendige) diameter van de TBM in meters;

γ_{TYP} factor die de invloed van het type TBM meeneemt. Neem vooralsnog $\gamma_{TYP}=1.0$ bij gebrek aan onderscheidende informatie;

γ_{dyn} factor $V_{top,95}(\text{vloer})/V_{top,95}(\text{maaiveld})$. Neem vooralsnog $\gamma_{dyn}=1.0$;

Verder geldt volgens [7]

$$V_{top,50} \approx \frac{1}{2.2} V_{top,95} \quad (3)$$

Bij gebrek aan voldoende informatie wordt gesteld:

$$V_{\text{eff,max},95} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} V_{\text{top},95} \quad (4)$$

Met bovenstaande formule (2) t/m (4) zijn in tabel 5 voor de Groene Harttunnel met $D=14.8\text{m}$, $\gamma_{\text{dyn}}=1$ en $\gamma_{\text{TP}}=1$ een aantal predicties weergegeven onder de aanname dat de as van de Groene Hart Tunnel 28 m onder het maaiveld ligt:

Tabel 5, Predicties $V_{\text{top},95}$ Groen Hart tunnel

Afstand R	R (hor)	$V_{\text{top},95}$	$V_{\text{top},50}$	$V_{\text{eff,max},95}$	$V_{\text{eff,max},50}$	$\mu V/\sigma V$	Meetpnt
M	m	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	mm/s	-
28.00	0	1.68	0.76	1.18	0.54	0.85/0.44	
29.73	10	1.55	0.70	1.10	0.50	0.79/0.41	
31.76	15	1.42	0.65	1.00	0.45	0.73/0.37	
34.40	20	1.27	0.58	0.90	0.41	0.65/0.33	
41.03	30	1.00	0.45	0.71	0.32	0.51/0.26	
48.83	40	0.79	0.36	0.56	0.25	0.40/0.21	
T.b.v. vergelijking met voormeting bij Achthoven							
56.30	48.85	0.65	0.29	0.46	0.21	0.33/0.17	M1
54.95	47.25	0.67	0.30	0.47	0.22	0.34/0.18	M2
56.68	49.28	0.64	0.29	0.45	0.21	0.33/0.17	M3
82.34	77.33	0.39	0.18	0.28	0.13	0.20/0.10	M4
54.90	47.42	0.67	0.31	0.47	0.21	0.35/0.17	M6
32.99	17.45	1.34	0.61	0.95	0.43	0.68/0.35	M7-M9
T.b.v. vergelijking met voormeting aannemer							
40.50	29.26	1.02	0.46	0.72	0.33	0.52/0.27	

Opmerkingen:

Voor V_{top} ($=\max(V_x, V_y, V_z)$) is een log-normale verdeling aangenomen. Uit $V_{\text{top},95}$ en $V_{\text{top},50}$ is het rekenkundig gemiddelde μV en de standaardafwijking σV van V_{top} geschat. R(hor) is de horizontale projectie van de afstand tussen as TBM en het responsie punt.

Op de genoemde afstanden is geen trillingsschade aan woningen te verwachten. Steeds blijft $V_{\text{top},95}$ de strengste grenswaarde die SBR deel A, [1], noemt (Zie 10.3.6).

Voor een beoordeling op trillingshinder volgens SBR deel B, [2], zijn $V_{\text{eff,max},95}$ en V_{per} nodig. Getoetst wordt op $V_{\text{eff,max},95} < A_2$ en $V_{\text{per}} < A_3$. Indien aan beide voorwaarden wordt voldaan dan wordt geacht geen trillingshinder op te treden. De streefwaarden A_2 en A_3 hangen onder andere af van de beoordelingsperiode (dag, avond of nacht), de gebouwfunctie en of het gaat om een langdurig of kortdurend aanwezige trillingen.

Via de voormeting van de aannemer [4] is wat bekend van V_{per} . Voor de Groene Hart tunnel ($D=14.8\text{m}$) werd op een (kortste) afstand R van ca 40.5 meter, tijdens een avondperiode, een $V_{\text{per}}=0.07$ afgeleid. Voor andere afstanden wordt voor de tunnel Groene Hart in eerste benadering de volgende predictie voorgesteld:

$$V_{per} = 0.275 * \left(\frac{R}{D}\right)^{-1.36} * \gamma_{TYP} * \gamma_{dyn} \quad [mm/s] \quad (5)$$

Deze formule volgt onder de veronderstelling dat V_{per} evenredig is met $V_{top,95}$ en daarmee evenredig met de term $(R/D)^{-1.36}$ uit formule (3).

Opmerking: de factor 0,275 in (5) volgt uit $(40.5/14.8)^{1.36} * 0.07$.

Met $V_{per} = V_{top,95}/V_{top,95,gemeten} * V_{per,gemeten}$ en $V_{per,gemeten} = 0.07$ aan het maaiveld (zie tabel 3) op $R=40.5m$ met een diameter D van de TBM gelijk aan $=14.8m$, volgt dan:

$$V_{per} = \beta \left(\frac{R}{D}\right)^{-1.36} * 1 * \gamma_{TYP} * 10 / (\beta \left(\frac{40.5}{14.8}\right)^{-1.36} * 1 * 1 * 10) * 0.07 \quad (6)$$

Enkele predicties met (6) onder de aannamen $\gamma_{dyn} = 1.0$ en $\gamma_{TYP} = 1.0$ zijn in tabel 6 opgenomen.

Tabel 6, Predicties V_{per} voor Groene Hart tunnel

Afstand R	R (hor)	V_{per}
m	m	mm/s
28.00	0	0.11
29.73	10	0.11
31.76	15	0.10
34.40	20	0.09
41.03	30	0.07
48.83	40	0.05

Op afstanden kleiner dan 50 meter is gedurende de avond en de nacht enige trillingshinder niet uit te sluiten. In dat geval geldt volgens SBR B: $A_2=0.15$ en $A_3=0.05$.

2.4 Conclusies / Samenvatting ten aanzien van de Groene Hart tunnel

De resultaten van metingen uit het verleden [3], de voormeting door de aannemer [4] en de voormeting bij Achthoven [5] laten zien dat trillingen ten gevolge van booractiviteiten, onderscheiden in de activiteiten boren, plaatsen van elementen en onderhoud, hoogstwaarschijnlijk geen schade aan woningen in het Patrimonium park zullen veroorzaken.

De voormeting [4] laat zien dat bij het onderhoud de hoogste trillingsniveaus zijn genoteerd. Het is niet duidelijk hoe dat tot stand kwam.

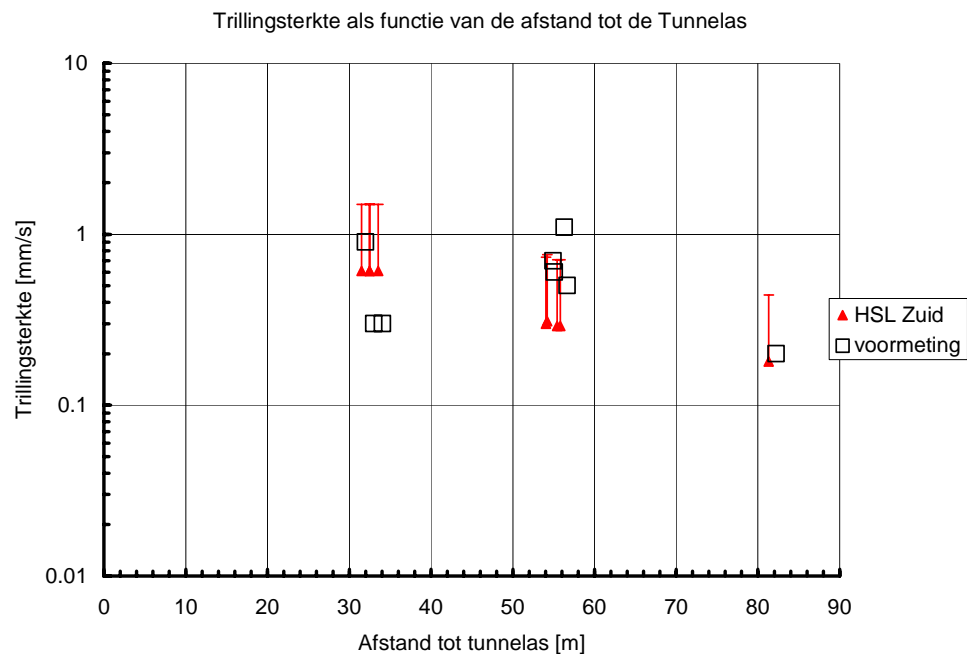
De verwachting is dat het trillingsniveau op het maaiveld ten gevolge van booractiviteiten, op een afstand van 40 meter en meer, in termen van V_{top} , beneden 1.0 mm/s zal blijven.

Voor kleinere afstanden dan 30 m zijn de risico's op schade ten gevolge van ongelijke zettingen waarschijnlijk dominant ten opzichte van het risico op schade ten gevolge van trillingen.

Het is niet uit te sluiten dat ten gevolge van booractiviteiten gedurende enkele dagen lichte trillingshinder optreedt, in die zin dat gedurende de beoordelingsperioden, dag en avond, de streefwaarden van de SBR B kunnen worden overschreden. Een en ander hangt wel af van de dynamische eigenschappen van vloeren en fundering van de beschouwde woning. Trillingen ten gevolge van booractiviteiten gedurende de dag, vormen geen probleem daar in dat geval de streefwaarden A_2 en A_3 hoger mogen worden gekozen.

In goed overleg met bewoners kan duidelijk worden gemaakt dat geen schade aan hun woning ten gevolge van het boren van de tunnel Groene Hart optreedt. Enige hinder gedurende enkele avonden en nachten tijdens de passage van de TBM is echter niet uit te sluiten.

Een samenvatting van de prognoses is weergegeven in Figuur 2 – 4.



Figuur 2 – 4 Samenvatting prognoses HSL Zuid. De weergegeven waarden van de voormeting zijn de maximaal gemeten waarden.

Referenties:

- [1] SBR deel A, Schade aan bouwwerken door trillingen.
augustus 2002
- [2] SBR deel B, Hinder voor personen in gebouwen door trillingen
augustus 2002
- [3] Trillingen Boortunnels Bouwfase
Samenvatting onderzoeken verleden
Holland Railconsult, 23 juli 2002

- [4] Concept Vibration Assessment report etc.
Vibration monitoring during the construction phase of the Groene Hart tunnel
(Voormeting aannemer)
Bouygues/Koop, 19 aug 2002
- [5] Meetrapport trillingsmetingen Groene Hart tunnel,
Voormeting bij Achthoven
TNO 006.22113.01.02, 14 juni 2002
- [6] Ontwikkeling bronmoduul boren van tunnels
Deelplan L420, Deelproject 4
CUR/COB-Uitvoeringscommissie L400, 12 sept 1997
- [7] Validatie Bronmoduul Boren van Tunnels
Deelproject L 450
CUR/COB- Uitvoeringscommissie L400, 19 juni 1998

3 Modelling op basis van EEM, bijdrage HR

3.1 Aanpak

Bij de voormeting in Achthoven waren twee typen trillingen te herkennen:

- Een continue trillingsniveau tijdens het boorproces van de TBM.
- Enkele trillingspieken tijdens het plaatsen van de segmenten in de tunnel.

Voor beide typen trillingen wordt door Holland Railconsult een predictie gedaan. Hierbij wordt gebruik gemaakt van zowel axisymmetrische als 3D eindige elementen modellen.

Er zijn aanwijzingen dat tijdens het boren de trillingen afkomstig zijn van de vijzels [1]. Om dit te modelleren is een axisymmetrisch model ongeschikt aangezien de vijzels hun kracht in de langsrichting van de tunnel uitoefenen. Voor de predictie van de trillingen tijdens het boorproces wordt daarom gebruik gemaakt van een 3D model.

Tijdens het plaatsen van de segmenten in het niet duidelijk waar zich precies de bron van de trillingen bevindt, en in welke richting een kracht wordt uitgeoefend. Wel is duidelijk dat de trillingen in de buurt van de TBM ontstaan, en kan de bron van de trillingen vrij duidelijk tot één punt gelokaliseerd worden. Daarom wordt de aanname gedaan dat de trillingen gemodelleerd kunnen worden met een equivalente puntbron in de tunnel. Voor deze trillingspredictie wordt volstaan met een 2D axisymmetrisch model.

Voor de predictie wordt uitsluitend gebruik gemaakt van de meetpunten op maaiveld bij Achthoven. Hiertoe is besloten omdat er twijfels waren over de betrouwbaarheid van de meetpunten op diepte. De trillingen op maaiveld zijn herleid tot een kracht uitgeoefend door de TBM (3D) of een equivalente puntbron in de tunnel (axisymmetrisch).

De gepresenteerde trillingsniveaus zijn verwachtingswaarden (50% waarden). Het is dus mogelijk dat er in de praktijk hogere trillingsniveaus gemeten worden. Bij de voormeting bleek dat er incidenteel trillingsniveaus kunnen voorkomen die 2 tot 3 keer hoger liggen dan de verwachtingswaarde.

3.1.1 Bepaling bron van trillingen

Voor de bepaling van de bron van de trillingen wordt gebruik gemaakt van de voormeting in Achthoven. Van zowel de trillingen tijdens het boorproces als de trillingen tijdens het plaatsen van de segmenten wordt een representatief trillingssignaal gezocht. Verder wordt er voor de situatie bij Achthoven een puls responsie berekening uitgevoerd met een axisymmetrisch model en met een 3D model. Door nu de gemeten trillingen te deconvolueren met de berekende puls responsie kan een belastingsignaal worden berekend voor zowel de axisymmetrische som als de 3D som.

Als van een systeem een puls responsie bekend is kan door middel van een convolutie de responsie van een willekeurige belasting berekend worden. Voor een convolutie in het frequentie domein geldt:

$$V(\omega) = F(\omega)H(\omega) \quad (1)$$

waarbij $V(\omega)$ = de trillingsnelheid, $F(\omega)$ = de belasting, $H(\omega)$ = de puls responsie en ω = de hoekfrequentie.

Omgekeerd kan het belastingsignaal berekend worden als de trillingsnelheid en een puls responsie bekend is. Dit proces heet deconvolutie.

$$F(\omega) = \frac{V(\omega)}{H(\omega)} \quad (2)$$

Het belastingsignaal dat op deze wijze bij Achthoven wordt berekend, zal ook worden gebruikt bij het Patrimoniumpark om het trillingsniveau te berekenen.

3.1.1.1 Locatie van predictie punten

Het trillingsniveau wordt voorspeld voor punten op het maaiveld, punten op diepte en voor een woning. De locatie van de predictie punten op maaiveld en in de grond is weergegeven in Tabel 1 en Tabel 2. Meetpunten en predictiepunten van Achthoven worden weergegeven met hoofdletters en predictiepunten van de overdrachtsmeting uit 1999 met kleine letters.

Tabel 1 Locatie van predictie punten (overeenkomend met meetpunten van de voormeting bij Achthoven).

predictie punt	soort predictie punt	hor. afstand tot tunnel [m]	diepte [m]
D1	op diepte	38	-28
D2	op diepte	68	-28
D3,D4	op diepte	19	-28
M1,M2,M3,M6,M10	maaiveld	38	0
M5,M7,M8,M9	maaiveld	8	0
M4	maaiveld	68	0

Tabel 2 Locatie van predictie punten (overeenkomend met meetpunten overdrachtsmeting 1999).

predictie punt	soort predictie punt	hor. afstand tot tunnel [m]	diepte [m]
d2	op diepte	14.5	-28
d3	op diepte	24.5	-28
d4	op diepte	34.5	-28
d5	op diepte	44.5	-28
m1	maaiveld	4.5	0
m2	maaiveld	14.5	0
m3	maaiveld	24.5	0
m4	maaiveld	34.5	0
m5	maaiveld	44.5	0

Het trillingsniveau wordt voor de woning voorspeld voor de woning op Patrimoniumpark 26. Deze woning ligt horizontaal circa 25 meter van de tunnel verwijderd.

3.1.2 *Trillingsniveau in de woning*

Bij het Patrimoniumpark bevinden zich enkele woningen dicht bij de tunnel. De kans is groot dat de trillingen van de tunnelboormachine hier voelbaar zijn.

In de woning kunnen op twee manieren het trillingsniveau berekend worden:

- Direct uit het model door aan het model een woning gevuld met lucht toe te voegen.
- Via empirische relaties die het trillingsniveau op maaiveld relateren aan een trillingssniveau in de woning. Hier hoeft dus geen woning in het model te worden opgenomen.

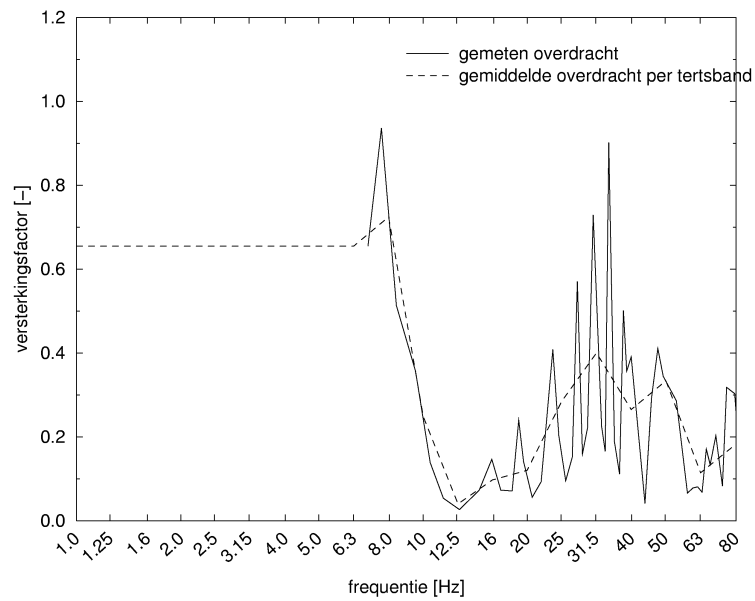
Bij de empirische benadering worden de volgende stappen gevolgd:

- De trillingssnelheid wordt bepaald aan het maaiveld
- Aan de hand van de gemeten overdrachtsverhouding wordt het trillingsniveau op de fundering berekend [[4]].
- Met een empirische relatie wordt het trillingsniveau op de fundering gerelateerd aan het trillingsniveau in de woning.

3.1.2.1 *Overdracht van maaiveld naar fundering.*

Bij de bepaling van de trillingen op funderingsniveau wordt gebruik gemaakt van de door TNO gemeten overdrachtsverhouding bij het Patrimoniumpark. In Figuur 3.1 is te zien hoe deze overdrachtsmeting is overgenomen uit [[4]], en hoe deze in tertsbanden is verdeeld. Voor de lage frequenties die niet zijn gemeten is overdrachtsverhouding bij de laagst gemeten frequentie aangehouden.

Nadat het trillingsniveau op maaiveld is omgezet naar een trillingsniveau per tertsband, kan het trillingsniveau op de fundering per tertsband worden bepaald door middel van vermenigvuldiging met de verhoudingsgetallen uit Tabel 3.



Figuur 3.1 Gemeten overdracht van maaiveld naar fundering en verdeling in tertsbanden.

Tabel 3 Overdracht maaiveld – fundering.

frequentie	versterkingsfactor
1.00	0.6550
1.26	0.6550
1.58	0.6550
2.00	0.6550
2.51	0.6550
3.16	0.6550
3.98	0.6550
5.01	0.6550
6.31	0.6550
7.94	0.7245
10.00	0.2480
12.59	0.0405
15.85	0.0977
19.95	0.1204
25.12	0.2856
31.62	0.4005
39.81	0.2652
50.12	0.3338
63.10	0.1144
79.43	0.1808

3.1.2.2 Overdracht van fundering naar midden vloerveld.

Bij de overdracht van de fundering naar het midden van de vloer is voor de modellen zonder woning gebruik gemaakt van de methode beschreven in de VROM publicatie "Rekenmodel voor de bepaling van trillingssterkte". Hierbij wordt de vloer beschreven als een gedempt massa – veersysteem.

De verhouding tussen de excitatie (fundering) en responsie wordt beschreven als:

$$H(\eta) = \frac{\text{responsie}}{\text{excitatie}} = \frac{1}{\sqrt{(1-\eta^2)^2 + 4\xi^2\eta^2}} \quad (3)$$

waarbij $\eta = f/f_e$ de verhouding tussen de aanstootfrequentie f en de eigenfrequentie f_e van het systeem; ξ = de dempingsmaat van het systeem (verhouding tussen demping en kritische demping).

Voor de woningen in het patrimoniumpark worden de volgende waarden aangehouden:

parameter	waarde	eenheid
f_e	10	Hz
ξ	0.07	-

3.1.3 Afgestraald laagfrequent geluid

Behalve trillingshinder kan er ook hinder ten gevolge van afgestraald laagfrequent geluid in de woningen ontstaan.

Het laagfrequente geluid zal op twee manieren worden berekend:

- Direct uit het model door aan het model een woning gevuld met lucht toe te voegen.
- Via empirische relaties die het trillingsniveau in de woning relateren aan een geluidsniveau in de woning.

Bij de empirische benadering wordt er een aantal stappen gevolgd:

- De trillingssnelheid wordt bepaald in de woning.
- Met een empirische relatie beschreven in [[6]] wordt het trillingsniveau van de vloer gerelateerd aan het geluidsniveau in de woning.

Een vlak (wand, vloer) met oppervlak S dat trilt met een effectieve snelheid v staalt een geluidsvermogen $W = s \cdot r \cdot c \cdot v^2 \cdot S$ uit, waarin s de afstralcoëfficiënt en $r \cdot c$ de akoestische impedantie van lucht. In een omsloten ruimte is het vlak tenminste aan de zijden ingeklemd en is de over het vlak gemiddelde snelheid een fractie $4/\pi^2$ van de effectieve snelheid ter plaatse van de grootste trilling. Het geluidsniveau is dus:

$$L_w = 10 \cdot \log \left(\frac{s \cdot r \cdot c \cdot \left(\frac{4v}{\pi}\right)^2 \cdot S}{W_0} \right) \quad (4)$$

met als referentievermogen $W_0 = 1 \text{ pW}$.

In een omsloten ruimte met volume V , (totaal) oppervlak A en (gemiddelde) absorptiecoëfficiënt a geeft een constant geluidsvermogen W aanleiding tot een geluidsdrumniveau

$$L_p = L_w - 10 \cdot \log\left(\frac{a \cdot A}{4}\right) \quad (5)$$

waarbij:

$T = V / (6 \cdot a \cdot A)$: de nagalmtijd

Bij de beschouwde woning wordt uitgegaan van een ruimte met de volgende waarden:

s	1	[-]
r	1.29	kg/m ³
c	344	m/s
breedte	3.0	m
lengte	5.0	m
hoogte	2.5	m
a	0.1	[-]

3.2 Materiaal parameters

3.2.1 Gegevens bodem

Bij de bepaling van de bodem eigenschappen is gebruik gemaakt van de seismische sonderingen die zijn uitgevoerd langs het tracé van de Groene Hart Tunnel [2], en de interpretatie van het grondonderzoek van de HSL-Zuid [3]. Voor de demping zijn dezelfde waarden gebruikt als bij de fase 1 predictie [1].

De bodemgegevens ter plaatse van de voormeting bij Achthoven staan in Tabel 4, en de bodemgegevens ter plaatse van het Patrimoniumpark staan in Tabel 5. Bij het Patrimoniumpark is de grond aan het maaiveld duidelijk stijver dan bij Achthoven.

Tabel 4 Grondparameters km 28.45 (Voormeting bij Achthoven).

diepte [m]		G_{dyn} [MPa]	ρ [kg/m ³]	ν [-]	C_{schuif} [m/s]	ξ [%]
van	tot					
-1	-1.6	53	1320	0.45	200	3
-1.6	-7	74	2040	0.45	190	3
-7	-9	15	1460	0.45	100	3
-9	-9.8	12	1230	0.45	100	3
-9.8	-11	15	1460	0.45	100	3
-11	-11.8	33	1090	0.45	175	3
-11.8	-23.6	169	2010	0.45	290	3
-23.6	-27.5	172	2040	0.45	290	3
-27.5	-31	222	2040	0.45	330	3
-31	-34	206	2010	0.45	320	3
-34	-38	154	1960	0.45	280	3
-38	-70	147	2010	0.45	270	3

Tabel 5 Grondparameters km27.55 (Patrimoniumpark).

diepte [m]		G_{dyn} [MPa]	ρ [kg/m ³]	ν [-]	C_{schuif} [m/s]	ξ [%]
van	tot					
0	-2	174	1550	0.45	335	3
-2	-7	117	1600	0.45	270	3
-7	-9	82	2040	0.45	200	3
-9	-13.3	60	1950	0.45	175	3
-13.3	-20	147	2010	0.45	270	3
-20	-24.5	338	2010	0.45	410	3
-24.5	-27	158	2010	0.45	280	3
-27	-34	215	2040	0.45	325	3
-34	-50	250	2040	0.45	350	3

3.2.2 Gegevens tunnel

De gehanteerde eigenschappen van de tunnel staan in Tabel 6

Tabel 6 Eigenschappen tunnel

	E [GPa]	ρ [kg/m ³]	ν [-]	ξ [%]	dikte [m]
lining	40	2500	0.20	0.02	0.60
schild	210	7800	0.30	0.01	0.07

3.2.3 Gegevens woning

De gehanteerde materiaal eigenschappen van de woning staan in Tabel 7.

In de eindige elementen modellen zijn de houten vloeren als massieve platen gemodelleerd. In werkelijkheid is de vloer niet massief. De dichtheid is daarom laag gekozen.

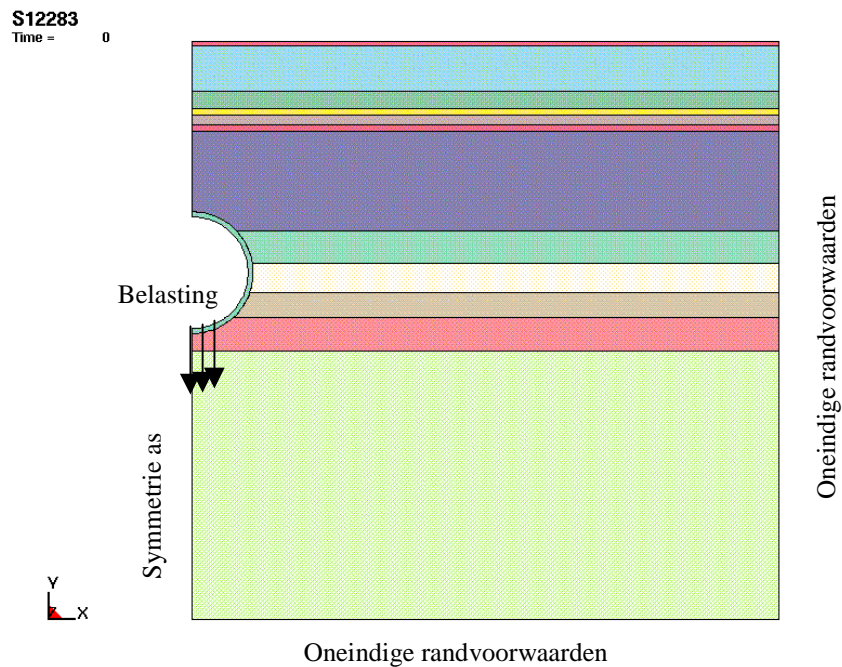
Tabel 7 Eigenschappen woning axisymmetrisch model en 3D model.

	E [MPa]	ρ [kg/m ³]	ν [-]	ξ [%]	dikte [m]
Funderingsbalken	30000	2500	0.20	0.01	0.50
(Houten) Vloeren	10000	200	0.20	0.02	0.20
Muren	10000	2000	0.15	0.01	0.20

3.3 Modelbeschrijving

3.3.1 Axisymmetrisch 2D model

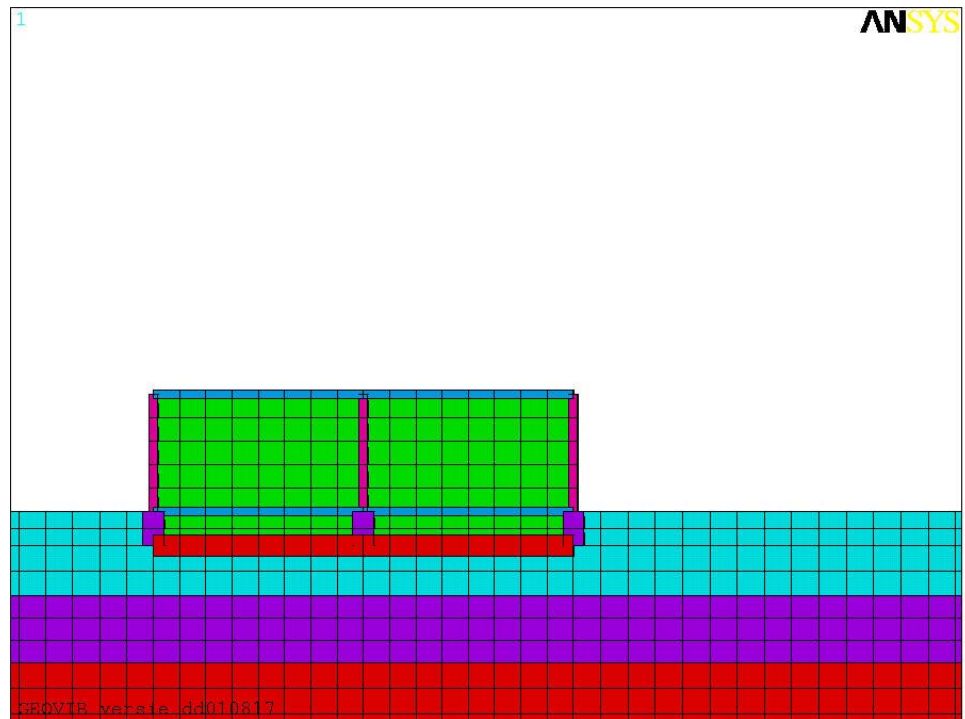
Het axisymmetrisch 2D model bestaat uit het grondlagenprofiel uit Tabel 4 of Tabel 5, waarin de tunnel is opgenomen. De tunnel as ligt precies op de symmetrie as van het model. Als gevolg van de rotatie symmetrie zal de tunnel zich hierdoor als een bol gedragen.



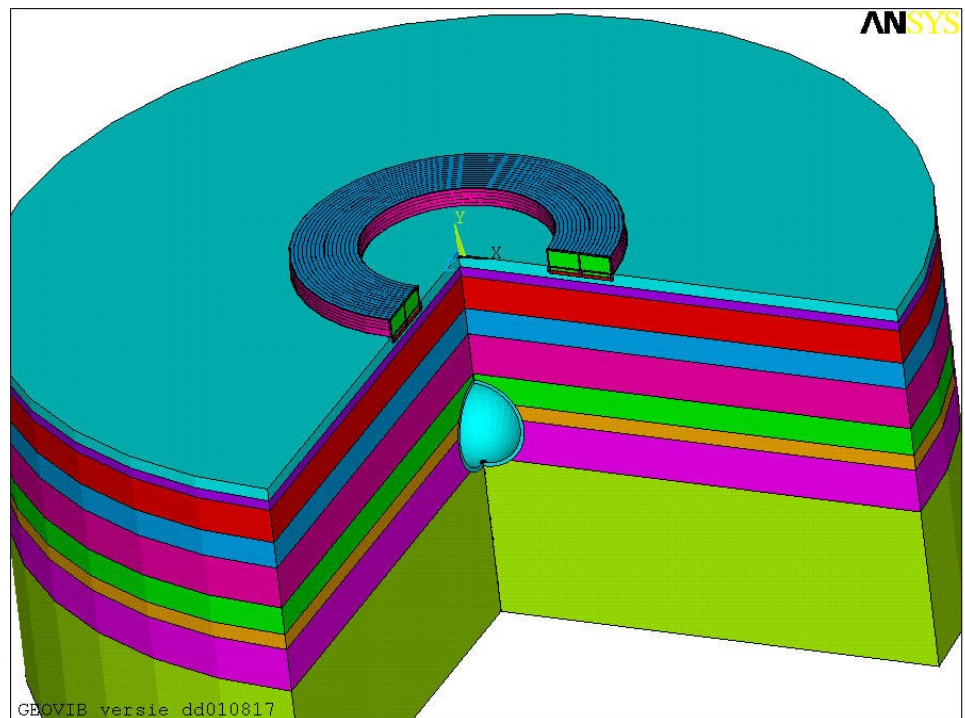
Figuur 3.2 Geometrie axisymmetrisch tunnelmodel

Het model dat op sondering S12283 (km 28.45) is gebaseerd heeft een elementgrootte van 37.5 cm. Bij het model van km 27.55 (sondering S12301) is de elementgrootte 65.8 cm.

Voor de predictie van het laagfrequente geluid is er bij km 27.55 (Patrimoniumpark) ook een axisymmetrisch model gebruikt waarin een woning is opgenomen. Bij de axisymmetrische benadering zal de woning een enigszins onnatuurlijke vorm hebben (Figuur 3.4). Voor de wanden en vloeren van de woning zijn axisymmetrische balk elementen gebruikt. Van binnen is de woning gevuld met elementen met de akoestische materiaal eigenschappen van lucht.



Figuur 3.3. Woning gemodelleerd met axisymmetrische balk elementen.

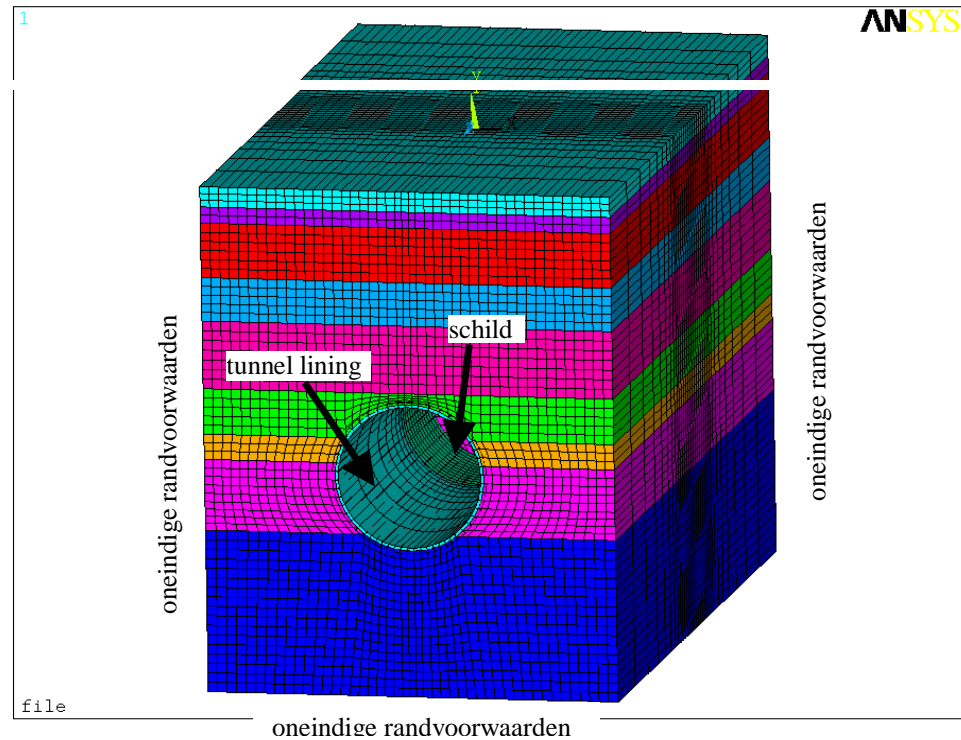


Figuur 3.4 Geometrie axisymmetrisch eindige elementen model met woning.

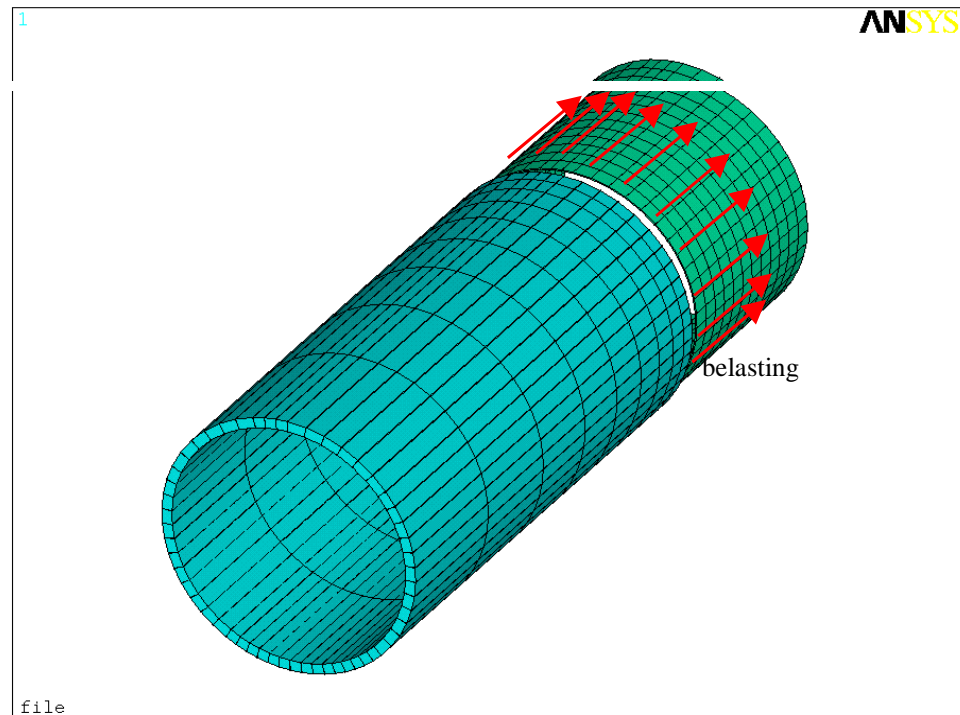
3.3.2 3D model van tunnel

Net als bij het axisymmetrische model, is het 3D model een grondlagenpakket met daarin de tunnel. Een verschil met het 2D model is dat in het 3D model zowel de tunnel lining als het tunnel schild aanwezig zijn.

De tunnelwand en het schild van de TBM zijn gemodelleerd met schaal elementen. Daaromheen is de grond met volume elementen gemodelleerd (Figuur 3.5 en Figuur 3.6). Aan de randen van het model gelden oneindige randvoorwaarden, zodat reflecties geminimaliseerd worden.



Figuur 3.5 Tunnel in grondlagen.



Figuur 3.6 Belasting op schild TBM

Bij de trillingsmetingen bij de Heinenoordtunnel en de Botlek spoortunnel waren er aanwijzingen dat de belangrijkste trillingen afkomstig waren van de vijzelkrachten. Er waren in de trillingssnelheid duidelijk pieken te herkennen met een periode van ongeveer 0.25s. De uitgeoefende belasting in het model is daarom een belasting in de langsrichting van de tunnel op het schild van de TBM.

Er wordt ook een variant van het 3D model doorgerekend waar een woning bestaande uit schaal elementen in is opgenomen. Hierbij worden de trillingen bepaald aan de funderingsbalken en in het midden van een begane vloerveld. De woning is met akoestische elementen gevuld aan de hand van de druk in de akoestische elementen wordt het geluidsniveau bepaald.

3.4 Resultaten

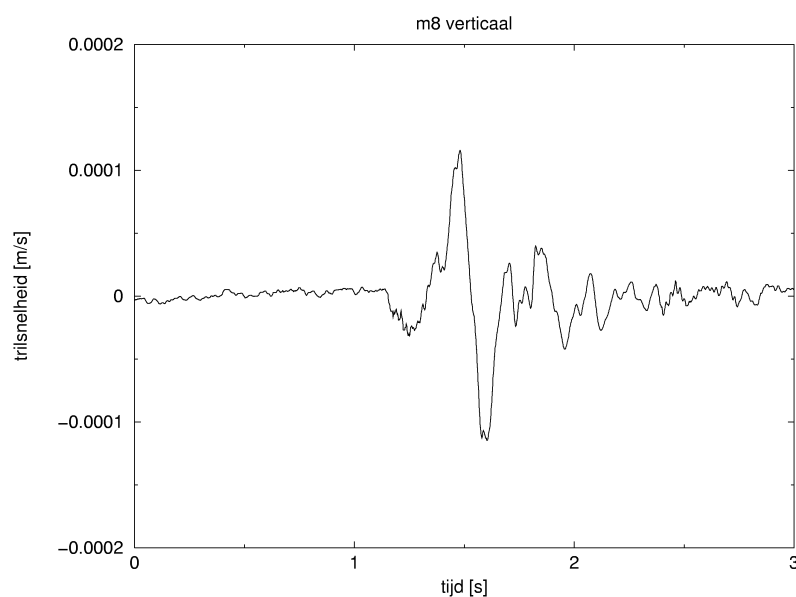
3.4.1 Axisymmetrische modellering

3.4.1.1 Bepaling belastingfunctie

Met het axisymmetrische model wordt het trillingsniveau tijdens het plaatsen van de segmenten gesimuleerd. Daartoe is in de voormeting een representatieve piek in het trillingsniveau gezocht tijdens het plaatsen van de segmenten. De gekozen piek is gevonden in metingnummer 340. Vermoedelijk vond meting 340 plaats op 18:42 op 1 juni 2002. Het maximum van dit meetsignaal is ongeveer gelijk aan het gemiddelde van de maxima boven de 0.1 mm/s. De predicties die met dit signaal worden uitgevoerd kan

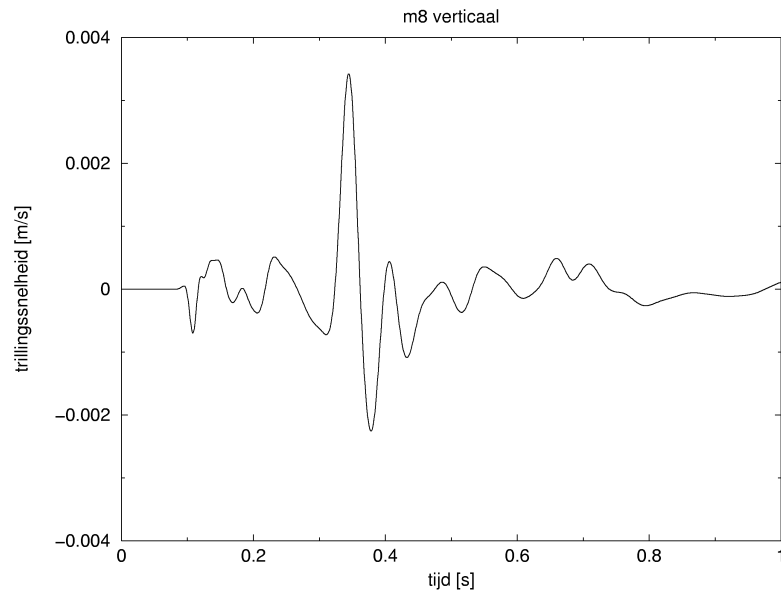
daarom het best als een 50% waarde beschouwd worden. Gedurende de dagmeting is er één keer een piek gemeten die een veel hogere amplitude had dan deze meting. In Figuur 3.7 is de verticale trilsnelheid te zien van één van de meetpunten. Dit meetpunt is gekozen omdat het gemeten trillings signaal relatief vrij van ruis was.

Een uitspraak over de betrouwbaarheid die met dit belastingsignaal bereikt wordt is niet eenvoudig te geven. Bij meetpunt M8, waarop het belastingsignaal gebaseerd is, had de grootste piek 1.5 maal de amplitude van het signaal waarop het krachtsignaal gebaseerd is. Bij meetpunt M7 was de verhouding in amplitude voor dezelfde twee metingen een factor 5.6. Ook de standaarddeviatie wijkt sterk af per meetpunt. Voor de meetwaarden boven 0.1 mm/s wordt een maximale standaarddeviatie gevonden van 0.75 maal de gemiddelde waarde (M7). De inschatting is dat de 95% waarde van de predictie 2.25 maal de 50% waarde bedraagt.

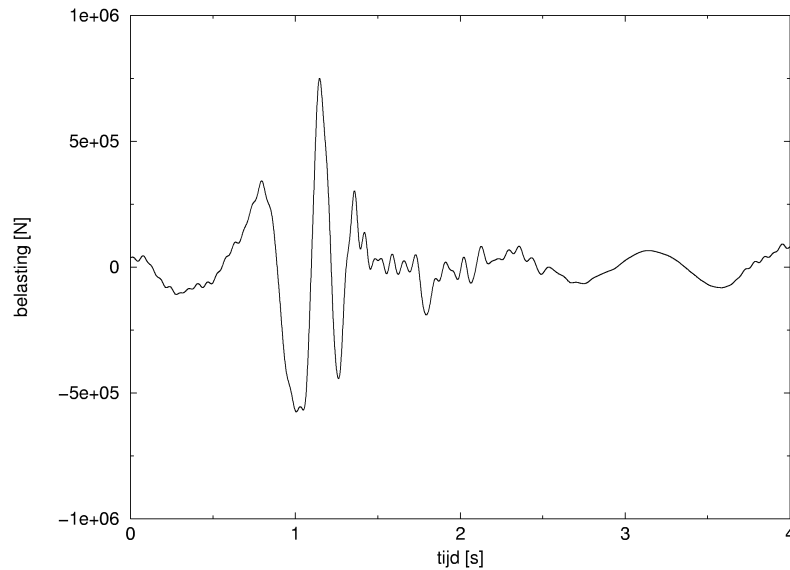


Figuur 3.7 Gemeten trilsnelheid op meetpunt M8 (meting 340).

De aanname wordt gedaan dat de bron van de trillingen zich aan de onderzijde van de tunnel bevindt, op 12m achter het boorfront. Voor de afstand bron – M8 wordt vervolgens een axisymmetrische puls responsie berekening uitgevoerd (Figuur 3.8). Nu de gemeten responsie en de berekende puls responsie bekend zijn, kan door middel van een deconvolutie een belastingfunctie gegenereerd worden (Figuur 3.9). Deze belastingfunctie zal gebruikt worden voor de axisymmetrische predicties bij het Patrimoniumpark.



Figuur 3.8 Axisymmetrische puls responsie berekening voor meetpunt M8.

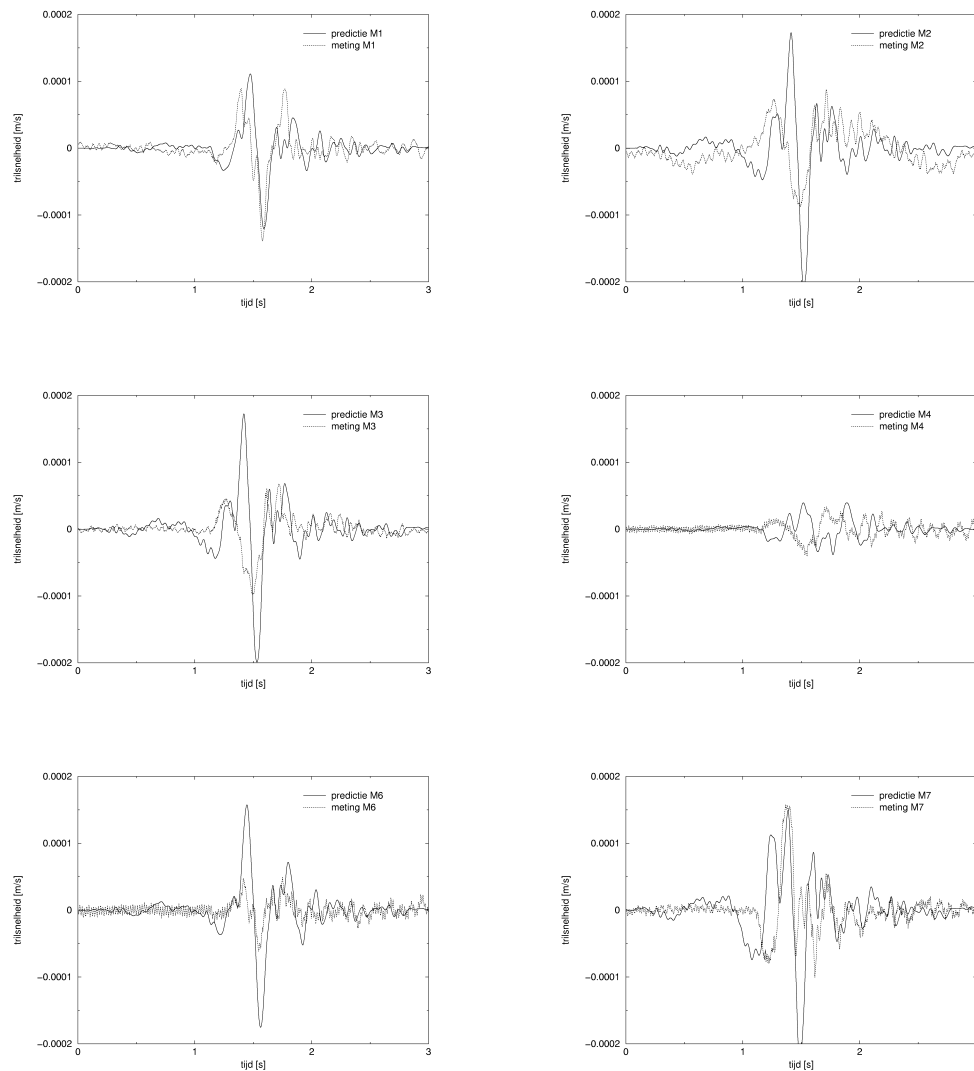


Figuur 3.9 Belastingfunctie voor axisymmetrische berekeningen.

Ter controle is met het belastingsignaal uit Figuur 3.9 weer een predictie gedaan voor de meetpunten van de voormeting. In Figuur 3.10 en Tabel 8 zijn de resultaten hiervan vergeleken met de gemeten signalen van de voormeting. Meetpunten M10 en M5 zijn

niet in de vergelijking opgenomen omdat de meetresultaten hiervan niet betrouwbaar waren.

De overeenkomst tussen de verschillende meetpunten verschilt sterk. Voor punt M1, M4 en M7 is er een redelijke overeenkomst. Voor M2, M3 en M6 is de overeenkomst minder goed. Bij de predictie is een duidelijke afname van het trillingsniveau met de afstand te zien. Voor de meting geldt dit niet altijd. Bij meetpunt M6 wordt bijvoorbeeld een ongeveer 2 keer zo laag trillingsniveau gemeten als bij meetpunt M8, terwijl meetpunt M8 verder van de bron verwijderd lijkt. Mogelijk is in werkelijkheid de uitstraling van trillingen niet in alle richtingen gelijk. Met een axisymmetrisch model valt dit niet te modelleren.



Figuur 3.10 Predictie voor meetpunten voormeting met belastingsignaal uit Figuur 3.9.

Tabel 8 Predictie met krachtsignaal uit Figuur 3.9 en gemeten waarden bij km 28.45.

predictie punt	richting	V_{\max} [mm/s] predictie	V_{\max} [mm/s] gemeten	$V_{\text{eff,max}}$ [-] predictie	$V_{\text{eff,max}}$ [-] gemeten
M1	verticaal	0.12	0.14	0.04	0.04
M2	verticaal	0.20	0.09	0.07	0.03
M3	verticaal	0.20	0.10	0.07	0.03
M4	verticaal	0.04	0.04	0.01	0.01
M6	verticaal	0.18	0.06	0.06	0.02
M7	verticaal	0.23	0.16	0.08	0.05

3.4.1.2 Trillingsniveau op maaiveld en in de grond

De resultaten van de predictie voor het trillingsniveau op maaiveld en in de grond zijn weergegeven in Tabel 9. Over het algemeen is het trillingsniveau in horizontale richting wat kleiner dan het trillingsniveau in verticale richting. Dit was ook te verwachten omdat de belasting in verticale richting is aangebracht. Het is goed mogelijk dat in werkelijkheid de kracht in een andere richting wordt uitgeoefend en dat de verticale component niet de grootste is. Als deze waarden worden vergeleken met andere predicties, moet men ermee rekening houden dat de predictie niet op de hoogste meetwaarde uit de voormeting gebaseerd is. De waarden kunnen het best beschouwd worden als een 50% verwachtingswaarde.

predictie punt	richting	V_{\max}	$V_{\text{eff,max}}$
D1	horizontaal loodrecht	0.05	0.02
D1	verticaal	0.19	0.06
D2	horizontaal loodrecht	0.03	0.01
D2	verticaal	0.11	0.03
D3,D4	horizontaal loodrecht	0.05	0.02
D3,D4	verticaal	0.31	0.10
M1,M2,M3,M6,M10	horizontaal loodrecht	0.11	0.05
M1,M2,M3,M6,M10	verticaal	0.20	0.08
M5,M7,M8,M9	horizontaal loodrecht	0.07	0.04
M5,M7,M8,M9	verticaal	0.37	0.15
M4	horizontaal loodrecht	0.05	0.02
M4	verticaal	0.18	0.07

Tabel 9 Trillingsniveau berekend met axisymmetrisch model.

predictie punt	richting	V_{\max}	$V_{\text{eff,max}}$
d2	horizontaal loodrecht	0.06	0.02
d2	verticaal	0.37	0.11
d3	horizontaal loodrecht	0.06	0.02
d3	verticaal	0.27	0.08
d4	horizontaal loodrecht	0.06	0.02
d4	verticaal	0.20	0.07
d5	horizontaal loodrecht	0.05	0.02
d5	verticaal	0.16	0.05
m1	horizontaal loodrecht	0.05	0.02
m1	verticaal	0.41	0.16
m2	horizontaal loodrecht	0.14	0.06
m2	verticaal	0.30	0.12
m3	horizontaal loodrecht	0.15	0.06
m3	verticaal	0.19	0.08
m4	horizontaal loodrecht	0.13	0.05
m4	verticaal	0.21	0.08
m5	horizontaal loodrecht	0.10	0.04
m5	verticaal	0.21	0.08

3.4.1.3 Trillingsniveau in de woning.

Het trillingsniveau in de woning wordt op twee manieren bepaald:

1. Met empirische relaties uitgaande van het trillingsniveau op maaiveld
2. Direct uit het model waarin ook een woning is opgenomen.

Bij de bepaling van het trillingsniveau in de woning op basis van empirische relaties wordt alleen een waarde gegeven voor de effectieve snelheid. Reden hiervoor is dat er geen fase informatie bekend is over de overdracht van de bodemtrillingen naar de trillingen op funderingsniveau. Om tot een totale effectieve snelheid te komen is eerst de effectieve snelheid per tertsband bepaald voor predictie punt m3. Deze is vermenigvuldigd met de overdrachtsverhouding van maaiveld naar fundering of van maaiveld naar vloerveld. De resulterende waarden in tertsbanden zijn ten slotte energetisch of lineair opgeteld om tot een totale effectieve snelheid te komen.

Een energetische optelling kan het best worden toegepast voor ongecorreleerde signalen. Het bleek dat bij de maaiveldpunten een energetische optelling van tertsbanden tot een lager resultaat leidde dan wanneer direct de effectieve snelheid werd bepaald uit het tijdsignaal. Als bovengrens wordt daarom ook de lineaire optelling van de tertsbandniveaus gegeven. Een lineaire optelling kan gebruikt worden als het twee identieke signale betreft. Waarschijnlijk ligt de werkelijke waarde hier tussenin. In Tabel 10 staan de resultaten.

De resultaten voor de axisymmetrische berekening waarin een woning is opgenomen staan in Tabel 11. Voor deze berekening kon wel een maximale trillingssnelheid worden afgegeven omdat deze direct uit het model volgt.

Gegeven het feit dat het hier de 50% verwachtingswaarden betreft is het mogelijk dat er in de woning enige mate van trillingshinder zal optreden tijdens het plaatsen van de segmenten.

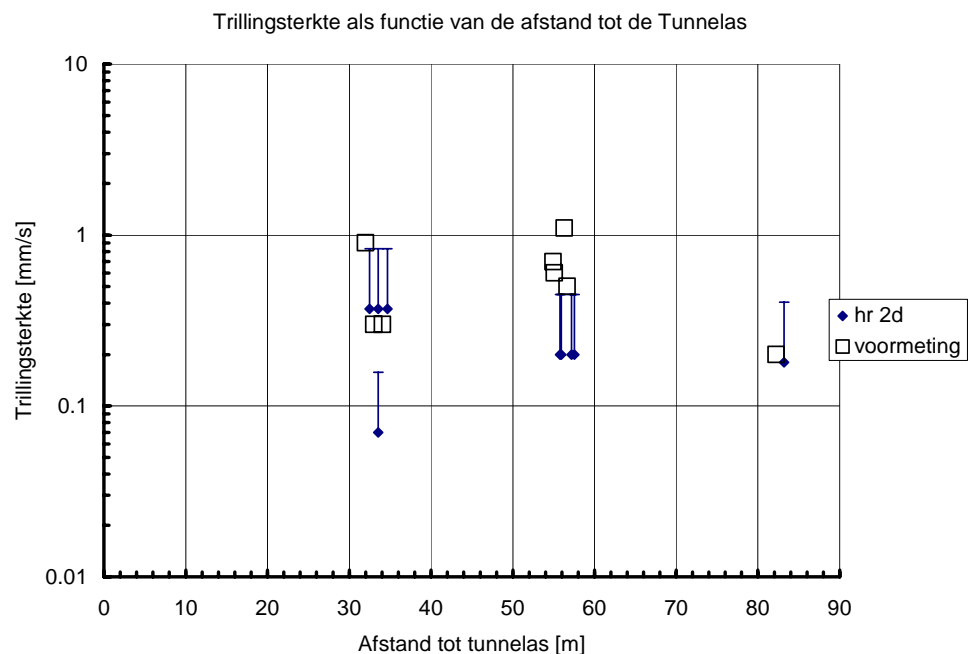
Tabel 10 Trillingen in woning gebaseerd op empirische relaties

predictie punt	richting	$V_{\text{eff,max}}$ [-] tertsbanden energetisch opgeteld	$V_{\text{eff,max}}$ [-] tertsbanden lineair opgeteld
fundering	verticaal	0.03	0.08
vloer	verticaal	0.04	0.11

Tabel 11 Trillingen in woning uit model

predictie punt	richting	V_{max} [mm/s]	$V_{\text{eff,max}}$ [-]
fundering	verticaal	0.25	0.09
vloer	verticaal	0.22	0.09

Een samenvatting van de 2D prognoses door Holland Railconsult is grafisch weergegeven in Figuur 3.11.



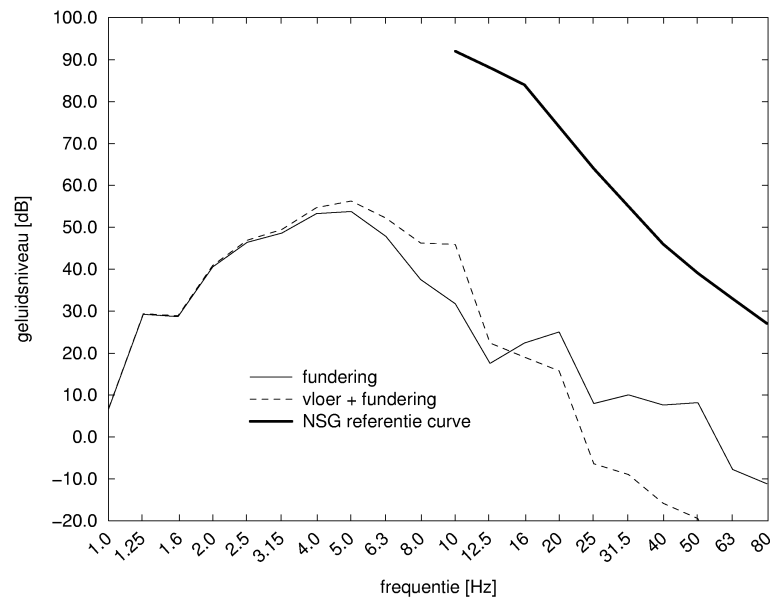
Figuur 3.11 Samenvatting 2D prognoses door Holland Railconsult. De weergegeven waarden van de voormeting zijn de maximaal gemeten waarden.

3.4.1.4 Laagfrequent geluid

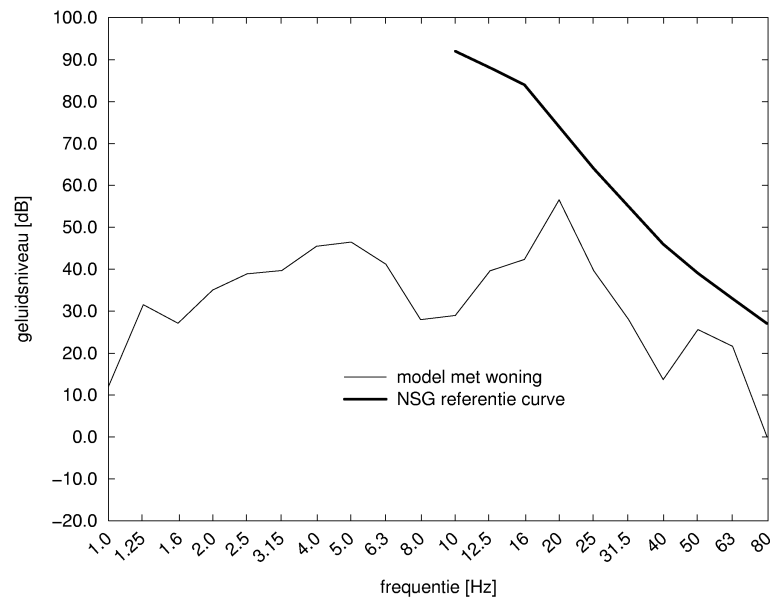
Laagfrequent geluid wordt uitgedrukt in tertsbanden van 1 tot 80 Hz. Laagfrequent geluid kan hinderlijk zijn als de NSG referentie curve wordt overschreden. Het

laagfrequent geluid is bepaald met empirische relaties aan de hand van het trillingsniveau op funderingsniveau of vloerveldniveau, en direct uit het model waarin ook de woning is opgenomen. In Figuur 3.12 staat het resultaat gebaseerd op de empirische relaties. Het laagfrequente geluid is zowel bepaald aan de hand van het trillingsniveau op de fundering als op de vloer. Als een van deze 2 resultaten de NSG referentie curve overschrijdt kan der sprake zijn van laagfrequente geluidshinder. Uitgaande van de geluidsdruk gebaseerd op trillingen van de fundering zal er hier dus geen sprake zijn van geluidshinder.

De resultaten die direct uit het model met de woning zijn gehaald staan in Figuur 3.13. Ook in dit geval is de predictie dat er geen sprake zal zijn van laagfrequente geluidshinder. Wat opvalt is dat met name in het hoogfrequente gebied de predictie uit het model met woning een hoger geluidsniveau geeft dan het geluidsniveau bepaald met empirische formules.



Figuur 3.12 Predictie van laagfrequent geluid in woning op basis van empirische relaties.



Figuur 3.13 Predictie van laagfrequent geluid in woning met model met woning.

3.4.2 3D modellering

3.4.2.1 Bepaling belastingfunctie

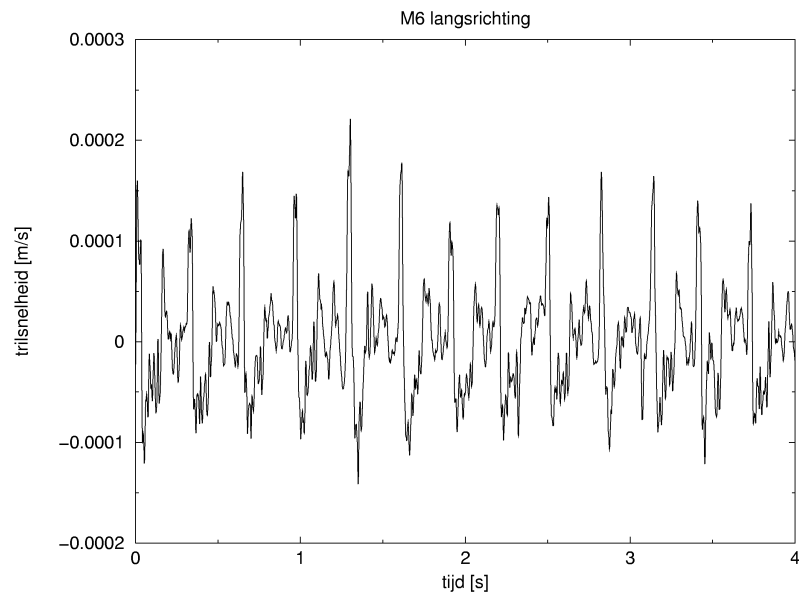
De 3D modellering wordt gebruikt om de trillingen tijdens het boorproces te simuleren. Uitgangspunt hierbij is dat de belasting afkomstig is van de vijzels. Uit de metingen is het metingnummer geselecteerd waarop de trillingen in de langsrichting van de tunnel het hoogst waren. Dit resulteerde in meting nummer 6 op 13:07. Uit deze meting is een tijdsignaal gedestilleerd voor meetpunt M1 uit de voormeting (Figuur 3.14).

Voor de afstand bron – M6 uit de voormeting is een 3D puls responsie berekening uitgevoerd. Dit heeft geleid tot het snelheidssignaal in Figuur 3.15. Door middel van een deconvolutie is vervolgens uit het gemeten snelheidssignaal en de berekende pulsresponsie het belastingssignaal berekend. De belasting als functie van de tijd is weergegeven in Figuur 3.16.

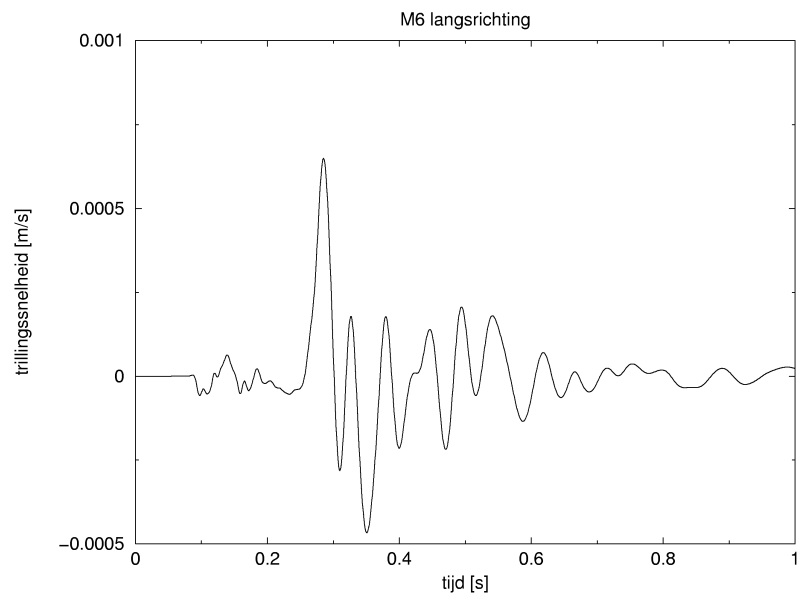
Ter controle is voor een aantal opnemer punten bij Achthoven een predictie gedaan. In Tabel 12 zijn de resultaten van deze predictie met de gemeten waarden vergeleken. De kwaliteit van de overeenkomst is erg wisselend. Dit betekent dat ook bij het Patrimoniumpark verschillen van een factor 2 goed mogelijk zijn.

De maximale amplitude van het meetsignaal waarop de belastingfunctie is gebaseerd komt ongeveer overeen met de gemiddelde waarde voor meetpunten M1, M2, M3 en M6 die allen op dezelfde afstand van de tunnel liggen. Derhalve wordt met dit belastingssignaal een 50% waarde bepaald. Van de beschouwde meetpunten was de grootste standaarddeviatie 0.32 maal de gemiddelde waarde. Hieruit volgt dat de 95% waarde 1.52 maal de gemiddelde waarde is. Gedurende het boorproces worden continu trillingen veroorzaakt. Als van de trillingen gedurende het boorproces een 95% waarde

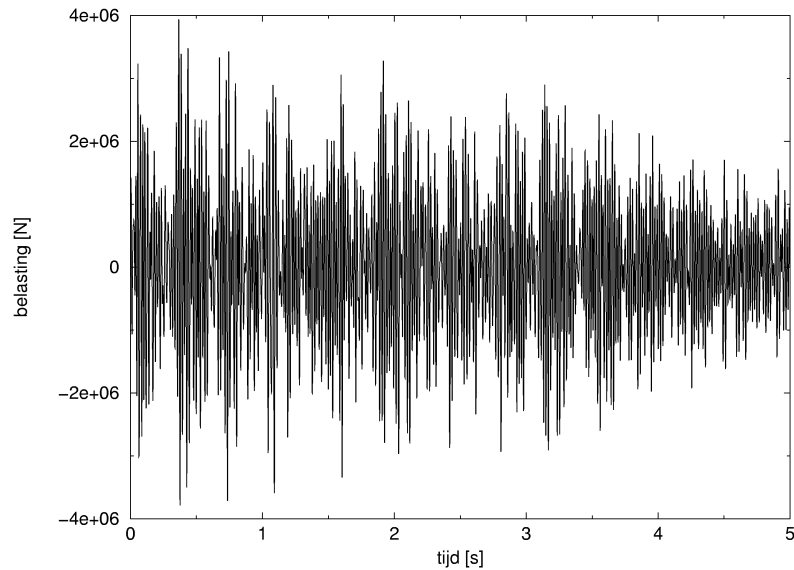
bepaald wordt, is de kans daarom erg groot dat bijvoorbeeld ieder uur de 95% waarde een paar keer wordt overschreden.



Figuur 3.14 Gemeten trilsnelheid op meetpunt M6 (meting 006).



Figuur 3.15 Berekende 3D puls responsie voor meetpunt M6 uit voormeting.



Figuur 3.16 Belastingfunctie voor 3D berekeningen.

Tabel 12 Predictie met krachtsignaal uit Figuur 3.16 en gemeten waarden bij km 28.45.

predictie punt	richting	V_{\max} [mm/s] predictie	V_{\max} [mm/s] gemeten	$V_{\text{eff,max}}$ [-] predictie	$V_{\text{eff,max}}$ [-] gemeten
M3	horizontaal loodrecht	0.12	0.21	0.04	0.06
M3	verticaal	0.14	0.13	0.06	0.04
M3	horizontaal evenwijdig	0.19	0.47	0.07	0.11
M6	horizontaal loodrecht	0.13	0.23	0.04	0.07
M6	verticaal	0.16	0.09	0.07	0.03
M6	horizontaal evenwijdig	0.19	0.22	0.07	0.07
M7	horizontaal loodrecht	0.16	0.00	0.06	0.00
M7	verticaal	0.62	0.10	0.27	0.03
M7	horizontaal evenwijdig	0.68	0.26	0.24	0.07

3.4.3 Trillingen op maaiveld en in de grond

In Tabel 14 en Tabel 14 zijn de resultaten weergegeven voor de trillingen op maaiveld in de grond zoals die zijn berekend met het 3D model. Het betreft hier wederom de verwachtingswaarde (50% waarde). Over het algemeen geeft de horizontale richting evenwijdig aan de tunnel as het grootste trillingsniveau.

Tabel 13 Trillingen op maaiveld en in de grond berekend met 3D model voor punten overeenkomend met voormeting 2002.

predictie punt	richting	V_{\max} [mm/s]	$V_{\text{eff,max}}$ [-]
D1	horizontaal loodrecht	0.33	0.16

predictie punt	richting	V_{\max} [mm/s]	$V_{\text{eff,max}}$ [-]
D1	verticaal	0.38	0.17
D1	horizontaal evenwijdig	0.87	0.37
D2	horizontaal loodrecht	0.14	0.06
D2	verticaal	0.02	0.01
D2	horizontaal evenwijdig	0.11	0.05
D3,D4	horizontaal loodrecht	0.81	0.38
D3,D4	verticaal	0.59	0.25
D3,D4	horizontaal evenwijdig	2.20	0.88
M1,M2,M3,M6,M10	horizontaal loodrecht	0.19	0.08
M1,M2,M3,M6,M10	verticaal	0.31	0.12
M1,M2,M3,M6,M10	horizontaal evenwijdig	0.44	0.18
M5,M7,M8,M9	horizontaal loodrecht	0.23	0.09
M5,M7,M8,M9	verticaal	0.64	0.32
M5,M7,M8,M9	horizontaal evenwijdig	1.13	0.51
M4	horizontaal loodrecht	0.05	0.02
M4	verticaal	0.05	0.02
M4	horizontaal evenwijdig	0.12	0.06

Tabel 14 Trillingen op maaiveld en in de grond berekend met 3D model voor punten overeenkomend met overdrachtsmeting 1999.

predictie punt	richting	V_{\max} [mm/s]	$V_{\text{eff,max}}$ [-]
d2	horizontaal loodrecht	0.36	0.16
d2	verticaal	0.12	0.04
d2	horizontaal evenwijdig	0.55	0.24
d3	horizontaal loodrecht	0.23	0.09
d3	verticaal	0.08	0.03
d3	horizontaal evenwijdig	0.46	0.21
d4	horizontaal loodrecht	0.13	0.06
d4	verticaal	0.08	0.04
d4	horizontaal evenwijdig	0.41	0.19
d5	horizontaal loodrecht	0.10	0.05
d5	verticaal	0.05	0.02
d5	horizontaal evenwijdig	0.35	0.15
m1	horizontaal loodrecht	0.20	0.09
m1	verticaal	0.74	0.36
m1	horizontaal evenwijdig	1.11	0.52
m2	horizontaal loodrecht	0.30	0.12
m2	verticaal	0.62	0.28
m2	horizontaal evenwijdig	0.85	0.35
m3	horizontaal loodrecht	0.29	0.14
m3	verticaal	0.51	0.22
m3	horizontaal evenwijdig	0.73	0.26
m4	horizontaal loodrecht	0.19	0.09
m4	verticaal	0.40	0.16
m4	horizontaal evenwijdig	0.58	0.22

predictie punt	richting	V_{\max} [mm/s]	$V_{\text{eff,max}}$ [-]
m5	horizontaal loodrecht	0.14	0.06
m5	verticaal	0.23	0.10
m5	horizontaal evenwijdig	0.38	0.14

3.4.4 Trillingen in de woning

Net als bij het axisymmetrische model zijn bij het 3D model de trillingen in de woning op 2 verschillende wijzen bepaald. In Tabel 15 staat het trillingsniveau zoals dat bepaald is met behulp van een empirische methode. In tegenstelling tot het axisymmetrische model zijn hier alleen waarden gegeven voor een energetische optellingen van tertsbanden. Bij de maaiveld punten bleek een energetische optelling tot betrouwbare resultaten te leiden, en daarom is de verwachting dat dit ook geldt voor punten in de woning.

De resultaten zoals die zijn berekend met het 3D model waarin een woning is opgenomen staan in Tabel 16.

Tabel 15 Trillingen in woning gebaseerd op empirische relaties (3D)

predictie punt	richting	$V_{\text{eff,max}}$ [-] tertsbanden energetisch opgeteld
fundering	horizontaal evenwijdig	0.07
fundering	verticaal	0.06
vloer	horizontaal evenwijdig	0.12
vloer	verticaal	0.02

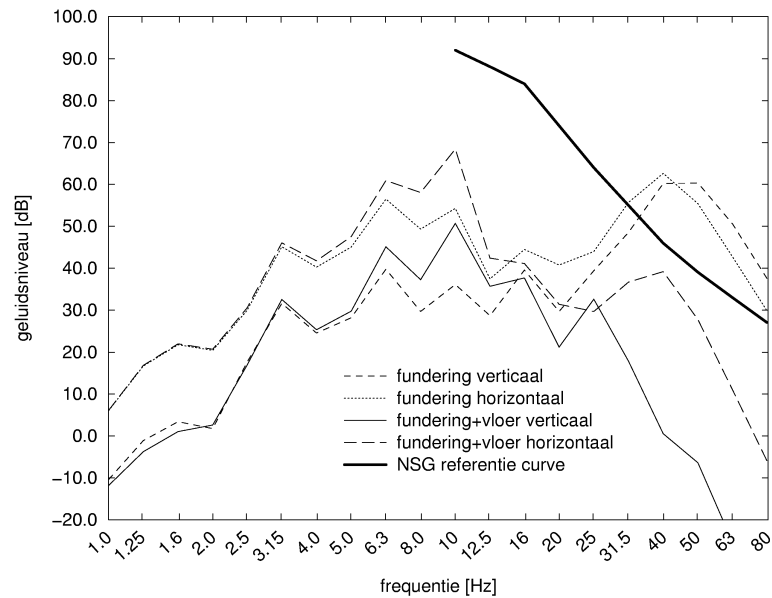
Tabel 16 Trillingen in woning uit 3D model met woning

predictie punt	richting	V_{\max} [-]	$V_{\text{eff,max}}$ [-]
fundering	horizontaal loodrecht	0.57	0.24
fundering	verticaal	0.77	0.35
fundering	horizontaal evenwijdig	0.67	0.28
vloer	horizontaal loodrecht	0.41	0.18
vloer	verticaal	1.14	0.52
vloer	horizontaal evenwijdig	0.45	0.18

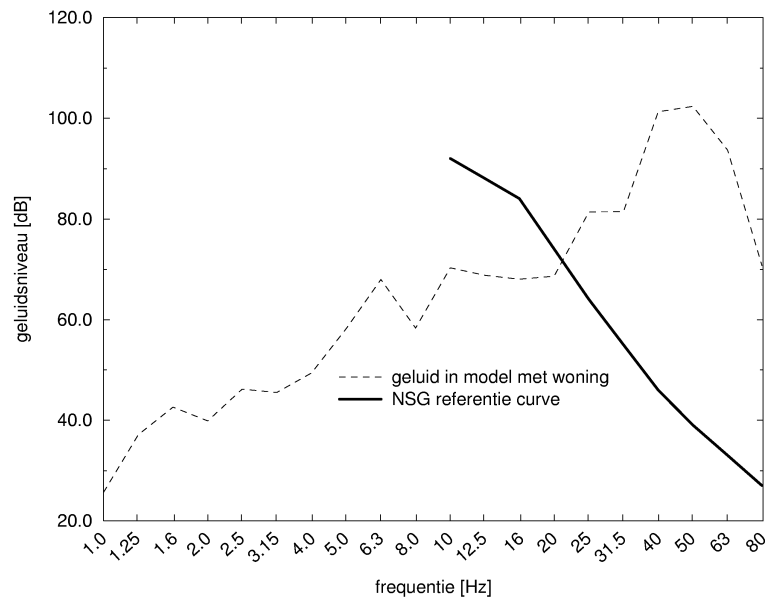
3.4.5 Laagfrequent geluid

In Figuur 3.17 en Figuur 3.18 staan de predicties van laagfrequent geluid gebaseerd op empirische relaties verkregen uit een 3D model met woning. Net als bij het axisymmetrische geval geeft hier het model met woning een groter geluidsniveau dan het geluidsniveau berekend met empirische formules. De NSG referentie curve wordt zowel voor het empirische geval als voor het model met woning overschreden. Hier kan dus hinder optreden ten gevolge van laagfrequent geluid.

Een mogelijke verklaring voor de grote discrepantie tussen de predictie van het model met woning en de predictie met empirische formules is dat er in het model met woning nauwelijks demping kan optreden. Hierdoor kan het erg galmen in de woning van het model.

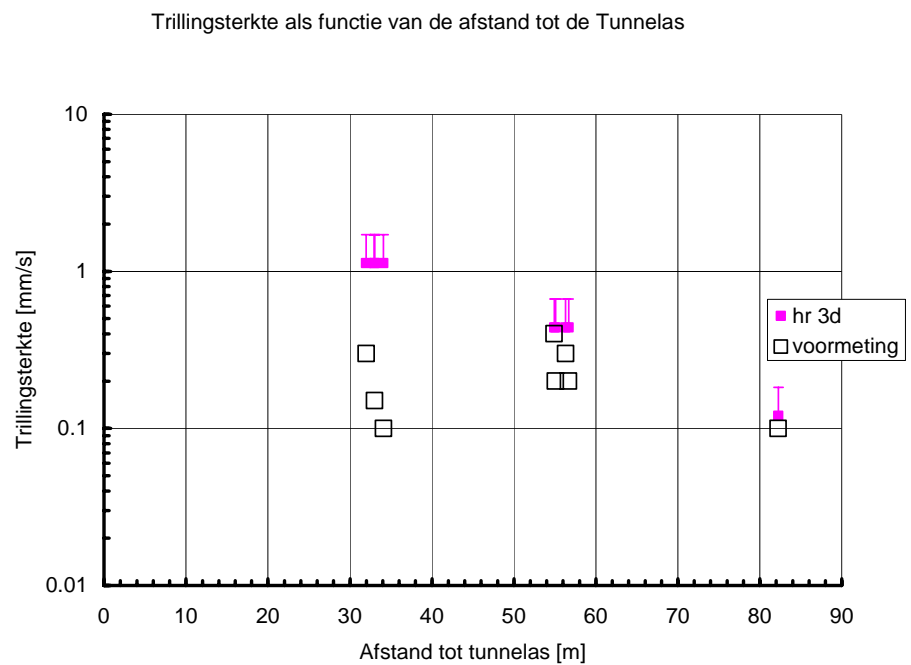


Figuur 3.17 Predictie van laagfrequent geluid in woning op basis van empirische relaties (3D).



Figuur 3.18 Predictie van laagfrequent geluid voor 3D model met woning.

Een samenvatting van de prognoses door Holland Railconsult is weergegeven in Figuur 3.19.



Figuur 3.19 Samenvatting prognoses Holland Railconsult. De weergegeven waarden van de voormeting zijn de maximaal gemeten waarden.

3.5 Literatuur

- [1] W. Gardien. 23-7-2002. *Trillingen Boortunnels Bouwfase – Samenvatting Onderzoeken Verleden*. Holland Railconsult GMV-MVD-020009392 – Versie 1.0.
- [2] P. Meijers. 21-7-2000. *Resultaat VSP Meting*. Concept Memo.
- [3] V. Hopman en J.W. de Feijter. 2000. *Grondonderzoek HSL Groene Hart Tunnel Seismische Sonderingen*. GeoDelft CO-380840/671.
- [4] G.P.C. van Oosterhout. 18-10-1999. *Experimentele Bepaling Trillingsoverdracht door Bodem nabij Groene Hart Tunnel*. TNO-rapport 99-CON-DYN-R0086.
- [5] D.J. Molenaar. 14-7-2002. *Meetrapport Trillingsmetingen Groene Hart Tunnel Voormeting*. TNO-rapport concept met bijbehorende meetdata.
- [6] L.G. Kurzweil 1979. *Ground-borne Noise and Vibration from Underground Rail Systems*. Journal of Sound and Vibration 66(3), 363-370.
- [7] F. van den Berg 1999. *Streefwaarden voor Laagfrequente Geluidsafstraling door Trillingen in de Woonomgeving*. - Presentatie op congres Geluid en Trillingen, Rotterdam 9-11 november 1999. Natuurkundewinkel Rijksuniversiteit Groningen.
- [8] P.C. van Staalduinen en P.H. Waarts. 1995. *Rekenmodel voor de Bepaling van Trillingssterkte*. VROM Verstoring nr. 9/1995.

4 Modelling op basis van EEM, bijdrage TNO Bouw

4.1 Inleiding

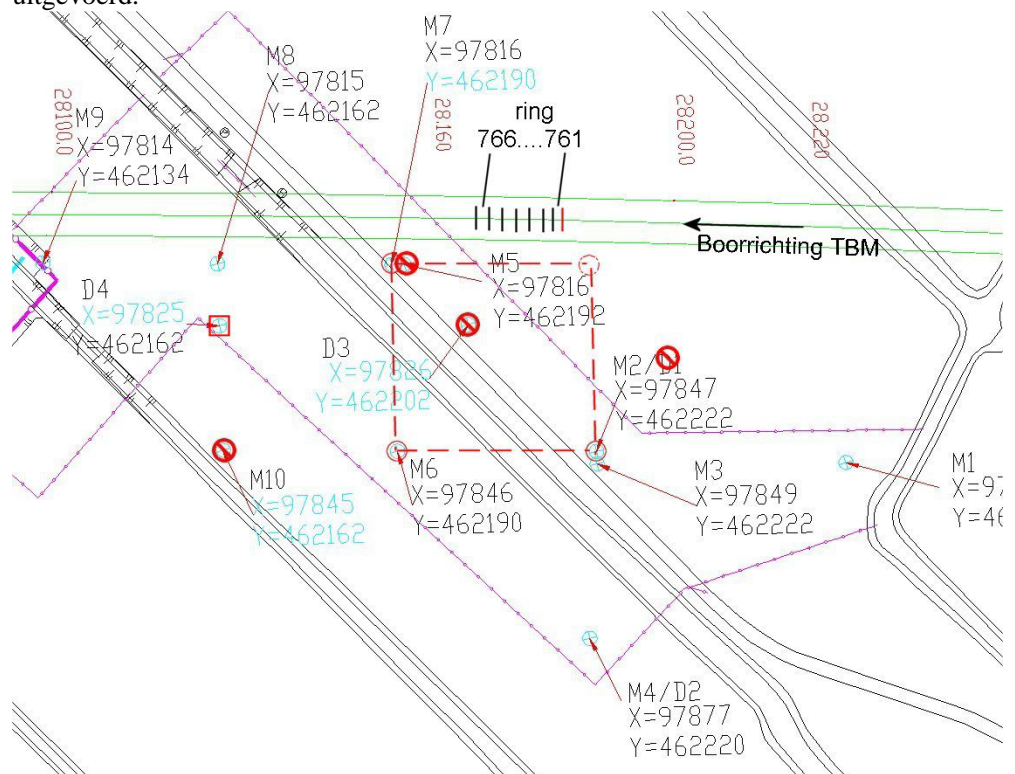
TNO Bouw heeft twee typen modelleringen gebruikt om de trillingen in het Patrimoniumpark tijdens de TBM passage te voorspellen. In dit hoofdstuk wordt de modellering met behulp van een 3D eindige elementen methode beschreven. In het volgende hoofdstuk staat de beschrijving van de methode met behulp van BOR.

Een belangrijk verschil met de methode van Holland Railconsult is dat TNO Bouw de input van de schil als trillingsbron heeft gebruikt volgens het meetprotocol om de predictie uit te voeren. Een probleem hierbij was dat de metingen niet geheel volgens het meetprotocol zijn uitgevoerd. Het gevolg was dat op niet alle benodigde punten op de schil resultaten van metingen voorhanden waren.

4.2 Aanpak

4.2.1 Gebruikte meetpunten

In Figuur 4.1 is de plattegrond weergegeven van het meetterrein waar de voormeting is uitgevoerd.



Figuur 4.1 – Meetterrein voormeting bij Achthoven

In Figuur 4.1 is de boorricting van de TBM weergegeven. De locatie van de ringen die tijdens de intensieve dagmeting zijn gemeten zijn weergegeven: ring 761 tot en met ring 766. Op de meetpunten M1 tot en met M10 aan het maaiveld en op de meetpunten op

diepte D1 tot en met D4 zijn bij de voormeting in drie richtingen tijdsignalen van 32 s geregistreerd. Op de meetlocaties M5, M10, D1 en D3 zijn geen bruikbare signalen opgenomen, vanwege een onjuiste conditionering van de signalen. In Figuur 4.1 zijn deze locaties gemarkeerd met een \otimes . De meetlocaties die zijn gebruikt als punten op de schil zijn gemarkeerd met een rode cirkel (○ maaiveldpunten) of een rood vierkant (□ dieptepunt). De gebruikte schil is gemarkeerd met een rode gestreepte lijn.

Omdat er maar van een beperkt aantal punten op de schil meetgegevens beschikbaar zijn, moeten voor de tussenliggende punten data worden verkregen uit interpolatie. Dit wordt beschreven in paragraaf 4.2.5.

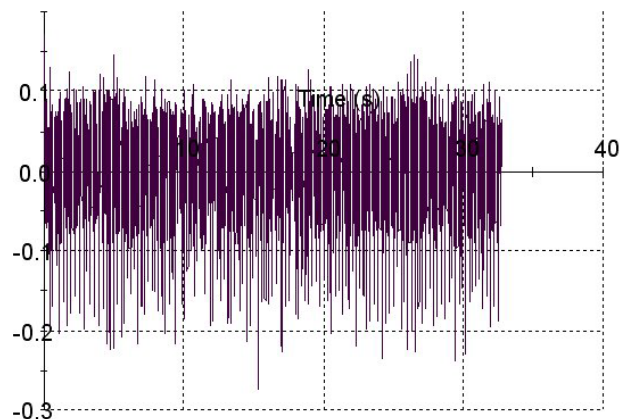
Op de dieptepunten op de schil is slechts op één dieptepunt een bruikbaar signaal opgenomen. Om toch een afstandsrelatie te maken, is voor de dieptepunten een zelfde lineaire relatie aangenomen als voor de maaiveldpunten.

De locaties van de predictiepunten zijn beschreven in paragraaf 3.1.1.1.

De gemeten en geïnterpoleerde signalen zijn in het EEM model opgelegd aan de lagen in het model, zie paragraaf 4.2.5.

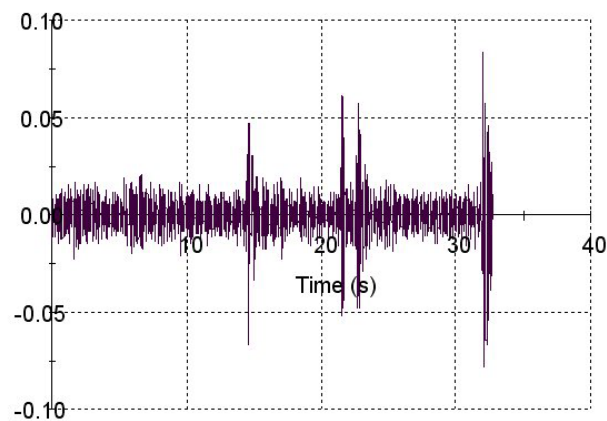
4.2.2 Selectie meetfile

Ten behoeve van de EEM modellering is een analyse gemaakt van de opgenomen signalen. Hierbij bleek dat in de periode waarin de TBM aan het boren was vrij continue trillingen optraden (figuur 5.3).



Figuur 4.2 – Tijdsignaal in M1 tijdens het boren van de TBM op 1 juni 2002 om 13:16 uur

In figuur 5.3 is het tijdsignaal te zien in meetlocatie M1 tijdens het boren van de TBM op 1 juni 2002 om 13:16 uur. In deze figuur staat de trillingsnelheid [mm/s] uitgezet als functie van de tijd [s]. Als het boren is gestopt en de segmenten worden ingebouwd, ziet het signaal er heel anders uit, veel onregelmatiger. Een voorbeeld is te zien in figuur 4.3.



Figuur 4.3 - Tijdsignaal in M1 tijdens het bouwen van de TBM op 1 juni 2002 om 14:06 uur

In figuur 4.3 staat een tijdsignaal weergegeven van het zelfde meetkanaal als in figuur 5.3, maar nu om 14:06 uur, tijdens het inbouwen van de segmenten. Het signaal is nu discontinu: af en toe treedt een sterke en kortdurende trillingspiek op. Deze pieken hebben een stochastisch karakter. Mogelijk is de trillingsbron verschillend voor de verschillende pieken (bijvoorbeeld stoten segmenten tegen elkaar, schokken in de vijzels, etc.). Hierdoor is het moeilijk een representatief signaal te kiezen. Daarnaast was niet de informatie beschikbaar welke piek bij welke activiteit hoorde. Daarom is ervoor gekozen om een tijdsignaal te gebruiken dat is opgenomen tijdens het boren. Het betrof de meetfile 17 die op 1 juni 2002 om 13:16 uur is gemaakt tijdens het boren voor ring 761. Het snijrad bevond zich op dat moment op de locatie die is weergegeven met het rode lijntje in Figuur 4.1.

De betreffende meetfile 17 is uitgekozen omdat er op het oog geen bijzondere afwijkingen werden aangetroffen.

4.2.3 Trillingsniveau in de woning

Het trillingsniveau in de woning is berekend door de woning op te nemen in het model. Een beschrijving van de gebruikte materiaaleigenschappen van de woning staat in Tabel 18 in paragraaf 4.2.4.2.

4.2.4 Materiaal parameters

4.2.4.1 Gegevens bodem

Bij de bepaling van de bodem eigenschappen is gebruik gemaakt van de seismische sonderingen die zijn uitgevoerd langs het tracé van de Groene Hart Tunnel [2], en de interpretatie van het grondonderzoek van HSL-Zuid [3].

De bodemgegevens ter plaatse van het Patrimoniumpark staan in Tabel 17.

Tabel 17 Bodemgegevens ter plaatse van het Patrimoniumpark

		E_{dvn}	ν	ρ	h	c_L	c_t
Laag nr	depth	(N/m^2)	(---)	(kg/m^3)	[m]	[m/s]	[m/s]
1	-0.50	4.00E+07	0.45	1640	0.5	156	92
2	-3.00	8.00E+06	0.45	1640	2.5	70	41
3	-5.50	4.00E+07	0.28	1960	1	143	89
4	-6.50	1.76E+08	0.28	1960	3.5	300	187
5	-10.00	9.60E+07	0.45	1640	1.5	242	142
6	-11.50	3.20E+07	0.45	1800	1.5	133	78
7	-13.00	1.12E+08	0.45	1800	2	249	146
8	-15.00	1.60E+07	0.47	1320	0.5	110	64
9	-15.50	3.04E+08	0.28	1960	2.5	394	246
10	-18.00	1.92E+08	0.28	1960	2.5	313	196
11	-20.50	3.52E+08	0.28	1960	0.5	424	265
12	-21.00	1.92E+08	0.28	1960	1	313	196
13	-22.00	3.52E+08	0.28	1960	1	424	265
14	-23.00	6.40E+08	0.28	1960	1	571	357
15	-24.00	3.04E+08	0.28	1960	3.5	394	246
16	-27.50	3.68E+08	0.28	1960	2	433	271
17	-29.50	2.56E+08	0.28	1960	0.75	361	226
18	-30.25	3.20E+08	0.28	1960	2.5	404	253
19	-32.75	2.56E+08	0.28	1960	3	361	226
20	-35.75	3.84E+08	0.28	1960	7	443	277

Bij de predictie is uitsluitend gebruik gemaakt van de bodemgegevens ter plaatse van het Patrimoniumpark. Dit levert een fout op. De rekentijd die dit model vergde was echter al zo lang dat niet is geprobeerd de bodemgegevens van het meetveld bij de voormeting te verwerken. Dit zou nog meer rekentijd hebben gevegd.

4.2.4.2 Gegevens woning

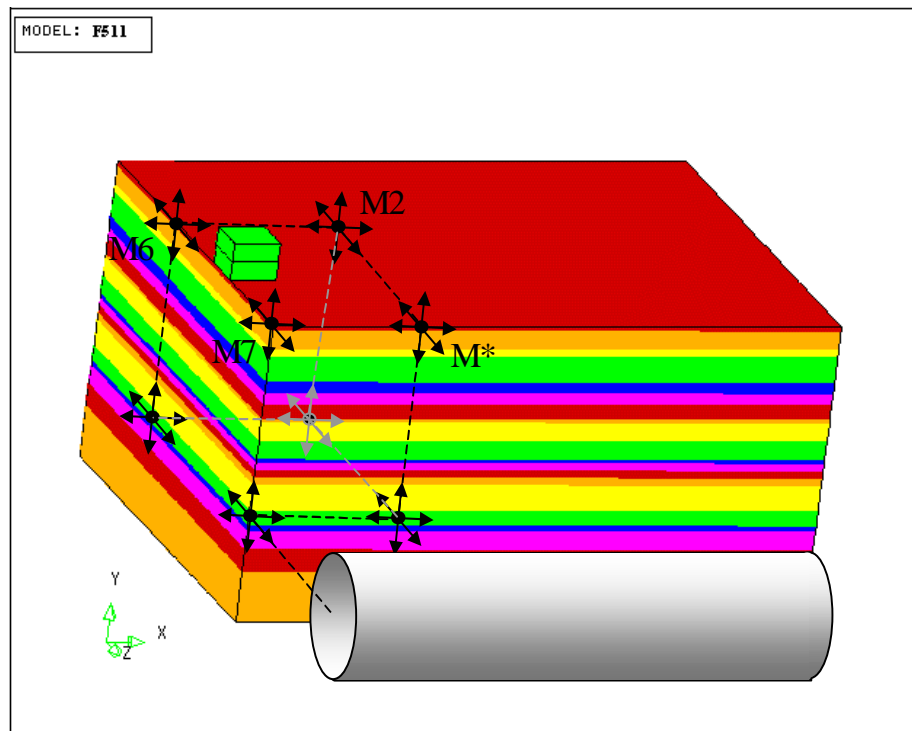
De gehanteerde materiaal eigenschappen van de woning staan in Tabel 18.

Tabel 18 Eigenschappen woning

	E [MPa]	ρ [kg/m^3]	ν [-]	dikte [m]
Funderingsbalken	25800	2540	0,15	
(Houten) Vloeren	5000	900	0,30	0,27
Muren	6500	1850	0,20	0,27

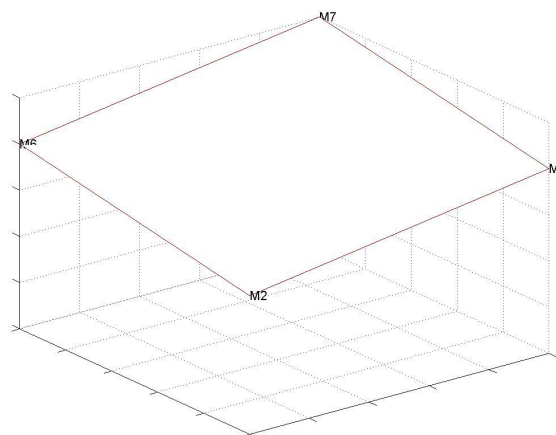
4.2.5 Modelbeschrijving

Er is een 3D model gemaakt volledig bestaande uit volume-elementen. In Figuur 4.4 is het gebruikte model met de positie van de tunnel weergegeven. Dit is een kwart van het totale model. Vanwege de symmetrie hoefden de overige drie delen niet te worden gemodelleerd. Zoals te zien is, valt de tunnel buiten het model. Aan de achterkant en aan de rechter zijkant gelden oneindige randvoorwaarden, zodat reflecties geminimaliseerd worden. Aan de voorkant van het model geldt voor de verplaatsingen in de drie richtingen: $u_x=0$, u_y =vrij, $u_z=0$. Aan de linker zijkant geldt: u_x =vrij, $u_y=0$, $u_z=0$.



Figuur 4.4 Model van de bodem en de woning

In dit model zijn de hoekpunten van de schil weergegeven waarop een trillingssignaal is opgelegd. Dit signaal is het signaal dat afkomstig is van de metingen van de voormeting, zoals is beschreven in paragraaf 4.2.1. Tussen M7 en M6 en tussen M6 en M2 is een lineaire interpolatie gebruikt, die automatisch wordt gedaan door het eindige elementen pakket DIANA. Het vierde hoekpunt (M*) was geen meetpunt. Daarom is hier het zelfde signaal opgelegd als in M7, maar dan lineair geschaald. Er is verondersteld dat de amplitude van de trillingen tussen M7 en M6 en tussen M6 en M2 lineair afneemt. In Figuur 4.5 is grafisch weergegeven hoe daarmee het signaal van meetpunt M7 naar het punt M* is geschaald.



*Figuur 4.5 – Bepaling amplitude trillingen in meetpunt M**

Op de zelfde manier is dit gedaan voor de dieptepunten. Hier was echter alleen het punt D4 te gebruiken. Daarom is verondersteld dat de verhoudingen in trillingssterktes op de zelfde manier op de hoekpunten van de schil lagen als op het maaiveld.

Met een trillingsniveau op een (onbebouwd) maaiveld als invoer bepaalt het computermodule BEVER het trillingsniveau van vloeren in bebouwing op die locatie. Hierbij wordt rekening gehouden met overdrachtsverzwakkingen en –versterkingen door belasting van het gebouw op het maaiveld, overdracht naar de fundering, voortplanting door het gebouw en resonantie van vloeren. Dit gebeurt aan de hand van een globale beschrijving van het gebouw en eenvoudige analytische formuleringen van effecten. BEVER is gebaseerd op het model dat is beschreven in [1], maar is sterk uitgebreid.

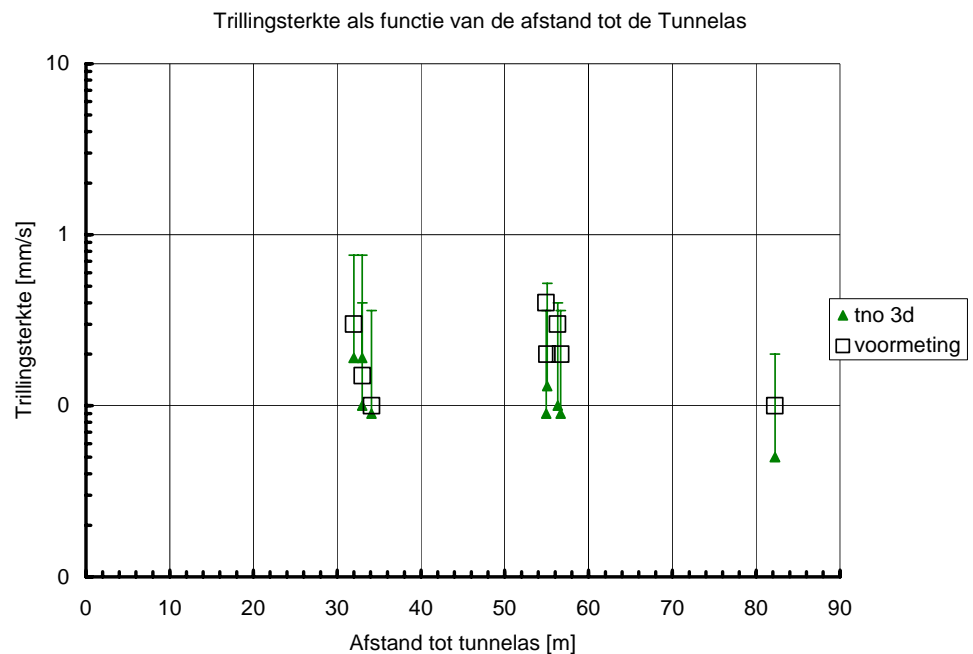
4.3 Resultaten

De resultaten van de metingen zijn samengevat in Tabel 19. Omdat de metingen met de turboconussen geen betrouwbare resultaten opleverden, is ook de betrouwbaarheid van de prognoses op diepte gering.

Tabel 19 Trillingen op maaiveld en in de grond berekend met 3D model voor punten overeenkomend met voormeting 2002

Ch. No.	meetpunt	richting	v_{\max} [mm/s]		$v_{\text{eff,max}}$ [-]	
			gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven
1	M1	Z	0.07	0.29	0.05	0.19
2	M1	Y	0.10	0.40	0.06	0.22
3	M1	X	0.05	0.18	0.03	0.10
4	M2	Z	0.07	0.29	0.04	0.16
5	M2	Y	0.09	0.36	0.06	0.22
6	M2	X	0.01	0.06	0.08	0.33
7	M3	Z	0.07	0.29	0.04	0.16
8	M3	Y	0.09	0.36	0.06	0.22
9	M3	X	0.01	0.06	0.08	0.33
10	M4	Z	0.03	0.10	0.01	0.05
11	M4	Y	0.03	0.12	0.02	0.07
12	M4	X	0.05	0.21	0.03	0.12
13	M5	Z	0.07	0.29	0.03	0.13
14	M5	Y	0.19	0.78	0.09	0.38
15	M5	X	0.16	0.66	0.07	0.28
16	M6	Z	0.05	0.19	0.02	0.07
17	M6	Y	0.12	0.46	0.04	0.17
18	M6	X	0.13	0.51	0.05	0.20
19	M7	Z	0.07	0.29	0.03	0.13
20	M7	Y	0.19	0.78	0.09	0.38
21	M7	X	0.16	0.66	0.07	0.28
22	M8	Z	0.04	0.18	0.02	0.09
23	M8	Y	0.08	0.31	0.03	0.13
24	M8	X	0.10	0.39	0.04	0.16
25	M9	Z	0.05	0.19	0.02	0.09
26	M9	Y	0.07	0.28	0.04	0.14

Ch. No.	meetpunt	richting	v_{\max} [mm/s]		$v_{\text{eff,max}}$ [-]	
			gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven
27	M9	X	0.09	0.37	0.04	0.18
28	M10	Z	0.07	0.29	0.04	0.16
29	M10	Y	0.09	0.36	0.06	0.22
30	M10	X	0.01	0.06	0.08	0.33
31	D1	Z	0.07	0.28	0.04	0.15
32	D1	Y	0.06	0.24	0.03	0.13
33	D1	X	0.07	0.29	0.04	0.16
34	D2	Z	0.02	0.08	0.01	0.05
35	D2	Y	0.03	0.10	0.01	0.05
36	D2	X	0.06	0.24	0.04	0.15
37	D3	Z	0.53	2.12	0.26	1.02
38	D3	Y	0.42	1.68	0.24	0.96
39	D3	X	0.71	2.84	0.35	1.38
40	D4	Z	0.67	2.66	0.28	1.11
41	D4	Y	0.49	1.95	0.23	0.92
42	D4	X	0.54	2.15	0.20	0.81



Figuur 4.6 Samenvatting prognoses TNO Bouw. De weergegeven waarden van de voormeting zijn de gemiddelde gemeten waarden in horizontale richting.

4.4 Referenties

- [1] P.C. van Staalduinen, P.H. Waarts, "Rekenmodel voor de bepaling van de trillingssterkte", VROM rapport Verstoring nr. 9/1995, mei 1995

5 Modelling op basis van BOR – Bijdrage TNO Bouw

5.1 Modellingstrategie

5.1.1 Inleiding

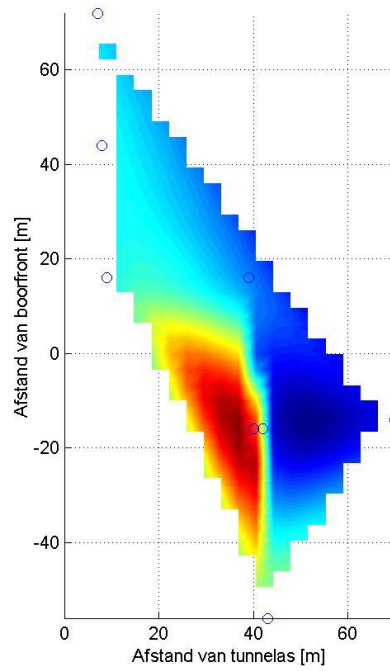
In deze studie wordt het trillingsniveau op het maaiveld en in een nabijgelegen woning met behulp van de combinatie van het BOR model en een 2D spectrale eindige elementen model voorspeld. Het BOR model is een spectrale randelementen pakket dat de dynamische grond- en funderingsresponsie in termen van admittanties bepaalt. Voor het spectrale eindige elementen model is in deze studie gekozen voor Femlab. Beide modellen worden in de volgende paragrafen gepresenteerd.

Voor het trillingsniveau in het huis wordt een “multistep” Soil-Structure Interaction (SSI) methode gebruikt. In een multistep SSI aanpak wordt het probleem in drie delen geschematiseerd, namelijk de vrievelde responsie tijdens het boren, de kinematische interactie van de grondstructuur en de traagheidsresponsie van de constructie.

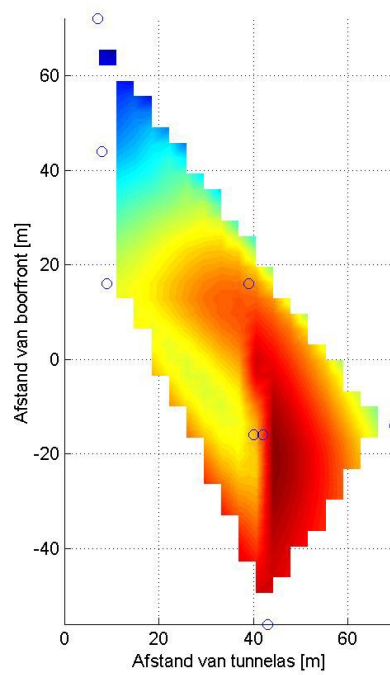
In deze studie waren de resultaten uit BOR (vrije veld responsie en dynamische funderingstijfheid met ongeveer 120 grondslagen) na 2 minuten (met een Pentium 4 machine) klaar. De dynamische responsie van het huis had ongeveer 3 minuten nodig. Hiermee was het mogelijk meerdere berekeningen te draaien.

5.1.2 Informatie uit de voormeting en de beschikbare gegevens

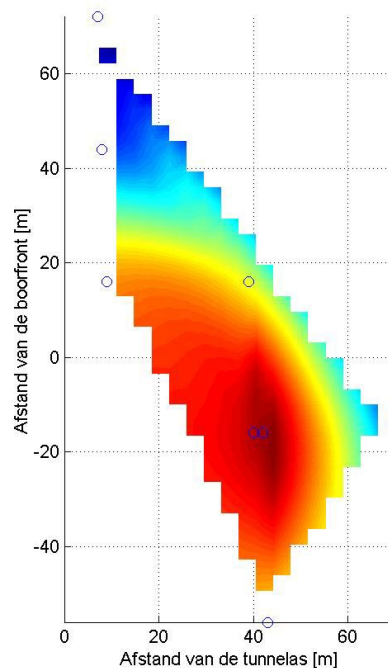
De resultaten van de voormeting zijn gevisualiseerd in Figuur 5.1 tot en met Figuur 5.3. In deze figuren zijn de trillingssterktes in kleuren weergegeven over het gemeten oppervlak. Een blauw oppervlak geeft de laagste trillingsterkte aan, die via geel naar rood loopt naar de grootste trillingsterkte. De blauwe cirkeltjes geven de meetpunten aan waarop de resultaten zijn gebaseerd. Met behulp van Matlab zijn de waarden tussen de meetpunten lineair geïnterpoleerd. Op deze manier zijn de figuren tot stand gekomen.



Figuur 5.1 Trillingssterkte in verticale richting bij de voormeting als functie van de locatie



Figuur 5.2 - Trillingssterkte in horizontale richting loodrecht op de tunnelas bij de voormeting als functie van de locatie



Figuur 5.3 - Trillingssterkte in horizontale richting evenwijdig aan de tunnelas bij de voormeting als functie van de locatie

Uit deze resultaten en de beschikbare informatie over grondsituatie en woningen werden de volgende uitgangspunten gehaald:

- uit de meting blijkt dat voor het boorfront weinig energie wordt overgedragen,
- als gevolg hiervan blijkt dat de trillingsterkte in het huis het sterkst is als het boorfront van de TBM het huis passeert en het schild van de machine nog niet voorbij is,
- de beschikbare informatie over materiaaleigenschappen, geometrie, type woning en precieze positie van de woning ten opzichte van de TBM komt uit het bebouwingsrapport [3].

Aan de hand van de uitgangspunten worden de volgende aannames gedaan:

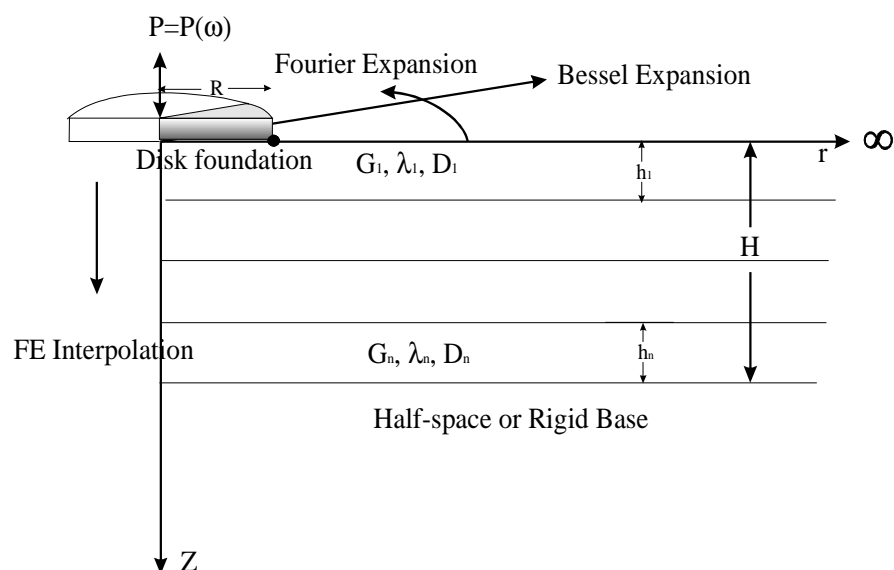
- het systeem is lineair en het principe van superpositie geldt,
- het moment dat het boorfront het huis passeert kan het systeem als een 2D situatie worden geschematiseerd,
- gezien de lengte van de bron ten opzichte van de lengte van het huis kan de bodem als vlakke – rek worden gemodelleerd,
- de laagopbouw (in termen van schuifgolfsnelheid) voor de twee sites kan met de bestaande informatie ([2] seismische sondering 12283 voor Achthoven en seismische sondering 12301 voor Patrimoniumpark) worden gemodelleerd,
- het dichtstbijzijnde punt van het huis is 16 m (horizontale afstand) vanaf de tunnelwand en het verst gelegen punt ligt op 23 m.

5.1.3 Dynamisch grondmodel en funderingsstijfheid: het BOR model

Om de dynamische responsie te bepalen zijn in deze studie spectrale randelementen gebruikt [1, 5, 6]. In axiaal-symmetrische problemen zijn de spectrale randelementen gebaseerd op een expansie van het bewegingsveld met gemodificeerde Bessel's series in de radiale richting en met Fourier series in de tangentiële richting (zie Figuur 5.4). In vlakke - rek situaties worden Fourier series gebruikt in de richting loodrecht op de tunnelas in plaats van gemodificeerde Bessel's series. Het spectrale randelementen programma, ontwikkeld door TNO [1] bepaalt de admittantie (verplaatsing per eenheid van kracht in het frequentiedomein) van het systeem gegeven de kracht die het systeem exciteert.

De spectrale randelementen leveren de exacte oplossing in de horizontale richtingen (radiaal en tangentieel voor axisymmetrie of loodrecht en evenwijdig voor vlakke rek). In de verticale richting wordt een eindige elementen discretisatie gebruikt. Verder zijn de resultaten berekend met behulp van deze methode onafhankelijk van onnauwkeurigheden veroorzaakt door discretisatie in de tijd (de integratie is analytisch) en van reflecties komende van de randen (perfecte halve ruimte). Een ander voordeel van spectrale randelementen is de berekeningstijd. Als voorbeeld, een som met 150 frequentiestappen en 120 lagen duurt ongeveer 2 minuten met een gewone Pentium computer.

In deze studie wordt de TBM geschematiseerd met een aantal horizontale en verticale lijnbelastingen in het vlak tussen -19.5 NAP en -34.5 NAP (zie Figuur 5.6). Het probleem wordt als een 2D systeem (vlakke rek) geschematiseerd. Uit de seismische sonderingen wordt een groot aantal lagen (120 lagen voor de Achthoven situatie en 117 voor het Patrimoniumpark) gegenereerd. De dikte van de lagen varieert tussen 0,2 m (vlakbij maaiveld) en 1 m (op diepte). Elke laag wordt beschreven met de schuifgolfsnelheid, de dichtheid, het Poisson getal en de demping. De schuifgolfsnelheid komt direct uit de seismische sonderingen. De dichtheid is uit [2] benaderd. Voor het Poisson getal wordt 0.49 genomen voor klei en andere organische materialen en 0.45 voor zand. Voor de materiaaldemping wordt 3% van de kritische demping gebruikt voor alle materialen onafhankelijk van de frequentie.



Figuur 5.4 Spectrale randvoorwaarden elementen discretisatie

De gebruikte grondparameters zijn samengevat in Tabel 20 en Tabel 21.

Tabel 20 grondparameters Achthoven

laagdikte	dichtheid	V_s	Poisson	demping
[m]	[kg/m ³]	[m/s]	[-]	[%]
6	1600	190	0.45	3
2	1460	110	0.49	3
2	1320	100	0.49	3
1	1100	170	0.45	3
16	2000	290	0.45	3
8	2050	320	0.45	3
halfruimte	2000	290	0.45	3

Tabel 21 grondparameters Patrimoniumpark

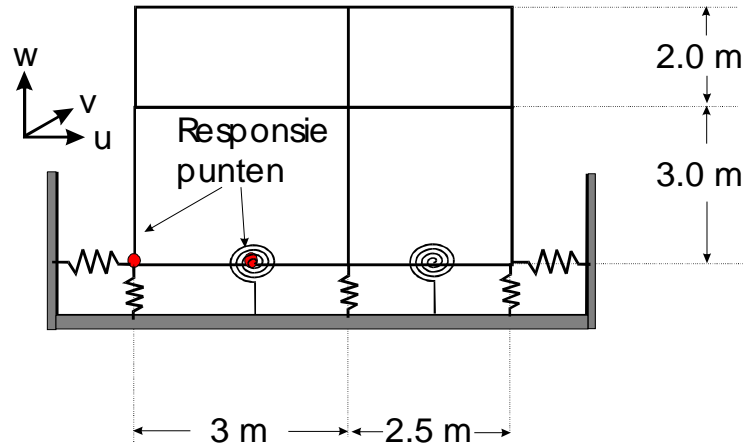
laagdikte	dichtheid	V_s	Poisson	demping
[m]	[kg/m ³]	[m/s]	[-]	[%]
2	1550	330	0.45	3
5	1600	270	0.45	3
2	2050	200	0.45	3
4.5	1950	180	0.45	3
7	2000	270	0.45	3
4.5	2000	410	0.45	3
3.5	2000	280	0.45	3
7	2050	330	0.45	3
halfruimte	2000	290	0.45	3

5.1.4 Dynamisch huismodel

De woning is gemodelleerd met het pakket Femlab. Femlab is eindige elementen software die samen met Matlab functioneert. De software kan typische vraagstukken van dynamica van constructies op verschillende manieren modelleren: met behulp van tijdsintegratie, modes superpositie en met de frequentie-responsie aanpak. In dit geval is voor de frequentie-responsie methode gekozen om de dynamische grond-constructie interactie te modelleren. De constructie is via viskeuze veren met de aarde verbonden. De veren zijn frequentieafhankelijk en worden met BOR berekend. De berekende responsie op het maaiveld is de excitatiebron voor de SSI. De excitatie wordt op het laagste punt van het huis opgelegd (zie Figuur 5.5). Om het huis te modelleren zijn vlakke spanning Timoshenko balkelementen gebruikt. Over de constructie van de vloeren in het huis waren niet alle details bekend. Daarom zijn hierover de volgende aannames gedaan. Het huis is op strokenfundering gefundeerd en de vloer bestaat uit houten balken. De gebruikte materiaaleigenschappen staan in Tabel 22.

Tabel 22 Materiaaleigenschappen voor EEM

Element	E [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]
Funderingsbalken	25	0.33	2300
Vloeren	12	0.30	380
Muren	17	0.30	2000



Figuur 5.5 Het model van het huis

De responsie wordt bepaald in termen van snelheid op twee punten (fundering en vloer - zie figuur 2-2) langs de verticale richting (w), de horizontale richting loodrecht op de tunnelas (u) en de horizontale richting evenwijdig aan de tunnelas (v).

5.1.5 Globale aanpak

5.1.5.1 Definities

In dit hoofdstuk worden de volgende grootheden gebruikt:

Impedantie (of dynamische stijfheid) is gedefinieerd als

$$K(\omega) = \frac{F(\omega)}{R(\omega)} \dots\dots\dots(1)$$

- waarin,
- K is de impedantie [N/m];
 - R is de responsie [m];
 - F is de kracht [N];
 - ω is de frequentie [rad];

Deze definitie is gebruikelijk in dynamica van constructies. De inverse van de impedantie is de compliantie (ook dynamische flexibiliteit)

$$Z(\omega) = \frac{R(\omega)}{F(\omega)} \dots\dots\dots(2)$$

waarin,

- Z is de compliantie [m/N];
- R is de responsie [m];
- F is de kracht [N];
- ω is de frequentie [rad];

5.1.5.2 Maaiveldresponse

De gemeten response op een punt $P_i(x_i, y_i, z_i)$ (zie Figuur 5.6) in het frequentiedomein kan worden opgeschreven als

$$R_{\text{gem}}(x_i, y_i, z_i, \omega) = F_{\text{eq}}(\omega) * Z_{\text{gem}}(x_i, y_i, z_i, \omega) \dots \dots \dots (3)$$

waarin,

- R_{gem} is de gemeten responsie [m];
- F_{eq} is de equivalente kracht van de TBM [N];
- Z_{gem} is de werkelijke compliantie van het systeem [m/N];
- $x_i, y_i,$ en z_i zijn de coördinaten van het systeem [m].

Als de compliantie van het systeem Z gemodelleerd wordt kan de kracht van de TBM worden terug berekend via

$$F_{\text{ber}}(\omega) = R_{\text{gem}}(x_i, y_i, z_i, \omega) * Z_{\text{ber,meting}}(x_i, y_i, z_i, \omega)^{-1} \dots \dots \dots (4)$$

waarin,

- F_{ber} is de terug berekende kracht van de TBM [N];
- $Z_{\text{ber,meting}}$ is de berekende compliantie van het systeem op de plaats van de meting [m/N].

Met de berekende kracht van de TBM en met de compliantie van de locatie Patrimoniumpark (uit een nieuwe modelleringfase) kan de responsie voorspeld worden met

$$R_{\text{pred}}(x_i, y_i, z_i, \omega) = F_{\text{ber}}(\omega) * Z_{\text{pred}}(x_i, y_i, z_i, \omega) \dots \dots \dots (5)$$

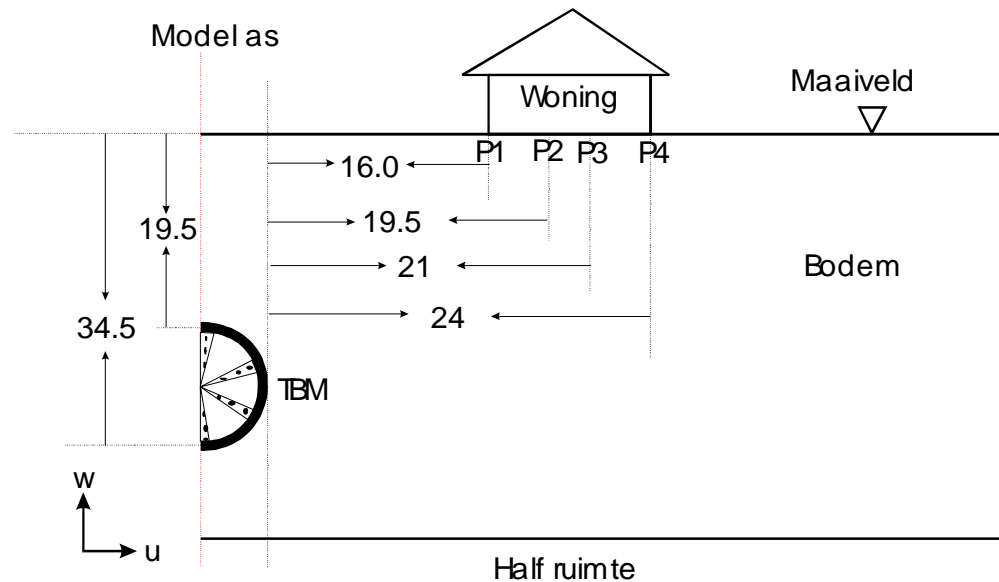
waarin,

- R_{pred} is de voorspelde responsie [m];
- Z_{pred} is de voorspelde compliantie van het systeem [m/N].

$R_{\text{pred}}(x_i, y_i, z_i, \omega)$ kan dan worden terug getransformeerd in het tijddomein waarna de responsie op het maaiveld wordt bepaald in termen van snelheid en effectieve snelheid [7]. R_{pred} is op vier punten bepaald. De horizontale afstanden (zie Figuur 5.6) van de uiterste punten van de TBM wand worden in de volgende tabel gegeven. Deze punten zijn de contactpunten van het huis met de grond, respectievelijk punt P1, P3 en P4 voor een huisdoorsnede loodrecht op de tunnelas en P1, P2 en P3 voor een huisdoorsnede evenwijdig aan de tunnelas.

Tabel 23 Horizontale afstanden van de tunnelwand van de punten waarvoor de responsie bepaald is

	P1	P2	P3	P4
Hor. afstand [m]	16	19.5	21	24



Figuur 5.6 Het geschematiseerde model

5.1.5.3 Woningresponsie

De responsie in de woning wordt bepaald door middel van multistep SSI. De multistep SSI heeft voordelen ten opzicht van de directe methode (bodem en constructie in een enkele model):

- De bodem toont het grootste aantal vrijheidsgraden in vergelijking met de constructie. In een multistep SSI met randelementen modellering voor de bodem wordt de grondresponsie met minder vrijheidsgraden gemodelleerd en wordt de berekening efficiënter.
- Als de resultaten van een subdeel van het probleem niet toerijkend zijn kan makkelijk dit subdeel opnieuw gemodelleerd worden.
- Het wordt makkelijker de afzonderlijke aspecten van het probleem te bestuderen en de controle op de resultaten is hoger.

Het is mogelijk verschillende constitutive relaties in hetzelfde model te gebruiken (bijvoorbeeld vlakke rek voor de grond en axisymmetrie voor de constructie).

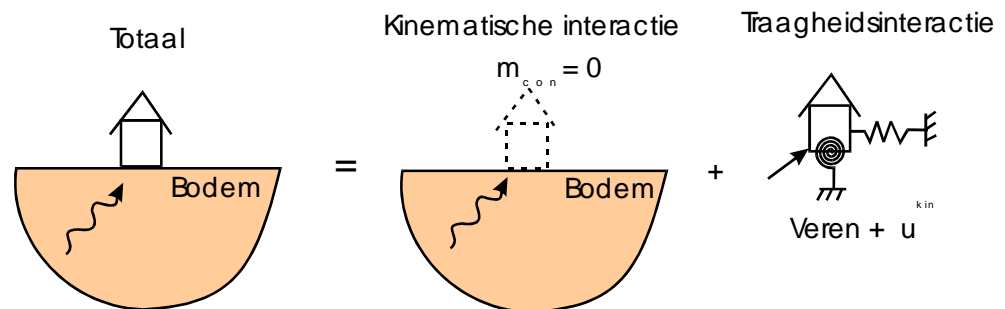
Eerste wordt de maaiveld – constructie interactie bepaald (kinematische interactie). In deze fase wordt de constructie als massaloos gemodelleerd. Het resultaat van deze analyse is de “Foundation Input Motion” (FIM) dat is de input beweging voor de constructie. Daarna wordt de frequentieafhankelijke bodemstijfheid bepaald. De stijfheid wordt uitgedrukt als een set van translatie- en rotatieveren. Uiteindelijk is de traagheidsresponsie van de constructie bepaald. Hier wordt de constructie gefundeerd op de frequentieafhankelijke veren geëxciteerd door de FIM. De multistep aanpak is in Figuur 5.7 getoond. De eerste 2 stappen worden met behulp van BOR uitgevoerd. De

laatste stap wordt met Femlab uitgevoerd. In wiskundige taal kan de multistep SSI opgeschreven [9] als

$$\begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ss} & \mathbf{S}_{so} \\ \mathbf{S}_{os} & \mathbf{S}_{oo}^s + \mathbf{S}_{oo}^g \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^i \\ \mathbf{u}_o^i \end{Bmatrix} = \omega^2 \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ss} & \mathbf{M}_{so} \\ \mathbf{M}_{os} & \mathbf{M}_{oo}^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_s^k \\ \mathbf{u}_o^k \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

waarin,

- S is de complexe stijfheidsmatrix;
- M is de massa matrix;
- u is de verplaatsing;
- s is constructie;
- o is de beweging van een star lichaam aan de rand constructie-bodem;
- g is de complexe stijfheidsmatrix van de bodem;
- ω is de frequentie;
- i is traagheidseffect;
- k is kinematisch effect.



Figuur 5.7 Geschematiseerde SSI

5.2 Resultaten

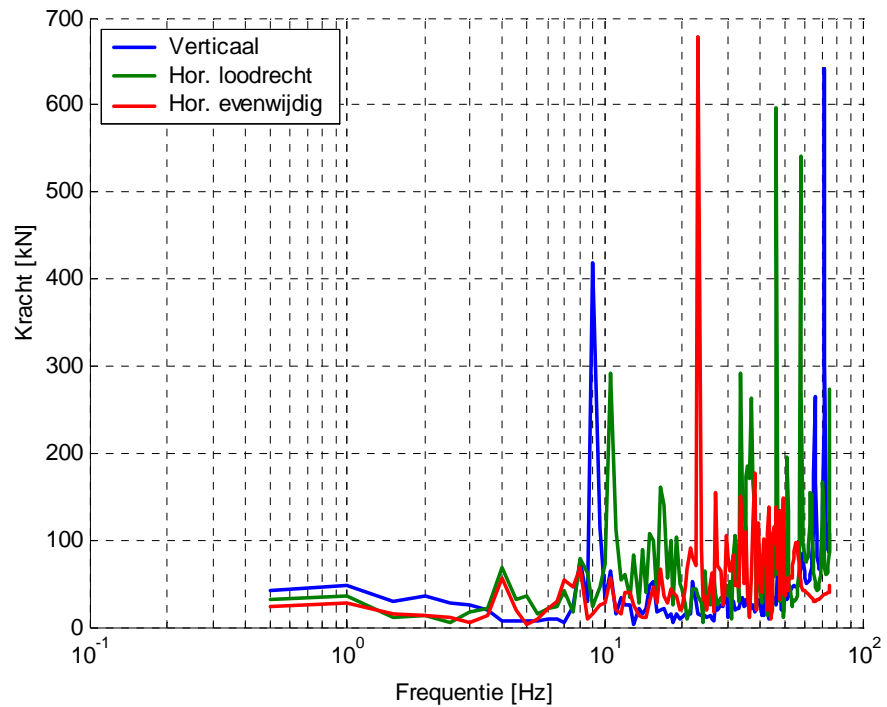
5.2.1 Inleiding

In deze paragraaf worden de resultaten gepresenteerd. Eerst wordt de terug berekende TBM kracht weer gegeven. Het is misschien een interessante exercitie de vergelijking van de resultaten van deze studie met de predictie voor de Groene Hart Tunnel gegeven in [8]. Daarna wordt de bodemadmittantie voor de Patrimoniumpark weergegeven. Met de bodemadmittanties wordt de maaiveldtrillingsterkte berekend. De modale responsie van het huis wordt verder bestudeerd om de twee eerste eigenfrequenties en de Rayleigh demping te bepalen. In de volgende sectie worden de bepaalde veerstijfheden gepresenteerd. Uiteindelijk wordt de voorspelde trillingsterkte in de woning gepresenteerd.

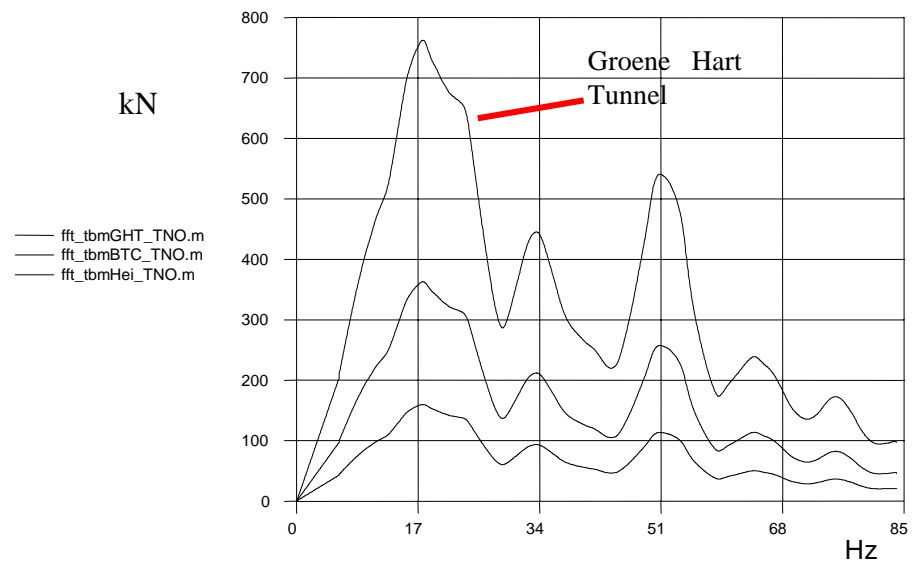
5.2.2 TBM kracht

Uit vergelijking (4) zijn TBM krachtspectra bepaald. Vier gemeten responsies (twee op diepte en twee op het maaiveld) worden gebruikt om de TBM krachtspectra te bepalen. De TBM krachtspectra zijn dan gemiddeld om near-field en far-field effecten te

beschouwen. In Figuur 5.8 worden de spectra getoond. In Figuur 5.9 is het TBM krachtspectrum bepaald in [8].



Figuur 5.8 Spectrum van de totale krachtgevoerd door de TBM



Figuur 5.9 Voorspelde TBM kracht uit [8]

5.2.3 Prognose Patrimoniumpark

Uit het grondmodel (zie sectie 5.1.3) zijn de horizontale en verticale complianties voor de meetpunten M1 tot en met M10 bepaald. Uit vergelijking (3) zijn de responsespectra bepaald. De spectra zijn vervolgens gedifferentieerd naar snelheden. De snelheidspectra

zijn in het tijddomein getransformeerd en de effectieve snelheden zijn bepaald volgens de SBR richtlijn B. In Tabel 24 staan de voorspelde maximale snelheden en de effectieve snelheden op de meetlocatie ter plaatse van het Patrimoniumpark.

Tabel 24 Voorspelde maximale snelheid en effectieve snelheid

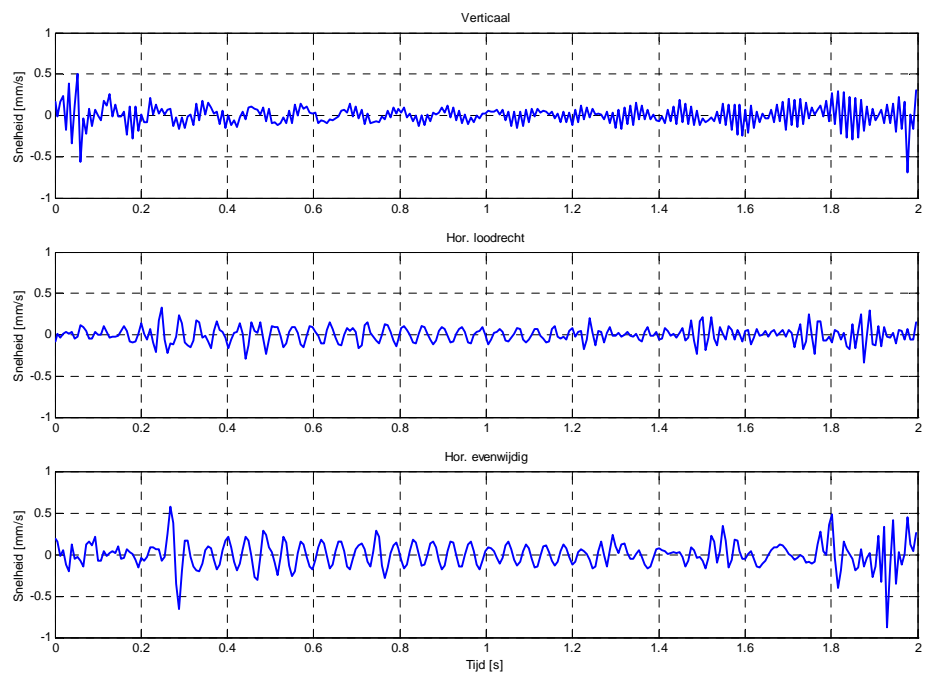
Meetpunt	Richting	V _{max} [mm/s]		V _{eff} [-]	
		50%	95%	50%	95%
M1	Z	0.12	0.30	0.06	0.15
M1	Y	0.23	0.58	0.09	0.22
M1	X	0.05	0.13	0.02	0.06
M2	Z	0.21	0.53	0.11	0.26
M2	Y	0.39	0.98	0.16	0.40
M2	X	0.11	0.28	0.05	0.13
M3	Z	0.22	0.55	0.11	0.28
M3	Y	0.39	0.98	0.15	0.38
M3	X	0.11	0.28	0.05	0.12
M4	Z	0.13	0.33	0.07	0.16
M4	Y	0.26	0.65	0.11	0.27
M4	X	0.06	0.15	0.03	0.07
M5	Z	0.30	0.75	0.15	0.38
M5	Y	0.14	0.35	0.05	0.14
M5	X	0.09	0.23	0.04	0.10
M6	Z	0.20	0.50	0.10	0.25
M6	Y	0.32	0.80	0.13	0.33
M6	X	0.08	0.20	0.04	0.09
M7	Z	0.29	0.73	0.15	0.37
M7	Y	0.13	0.33	0.05	0.13
M7	X	0.09	0.23	0.04	0.10
M8	Z	0.11	0.28	0.06	0.14
M8	Y	0.21	0.53	0.09	0.22
M8	X	0.05	0.13	0.02	0.06
M9	Z	0.05	0.13	0.03	0.06
M9	Y	0.10	0.25	0.04	0.10
M9	X	0.02	0.05	0.01	0.02
M10	Z	0.07	0.18	0.04	0.09
M10	Y	0.12	0.30	0.05	0.12
M10	X	0.04	0.10	0.02	0.05
D1	Z	0.23	0.58	0.12	0.29
D1	Y	0.39	0.98	0.15	0.38
D1	X	0.17	0.43	0.07	0.19
D2	Z	0.14	0.35	0.07	0.18
D2	Y	0.22	0.55	0.09	0.23
D2	X	0.07	0.18	0.03	0.08
D3	Z	0.84	2.10	0.43	1.07
D3	Y	1.33	3.33	0.52	1.30
D3	X	0.51	1.28	0.22	0.56
D4	Z	0.21	0.53	0.11	0.26

Meetpunt	Richting	V_{\max} [mm/s]		V_{eff} [-]	
		50%	95%	50%	95%
D4	Y	0.40	1.00	0.16	0.41
D4	X	0.12	0.30	0.06	0.14

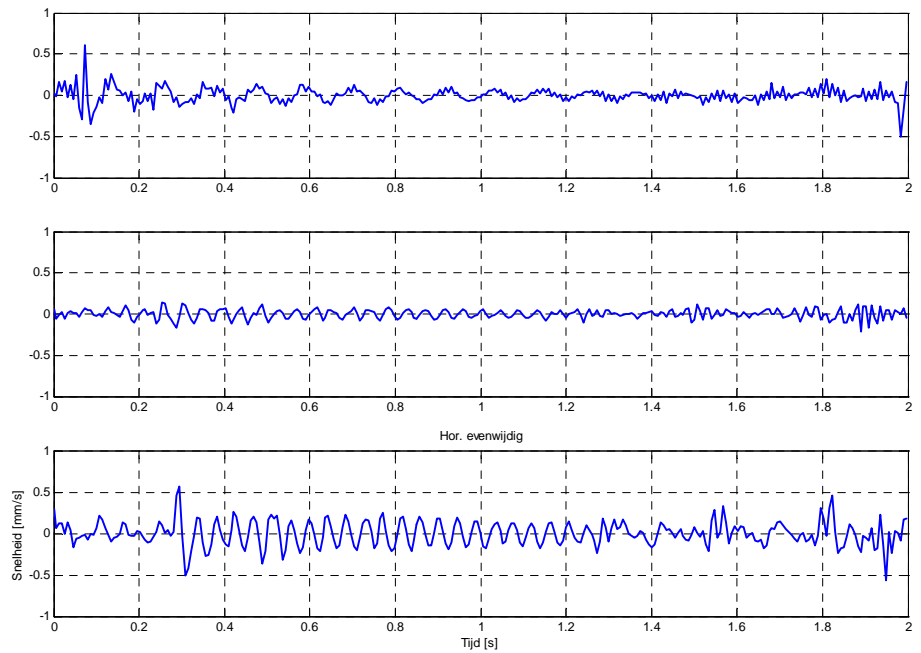
In Tabel 25 staan de voorspelde maximale snelheden en de effectieve snelheden op het maaiveld ter plaatse van Patrimoniumpark 26. In Figuur 5.10 en in Figuur 5.11 worden de berekende snelheden op punt P1 en P4 als voorbeeld getoond.

Tabel 25 Voorspelde maximale snelheid en effectieve snelheid op het maaiveld

Locatie	V_{\max} [mm/s]			$V_{\text{eff,max}}$ [mm/s]		
	Vert.	H. lood.	H. even.	Vert.	H. lood.	H. even.
P1	0.69	0.34	0.88	0.25	0.17	0.31
P2	0.62	0.27	0.68	0.23	0.13	0.26
P3	0.55	0.20	0.63	0.22	0.11	0.25
P4	0.60	0.21	0.57	0.21	0.10	0.24



Figuur 5.10 Snelheid op punt P1



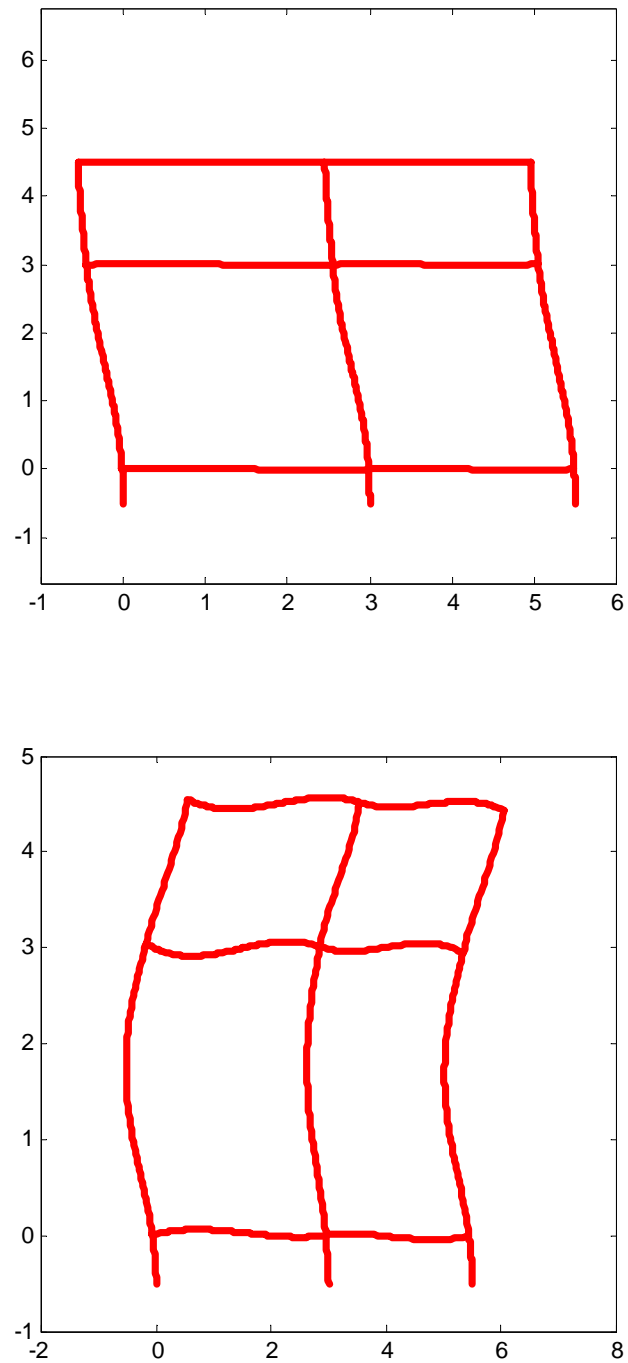
Figuur 5.11 Snelheid op punt P4

5.2.4 Woning eigenfrequenties

De eerste zes berekende eigenfrequenties zijn in Tabel 26 weer gegeven. Met de eerste twee berekende eigenfrequentie en met de aanname dat de modale demping 4% voor beide eigenfrequenties is wordt de Rayleigh demping bepaald als 0.65 (alfa) en 0.0015 (beta). In Figuur 5.12 zijn de twee eerste modes van de woning weergegeven.

Tabel 26 De eerste zes berekende eigenfrequenties (Hz)

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
9.4	41.5	70.4	72.3	90.5	106.2

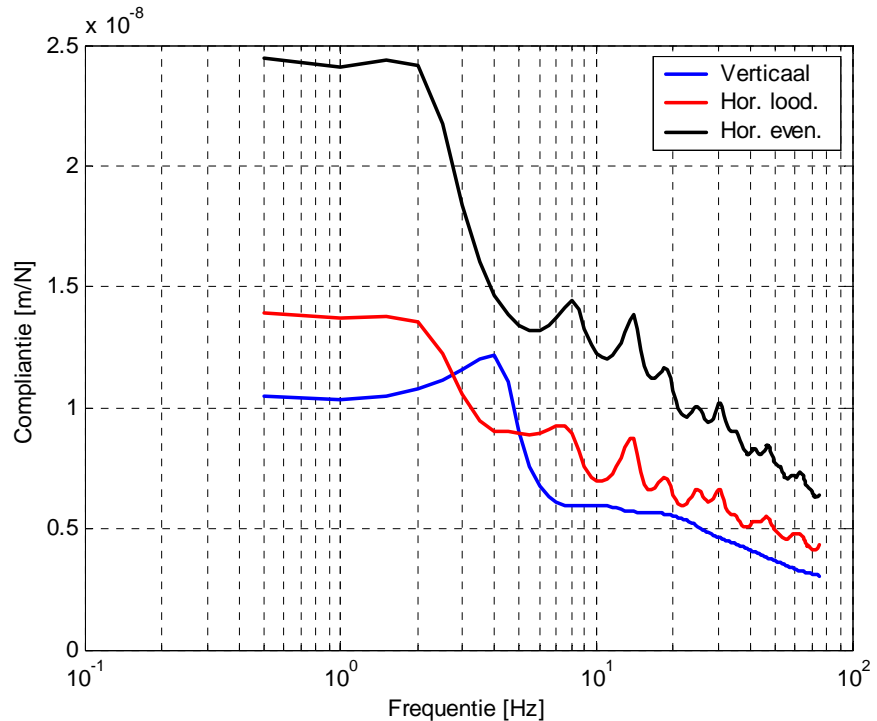


Figuur 5.12 Berekende twee eerste modes

5.2.5 Funderingstijfheden

De fundering wordt geschematiseerd als een massalose strook. De complianties (verticaal, horizontaal loodrecht en horizontaal evenwijdig) worden met BOR bepaald. De gebruikte frequentiestap is 0,5 Hz en de maximale frequentie is 75 Hz. De complexe

admittantie wordt uit de inverse van de compliantie bepaald. Het is interessant op te merken dat zowel de vorm als de relatieve amplitudes overeenkomen met de in [9] gegeven waarde voor een halfruimte.



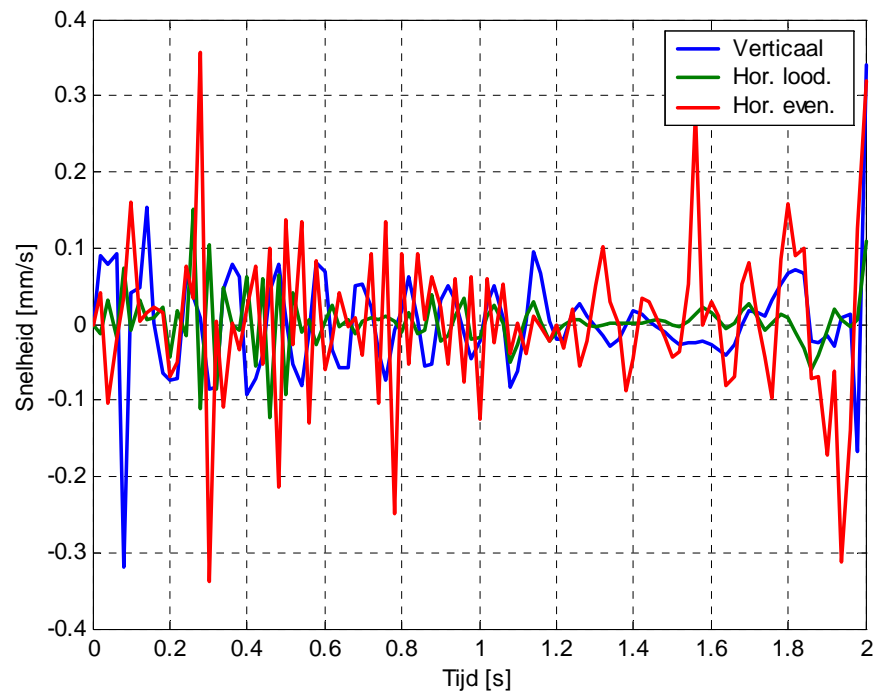
Figuur 5.13 Receptanties van de fundering

5.2.6 Trillingsterkte in de woning

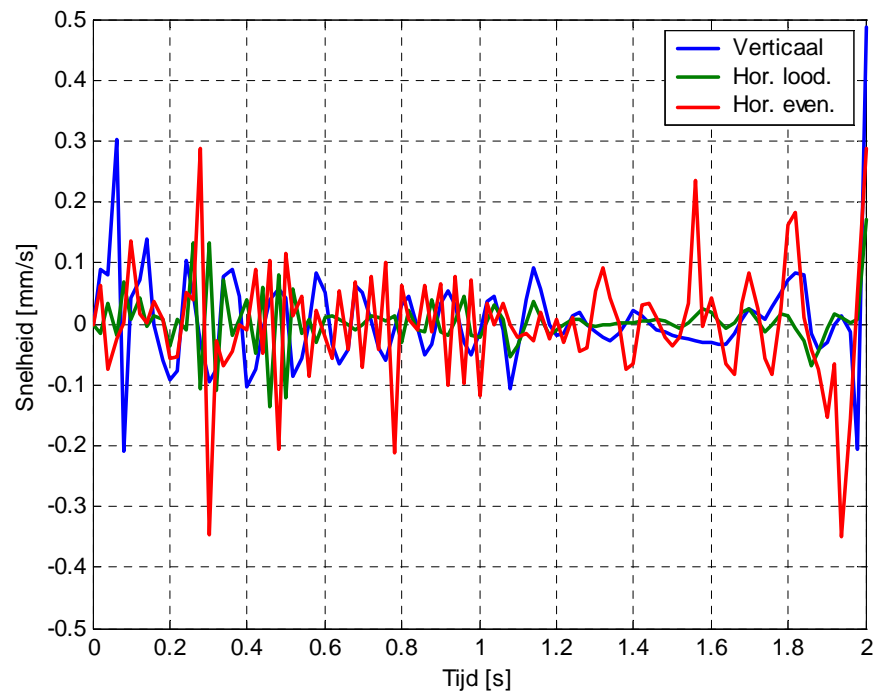
Uit het eindige elementen model beschreven in sectie 5.1.4 en uit de SSI beschreven in 5.1.5.3 is de responsie van de woning berekend. De responsiepunten zijn de fundering op de kortste afstand van de TBM en het midden van de vloer op de kortste afstand van de TBM. Het eindige elementen model levert spectra die zijn terug getransformeerd in het tijd domein en daarna afgeleiden in snelheden. De effectieve snelheden zijn verder volgens [7] bepaald.

Tabel 27 Voorspelde maximale snelheid en effectieve snelheid in de woning

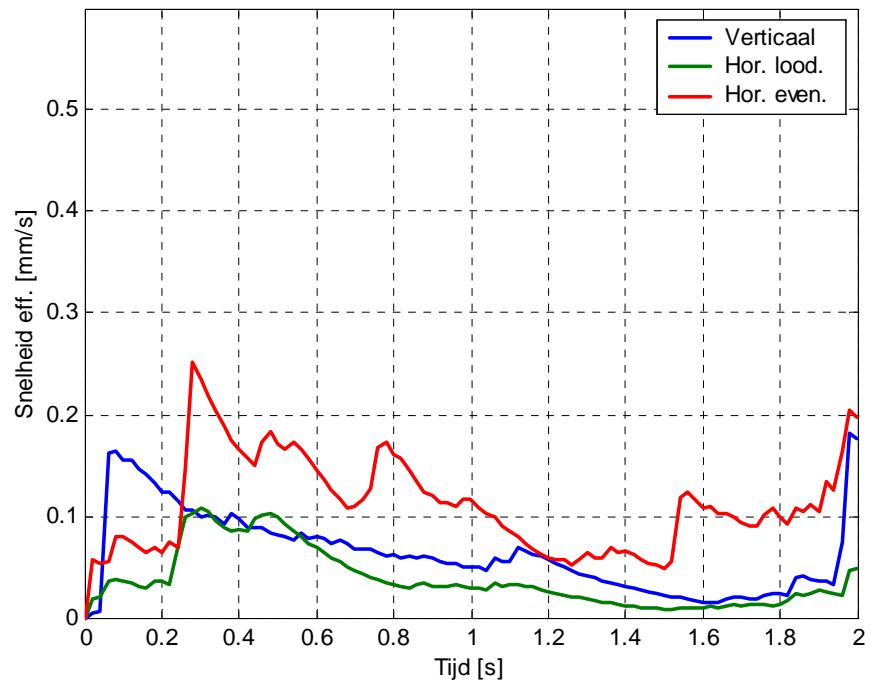
	V_{\max} [mm/s]			$V_{\text{eff,max}}$ [mm/s]		
	Vert.	H. lood.	H. even.	Vert.	H. lood.	H. even.
Fundering	0.34	0.15	0.36	0.18	0.11	0.25
Vloer	0.49	0.17	0.35	0.25	0.12	0.23



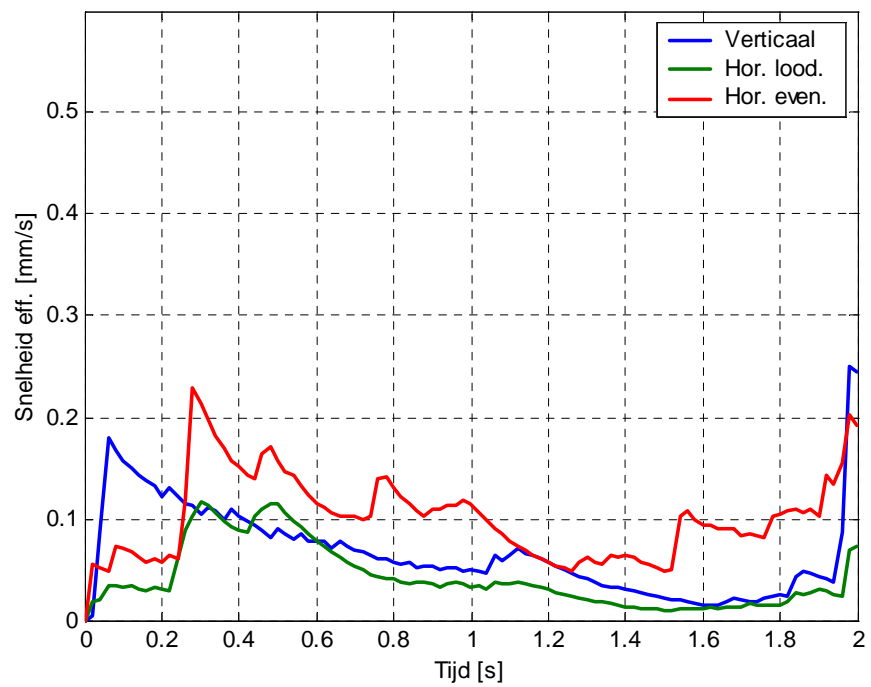
Figuur 5.14 Snelheden fundering



Figuur 5.15 Snelheden vloer



Figuur 5.16 Effectieve snelheden fundering



Figuur 5.17 Effectieve snelheden vloer

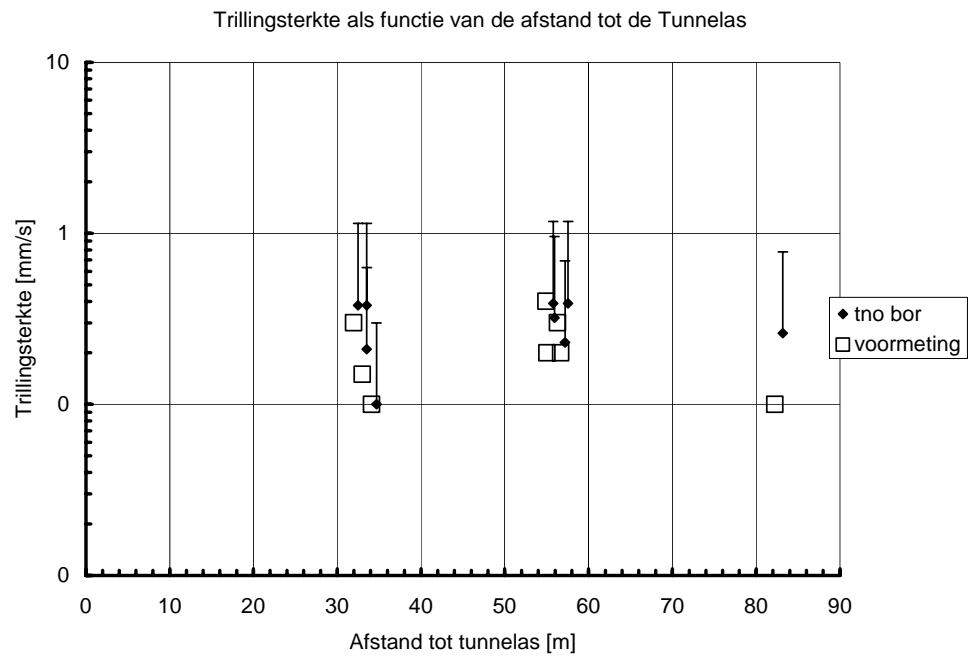
5.3 Conclusies modellering met behulp van BOR

- Op het maaiveld op het punt van het huis dat zich het dichtst bij de tunnelas (16 m) bevindt zijn de maximale voorspelde snelheden 0.69 (verticaal), 0.34 (horizontaal loodrecht) en 0.88 mm/s (horizontaal evenwijdig);
- in het huis op en de fundering zijn de maximale voorspelde snelheden 0.34 (verticaal), 0.15 (horizontaal loodrecht) en 0.36 mm/s (horizontaal evenwijdig);
- in het huis op de midden ven de vloer zijn de maximale voorspelde snelheden 0.49 (verticaal), 0.17 (horizontaal loodrecht) en 0.35 mm/s (horizontaal evenwijdig);
- er is een goede overeenkomst tussen de gedeconvolueerde TBM kracht en de voorspelde TBM kracht [8]. In beide spectra is de energie geconcentreerd in dezelfde frequentieband en de maximale energie geleverd door de TBM is in beide benaderingen in de buurt van 700 kN.

5.4 Referenties

- [1] G. Esposito, 2001. "Spectral Boundary Elements for Soil Dynamics", TNO Rapport CON-DYN-R8054.
- [2] V. Hopman, 2000. "Grondonderzoek HSL Groene Hart Tunnel Seismische Sonderingen", Geodelft Rapport CO 380840/671.
- [3] J. Vriends, 1999. "Bebouwingsrapport, locatie Patrimoniumpark 24 en 26 te Leiderdorp".
- [4] D.J., Molenaar, 2002. "Meetrapport trillingsmetingen Groene Hart Tunnel - Voormeting", TNO Rapport, Concept.
- [5] Roesset, M., Kausel, F., 2001. "Thin Layer Method for Wave Propagation Problems" in Wave Propagation in Civil Engineering, Elsevier, Nederland.
- [6] Waas, G., 1989. "Linear two-dimensional analysis of foundation dynamic stiffness problems in semi-infinite layer media". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **15** (4), Springer, Duitsland.
- [7] SBR, 1993. "Hinder voor personen in gebouwen door trillingen", Richtlijn 2, Rotterdam.
- [8] G. Esposito, G.P.C van Oosterhout, S. Lokhorst, 2002. "Prediction of the TBM Force Spectrum for New Tunneling Projects in The Netherlands", Proceedings IS - Toulouse 2002, Balkema, Rotterdam.
- [9] Cough, J., Penzien, M., 1998. "Dynamics of Structures", McGraw Hill, NY. USA.

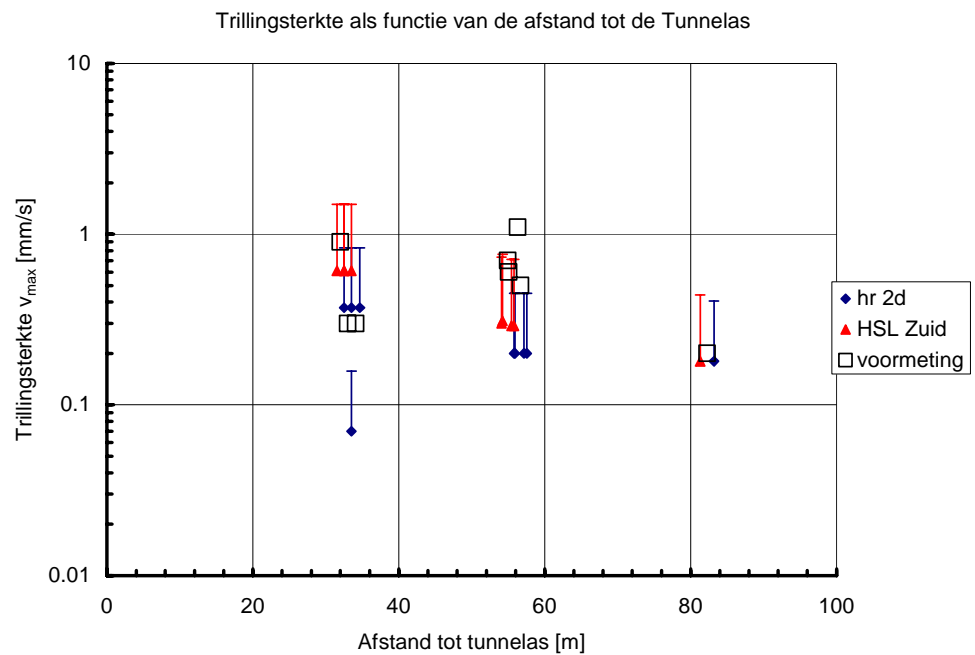
Een samenvatting van de prognoses door TNO Bouw met behulp van BOR is grafisch weergegeven in Figuur 5.18.



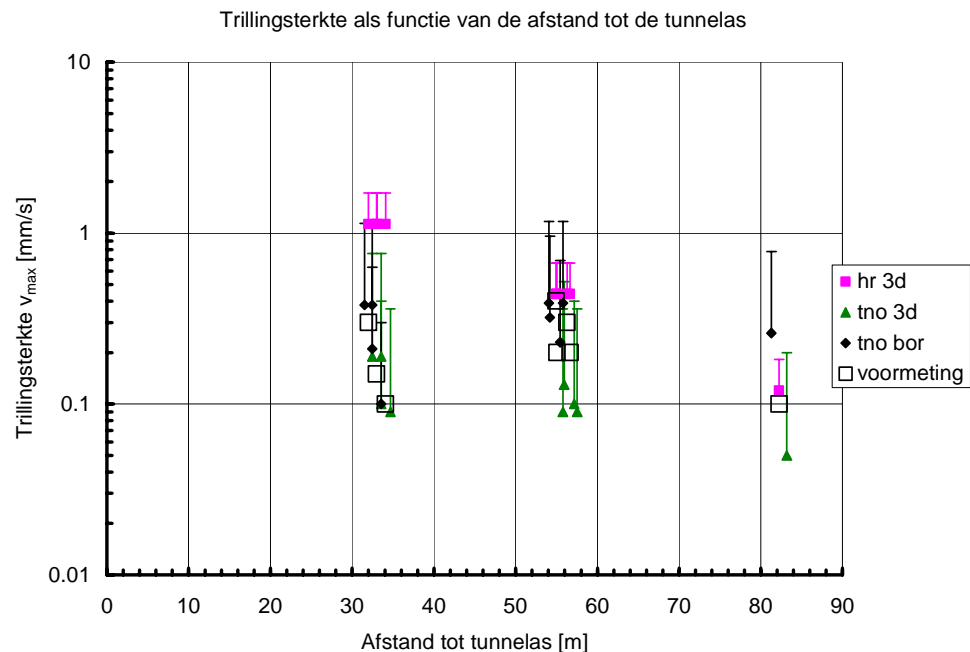
Figuur 5.18 Samenvatting prognoses met behulp van BOR door TNO Bouw. De weergegeven waarden van de voormeting zijn de gemiddelde gemeten waarden in horizontale richting.

6 Samenvatting en conclusies

Een samenvatting van alle resultaten staat in de tabel in de bijlage. Hierbij moet onderscheid worden gemaakt tussen de prognoses voor de trillingen als gevolg van het boren en de trillingen als gevolg van het plaatsen van de segmenten. De resultaten in deze tabel zijn tevens grafisch uitgezet in Figuur 6.1 en Figuur 6.2. In deze grafieken staat de trillingsterkte v_{\max} uitgezet als functie van de afstand tot de tunnelas. Voor de afstand is de geprojecteerde horizontale afstand genomen. De symbolen zijn de 50 % waarden, de foutenbalken geven de 95 % bovengrenzen aan.



Figuur 6.1 Samenvatting resultaten trillingen als gevolg van het plaatsen van segmenten. De weergegeven waarden van de voormeting zijn de maximaal gemeten waarden.



Figuur 6.2 Samenvatting resultaten trillingen als gevolg van het boren van de TBM. De weergegeven waarden van de voormeting zijn de gemiddelde gemeten waarden in horizontale richting.

Uit Figuur 6.1 en Figuur 6.2 blijkt dat er grote verschillen tussen de verschillende prognoses bestaan. De 95 % bovengrenzen dekken elkaar niet geheel af.

Op basis van de resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

- Op basis van de resultaten volgt dat de grenswaarden volgens SBR richtlijn A niet worden overschreden. Er valt dus geen schade te verwachten.
- Het is niet uit te sluiten dat ten gevolge van booractiviteiten gedurende enkele dagen lichte trillingshinder optreedt, in die zin dat gedurende de beoordelingsperioden, dag en avond, de streefwaarden van de SBR B kunnen worden overschreden. Een en ander hangt af van de dynamische eigenschappen van vloeren en fundering van de beschouwde woning.
- Er zijn verschillen tussen de verschillende prognoses. De foutenbalken dekken elkaar niet af. De gepresenteerde foutenbalken zijn gebaseerd op een combinatie van modelonzekerheid, parameteronzekerheid en variatie van de trillingssterkte van de bron. Deze bronnen van onzekerheid zijn niet uitgesplitst. Een nadere analyse hiervan zou meer inzicht kunnen verschaffen in de te verwachten spreiding in de resultaten van de verschillende modellen.
- Het is niet duidelijk wat de verschillen tussen de prognoses heeft veroorzaakt: er zijn meerdere verschillende parameters gebruikt. Sommige parameters waren niet bekend (bijvoorbeeld de exacte samenstelling van de bodem, de dikte van de vloer in de woning, de constructie ervan, etc). Hiervoor zijn door de participanten verschillende waarden aangenomen.

A Resultaten

Ch. No.	meetpunt	richting	Holland Railconsult 2D				Holland Railconsult 3D				TNO Bouw 3D				TNO Bouw BOR				HSL Zuid			
			vmax		veffmax		vmax		veffmax		vmax		veffmax		vmax		veffmax		vmax		veffmax	
			gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven
1	M1	Z	0.11	0.25	0.05	0.11	0.19	0.29	0.08	0.12	0.07	0.29	0.05	0.19	0.12	0.36	0.06	0.18	0.29	0.64	0.21	0.46
2	M1	Y	0.2	0.45	0.08	0.18	0.31	0.47	0.12	0.18	0.10	0.40	0.06	0.22	0.23	0.69	0.09	0.27				
3	M1	X					0.44	0.67	0.18	0.27	0.05	0.18	0.03	0.10	0.05	0.15	0.02	0.07				
4	M2	Z	0.11	0.25	0.05	0.11	0.19	0.29	0.08	0.12	0.07	0.29	0.04	0.16	0.21	0.63	0.11	0.32	0.3	0.66	0.22	0.48
5	M2	Y	0.2	0.45	0.08	0.18	0.31	0.47	0.12	0.18	0.09	0.36	0.06	0.22	0.39	1.17	0.16	0.48				
6	M2	X					0.44	0.67	0.18	0.27	0.01	0.06	0.08	0.33	0.11	0.33	0.05	0.15				
7	M3	Z	0.11	0.25	0.05	0.11	0.19	0.29	0.08	0.12	0.07	0.29	0.04	0.16	0.22	0.66	0.11	0.34	0.29	0.64	0.21	0.46
8	M3	Y	0.2	0.45	0.08	0.18	0.31	0.47	0.12	0.18	0.09	0.36	0.06	0.22	0.39	1.17	0.15	0.46				
9	M3	X					0.44	0.67	0.18	0.27	0.01	0.06	0.08	0.33	0.11	0.33	0.05	0.15				
10	M4	Z	0.05	0.11	0.02	0.05	0.05	0.08	0.02	0.03	0.03	0.10	0.01	0.05	0.13	0.39	0.07	0.20	0.18	0.40	0.13	0.29
11	M4	Y	0.18	0.41	0.07	0.16	0.05	0.08	0.02	0.03	0.03	0.12	0.02	0.07	0.26	0.78	0.11	0.32				
12	M4	X					0.12	0.18	0.06	0.09	0.05	0.21	0.03	0.12	0.06	0.18	0.03	0.08				
13	M5	Z	0.07	0.16	0.04	0.09	0.23	0.35	0.09	0.14	0.07	0.29	0.03	0.13	0.30	0.90	0.15	0.46				
14	M5	Y	0.37	0.83	0.15	0.34	0.64	0.97	0.32	0.49	0.19	0.78	0.09	0.38	0.14	0.42	0.05	0.16				
15	M5	X					1.13	1.72	0.51	0.78	0.16	0.66	0.07	0.28	0.09	0.27	0.04	0.12				
16	M6	Z	0.11	0.25	0.05	0.11	0.19	0.29	0.08	0.12	0.05	0.19	0.02	0.07	0.20	0.60	0.10	0.30	0.31	0.68	0.21	0.46
17	M6	Y	0.2	0.45	0.08	0.18	0.31	0.47	0.12	0.18	0.12	0.46	0.04	0.17	0.32	0.96	0.13	0.39				
18	M6	X					0.44	0.67	0.18	0.27	0.13	0.51	0.05	0.20	0.08	0.24	0.04	0.11				
19	M7	Z	0.07	0.16	0.04	0.09	0.23	0.35	0.09	0.14	0.07	0.29	0.03	0.13	0.29	0.87	0.15	0.44	0.61	1.34	0.43	0.95
20	M7	Y	0.37	0.83	0.15	0.34	0.64	0.97	0.32	0.49	0.19	0.78	0.09	0.38	0.13	0.39	0.05	0.15				

Ch. No.	meetpunt	richting	Holland Railconsult 2D				Holland Railconsult 3D				TNO Bouw 3D				TNO Bouw BOR				HSL Zuid			
			vmax		veffmax		vmax		veffmax		vmax		veffmax		vmax		veffmax		vmax		veffmax	
			gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven
21	M7	X					1.13	1.72	0.51	0.78	0.16	0.66	0.07	0.28	0.09	0.27	0.04	0.12				
22	M8	Z	0.07	0.16	0.04	0.09	0.23	0.35	0.09	0.14	0.04	0.18	0.02	0.09	0.11	0.33	0.06	0.17	0.61	1.34	0.43	0.95
23	M8	Y	0.37	0.83	0.15	0.34	0.64	0.97	0.32	0.49	0.08	0.31	0.03	0.13	0.21	0.63	0.09	0.26				
24	M8	X					1.13	1.72	0.51	0.78	0.10	0.39	0.04	0.16	0.05	0.15	0.02	0.07				
25	M9	Z	0.07	0.16	0.04	0.09	0.23	0.35	0.09	0.14	0.05	0.19	0.02	0.09	0.05	0.15	0.03	0.08	0.61	1.34	0.43	0.95
26	M9	Y	0.37	0.83	0.15	0.34	0.64	0.97	0.32	0.49	0.07	0.28	0.04	0.14	0.10	0.30	0.04	0.12				
27	M9	X					1.13	1.72	0.51	0.78	0.09	0.37	0.04	0.18	0.02	0.06	0.01	0.03				
28	M10	Z	0.11	0.25	0.05	0.11	0.19	0.29	0.08	0.12	0.07	0.29	0.04	0.16	0.07	0.21	0.04	0.11				
29	M10	Y	0.2	0.45	0.08	0.18	0.31	0.47	0.12	0.18	0.09	0.36	0.06	0.22	0.12	0.36	0.05	0.15				
30	M10	X					0.44	0.67	0.18	0.27	0.01	0.06	0.08	0.33	0.04	0.12	0.02	0.06				
31	D1	Z	0.05	0.11	0.02	0.05	0.33	0.50	0.16	0.24	0.07	0.28	0.04	0.15	0.23	0.69	0.12	0.35				
32	D1	Y	0.19	0.43	0.06	0.14	0.38	0.58	0.17	0.26	0.06	0.24	0.03	0.13	0.39	1.17	0.15	0.46				
33	D1	X					0.87	1.32	0.37	0.56	0.07	0.29	0.04	0.16	0.17	0.51	0.07	0.22				
34	D2	Z	0.03	0.07	0.01	0.02	0.14	0.21	0.06	0.09	0.02	0.08	0.01	0.05	0.14	0.42	0.07	0.21				
35	D2	Y	0.11	0.25	0.03	0.07	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.10	0.01	0.05	0.22	0.66	0.09	0.27				
36	D2	X					0.11	0.17	0.05	0.08	0.06	0.24	0.04	0.15	0.07	0.21	0.03	0.10				
37	D3	Z	0.05	0.11	0.02	0.05	0.81	1.23	0.38	0.58	0.53	2.12	0.26	1.02	0.84	2.52	0.43	1.29				
38	D3	Y	0.31	0.70	0.1	0.23	0.59	0.90	0.25	0.38	0.42	1.68	0.24	0.96	1.33	3.99	0.52	1.56				
39	D3	X					2.2	3.34	0.88	1.34	0.71	2.84	0.35	1.38	0.51	1.53	0.22	0.67				
40	D4	Z	0.05	0.11	0.02	0.05	0.81	1.23	0.38	0.58	0.67	2.66	0.28	1.11	0.21	0.63	0.11	0.32				
41	D4	Y	0.31	0.70	0.1	0.23	0.59	0.90	0.25	0.38	0.49	1.95	0.23	0.92	0.40	1.20	0.16	0.49				
42	D4	X					2.2	3.34	0.88	1.34	0.54	2.15	0.20	0.81	0.12	0.36	0.06	0.17				
woning																						

			Holland Railconsult 2D				Holland Railconsult 3D				TNO Bouw 3D				TNO Bouw BOR				HSL Zuid			
			vmax		veffmax		vmax		veffmax		vmax		veffmax		vmax		veffmax		vmax		veffmax	
Ch. No.	meetpunt	richting	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven	gemiddelde	95% boven
	fundering	Z	0.25	0.56	0.09	0.20	0.57	0.87	0.24	0.36	0.07	0.29	0.04	0.16	0.34	1.02	0.18	0.54				
		Y					0.77	1.17	0.35	0.53	0.09	0.36	0.06	0.22	0.15	0.45	0.11	0.33				
		X					0.67	1.02	0.28	0.43	0.01	0.06	0.08	0.33	0.36	1.08	0.25	0.75				
	vloerveld	Z	0.22	0.50	0.09	0.20	0.41	0.62	0.18	0.27	0.21	0.84	0.18	0.72	0.49	1.47	0.25	0.75				
		Y					1.14	1.73	0.52	0.79	0.09	0.36	0.06	0.22	0.17	0.51	0.12	0.36				
		X					0.45	0.68	0.18	0.27	0.01	0.06	0.08	0.33	0.35	1.05	0.23	0.69				
	geluid	Lp(A)									7	17										
		16	27	62			47	71			63	73										
		32	13	30			63	96			42	52										
		63	8	19			61	92			31	41										
		125									0	4										