

Title Deliverable:		Betrouwbare Trillingsmaatregel, standaard rekenmethode voor trillingen (SRM-T), Referentieafstand en variatiestudie			
DC-Project code:	DC Project Title:	CT01.10 Beheerst Boren in Stedelijk Gebied			
CT01.10					
DC-Work package code	DC Work Package Title:	Workpackage 6 - de betrouwbare trillingsmaatregel			
CT01.11.13					
Principal Author 1:	R.D.J.M. Steenbergen	Institute:	TNO		
Contributor 1:	S.S.K. Lentzen	Institute:			
Report Type:	Final report				
Report Status:	Definitive				
Number of pages:	49	Number of Annexes:	0		
Keywords (3-8):	Trillingsrisico, referentieafstand, treinbelasting,				
Abstract:	<p>In TNO rapport TNO-034-DTM-2009-01104 is een Standaard RekenMethode voor Trillingen (SRM-T) ontwikkeld om het trillingsrisico als gevolg van passerende treinen al in een vroeg stadium te kunnen inschatten.</p> <p>In vervolg op het bovengenoemd rapport wordt in onderhavig rapport door middel van een analytische studie die deels door de TUD is uitgevoerd, nagegaan voor welke referentieafstand van de meting langs het spoor een equivalente treinbelasting bodemonafhankelijk is. Ook worden in een modelomgeving de variatiecoëfficiënten van de verschillende deelmodellen bepaald.</p> <p>Er zullen nog metingen met aanvullend onderzoek uitgevoerd worden om de SRM-T verder uit te werken. Dit rapport is daarom een eerste in een reeks documenten over dit onderwerp.</p> <p>In hoofdstuk 2 wordt toegelicht op welke wijze een bodemonafhankelijke bronkarakterisering wordt afgeleid. In hoofdstuk 3 wordt het TUD rapport besproken waarin in een analytisch model wordt gekeken voor welke referentieafstand van de meting langs het spoor een equivalente treinbelasting bodemonafhankelijk is. Vervolgens wordt in de hoofdstukken 4, 5 en 6 een numeriek model opgezet voor een grote variatiestudie. In hoofdstuk 7 worden dan de variatiecoëfficiënten van de verschillende deelmodellen bepaald.</p>				
Institute Publication-number (optional):		TNO-034-DTM-2009-03700	COB		
Isbn:		Issn:			
DC-Publication-number (invullen door DC):		CT01.13.R06			
Date:	15-09-2009				

Bouw
Van Mourik Broekmanweg 6
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 15 276 30 00
F +31 15 276 30 10
info-BenO@tno.nl

TNO-rapport

TNO-034-DTM-2009-03700

**Betrouwbare Trillingsmaatregel
Standaard RekenMethode voor Trillingen
(SRM-T),
Referentieafstand en variatiestudie**

Datum	15 september 2009
Auteur(s)	Dr. ir. R.D.J.M. Steenbergen Dr. ir. S.S.K. Lentzen Drs. A. Koopman
Opdrachtgever	Centrum Ondergrond Bouwen Postbus 420 2800 AK Gouda
Projectnummer	034.87187
Aantal pagina's	49
Aantal bijlagen	-

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke 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 onderzoeksopdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

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

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	3
2	Bodemonafhankelijke bronkarakterisering.....	4
3	Bespreking TUD-rapport ter ondersteuning keuze SRM-T.....	6
4	Fysisch compleet model.....	16
4.1	Numerieke aanpak.....	16
5	Opzet variatiestudie	20
5.1	FEM (bodem)	20
5.2	TRINT (trein)	27
6	Berekeningsmethode variatiestudie	32
6.1	TRINT berekening	32
6.2	FEM berekening: LS-Dyna	32
6.3	Convolutie FEM/TRINT	34
6.4	Bepaling overdrachtsadmittantie	36
6.5	Bepaling equivalente kracht onder het spoor	36
7	Resultaten variatiestudie	37
7.1	Eerste resultaten	37
7.2	Gedetailleerde analyse voor de equivalente kracht	41
8	Vervolg	46
8.1	Vervolgonderzoek	46
8.2	Toepassing op praktijksituatie.....	46
9	Conclusies.....	48
10	Literatuur.....	49

1 Inleiding

In TNO rapport TNO-034-DTM-2009-01104 is een Standaard RekenMethode voor Trillingen (SRM-T) ontwikkeld om het trillingsrisico als gevolg van passerende treinen al in een vroeg stadium te kunnen inschatten.

In vervolg op het bovengenoemd rapport wordt in onderhavig rapport door middel van een analytische studie die deels door de TUD is uitgevoerd, nagegaan voor welke referentieafstand van de meting langs het spoor een equivalente treinbelasting bodemonafhankelijk is. Ook worden in een modelomgeving de variatiecoëfficiënten van de verschillende deelmodellen bepaald.

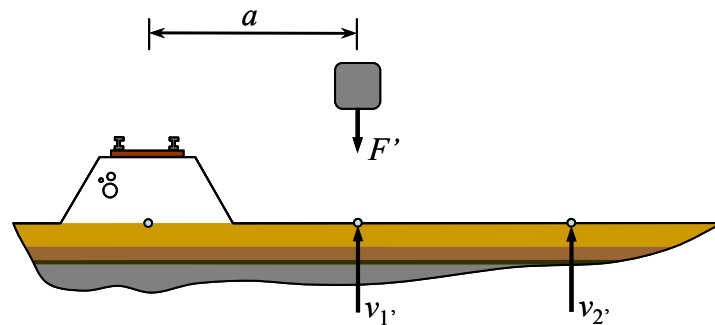
Er zullen nog metingen met aanvullend onderzoek uitgevoerd worden om de SRM-T verder uit te werken.

Dit rapport is daarom een eerste in een reeks documenten over dit onderwerp.

In hoofdstuk 2 wordt toegelicht op welke wijze een bodemonafhankelijke bronkarakterisering wordt afgeleid. In hoofdstuk 3 wordt het TUD rapport besproken waarin in een analytisch model wordt gekeken voor welke referentieafstand van de meting langs het spoor een equivalente treinbelasting bodemonafhankelijk is. Vervolgens wordt in de hoofdstukken 4, 5 en 6 een numeriek model opgezet voor een grote variatiestudie. In hoofdstuk 7 worden dan de variatiecoëfficiënten van de verschillende deelmodellen bepaald.

2 Bodemonafhankelijke bronkarakterisering

In TNO rapport TNO-034-DTM-2009-01104 is een equivalente trillingsbron onder het spoor voorgesteld om tot een bodemonafhankelijke bronkarakterisering te komen. Hieronder wordt deze nieuwe methode in algemene zin toegelicht.



Figuur 2.1 Valgewichtproef ter bepaling van de punt- en overdrachtsimpedantie van de bodem.

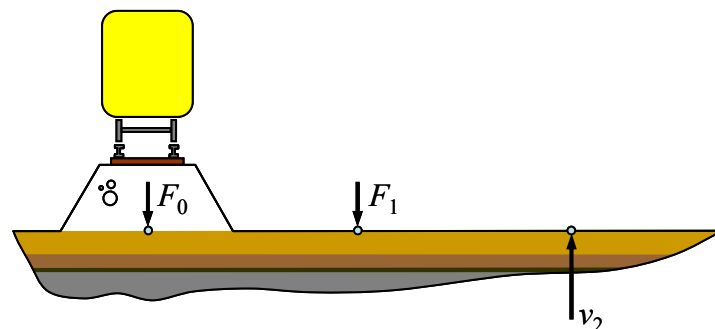
In figuur 2.1 is de valgewichtproef, zoals deze bij de equivalente lijnkrachtmethode gebruikt wordt, afgebeeld. Hierbij wordt op de positie 1 een valgewicht vanaf een bepaalde hoogte laten vallen om de bodem op dit punt te exciteren. Tijdens dit proces worden de kracht van het valgewicht F' en de trillingssnelheden van de bodem op de punten 1 en 2, v_1' en v_2' respectievelijk, gemeten. Hierdoor kunnen de puntimpedantie

$$Z_{11} = \frac{F'}{v_1'} \quad \text{of} \quad LT_{11}^{(F,v)} = L_1^{(F)} - L_1^{(v)} \quad (2.1)$$

en de overdrachtsimpedantie

$$Z_{12} = \frac{F'}{v_2'} \quad \text{of} \quad LT_{12}^{(F,v)} = L_1^{(F)} - L_2^{(v)} \quad (2.2)$$

bepaald worden. De tweede versie die in de bovenstaande vergelijkingen gegeven wordt is de notatie voor een logaritmische schaal, waarbij de L voor level staat, T is de transfer function (overdrachtsfunctie), de lage indices geven de posities aan en de hoge indices de variabele waarvoor de overdracht dan wel het niveau geldt.



Figuur 2.2 De bepaling van de equivalente kracht bij het passeren van een trein.

Zoals in figuur 2.2 afgebeeld is, wordt tijdens het passeren van een trein de snelheid v_2 op positie 2 gemeten. Met de voorheen gemeten overdrachtsimpedantie kan deze snelheid teruggerekend worden naar een equivalente lijnkracht op de positie 1

$$F_1 = Z_{12}v_2 \quad \text{of} \quad L_1^{(F)} = LT_{12}^{(F,v)} + L_2^{(v)}. \quad (2.3)$$

Deze equivalente kracht is dus niet alleen afhankelijk van de bron, maar ook van de bodemcondities van de bron tot dit punt.

Uitgaande van longitudinaal homogene bodemcondities en gelijke afstanden tussen de puntcombinaties 1-2 en 0-1, waarbij 0 het punt onder het spoor aanduidt, kan tussen de bron en de locatie van het valgewicht een gelijke overdrachtsimpedantie aangenomen worden als de voorheen bepaalde overdracht $LT_{12}^{(F,v)}$, dus

$$Z_{01} = Z_{12} \quad \text{of} \quad LT_{01}^{(F,v)} = LT_{12}^{(F,v)}. \quad (2.4)$$

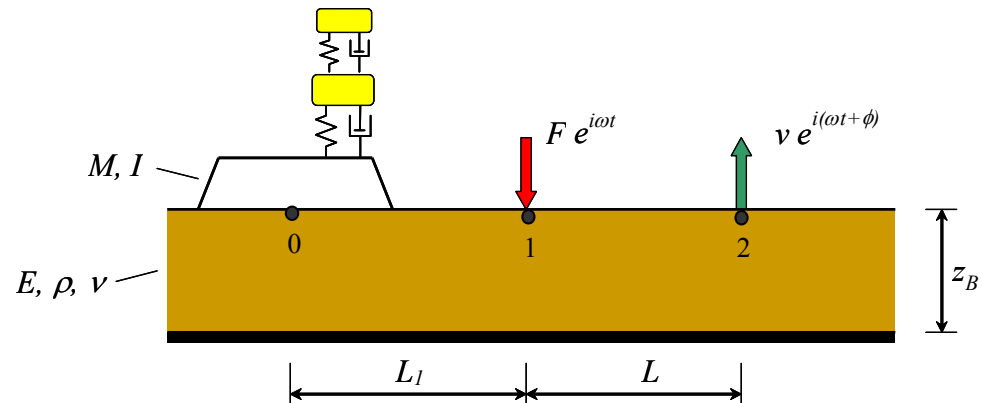
De uiteindelijke equivalente lijnkracht onder de bron kan dus als volgt bepaald worden

$$\begin{aligned} F_0 &= Z_{01}v_1 & L_0^{(F)} &= LT_{01}^{(F,v)} + L_1^{(v)} \\ &= Z_{01} \frac{F_1}{Z_{11}} & \text{of} & &= LT_{01}^{(F,v)} + L_1^{(F)} - LT_{11}^{(F,v)} \\ &= Z_{01} \frac{Z_{12}}{Z_{11}}v_2 & & &= LT_{01}^{(F,v)} + LT_{12}^{(F,v)} - LT_{11}^{(F,v)} + L_2^{(v)}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

De vraag die nu beantwoord moet worden is in hoeverre de overdrachtsimpedantie Z_{01} gelijk gesteld kan worden aan de overdrachtsimpedantie Z_{12} . Alvorens het principe te testen in een fysisch complete omgeving, zal deze vraag eerst beantwoord moeten worden. Dit is aan de TU Delft gedaan in een analytische omgeving, zie ref. [2]. De resultaten van die studie worden besproken in het volgende hoofdstuk.

3 Bespreking TUD-rapport ter ondersteuning keuze SRM-T

In dit hoofdstuk worden de uitgangspunten de resultaten uit de TUD studie besproken.



Figuur 3.1 Schematische representatie van het halfruimte model.

De analytisch beperkte omgeving wordt door een 2D halfruimte gemodelleerd. In Figuur 3.1 zijn de invoerparameters zichtbaar gemaakt. De bodem bestaat uit een enkele homogene elastische laag met de dikte z_B . De baan wordt door een massa M met een traagheidsmoment I beschreven. De trein wordt als 2-massa-veer systeem aangenomen.

Op de afstand L_1 van het middelpunt van de baan wordt de bodem door een kracht $F e^{i\omega t}$ geëxciteerd. Op een afstand L van dit punt vandaan wordt de responsie $v e^{i(\omega t + \phi)}$ geanalyseerd. Uit zowel de excitatie als de responsie kan de overdrachtsimpedantie bepaald worden.

Als de hypothese uit het vorige hoofdstuk klopt, namelijk dat de overdracht van punt 1 naar 2 hetzelfde is als van punt 0 naar 1, dan mag de, in dit model bepaalde, overdrachtsimpedantie van 1 naar 2 niet veranderen bij de verandering van de lengte L_1 zolang de afstand L constant blijft.

Deze hypothese is getoetst bij de variatie van verschillende factoren.

De eerste parametervariatie is als volgt opgebouwd.

Er werden twee typen bodems gekozen, namelijk bodemtype A:

$$E = 1 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2, \rho = 1500 \text{ kg/m}^3 \text{ en } \nu = 0,45$$

en bodemtype B:

$$E = 5 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2, \rho = 2000 \text{ kg/m}^3 \text{ en } \nu = 0,3$$

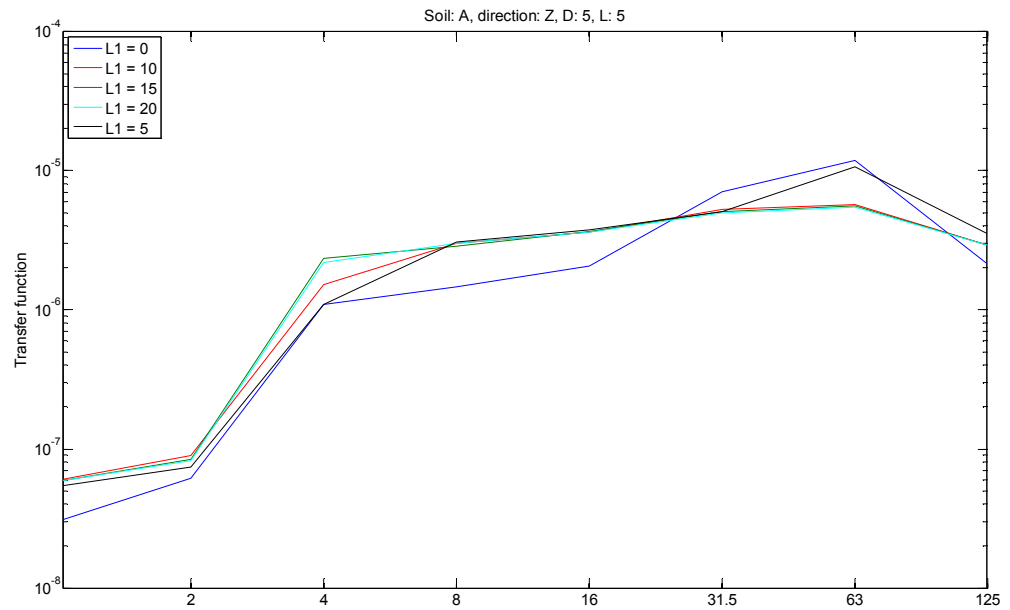
De laagdikte z_B van de bodem en L en L_1 werden van 5m tot 20m in stappen van 5m gevarieerd.

Voor de trein werd in eerste instantie als een één-massa-veer systeem gezien met een massa $M = 20 \cdot 10^3 \text{ kg}$; veerstijfheid $K = 1 \cdot 10^6 \text{ N/m}$ en een visceuze dempingsconstante $C = 1 \cdot 10^4 \text{ Ns/m}$ aangenomen.

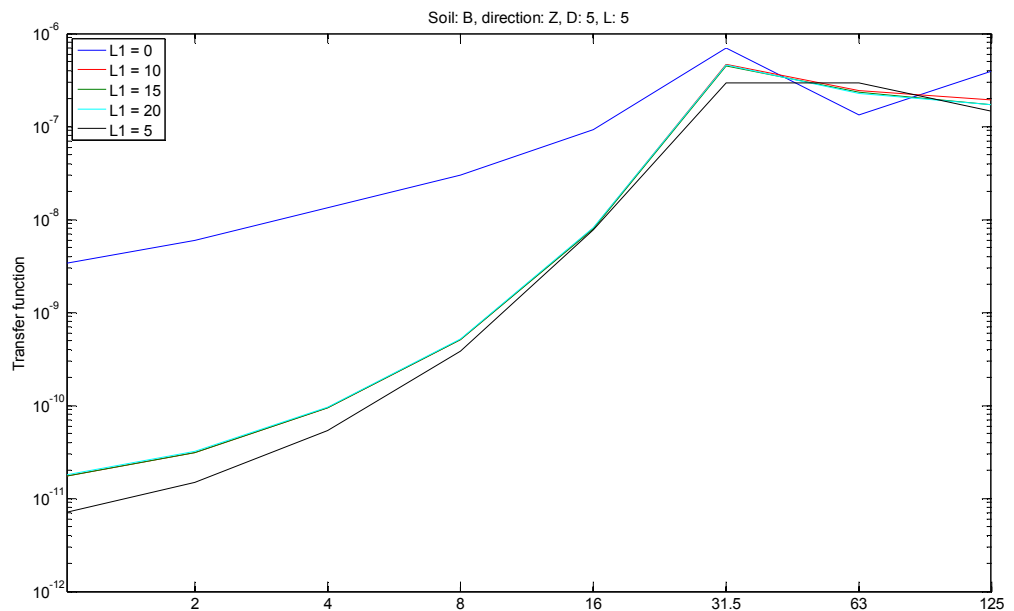
Verder is voor het dijklichaam een hoogte van 0.4 m; een massa per eenheid van lengte van 7216 kg/m en een traagheidsmoment per eenheid van lengte van 41021 kgm aangenomen en voor de trein een excentriciteit van 2 m uit het hart van het dijklichaam.

In de figuren 3.2 tot 3.8 zijn een aantal resultaten weergegeven van deze variatiestudie. In de diagrammen zijn de overdrachtsimpedanties gegeven bij verschillende parametercombinaties. Door te kijken naar de veranderingen van deze

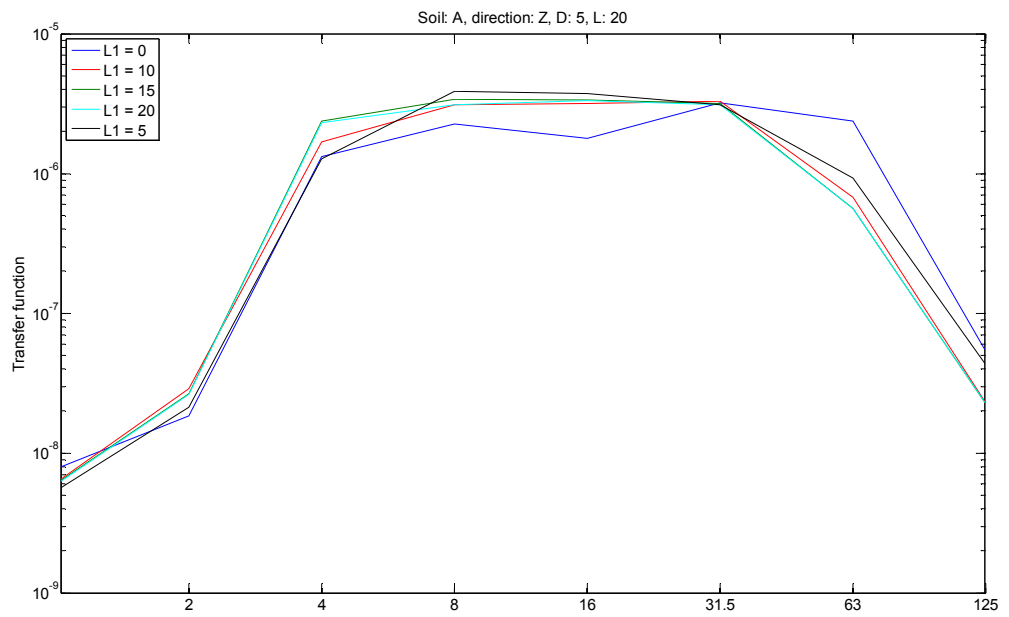
overdrachtsfuncties bij een variatie van L_1 kan geconcludeerd worden, dat vooral bij een stijvere bodem de hypothese geldig is en bij een grote afstand L .



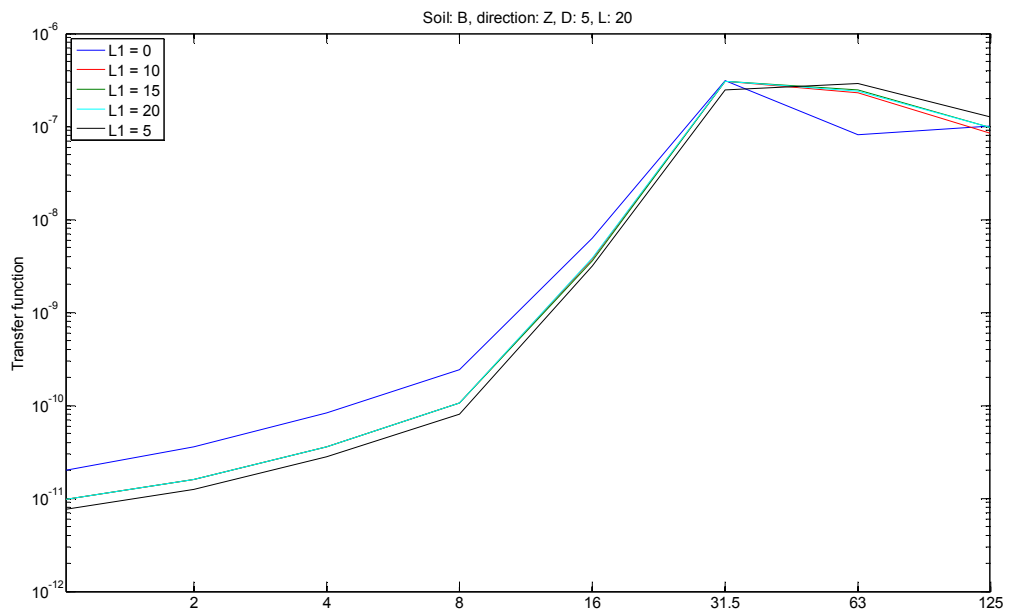
Figuur 3.2 Resultaat voor bodemtype A, bodemdiepte 5m en $L = 5$ m.



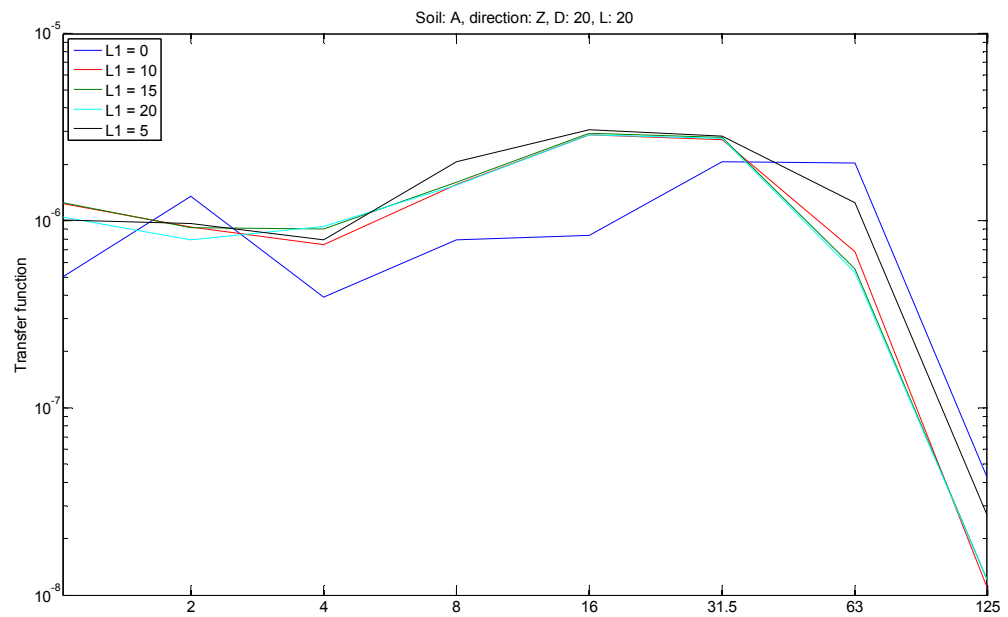
Figuur 3.3 Resultaat voor bodemtype B, bodemdiepte 5m en $L = 5$ m.



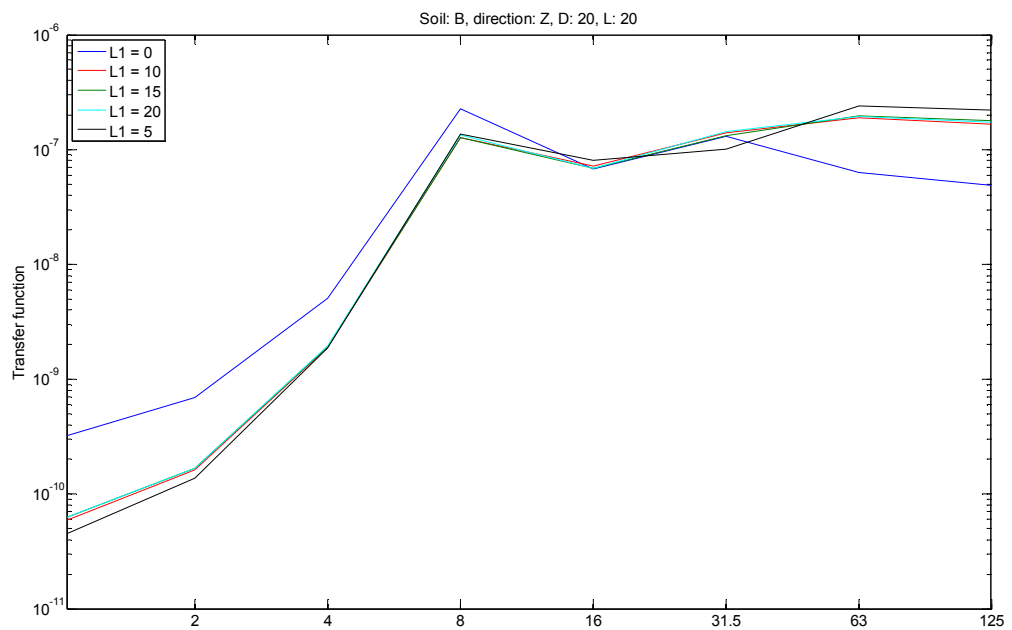
Figuur 3.4 Resultaat voor bodemtype A, bodemdiepte 5m en L = 20m.



Figuur 3.5 Resultaat voor bodemtype B, bodemdiepte 5m en L = 20m.



Figuur 3.6 Resultaat voor bodemtype A, bodemdiepte 20m en $L = 20$ m.



Figuur 3.8 Resultaat voor bodemtype B, bodemdiepte 20m en $L = 20$ m.

Uit deze resultaten blijkt dat de hypothese voorlopig stand houdt, als $L=L_1=20$ m worden de beste resultaten behaald. In de hiernavolgende analyse worden deze waarden dan ook zo aangehouden.

In een tweede parametervariatie is besloten om ook de hoogte van het dijklichaam te variëren: 1m en 2m.

Verder wordt in het vervolg de gemodelleerd als een twee-massa-veer-demper systeem (zie Fig. 3.9), waarbij ook de parameters gevarieerd worden.

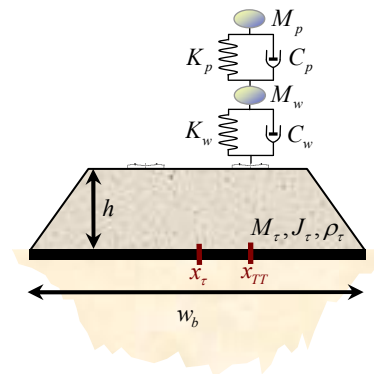


Fig. 3.9 De trein als 2-mvs op het dijklichaam.

De eigenschappen van de verschillende treinen zijn hieronder weergegeven.

trein	M_p (kg)	K_p (N/m)	C_p (Ns/m)	M_w (kg)	K_w (N/m)	C_w (Ns/m)
1	$28 \cdot 10^3$	$24 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^4$	$35 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^4$
2	$4 \cdot 10^3$	$24 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^4$
3	$16 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^4$	$16 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^3$
4	$20 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^4$	$17 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^4$
5	$20 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^4$	$18 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^4$

Hieronder is een beschrijving gegeven van de treinen uit de bovenstaande tabel:

- Trein 1 = loc E1700 (meest voorkomende locomotief)
- Trein 2 = Onbeladen containerdraagwagen (type Sgss)
- Trein 3 = SGM motorbak ("sprinter", een stoptrein), beladen
- Trein 4 = DDM1161 (dubbeldekkersstoptrein, de motorbak), onbeladen
- Trein 5 = DDM1159 en/of DDM1160 (dubbeldekkerstoptrein, een loopbak), onbeladen

In de figuren 3.10-3.19 worden het quotiënt Q_z van overdrachtsfuncties 1-2 en 0-1 (zie Fig. 3.1) geplot.

De zes combinaties waarvoor dit quotiënt Q_z is berekend zijn gegeven in de onderstaande tabel.

combi	$h_{\text{dijklichaam}}$ (m)	z_B (dikte grondlaag) (m)
1	1	5
2	1	10
3	1	20
4	2	5
5	2	10
6	2	20

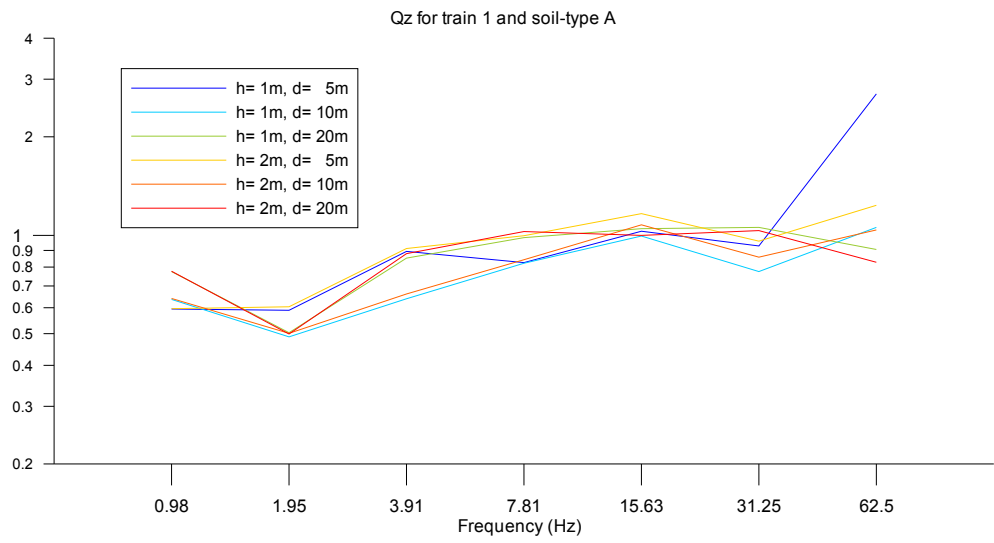


Fig. 3.10: Trein 1, Bodemtype A

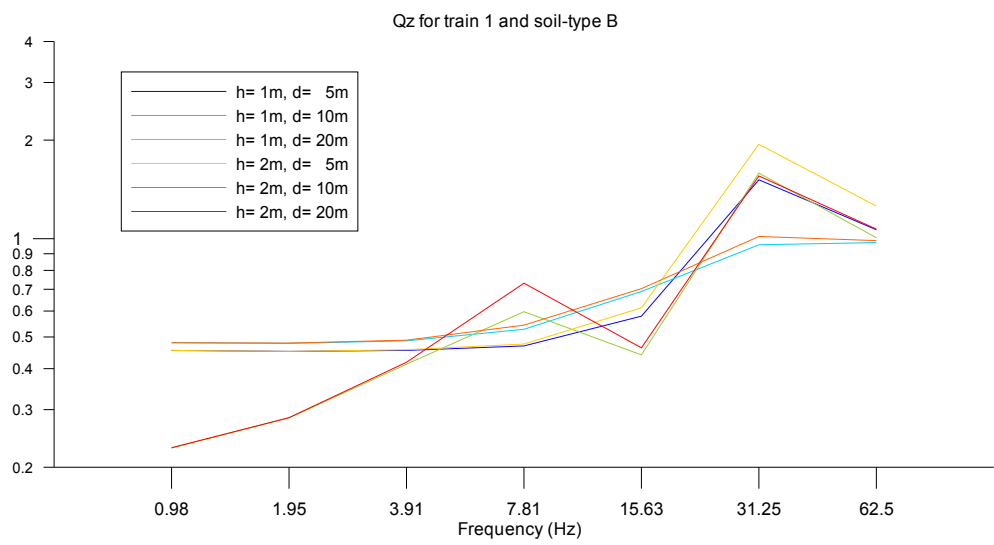


Fig. 3.11: Trein 1, Bodemtype B

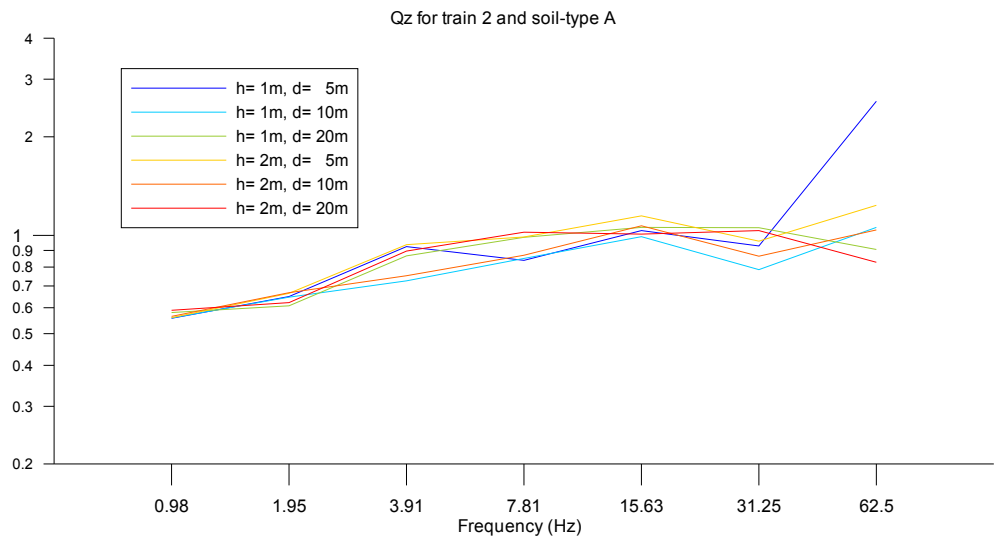


Fig. 3.12: Trein 2, Bodemtype A

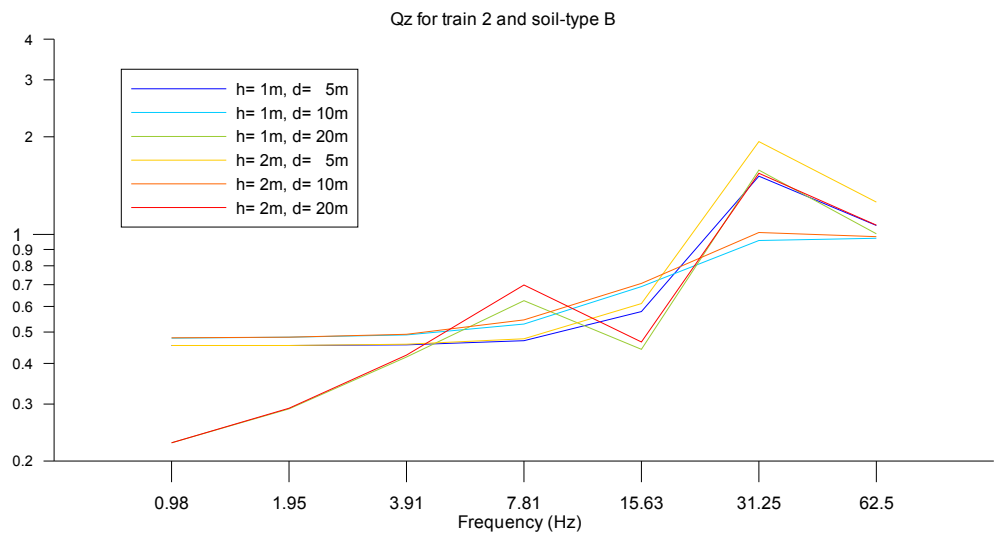


Fig. 3.13: Trein 2, Bodemtype B

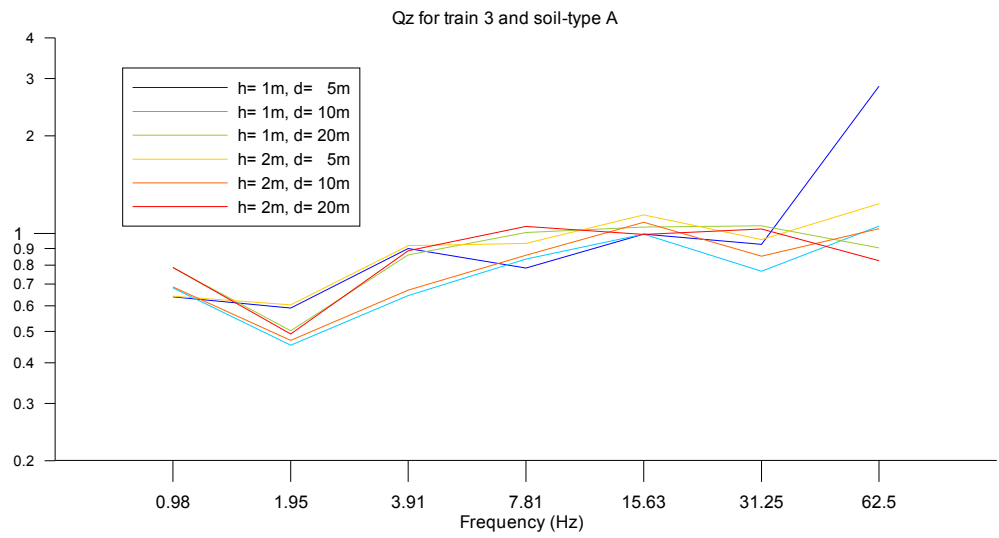


Fig. 3.14: Trein 3, Bodemtype A

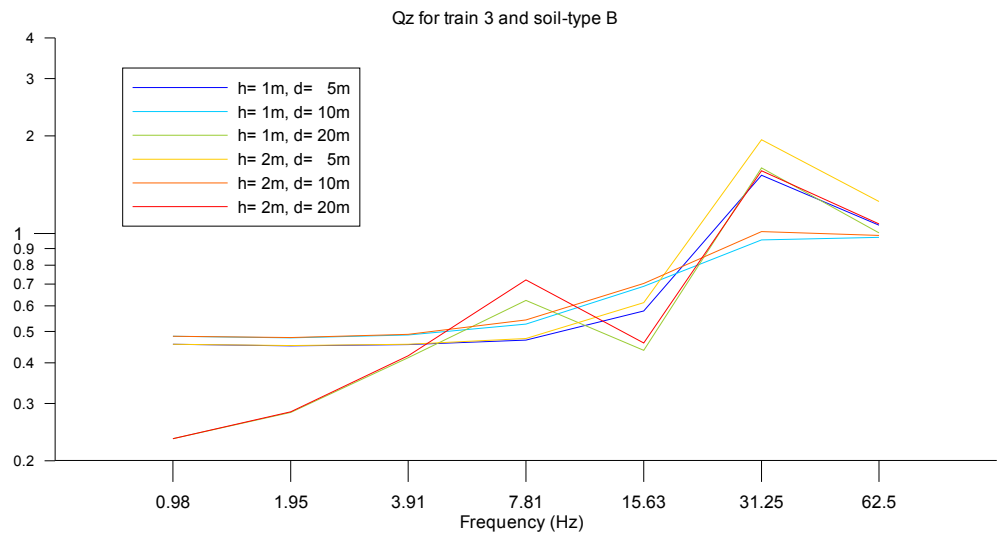


Fig. 3.15: Trein 3, Bodemtype B

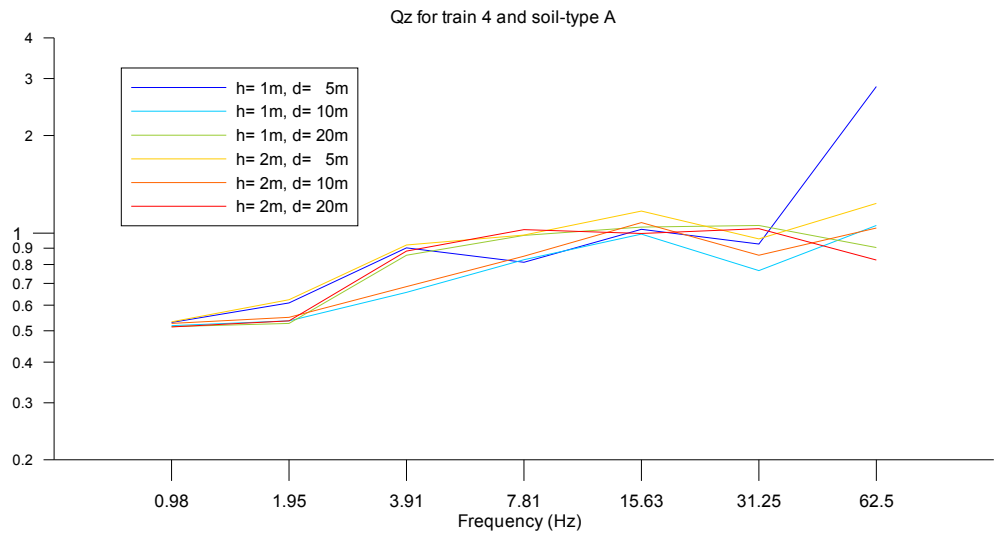


Fig. 3.16: Trein 4, Bodemtype A

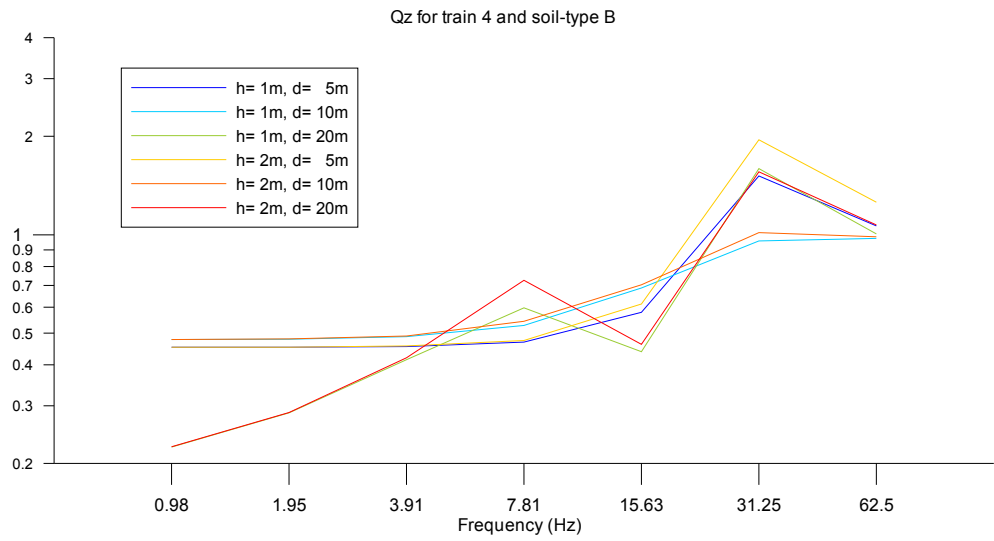


Fig. 3.17: Trein 4, Bodemtype B

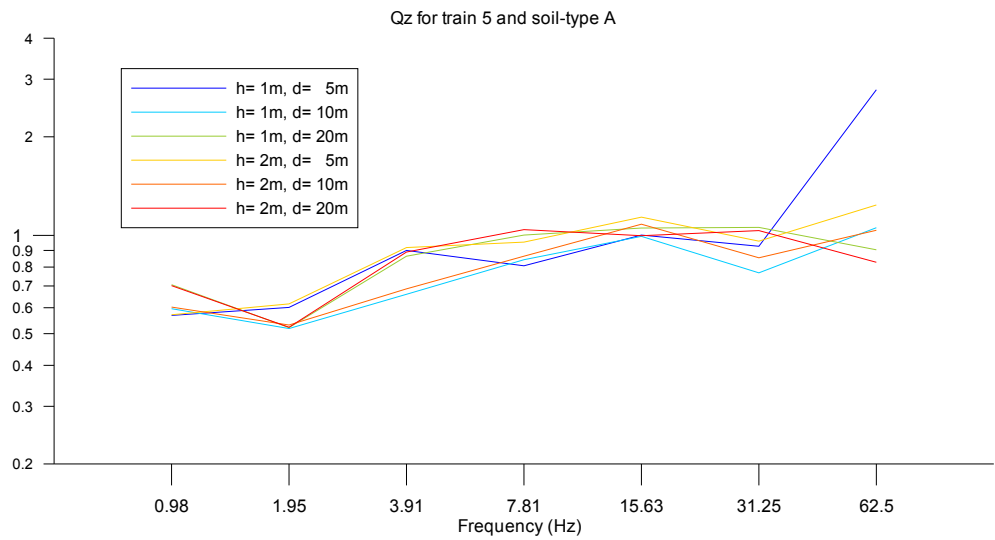


Fig. 3.18: Trein 5, Bodemtype A

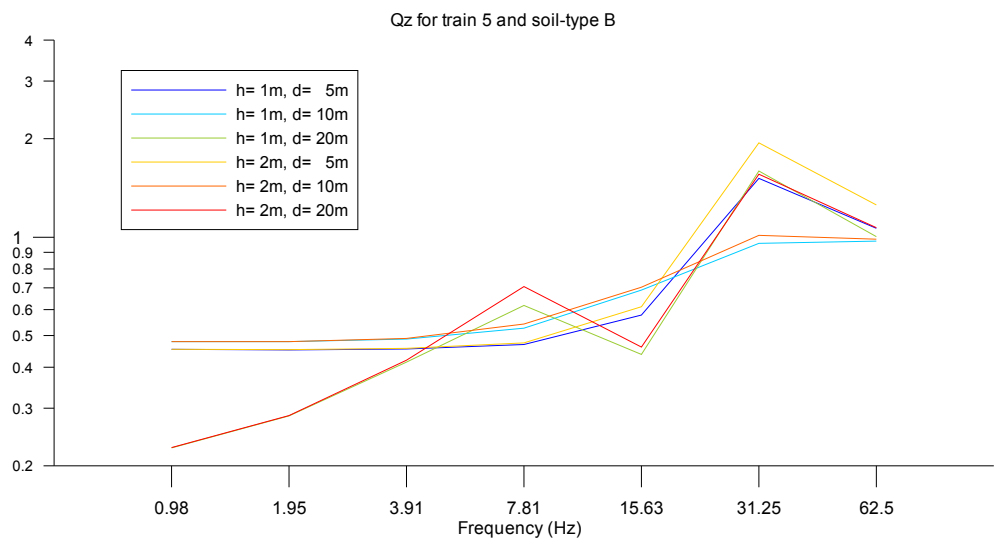


Fig. 3.19: Trein 5, Bodemtype B

Concluderend kan gesteld worden dat de overdrachtsimpedantie Z_{01} in redelijke mate gelijk gesteld kan worden aan de overdrachtsimpedantie Z_{12} indien $L=20$ m. In een fysisch complete modellering wordt in het volgende hoofdstuk gekeken naar de robuustheid van deze aanname.

4 Fysisch compleet model

De methode waarop het standaard rekenmodel gebaseerd is, gaat uit van een onveranderlijke overdrachtsimpedantie van de bodem die in de horizontale richting als homogeen aangenomen wordt. Om de invloed van de spoorbaan te minimaliseren, moet de afstand waarover de overdrachtsimpedantie bepaald wordt, groot genoeg gekozen worden. De vraagstelling of de aanname van een constante overdracht geldig is, en zo ja hoe groot deze afstand gekozen moet worden, is in een voorstudie aan de TU Delft uitgevoerd (hoofdstuk 3).

Het model dat bij dit onderzoek gebruikt werd, is gebaseerd op een halfruimtemodel waarmee alleen tweedimensionale effecten gesimuleerd kunnen worden. Er wordt hierbij dan ook van een analytisch beperkt model gesproken. Toch geeft deze analyse een goede indicatie van de invloed van de spoorbaan en de grootte van de afstand. Uit de voorstudie, is gebleken dat voor het valgewicht een minimale afstand van 20 m aangehouden moet worden. Bij deze afstand wordt de invloed van de spoorbaan op de gemeten overdrachten acceptabel klein.

Een tweedimensionaal model kan niet alle fenomenen simuleren en om de uitkomsten van de voorstudie te bevestigen wordt een driedimensionaal model gemaakt en gebruikt om de analyses gedetailleerder in de driedimensionale ruimte te onderzoeken.

4.1 Numerieke aanpak

Om het aantal geometrische beperkingen aan het bodemmodel te beperken, is er voor een eindige elementenmodel (FEM) gekozen. Door deze keuze moet er extra aandacht geschonken worden om de rekentijd zo laag mogelijk te houden.

In de eerste plaats wordt de rekentijd van een FEM-model bepaald door het aantal vrijheidsgraden en dus het aantal eindige elementen. Als het geometrische bereik van het model vastligt, dan wordt het aantal elementen vooral bepaald door de minimale grootte. Deze minimale grootte wordt wederom bepaald door de grootte van de kleinste golflengte die in het model nog aanwezig moet zijn. De minimale golflengte is afhankelijk van de laagste golfsnelheid en de grootste frequentie die in de analyse meegenomen moet worden. Het is duidelijk dat de laagste snelheden behaald worden door de Rayleigh- en schuifgolven en daarom geldt voor de minimale golflengte λ_{\min}

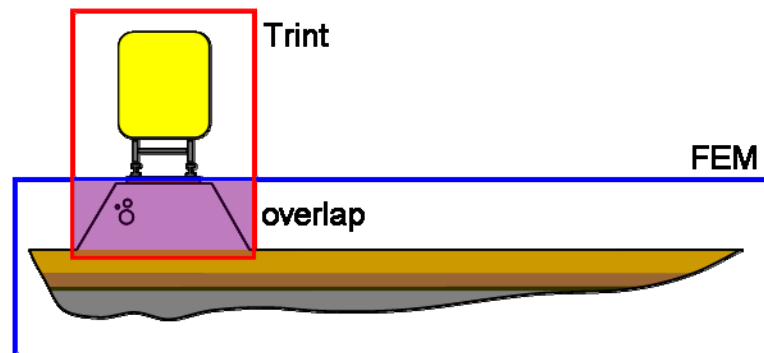
$$\lambda_{\min} = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (4.1)$$

In deze vergelijking zijn E , f , ν en ρ de elasticiteitsmodulus, de frequentie van de golf, de Poisson constante en de dichtheid, respectievelijk. Volgens het Nyquist criterium moeten er 2,2 eindige elementen uit het model in een golf passen zodat deze nog in de analyse meegenomen kan worden.

Ter illustratie van de omvang van het model, wordt hier uitgegaan van een slappe bodem met $E = 1,0 \cdot 10^7$ Pa, $\nu = 0,3$, $\rho = 2000$ kg/m³ en $f = 100$ Hz. Voor een dergelijke bodem moet volgens het Nyquist criterium een elementgrootte van 20 cm gekozen worden. Als er verder geen vereenvoudigingen voor het model ingevoerd worden en uitgaande van een invloedsgebied voor trillingen van 90° (dit is het gebied waarbinnen het voorbijrijdende wiel zich moet bevinden om een invloed op de trillingen in het waarnemingspunt uit te kunnen oefenen) dan moet het geometrische bereik ten minste

120 m x 120 m zijn. De diepte van de bodem wordt hier, zonder er verder op in te gaan, als 25 m aangenomen. De 120 m zijn gebaseerd op een buitenste meetpunt van 60 m van het spoor vandaan. Deze geometrie heeft een model bestaande uit 45 miljoen eindige elementen en ongeveer 135 miljoen vrijheidsgraden. Het is nu duidelijk dat er maatregelen genomen moeten worden om het model te reduceren.

Ten eerste wordt de elementgrootte als 60 cm x 60 cm x 50 cm (l x b x h) aangenomen. Het element wordt in de rijrichting van de trein als 60 cm groot aangenomen. Dit heeft een praktische reden, omdat de dwarsliggers (de krachtaangrijpingspunten in het bodemmodel) equidistant met 60 cm van elkaar verwijderd zijn. Dit heeft als gevolg dat de golven in bepaalde typen bodem niet meer tot 100 Hz berekend kunnen worden. De hoogte van het element wordt als 50 cm aangenomen om de praktische reden dat de bodem in lagen opgedeeld wordt. Een hoogte van 1 m zou een verslechtering van de golfresolutie betekenen en een grotere vervorming van het element, waardoor kunstmatige verstijvingen (ook wel locking genoemd) kunnen ontstaan.

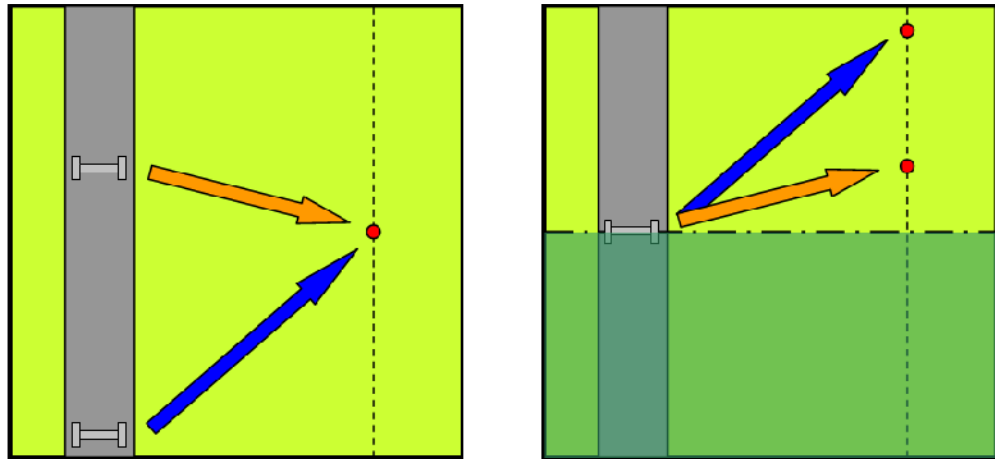


Figuur 4.1 De onderverdeling van de fysisch complete wereld in de twee methoden TRINT en FEM.

In figuur 4.1 is geschematiseerd hoe de fysisch complete wereld gemodelleerd worden door de treinsimulatie TRINT en de eindige elementenmethode (FEM). Om de robuustheid van het standaard rekenmodel te testen, wordt een variatiestudie gedaan, waarbij in totaal 1.228.500 variaties onderzocht worden. Als de fysisch complete wereld als één gekoppeld probleem opgelost wordt, dan zullen de numerieke kosten onwaarschijnlijk hoog zijn. Daarom is er gekozen voor een ontkoppelde methode waarbij fysisch aanwezige koppeling door een overlap van beide modellen benaderd wordt. Hierdoor wordt het mogelijk om het aantal kostenintensieve FEM-berekeningen te reduceren tot 1050. Dit aantal ontstaat uit 6 verschillende spoorbaanconfiguraties, 7 verschillende bodemprofielen en 25 variaties hiervan. Verder moet ook de overdracht van de locatie van het valgewicht op 20 m van het spoor naar de meetlocatie op 40 m van het spoor bepaald worden. Hiervoor telkens maar 3 van de 6 verschillende spoorbaanconfiguraties geanalyseerd, omdat deze in paren van 2 redelijk op elkaar lijken. Er bestond ook de optie om in totaal van maar 25 x 7 situaties de overdrachten te bepalen. Bij deze aanpak zou de spoorbaan uit het model weggelaten worden. Hiervoor is echter niet gekozen, omdat de reflecties van de compressiegolven aan de spoorbaan de overdracht eventueel kunnen beïnvloeden.

De trillingen $v(\omega)$ op de meetpositie door een excitatie op een locatie op het spoor kan bepaald worden door het excitatiespectrum $F(\omega)$ te projecteren op de overdrachts-admittantie $Y(\omega)$ van het excitatiepunt naar het observatiepunt:

$$v(\omega) = Y(\omega) \cdot F(\omega). \quad (4.2)$$



Figuur 4.2 Illustratie ter verduidelijking van de vereenvoudiging van het model.

Met deze aanname kan het model verder vereenvoudigd worden. In figuur 4.2 is dit geïllustreerd. In deze figuur wordt de situatie van boven geschetst. Aan de linker kant zijn de overdrachtsimpedanties van twee verschillende punten onder het spoor naar het observatiepunt op 40 m afstand getekend. De meest omslachtige manier zou zijn om deze twee overdrachten sequentieel met twee pulsexcitaties te bepalen. De rechter afbeelding in deze figuur laat zien dat het model ook gehalveerd worden kan. In dit model wordt op 1 plaats geëxciteerd en de overdrachten naar elk punt op een lijn op 40m afstand kan dan in één keer bepaald worden. De overdrachten met dezelfde kleur zijn in beide situaties identiek. De halvering van het model gebeurt door het toepassen van symmetrische randcondities op het halveringsvlak en door halvering van de excitatiekracht.

Een ander voordeel dat het toepassen van overdrachten met zich meebrengt is het feit dat de totale gesimuleerde tijd in het FEM-model gering blijft. Als het excitatieproces tijdens het voorbijrijden van een hele trein op het model gemodelleerd wordt, dan kan de gesimuleerde tijd 30 tot wel 60 seconden bedragen. In het geval dat alleen overdrachten bepaald moeten worden, waarbij het model door een puls belast wordt, zal de gesimuleerde tijd maximaal 4 seconden bedragen. Dit is de tijd die nodig is voor alle golven om voorbij het observatiepunt te zijn voortgeplant. De pulsexcitatie $F(t)$ wordt beschreven volgens

$$F(t) \begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi t}{0,01}\right) & 0 \leq t < 0,005 s \\ 0 & t \geq 0,005 s \end{cases} \quad (4.3)$$

Deze relatief korte gesimuleerde tijd maakt het mogelijk een expliciete solver voor het FEM-model te gebruiken. Het grote voordeel van een expliciete solver in dit geval is dat de tijd die nodig is om 1 tijdstap te berekenen zeer veel kleiner is als bij een impliciete solver. Dit komt omdat bij een expliciet algoritme geen grote matrices gefactoriseerd hoeven te worden. Het grote nadeel zijn de kleine tijdstappen waarmee de gesimuleerde tijd voort moet schrijven zodat het algoritme stabiel blijft. De kritische tijdstap wordt zo bepaald dat de snelste golf (de compressiegolfsnelheid c_p) het kleinste element niet over kan slaan. Hiervoor wordt een karakteristieke lengte ℓ ingevoerd die bepaald wordt door het volume gedeeld door de lengte van de diagonaal van een eindig element.

De minimale tijdstap wordt vervolgens bepaald als:

$$\Delta t_{\min} = 0,9 \frac{\ell}{c_p} \Big|_{\min} \quad (4.4)$$

De factor 0,9 zorgt voor een marge ten opzichte van de meest kritieke situatie. Het is dus duidelijk dat in dit geval een grond die stijver en/of meer incompressibel is, nadeliger is voor de numerieke kosten van een som. De compressiegolfsnelheid wordt namelijk als volgt bepaald

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (4.5)$$

Uitgaande bijvoorbeeld van een bodem met $E = 1,0 \cdot 10^8$ Pa, $\nu = 0,48$, $\rho = 2000$ kg/m³ en de besproken geometrie van de eindige elementen, moet een tijdstap van $2,5 \cdot 10^{-4}$ s gekozen worden.

Het commercieel verkrijgbare FEM-pakket LS-Dyna staat bekend om zijn expliciete solver. De keuze is dan ook snel voor dit pakket gemaakt. In LS-Dyna bestaat de mogelijkheid om randcondities te kiezen die voor zowel de compressie- als de schuifgolven tegelijk of afzonderlijk niet-reflecterend zijn. Hierdoor wordt het mogelijk om het geometrisch domein van het FEM-model verder te reduceren. De grenzen van het domein zijn zo gekozen dat deze ongeveer 5 m van belangrijke observatiepunten af liggen. De kwaliteit van deze randcondities is getest en het blijkt dat er nog maar minimale reflectie optreedt. Deze ligt in de orde van één duizendste van de inkomende golf.

5 Opzet variatiestudie

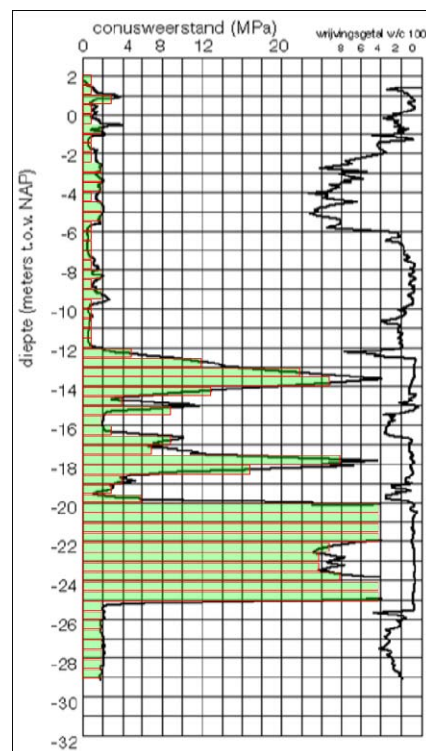
In dit hoofdstuk wordt de opzet van de variatiestudie weergegeven.

5.1 FEM (bodem)

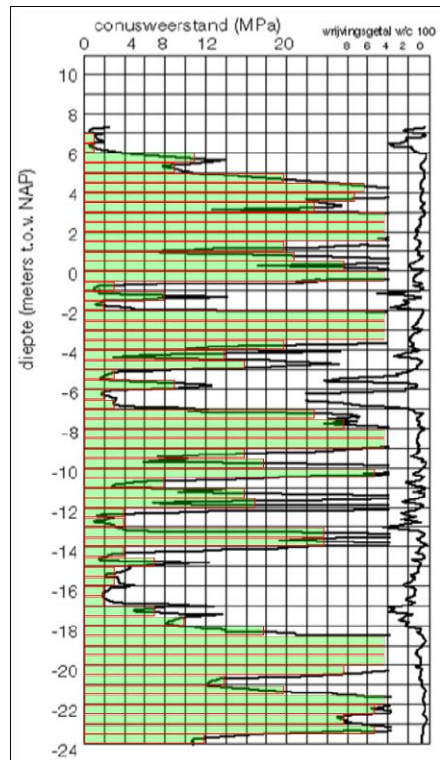
Zoals beschreven zal de fysisch complete wereld gesimuleerd worden met een FEM-model in combinatie met een treinmodel (TRINT). Aan de kant van de bodem simulatie met behulp van de FEM modellering wordt de bodem gevarieerd. De betreffende parameters zijn:

- Elasticiteitsmodule E
- Dwarscontractie ν
- Dichtheid ρ
- Damping ζ

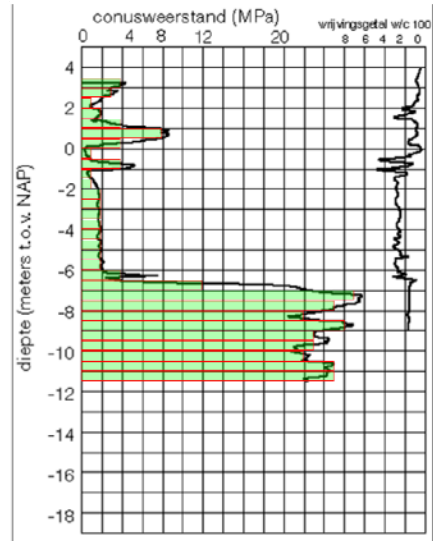
Er wordt uitgegaan van 7 verschillende bodems afkomstig uit CUR 166, 3^e druk. Van deze bodems is een serie sonderingen bekend. Het gaat hier om sonderingen in Amsterdam, Eindhoven, Groningen, Maasvlakte, Rotterdam, Scheveningen en Tiel. In figuur 5.1 tot en met figuur 5.7 zijn de sonderingsdata en uitgelezen waarden met een resolutie van 0,5m weergegeven.



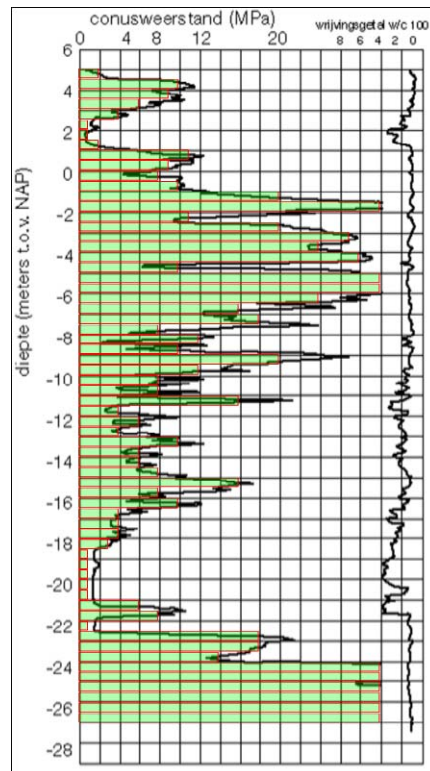
Figuur 5.1 Sondering van Amsterdam met in het groen de uitgelezen data.



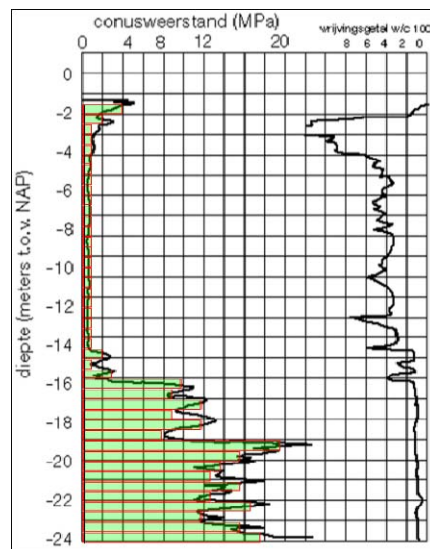
Figuur 5.2 Sondering van Eindhoven met in het groen de uitgelezen data.



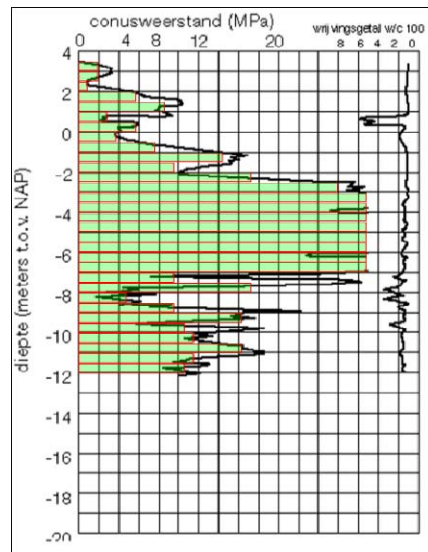
Figuur 5.3 Sondering van Groningen met in het groen de uitgelezen data.



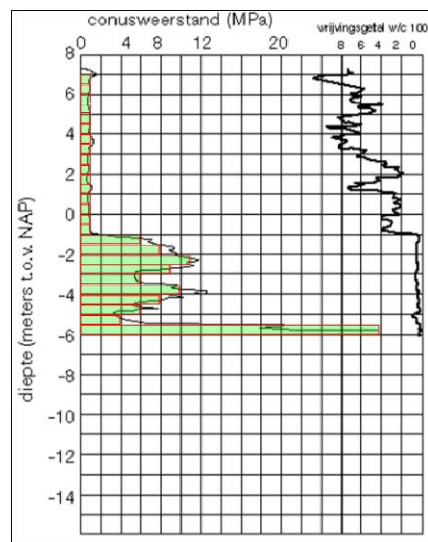
Figuur 5.4 Sondering van de Maasvlakte met in het groen de uitgelezen data.



Figuur 5.5 Sondering van Rotterdam met in het groen de uitgelezen data.



Figuur 5.6 Sondering van Scheveningen met in het groen de uitgelezen data.



Figuur 5.7 Sondering van Tiel met in het groen de uitgelezen data.

De uitgelezen conusweerstand worden met een factor 18 vermenigvuldigd om hieruit de elasticiteitsmoduli te verkrijgen. Om het aantal FEM-modellen te beperken, is aangenomen dat de eerste 20 m van de bodem uit lagen bestaat. De daaropvolgende 5 m bestaat uit één laag, namelijk zand. Als de sonderingsdata niet tot op een diepte van 20m bekend zijn, is aangenomen dat de zandlaag al begint op de diepte van de sondering. De parameters van de zandlaag zijn aangenomen als aangegeven in Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Materiaalparameters van de onderste zandlaag

E	$5 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$
ν	0,45
ρ	2200 kg/m^3
ζ	0,03

Vervolgens is het waterpeil gevarieerd met maximaal 4m. Boven het waterpeil zijn andere dwarscontractiecoëfficiënt en dempingen aangenomen dan onder het waterpeil. De variatiebereiken van deze twee factoren zijn in Tabel 5.2 opgenomen.

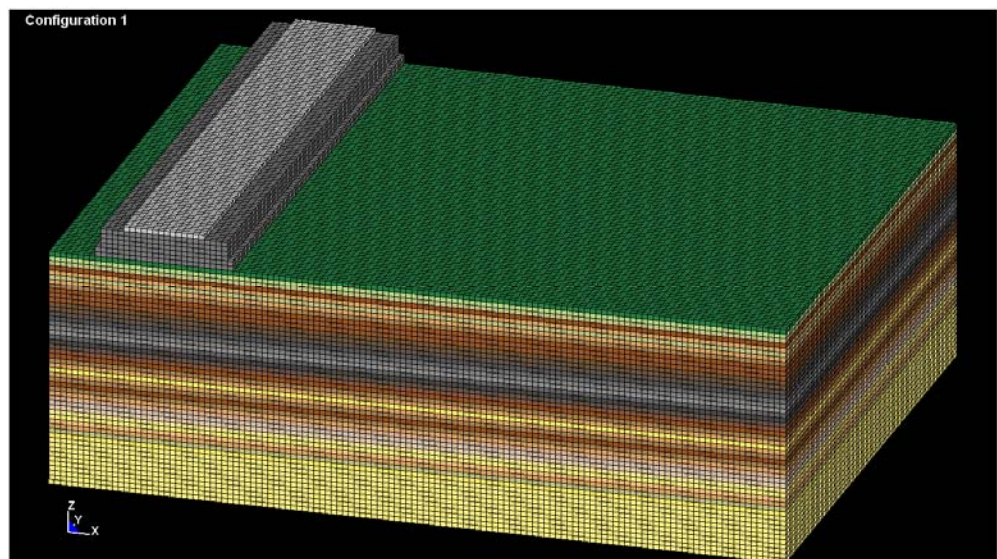
Tabel 5.1 Variatiebereiken van de dwarscontractie en de demping

Boven waterpeil		Onder waterpeil	
ν [-]	ζ [-]	ν [-]	ζ [-]
[0,2 – 0,4]	[0,01 – 0,03]	[0,42 – 0,48]	[0,02 – 0,04]

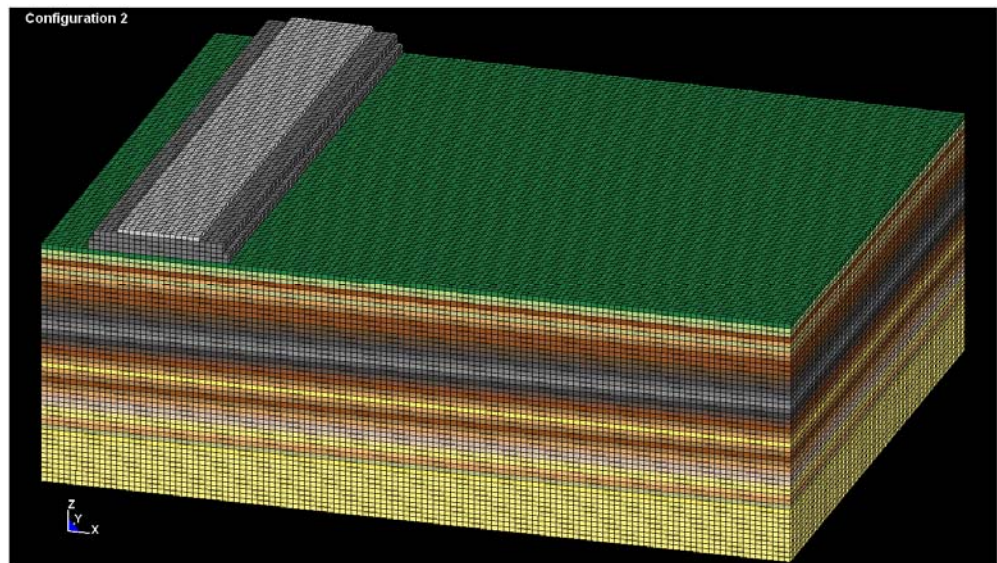
De dichtheid van de bodemlagen in de 7 profielen zijn overgenomen uit de tabellen die gebruikt zijn bij het opstellen van het programma VP drempel. Deze waarden zijn gevarieerd binnen een bereik van $\pm 100 \text{ kg/m}^3$.

Verder zijn de elasticiteitsmoduli gevarieerd. Dit is gebeurd door de gelaagdheid, die beschreven is als $E(z)$, waarbij z de dieptecoördinaat is, te variëren. Hierbij kunnen de geïdentificeerde lagen met maximaal 2 m naar boven of naar beneden verplaatst worden.

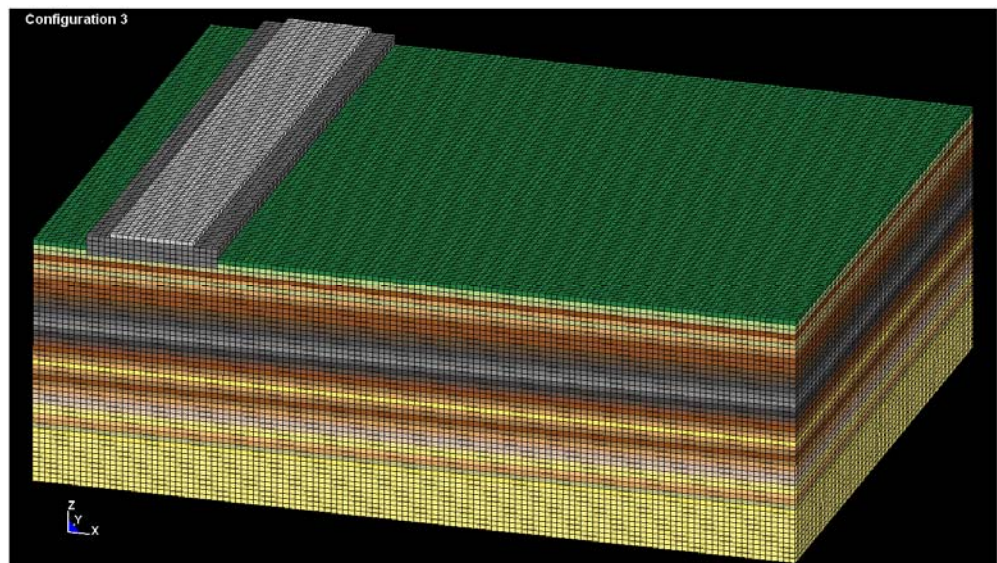
Verder is in het FEM-model een variatie van de spoorbaan uitgevoerd. Er is gekozen voor 6 configuraties. De geometrie van de FEM-modellen van de 6 configuraties zijn in figuur 5.8 tot en met figuur 5.13 afgebeeld.



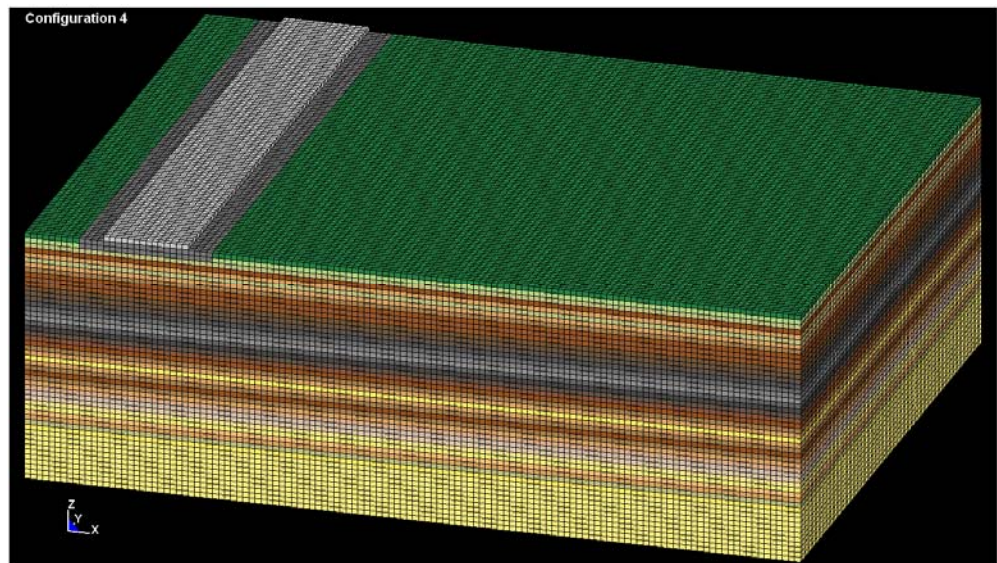
Figuur 5.8 Configuratie 1: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (2m), ophoging (1m) en bodem (25m).



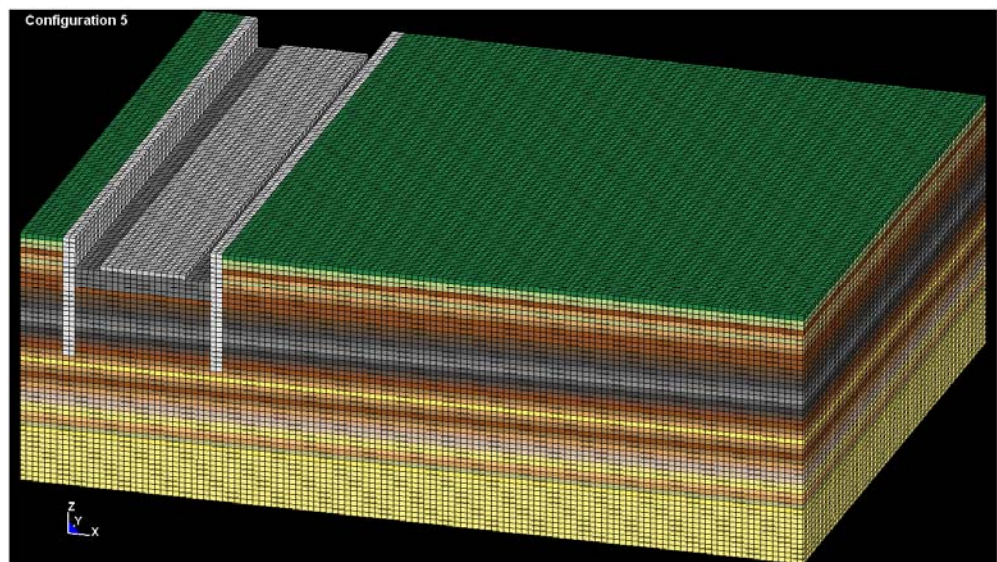
Figuur 5.9 Configuratie 2: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (1m), ophoging (1m) en bodem (25m).



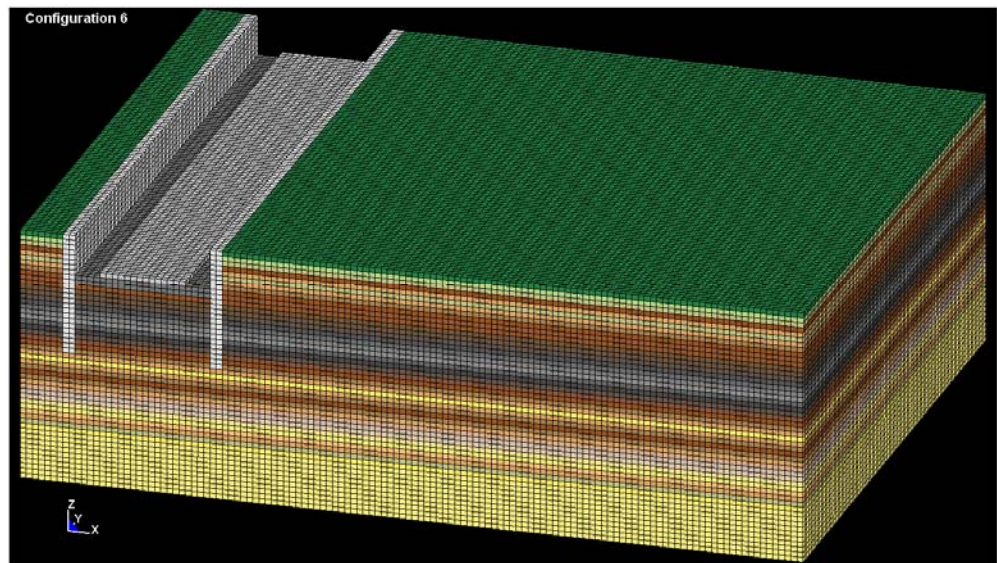
Figuur 5.10 Configuratie 3: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (2m) en bodem (25m).



Figuur 5.11 Configuratie 4: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (1m) en bodem (25m).



Figuur 5.12 Configuratie 5: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (2m), damwanden en bodem (25m).



Figuur 5.13 Configuratie 6: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (1m), damwanden en bodem (25m).

De variatie heeft plaatsgevonden in de hoogte van het ballastbed (1m of 2m) en de diepte hiervan (+1m, -1m en -5m). De materiaalparameters van de overige onderdelen zijn in Tabel 5.3 weergegeven.

Tabel 5.3 Materiaalparameters van de overige onderdelen

	E [N/m ²]	ρ [kg/m ³]	ν [-]	ζ [-]
Ballastbed	$1,5 \cdot 10^9$	2200	0,2	0,04
Damwand	$3 \cdot 10^{10}$	2400	0,3	0,03
Zandlichaam	$5 \cdot 10^8$	2100	0,3	0,03
Ophoging	$5 \cdot 10^8$	2100	0,3	0,03

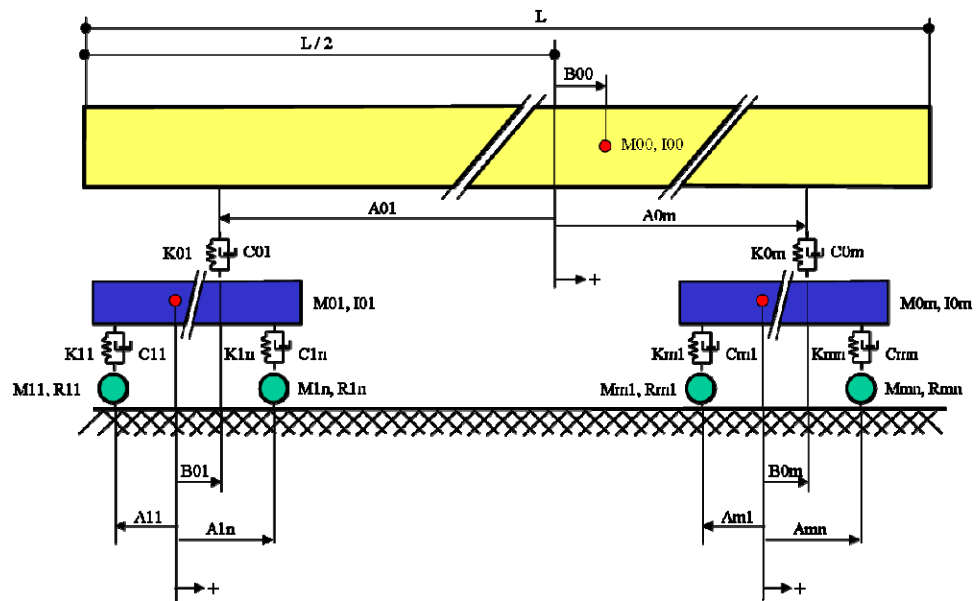
De randcondities zijn als volgt gekozen. Het voorste verticale vlak is een symmetrievlak. Het linker- en rechtervlak de achter- en onderkant zijn als niet reflecterende voor de compressie en de schuifgolven gekozen.

Op de spoorbaan bevinden zich twee sporen. De kracht is in het midden van het rechter spoor op het symmetrievlak aangenomen. Deze kracht is verdeeld over de oppervlakten van twee naast elkaar gelegen element en verder is deze vanwege de symmetrie gehalveerd.

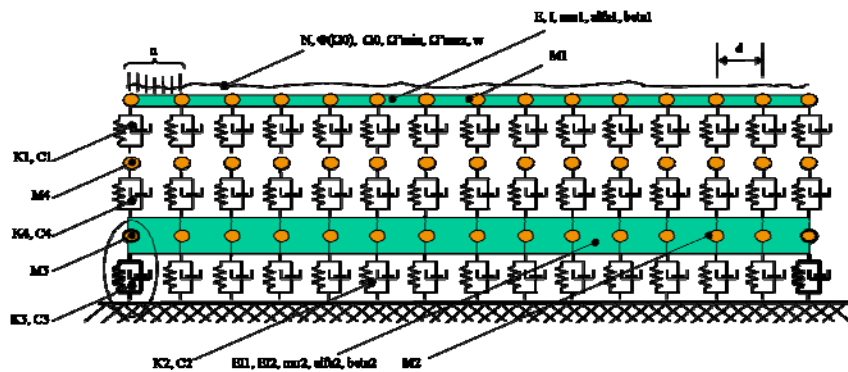
Er zijn dus in totaal 7x6 uitgangssituaties. Van elke van deze uitgangssituatie zijn 25 variaties onderzocht, wat in totaal 1050 variaties oplevert.

5.2 TRINT (trein)

In het TRINT model kan gekozen worden voor een model van de trein en een model voor de spoorbaan. In deze studie werd gekozen voor het treintype 40 en het baantype 70 zoals afgebeeld in figuur 5.14 en figuur 5.15.



Figuur 5.14 Treintype 40 van het TRINT model.



Figuur 5.15 Baantype 70 van het TRINT model.

Met het treintype 40 zullen 6 verschillende treinen gemodelleerd worden waaronder verschillende goederen- en persontreinen. Uitgaande van deze 6 treinen, zullen 3 verschillende treinsnelheden onderzocht worden, namelijk 40 km/u, 90 km/u en 140 km/u.

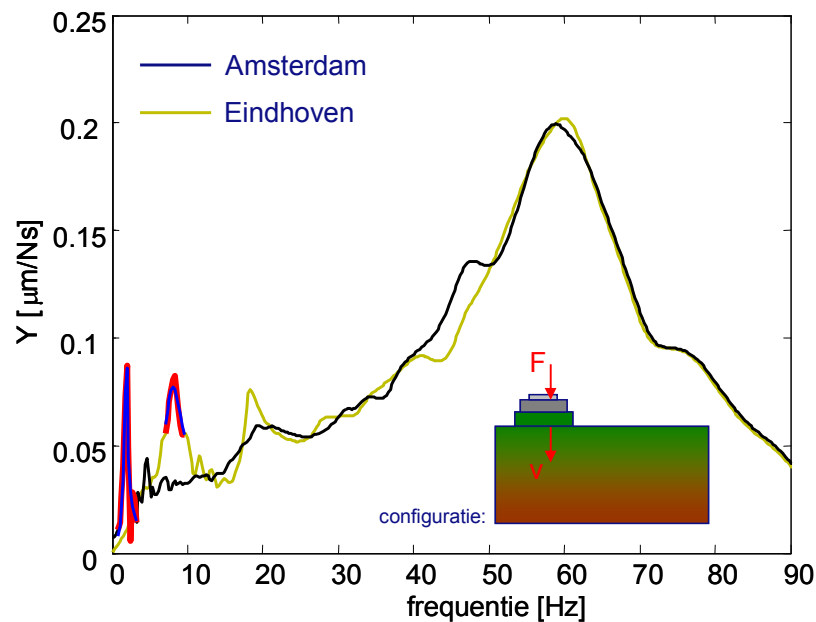
In het baantype 70 wordt de elasticiteit en de demping van de bodem met de veerconstante $K2$ en de dempingconstante $C2$ ingesteld. Met de FEM sommen worden de puntadmittanties op de plaats van het excitatiepunt berekend. Dit admittantiespectrum wordt met least squares principe gefit op het spectrum van het systeem dat met de volgende differentiaalvergelijking beschreven wordt:

$$C2 \dot{x}(t) + K2 x(t) = F(t), \tag{5.1}$$

waarbij $x(t)$ de indruk lengte van de veer is die de bodem representeert.

Deze methode is toegelicht in Fig. 5.16. In het model wordt per plaatse van de trein een pulsbelasting aangebracht en de responsie onder het baanlichaam wordt bepaald.

De lagere frequenties zijn die van de bodem, de hogere die van de bovenbouw. Op de rode pieken worden daarom de waarden voor de stijfheid en demping gefit.



Figuur 5.16 Dynamische bodemstijfheid voor invoer in TRINT.

Voor elk van de configuraties en bodemprofielen worden van elke variatie de beste K_2 en C_2 bepaald en daarna gemiddeld. Het zou vanwege de rekentijd onmogelijk zijn om met de parameters K_2 en C_2 voor elk van de 1050 FEM sommen rekening te houden. De keuze om deze parameters te de 25 variaties van de bodemprofielen te middelen is gebaseerd op het feit dat de krachten onder de dwarsliggers (M4 in bodemtype 70) weinig afhankelijk van de parameters K_2 en C_2 .

Er zijn voor de TRINT sommen dus $6 \times 3 \times (7 \times 6)$ uitgangssituaties. In deze uitgangssituaties worden de volgende parameters in treintype 40 gevarieerd:

- K_{1i} (veerconstante wiel i)
- C_{1i} (viskeuze demping wiel i)
- K_{0j} (veerconstante draaistel j)
- C_{0j} (viskeuze demping draaistel j)
- M_{00} (massa bak)
- M_{0k} (massa draaistel k)
- M_{1k} (massa wiel k)
- Belading

Uitgaande van de standaard instellingen, zijn 65 variaties onderzocht waarbij de hierboven genoemde parameters inclusief de treinsnelheid met maximaal $\pm 25\%$ gevarieerd zijn. De belading is gevarieerd van “vol” tot “leeg”.

In totaal zijn er dus $6 \times 3 \times 7 \times 6 \times 65 = 49140$ verschillende TRINT sommen gedraaid, die ieder ongeveer 5 minuten aan rekentijd nodig hebben. Onder alle dwarsliggers van een stuk van baan van 120 meter zijn de krachten uitgegeven die geconvolveerd met de overdrachten uit de FEM-sommen, de responsies op 20m, 40m en 60m van het spoor

weergeven. In totaal zijn er dus $7 \times 6 \times 3 \times 6 \times 65 \times 25 = 1.228.500$ variaties uitgevoerd in de fysisch complete wereld.

De variatiestudie ziet er als volgt uit:

Uitgangsconfiguraties:

6 Treinen:

- E1700 – DDM1160 – DDM1160 – DDM1160 – DDM1160 – DDM1161
- E1700 – Sgss – Sgss – Sgss – Sgss – Sgss
- E1700 – ICR – ICR – ICR – ICR – ICR
- ICM_m – ICM_l – ICM_l – ICM_l – ICM_l – ICM_m
- SGM_m – SGM_l – SGM_m – SGM_m – SGM_l – SGM_m
- E1700 – Eaos – Eaos – Eaos – Eaos – Eaos

3 Snelheden:

- 40 km/u
- 90 km/u
- 140 km/u

3 Baanconfiguraties:

- Opgehoogd
- Maaiveld
- Diep

2 Zandlichamen:

- 1 m hoog
- 2 m hoog

7 Locaties:

- Amsterdam
- Eindhoven
- Groningen
- Maasvlakte
- Rotterdam
- Scheveningen
- Tiel

Variatieparameters:

- | | |
|--------------------------------------|---|
| - K1i (veerconstante wiel i) | uniform verdeeld tussen $\pm 25\%$ rond μ |
| - C1i (viskeuze demping wiel i) | uniform verdeeld tussen $\pm 25\%$ rond μ |
| - K0j (veerconstante draaistel j) | uniform verdeeld tussen $\pm 25\%$ rond μ |
| - C0j (viskeuze demping draaistel j) | uniform verdeeld tussen $\pm 25\%$ rond μ |
| - M00 (massa bak) | uniform verdeeld tussen $\pm 25\%$ rond μ |
| - M0k (massa draaistel k) | uniform verdeeld tussen $\pm 25\%$ rond μ |
| - M1k (massa wiel k) | uniform verdeeld tussen $\pm 25\%$ rond μ |
| - Belading container/reizigers erts | uniform verdeeld tussen leeg en vol
binair verdeeld tussen leeg en vol |
| - Snelheid | uniform verdeeld tussen $\pm 25\%$ rond μ |
| - Grondwaterstand | uniform verdeeld tussen $\pm 2m$ rond μ |

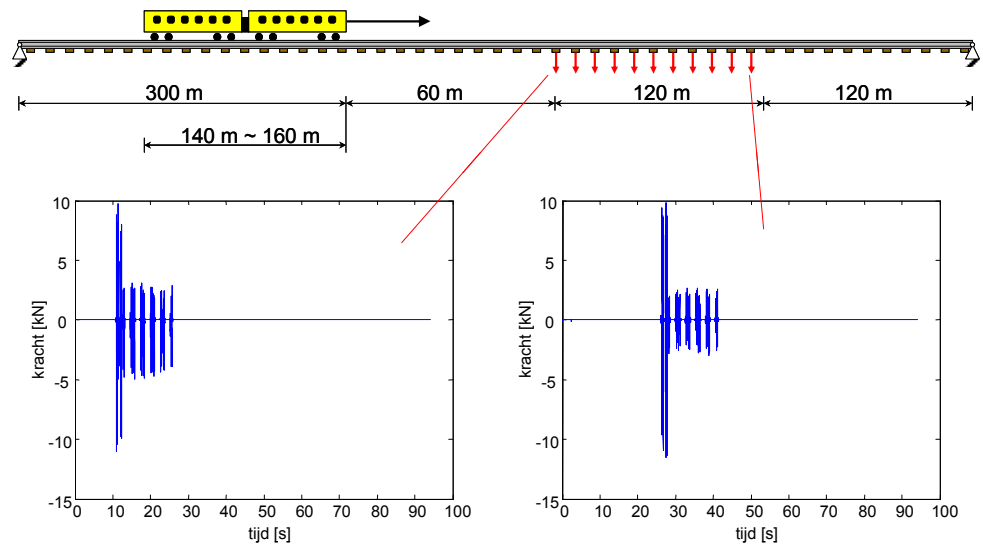
- E		uniform verdeeld tussen $\pm 25\%$ rond μ
- Laaghoogte		uniform verdeeld tussen ± 2 m rond μ
- ρ		uniform verdeeld tussen ± 100 kg/m ³ rond μ
- v	boven GW	uniform verdeeld tussen $\pm 0,1$ rond μ
	onder GW	uniform verdeeld tussen $\pm 0,03$ rond μ
- ζ	boven GW	uniform verdeeld tussen $\pm 0,01$ rond μ
	onder GW	uniform verdeeld tussen $\pm 0,01$ rond μ

6 Berekeningsmethode variatiestudie

In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe de berekeningen in TRINT en FEM verlopen en hoe de convolutie plaats vindt.

6.1 TRINT berekening

In het TRINT-model wordt de baan, bestaande uit dwarsliggers, baanlichaam en bodem met een bepaalde snelheid onder een trein vandaan getrokken. Hierbij worden de berekende krachten onder elke dwarsligger op een traject van 120m opgeslagen. Zie figuur 6.1.

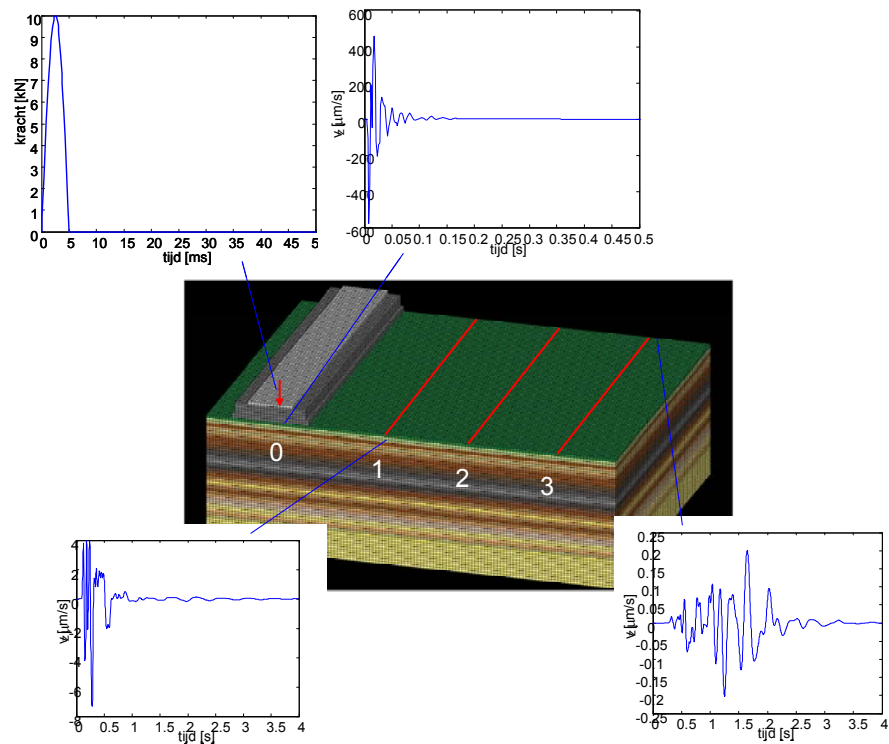


Figuur 6.1 TRINT-krachten onder de dwarsliggers over een traject van 120 m.

6.2 FEM berekening: LS-Dyna

In het LS-Dyna model is een 20 m-lijn (lijn 1, zie figuur 6.2, op 20 m van hart spoor) aangebracht, bestaande uit 101 equidistante knopen die 0.6 m van elkaar verwijderd zijn. Op deze lijn worden de responsies gemeten.

Verder zijn twee extra lijnen aangebracht (lijnen 2 en 3, zie figuur 6.2) op 40 m en 60 m van hart spoor, respectievelijk. Op deze lijnen worden de responsies gemeten, zodat ook op 40 m en 60 m de bodemtrillingen door convolutie verkregen kunnen worden.

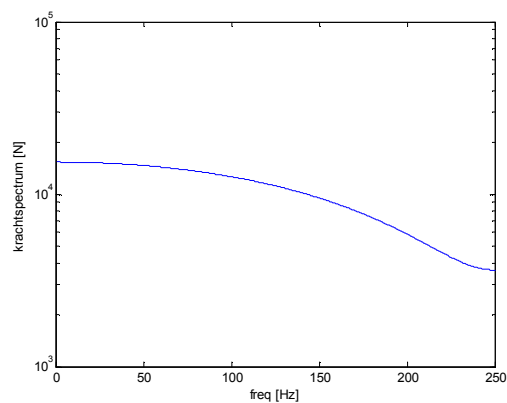


Figuur 6.2 Overdracht van spoor naar lijnen op 20 m, 40 m en 60 m..

Het model wordt direct onder het ballastbed ter plaatse van het hart van het rechterspoor met de volgende kracht geëxciteerd:

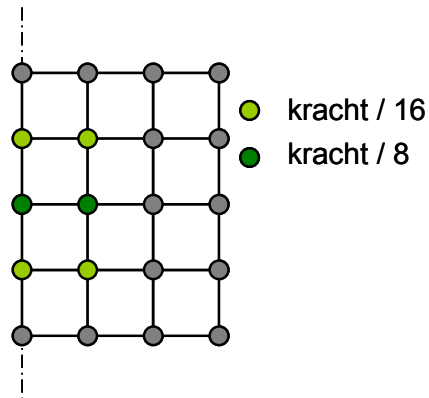
$$F(t) \begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi t}{0,01}\right) & 0 \leq t < 0,005 s \\ 0 & t \geq 0,005 s \end{cases}$$

In Figuur 6.2 is het tijdsignaal van de kracht weergegeven en de locatie op het plaatje aan gegeven. In de figuur 6.3 is het krachtspectrum weergegeven.



Figuur 10.3 Amplitudespectrum van de kracht.

Deze kracht is over de knopen verdeeld als aangegeven in figuur 6.4. Dit is equivalent aan een kracht die verdeeld is over een oppervlak gelijk aan het oppervlak van een [2 x 2] mesh.

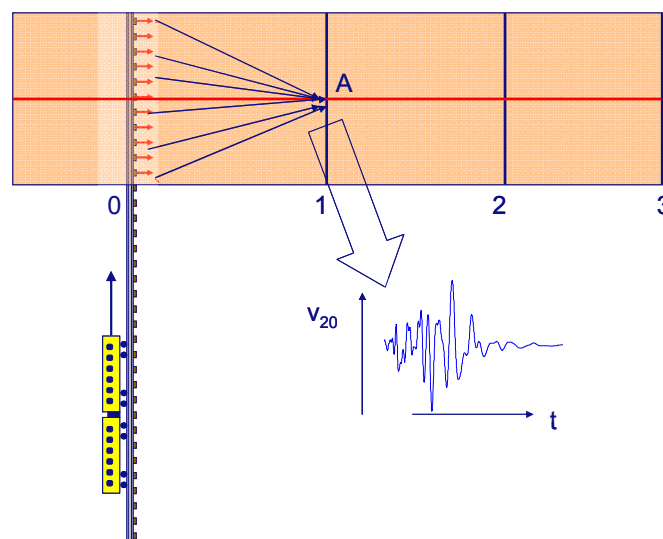


Figuur 6.4 Krachtverdeling over de knopen (links: symmetrielijns)

Er is een smalbandig overdrachtspectrum gemaakt van het krachtspectrum naar het responsiespectrum op elke knoop van de 20 m-, de 40 m- en de 60 m-lijn. Deze wordt hier bijvoorbeeld voor het punt i op de 20m lijn als $TF_{20,i}$ aangeduid.

6.3 Convolutie FEM/TRINT

In figuur 6.5 is de convolutie schematisch weergegeven.



Figuur 6.5 Convolutie FEM/TRINT

Op de TRINT krachten onder de dwarsliggers wordt een Fourier transformatie uitgevoerd dat smalbandige spectra oplevert. Ook de dwarsliggers zijn equidistant 0,6 m van elkaar verwijderd.

De gesimuleerde snelheid op één van de observatiepunten (20m, 40m of 60m: hier kort A genoemd) wordt verkregen door de krachtspectra te convolueren met de overdrachtspectra uit FEM.

Er zijn in het totaal 201 dwarsliggers in het geanalyseerde traject van 120 m. Dit betekent dat dwarsligger nr 101 zich in het midden van het traject bevindt.

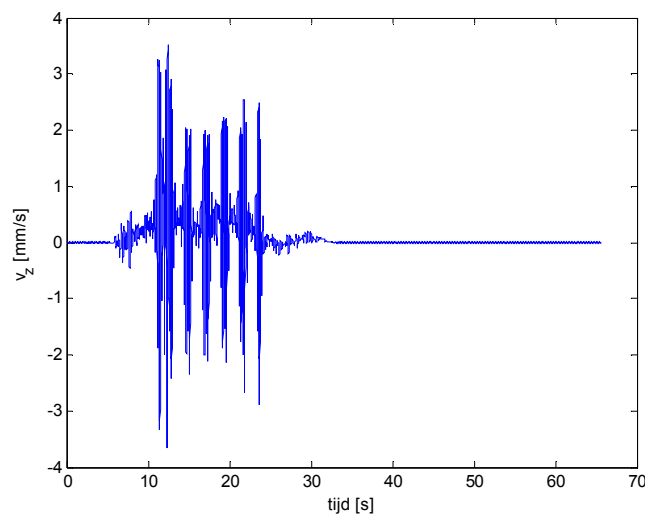
Aangezien de overdrachtfunctie voor de transversale snelheid van dwarsligger 101-i naar het observatiepunt, gelijk is aan die vanaf dwarsligger 101+i, worden de krachtspectra van deze dwarsliggers bij elkaar opgeteld

$$SF_{i+1} = SF_{101-i} + SF_{101+i},$$

waarbij SF naar het krachtspectrum verwijst. Aangezien de overdrachtfunctie van dwarsligger i naar het observatiepunt A gelijk is aan de overdrachtfunctie van het excitatiepunt in het LS-Dyna model naar het punt i op de lijn door het observatiepunt A , kan de convolutie als volgt geschreven worden

$$SV_A = \sum_{i=1}^{101} SF_i \cdot TF_{A,i},$$

hier verwijst SV_A naar het smalbandige snelheidspectrum in observatiepunt A . In figuur 6.6 is de inverse Fourier transformatie SV_A afgebeeld.



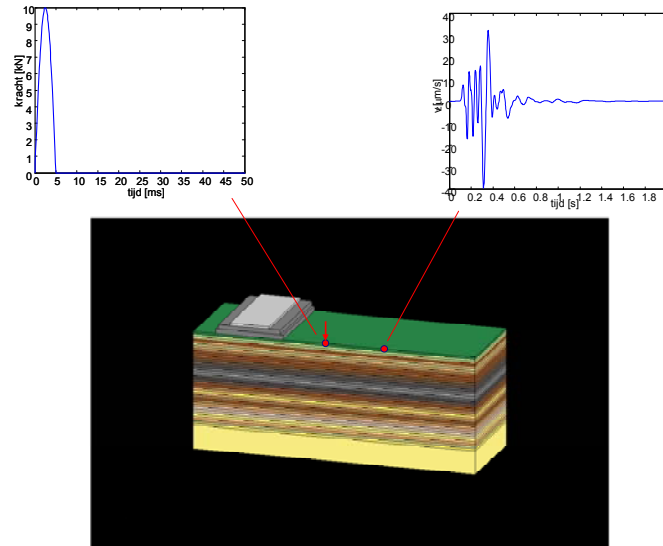
Figuur 6.6 Bodemtrillingen op 20m ten gevolge van een passerende trein.

Aangezien de equivalente aanstootkracht F_{eq} per octaafband (2Hz, 4Hz, 8Hz, 16Hz, 31.5Hz en 63Hz) geëvalueerd wordt, worden de smalbandige snelheidspectra energetisch in de desbetreffende octaven opgeteld:

$$SV_{A,octaaf} = \sqrt{\sum_{octaaf} SV_A^2}.$$

6.4 Bepaling overdrachtsadmittantie

Voor het vertalen van de snelheid v op 20 m naar een equivalente kracht onder het spoor is de overdrachtsadmittantie over 20 m benodigd. Deze wordt in een FEM berekening bepaald door middel van een valgewicht simulatie. Zie figuur 6.7.



Figuur 6.7 Bepaling bodemoverdracht

Voor het bepalen van de overdracht- en de puntadmittanties zijn modellen gemaakt waarbij geen onderscheid gemaakt is tussen de zandlichamen van 1m en 2m. In dit model wordt op de symmetrieas op 20m van de spoorbaan eenzelfde impuls aangebracht als in de hierboven besproken simulaties. Ook hier is de puls verdeeld over het oppervlak van een $[2 \times 2]$ mesh. De overdrachtadmittantie TF_z tussen de kracht en de snelheid op de symmetrieknoop op de 40m-lijn worden hiermee bepaald. Daarvoor worden het smalbandige krachtspectrum SF en de smalbandige responsiespectra energetisch in de betreffende octaven opgeteld:

$$SF_{octaaf} = \sqrt{\sum_{octaaf} SF^2}, \quad SV_{20val,octaaf} = \sqrt{\sum_{octaaf} SV_{20val}^2}, \quad SV_{40val,octaaf} = \sqrt{\sum_{octaaf} SV_{40val}^2},$$

$$P_{z,octaaf} = \frac{SV_{20val,octaaf}}{SF_{octaaf}}, \quad TF_{z,octaaf} = \frac{SV_{40val,octaaf}}{SF_{octaaf}}.$$

6.5 Bepaling equivalente kracht onder het spoor

Uiteindelijk wordt de equivalente aanstootkracht uitgerekend, bepaald uit de snelheden gemeten op 20 m. Dit gebeurt als volgt:

$$F_{eq20,octaaf} = SV_{20} \frac{1}{TF_{z,octaaf}}$$

7 Resultaten variatiestudie

In het kort volgen hier nog eens de doelen van de variatiestudie:

- Checken bodemonafhankelijkheid emissiegrootte F_{eq} onder het spoor
- Bepalen variatie in F_{eq}
- Bepalen variatie in bodemoverdracht

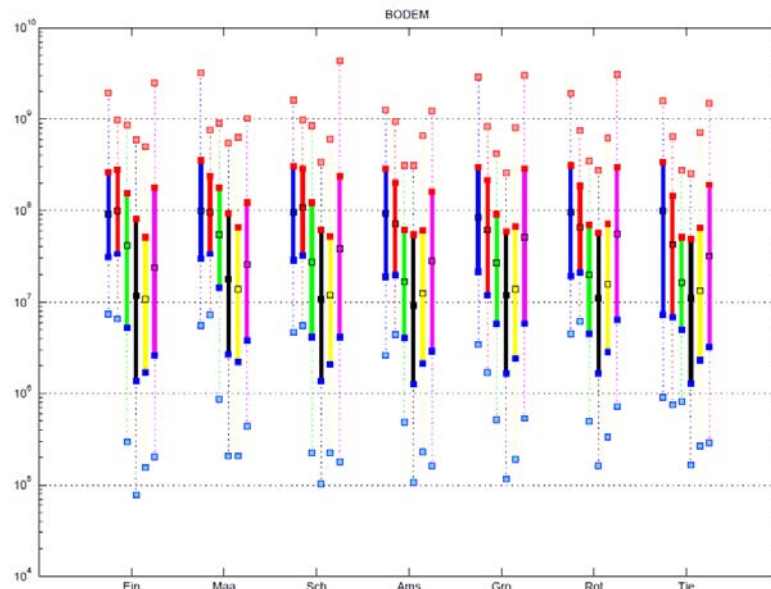
In deze variatiestudie zijn zowel de FEM als de TRINT variaties verwerkt.

Van elke uitgangssituatie, die gedefinieerd wordt door de locatie (7 stuks), de baanconfiguratie (6 stuks), de treinsnelheid (3 stuks) en het treintype (6 stuks), bestaan $25 \times 65 = 1625$ permutaties die een kleine variatie op de uitgangssituatie representeren.

7.1 Eerste resultaten

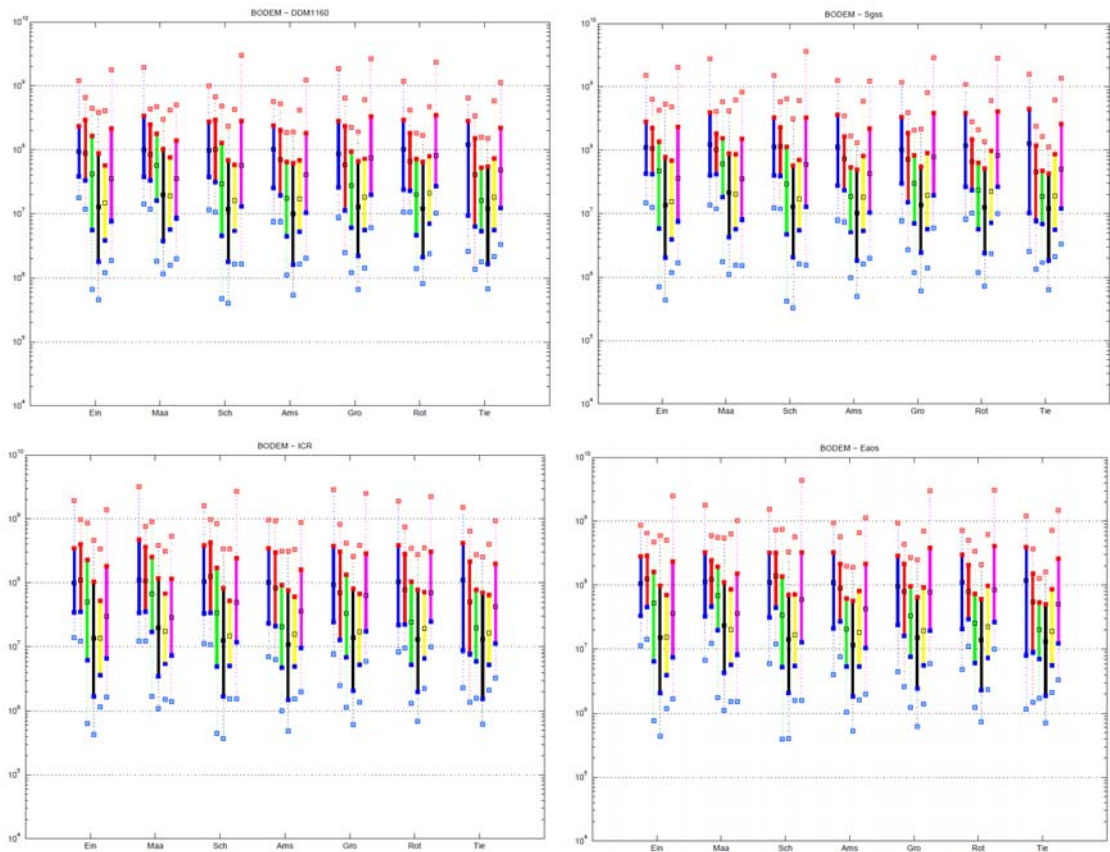
In onderstaande grafieken zijn de resultaten weergegeven voor het spectrum in octaafbanden van de equivalente aanstootkracht [N] onder het spoor. De tweede tot en met de zevende octaafbande zijn weergegeven (2 Hz, 4 Hz, 8Hz, 16 Hz, 31.5 Hz, 63 Hz). Aangegeven zijn per band de mediaan van de variaties, de 5% en 95% -waarden en de minimale en maximale waarde. Tussen de 5% en 95%-waarden zijn lijnen getrokken. In figuur 11.1 is, zoals de titel in die grafiek aanduidt, van elke variatiemogelijkheid het bodemtype vastgehouden. Dat betekent dat per populatie, waaruit de mediaan waarde, de p_5 - en de p_{95} - waarde bepaald worden, $6 \times 3 \times 6 \times 25 \times 65 = 1.755.000$ individuen aanwezig zijn.

Dit is een grove benadering voor een variatiestudie. Daarom zijn zoals in Figuur 7.2 meer parameters vastgehouden. In dat geval is de variatiestudie uitgevoerd per bodemtype en per trein (zoals iedere keer de titels van de grafieken aanduiden). Dat betekent dat er per populatie $6 \times 3 \times 25 \times 65 = 29.250$ individuen aanwezig zijn.

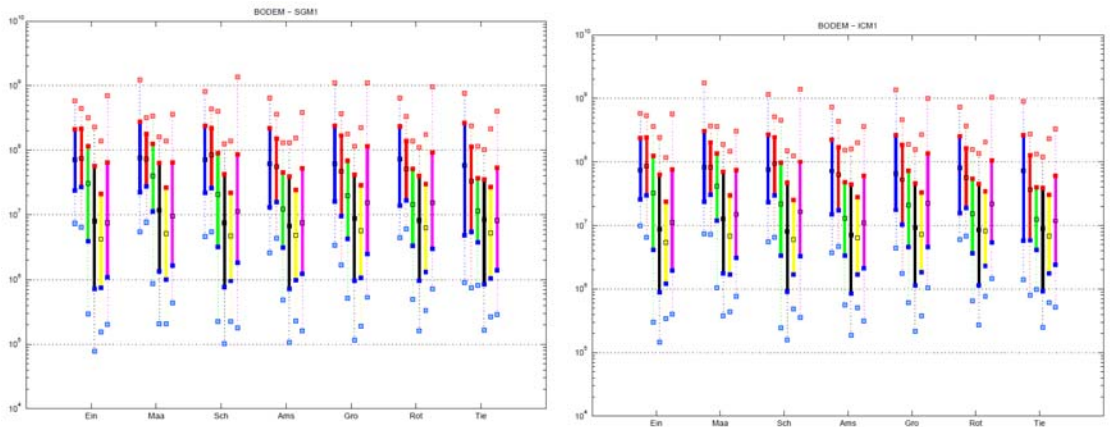


Figuur 7.1 Spectrum van F_{eq} in twee frequentiebanden per basisbodem, variatie over alle andere parameters.

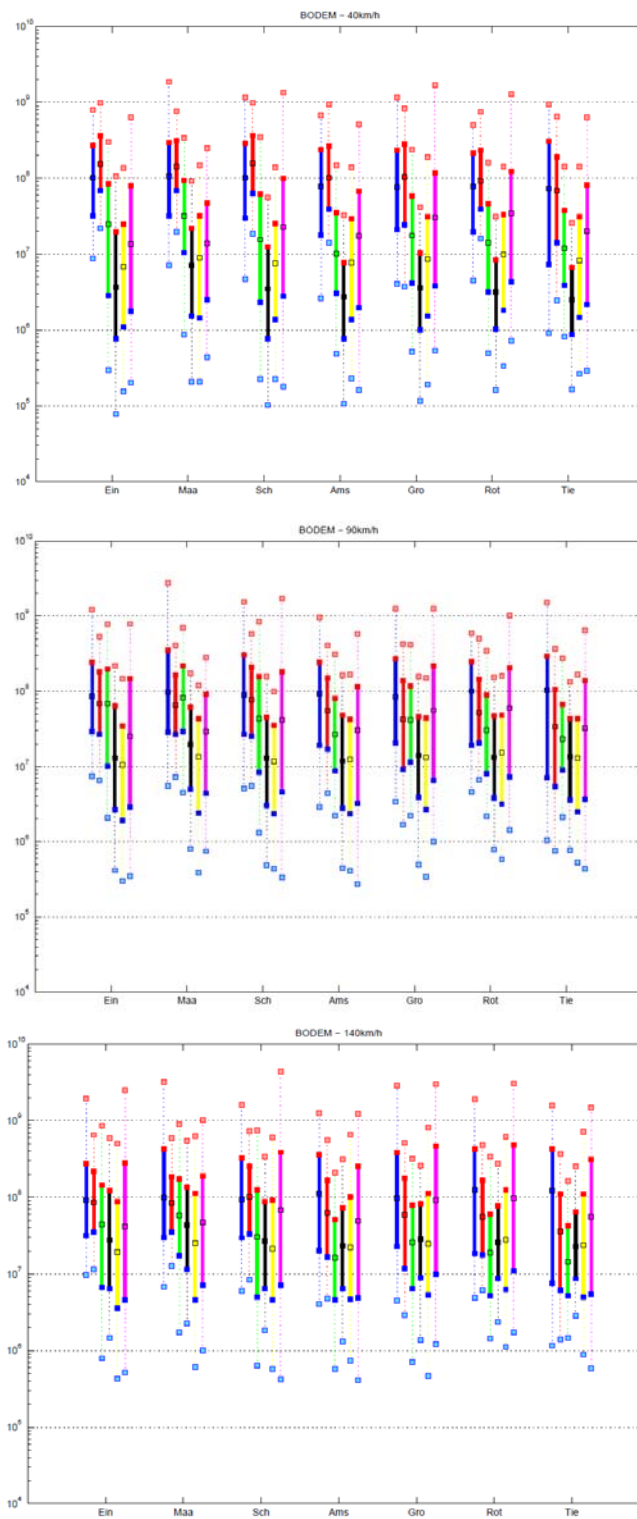
Eerste conclusie: de equivalente kracht onder het spoor is inderdaad bij goede benadering bodemonafhankelijk. De gemiddelde waarden verschillen nauwelijks, de variatie is bijna dezelfde.



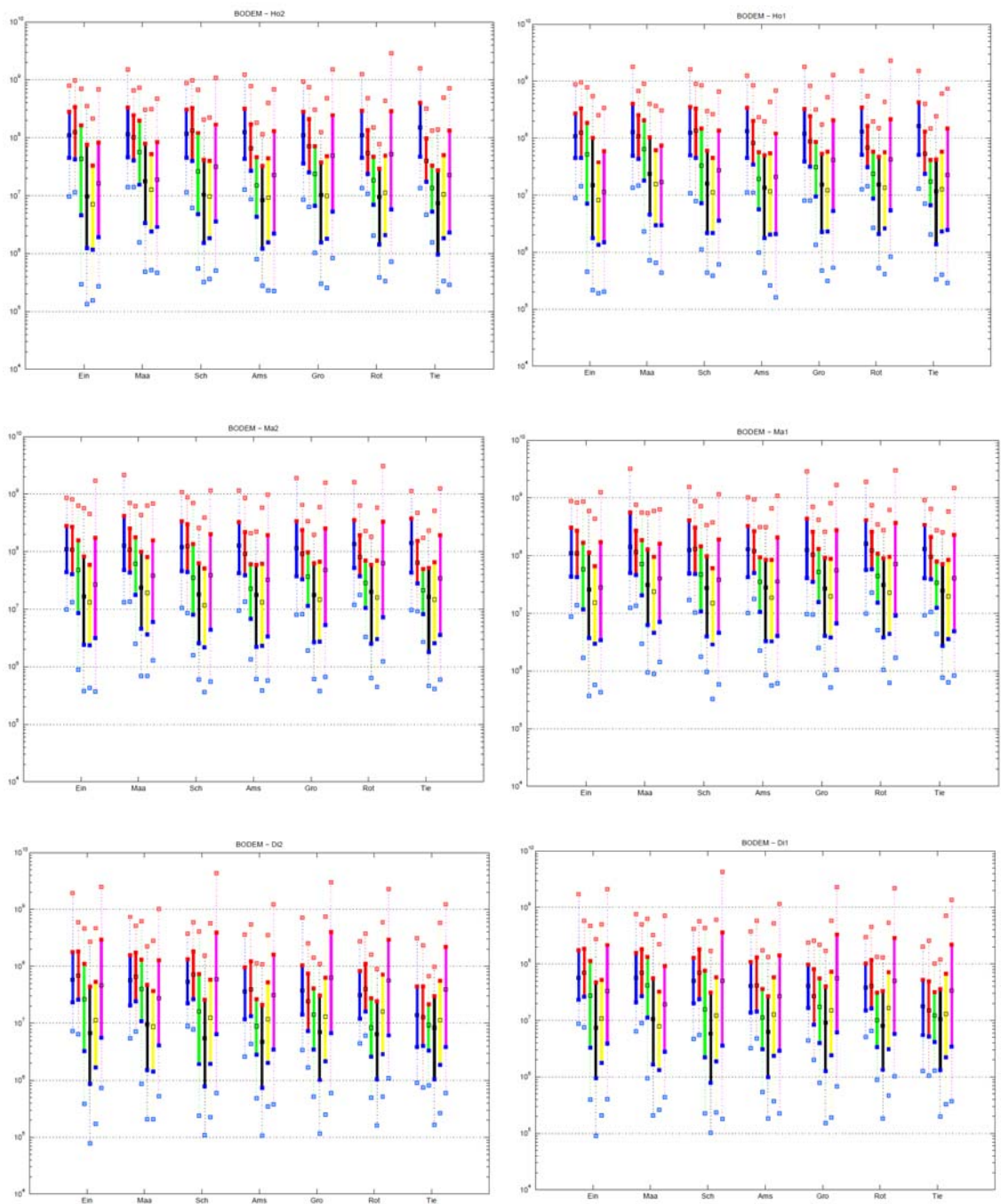
Figuur 7.2 Spectrum van F_{eq} in twee frequentiebanden per basisbodem, uitgesplitst per treintype, variatie over bodemparameters, configuraties en snelheden. Zware treinen.



Figuur 7.3 Spectrum van F_{eq} in twee frequentiebanden per basisbodem, uitgesplitst per treintype, variatie over bodemparameters, configuraties en snelheden. Lichte treinen.



Figuur 7.4 Spectrum van F_{eq} in twee frequentiebanden per basisbodem, uitgesplitst per treinsnelheid (40, 90, 140 km/h), variatie over bodemparameters, configuraties en treintypes.



Figuur 7.5 Spectrum van F_{eq} in twee frequentiebanden per basisbodem, uitgesplitst per configuratie, variatie over bodemparameters, snelheden en treintypes.

Waarbij:

Ho2=Configuratie 1: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (2m), ophoging (1m) en bodem (25m).

Ho1=Configuratie 2: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (1m), ophoging (1m) en bodem (25m).

Ma2=Configuratie 3: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (2m) en bodem (25m).

Ma1=Configuratie 4: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (1m) en bodem (25m).

Di2=Configuratie 5: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (2m), damwanden en bodem (25m).

Di1=Configuratie 6: Ballastbed (0,5m), zandlichaam (1m), damwanden en bodem (25m).

7.2 Gedetailleerde analyse voor de equivalente kracht

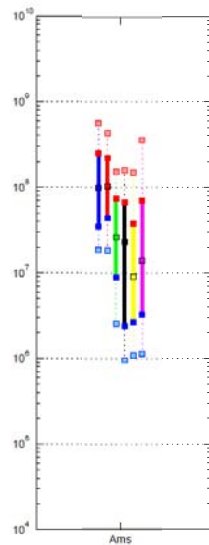
In deze paragraaf wordt een meer gedetailleerde analyse gedaan. Gewerkt wordt nu in octaafbanden.

In de SRM-T formule zal er sprake zijn van een bronterm met modificaties; dit leidt tot de noodzaak van een referentie.

Als referentie wordt genomen:

Bodem Amsterdam, configuratie maaiveld 1m, snelheid 40km/h en trein ICM1.

In Fig. 7.6 wordt voor deze situatie het spectrum van de equivalente aanstootkracht onder het spoor gegeven. De eerste zes octaafbanden zijn in verschillende kleuren weergegeven.



Figuur 7.6 Spectrum van de equivalente kracht (bronterm) in de referentiesituatie.

Vraag is nu hoe dit spectrum verschuift (zowel de mediaanwaarde als de 5% en 95% waarde) als naar een andere bodemsoort wordt gegaan, en/of naar een andere baanconfiguratie en/of naar een andere snelheid, en/of naar een ander treintype. Aanname hier is dat de bodemopbouw, baanconfiguratie, snelheid en treintype onafhankelijke parameters zijn.

Om te berekenen hoe het spectrum verschuift als gevolg van b.v. een snelheidsverhoging van 40 naar 90 km/h wordt gekeken naar hoe groot de verschuivingsfactor per bodemtype, per baanconfiguratie en per treintype is. Aangezien van elk van deze mogelijke combinaties 25x65 kleine variaties bestaan, worden deze verschuivingsfactoren beschreven door een gemiddelde, een 5% ondergrens en een 95% bovengrens. Door naar de gehele populatie van deze drie factoren in het geval van een snelheidsverhoging van 40 naar 90 km/h te kijken, kan voor elk van deze drie factoren een verwachtingswaarde bepaald worden. Deze is weergegeven in Tabel 11.2.

Ditzelfde kan ook gedaan worden indien het bodemtype, de baanconfiguratie en het treintype veranderd wordt. Belangrijk is wel dat bij elke verandering uitgegaan wordt van één van de basisparameters. Dus vanuit Amsterdam als het bodemtype veranderd wordt, vanuit 40 km/h als de snelheid veranderd wordt, vanuit maaiveld 1m als de baanconfiguratie veranderd wordt en vanuit ICM1 als het treintype veranderd wordt.

Op basis van deze analyse wordt een tabel gevuld met verwachtingswaarden voor factoren die toegepast kunnen worden om wijzigingen ten opzicht van het referentiegeval in rekening te brengen.

Deze exercitie wordt niet alleen voor de equivalente aanstootkracht gedaan, maar ook voor de met het valgewicht bepaalde overdrachtsamittanties en afstandsverzwakkingen van het snelheidsniveau van 20 m naar 40 m tijdens de passage van een trein. Bij deze laatste wordt alleen het bodemtype als invloedsfactoren meegenomen.

7.2.1 *Equivalente kracht onder het spoor*

In de tabellen 7.1 tot en met 7.4 worden de factoren weergegeven voor het inrekening brengen van de invloed van het bodemtype, de snelheid, de baanconfiguratie en het treintype op het gemiddelde en de spreiding van de equivalente kracht.

De werkwijze voor het gemiddelde is als volgt: het gemiddelde (oranje cel) is genormeerd op 1 omdat deze in de SRM-T som gemeten wordt. De factoren geven aan hoe de gemiddelde waarden veranderen.

De 95% en 5% waarden zijn voor het standaardgeval in de gele cellen weergegeven.

Deze dienen vermenigvuldigd te worden met de factoren voor de andere situaties (niet gekleurde cellen).

Tabel 7.1 Invloedsfactoren bodemtype

Equivalente kracht:Factoren locatie bodem								
octaafband 2Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	2.51	2.62	2.24	3.14	2.00	2.54	2.06
	μ	1.00	1.19	1.01	1.30	1.01	1.16	0.92
	p5	0.30	0.45	0.36	0.45	0.44	0.45	0.36
octaafband 4Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	1.79	2.67	1.75	2.34	1.69	2.89	1.01
	μ	1.00	1.46	0.89	1.35	0.93	1.56	0.57
	p5	0.47	0.63	0.35	0.64	0.44	0.60	0.27
octaafband 8 Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	2.11	6.60	3.28	7.59	2.24	5.13	1.74
	μ	1.00	2.71	1.59	3.43	1.14	1.89	0.95
	p5	0.37	0.39	0.51	1.11	0.48	0.37	0.42
octaafband 16 Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	1.82	4.59	2.57	4.52	2.09	2.62	2.16
	μ	1.00	1.55	1.25	2.07	1.11	1.20	1.06
	p5	0.46	0.35	0.49	0.72	0.50	0.42	0.41
octaafband 31.5Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	2.32	2.17	2.87	2.61	3.00	2.33	2.76
	μ	1.00	0.85	1.12	1.08	1.22	0.93	1.07
	p5	0.30	0.22	0.31	0.39	0.40	0.28	0.31
octaafband 63Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	2.94	3.08	5.45	2.28	4.87	4.47	3.21
	μ	1.00	1.04	1.94	0.90	1.92	1.55	1.15
	p5	0.19	0.18	0.39	0.23	0.53	0.26	0.24

Tabel 7.2 Invloedsfactoren snelheid

Equivalentente kracht:Factoren snelheden				
octaafband 2Hz	Snelheid	40 km/h-REF	90 km/h	140 km/h
	p95	2.51	2.24	2.73
	μ	1.00	1.01	1.22
	p5	0.30	0.41	0.47
octaafband 4Hz	Snelheid	40 km/h-REF	90 km/h	140 km/h
	p95	1.79	0.97	1.12
	μ	1.00	0.52	0.60
	p5	0.47	0.21	0.27
octaafband 8 Hz	Snelheid	40 km/h-REF	90 km/h	140 km/h
	p95	2.11	5.03	3.42
	μ	1.00	2.39	1.56
	p5	0.37	0.82	0.52
octaafband 16 Hz	Snelheid	40 km/h-REF	90 km/h	140 km/h
	p95	1.82	9.57	17.05
	μ	1.00	4.27	8.13
	p5	0.46	1.31	3.21
octaafband 31.5Hz	Snelheid	40 km/h-REF	90 km/h	140 km/h
	p95	2.32	3.48	9.70
	μ	1.00	1.53	3.31
	p5	0.30	0.51	0.84
octaafband 63Hz	Snelheid	40 km/h-REF	90 km/h	140 km/h
	p95	2.94	4.51	9.99
	μ	1.00	1.77	3.38
	p5	0.19	0.44	0.63

Tabel 7.3 Invloedsfactoren baanconfiguraties

Equivalentente kracht:Factoren configuraties							
octaafband 2Hz	Configuratie	ma1-REF	ho2	ho1	ma2	di2	di1
	p95	2.51	1.88	2.07	2.05	0.70	0.72
	μ	1.00	0.89	0.96	0.93	0.32	0.34
	p5	0.30	0.36	0.38	0.37	0.12	0.12
octaafband 4Hz	Configuratie	ma1-REF	ho2	ho1	ma2	di2	di1
	p95	1.79	1.44	1.57	1.53	0.78	0.81
	μ	1.00	0.76	0.85	0.85	0.42	0.43
	p5	0.47	0.31	0.37	0.40	0.17	0.18
octaafband 8 Hz	Configuratie	ma1-REF	ho2	ho1	ma2	di2	di1
	p95	2.11	1.43	1.64	1.58	0.91	1.00
	μ	1.00	0.62	0.74	0.76	0.38	0.43
	p5	0.37	0.17	0.22	0.27	0.10	0.11
octaafband 16 Hz	Configuratie	ma1-REF	ho2	ho1	ma2	di2	di1
	p95	1.82	1.00	1.39	1.41	0.69	0.85
	μ	1.00	0.43	0.62	0.69	0.30	0.37
	p5	0.46	0.15	0.22	0.28	0.10	0.12
octaafband 31.5Hz	Configuratie	ma1-REF	ho2	ho1	ma2	di2	di1
	p95	2.32	1.35	1.60	1.94	1.75	1.84
	μ	1.00	0.54	0.64	0.78	0.67	0.71
	p5	0.30	0.17	0.20	0.25	0.18	0.18
octaafband 63Hz	Configuratie	ma1-REF	ho2	ho1	ma2	di2	di1
	p95	2.94	1.79	1.56	2.49	3.48	3.00
	μ	1.00	0.67	0.59	0.93	1.19	1.01
	p5	0.19	0.16	0.14	0.23	0.22	0.15

Tabel 7.4 Invloedsfactoren treintypes

Equivalente kracht: Factoren treintypes							
octaafband 2Hz	Trein	ICM1-REF	DDM	SGSS	ICR	SGM1	EAOSS
	p95	2.51	2.36	2.90	3.52	2.13	2.77
	μ	1.00	1.19	1.46	1.42	0.92	1.36
	p5	0.30	0.55	0.62	0.49	0.30	0.50
octaafband 4Hz	Trein	ICM1-REF	DDM	SGSS	ICR	SGM1	EAOSS
	p95	1.79	1.86	2.08	2.89	1.65	2.62
	μ	1.00	1.08	1.18	1.42	0.89	1.43
	p5	0.47	0.53	0.56	0.54	0.37	0.61
octaafband 8 Hz	Trein	ICM1-REF	DDM	SGSS	ICR	SGM1	EAOSS
	p95	2.11	2.72	2.90	4.02	2.09	3.33
	μ	1.00	1.29	1.40	1.68	0.94	1.57
	p5	0.37	0.48	0.48	0.46	0.29	0.52
octaafband 16 Hz	Trein	ICM1-REF	DDM	SGSS	ICR	SGM1	EAOSS
	p95	1.82	3.26	3.40	3.55	2.09	3.73
	μ	1.00	1.51	1.57	1.60	0.92	1.70
	p5	0.46	0.59	0.62	0.56	0.30	0.65
octaafband 31.5Hz	Trein	ICM1-REF	DDM	SGSS	ICR	SGM1	EAOSS
	p95	2.32	6.15	7.54	5.21	2.25	7.61
	μ	1.00	2.59	2.90	2.33	0.82	2.91
	p5	0.30	0.89	0.89	0.85	0.17	0.89
octaafband 63Hz	Trein	ICM1-REF	DDM	SGSS	ICR	SGM1	EAOSS
	p95	2.94	7.40	8.90	6.10	2.59	8.91
	μ	1.00	3.01	3.31	2.58	0.79	3.31
	p5	0.19	0.81	0.78	0.74	0.09	0.78

7.2.2 Bodemadmittantie uit valgewichtproef

In tabel 7.5 worden de factoren weergegeven voor het in rekening brengen van de invloed van het bodemtype, de snelheid, de baanconfiguratie en het treintype op het gemiddelde en de spreiding van de bodemadmittantie uit de valgewichtproef.

Tabel 7.5 Invloedsfactoren bodemadmittantie

Valgewichtproef: Factoren locatie bodem								
octaafband 2Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	1.73	0.42	0.47	0.36	2.73	0.51	1.90
	μ	1.00	0.13	0.19	0.14	2.25	0.18	1.02
	p5	0.27	0.04	0.06	0.04	0.77	0.06	0.26
octaafband 4Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	1.67	0.72	1.48	0.39	1.33	1.15	2.22
	μ	1.00	0.18	0.65	0.16	0.99	0.21	1.91
	p5	0.28	0.04	0.15	0.06	0.47	0.06	1.15
octaafband 8 Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	1.63	1.24	1.50	0.36	0.69	1.65	1.31
	μ	1.00	0.31	0.69	0.13	0.50	0.51	1.10
	p5	0.40	0.04	0.21	0.02	0.27	0.06	0.90
octaafband 16 Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	1.62	2.07	1.81	0.97	0.77	1.89	1.43
	μ	1.00	0.95	1.01	0.50	0.56	1.04	0.92
	p5	0.35	0.10	0.39	0.20	0.30	0.42	0.47
octaafband 31.5Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	2.29	3.20	1.59	3.54	0.75	3.26	1.43
	μ	1.00	1.57	0.89	2.14	0.43	1.54	0.77
	p5	0.38	0.68	0.33	1.22	0.19	0.55	0.26
octaafband 63Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	2.16	8.22	1.64	8.69	0.73	4.96	2.02
	μ	1.00	2.54	0.54	4.33	0.23	1.49	0.71
	p5	0.20	0.43	0.14	1.53	0.03	0.07	0.14

7.2.3 Afstandsverzwakking van 20 m naar 40 m

In tabel 7.6 worden de factoren weergegeven voor het inrekening brengen van de invloed van het bodemtype, de snelheid, de baanconfiguratie en het treintype op het gemiddelde en de spreiding van de afstandsverzwakkingen van 20 m naar 40 m.

Tabel 7.6 Invloedsfactoren afstandverzwakkingen

Uitdemping bodem: Factoren locatie bodem								
octaafband 2Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	1.39	1.09	1.45	1.03	1.26	1.17	1.38
	μ	1.00	0.62	0.89	0.60	0.92	0.70	0.92
	p5	0.64	0.35	0.46	0.29	0.66	0.38	0.56
octaafband 4Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	1.62	1.28	1.10	1.35	1.73	1.56	1.43
	μ	1.00	0.88	0.81	0.94	1.14	1.06	0.92
	p5	0.62	0.59	0.59	0.63	0.74	0.70	0.59
octaafband 8 Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	2.03	2.10	1.38	2.54	2.04	2.66	1.21
	μ	1.00	1.28	0.93	1.41	1.10	1.48	0.80
	p5	0.53	0.70	0.58	0.79	0.56	0.65	0.47
octaafband 16 Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	1.62	2.35	1.90	2.31	1.65	2.21	1.41
	μ	1.00	1.32	1.13	1.50	0.98	1.29	0.88
	p5	0.53	0.62	0.63	0.96	0.52	0.60	0.44
octaafband 31.5Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	1.72	1.75	2.09	1.62	1.91	1.63	1.45
	μ	1.00	1.15	1.27	1.17	1.04	1.11	0.87
	p5	0.52	0.67	0.68	0.79	0.58	0.67	0.51
octaafband 63Hz	Locatie	AMS-REF	EIND	GRON	MAASVL	RDAM	SCHEV	TIEL
	p95	2.00	2.49	3.92	2.04	2.24	2.27	2.32
	μ	1.00	1.34	2.08	1.25	1.06	1.28	1.14
	p5	0.48	0.56	0.58	0.50	0.36	0.61	0.37

7.2.4 Discussie

In dit hoofdstuk zijn een aantal aannamen gedaan, namelijk dat de effecten van treintype, snelheid, configuratie en bodem geen onderlinge interactie vertonen. Dit is een benadering.

In een vervolgstudie kan hier nader aandacht aan worden besteed, bijvoorbeeld in een Anova-variantie-analyse van de gehele variatiestudie.

Ook kan gekeken worden naar een vereenvoudiging door groepering (b.v. twee bodems, 2 treinen etc.).

8 Vervolg

8.1 Vervolgonderzoek

In dit hoofdstuk wordt aangegeven welke onderdelen van de SRM-T nog door de commissie uitgevoerd dienen te worden.

De SRM-T formule is (per octaafband) als volgt:

$$v(r) = F_{bron} H_{situatie} H_{baan} Y_{ondergrond} H(r) H_{bf} H_{fw} H_{wv}$$

waarin:

v	trillingssnelheid [m/s]
r	afstand [m]
F_{eq}	een bodemonafhankelijke equivalente treinbelasting, uitsluitend afhankelijk van treintype en rijnsnelheid in [N]
$H_{situatie}$	een correctiefactor voor de bovenbouwsituatie is (wissel, duiker, overweg) [-], geldig bij een lijnaanstoting
H_{baan}	een correctiefactor voor de opbouw van de aardenbaan (onderbouw) [-], geldig bij een lijnaanstoting
$Y_{ondergrond}$	de transfer functie voor de betreffende ondergrond is [(m/s)/N], geldig bij een lijnaanstoting
$H(r)$	verzwakking in de bodem voor $r > r_{ref}$ [-]
H_{bf}	overdrachtsfactor bodem-fundering [-]
H_{fw}	overdrachtsfactor fundering-wand [-]
H_{wv}	overdrachtsfactor wand-vloer [-]

Door middel van grote metingen worden de gemiddelde waarden voor elk van bovengenoemde parameters vastgelegd. In het geval er geen grote metingen nog voorhanden zijn, kunnen de modelwaarden uit dit rapport in eerste aanleg ook gebruikt worden.

De grote metingen zullen niet elk van de genoemde combinaties van de locatie (7 stuks), de baanconfiguratie (6 stuks), de treinsnelheid (3 stuks) en het treintype (6 stuks) betreffen.

Waarschijnlijk zal het een meting zijn op slappe en op stijve bodem, waarbij dan wel zoveel mogelijk snelheden en treintypes worden meegenomen.

Aan te bevelen is in de variatiestudie een condensatie/groepering aan te brengen om het aantal combinaties te beperken.

8.2 Toepassing op praktijksituatie

Stel er wordt in Appingedam een nieuwe spoorlijn aangelegd. Vraag is of de trillingen binnen de grenzen blijven.

Uitgaande van een beperkt aantal grote metingen zal de situatie in Appingedam niet exact terug te vinden zijn in de grote metingen.

Gekozen wordt dan die bodem en die baan die het meeste overeenkomen en waarvan de resultaten (grote metingen) bekend zijn. Uit de variatiestudie in dit rapport volgt een waarde voor de variatie die ontstaat door de kleine wijzigingen in bodem en trein binnen een standaardgeval waarvoor de grote meting is aangebracht. Deze variatieparameter δ (>1) wordt dan in rekening gebracht voor het geval Appingedam omdat daar geen metingen zijn verricht.

De toe te passen formule in Appingedam wordt dan:

$$v_{appingedam}(r) = \{F_{bron} H_{situatie} H_{baan} Y_{ondergrond} H(r) H_{bf} H_{fw} H_{wv}\} \delta$$

met:

$$\delta = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^n \left(\frac{p_{95}}{\mu} \right)^2 \right)}$$

Er geldt dat met minder basisgevallen, de waarde voor δ groter wordt.

Om te komen tot een toetswaarde die beoordeeld kan worden aan de SBR-richtlijnen, worden de waarden per frequentieband gesommeerd tot een effectieve waarde volgens de formule:

$$V_{eff} = \sqrt{\left(\sum_{band} V_j^2 \cdot H_{weeg} \right)}$$

De effectieve waarde dient nog vermenigvuldigd te worden met een piekfactor:

$$g = 1 + \sqrt{2 \ln \left(\frac{n_{passage}}{n_{meet}} \right)}$$

met:

$n_{passage}$ = de totale passageduur van alle treinen in 1 week.

n_{meet} = de totale meetduur.

9 Conclusies

In dit rapport zijn een aantal elementen uit de standaard rekenmethode voor treintrillingen gepresenteerd. De theoretische achtergrond is toegelicht.

Op basis van een TUD studie is een referentieafstand bepaald voor de SRM-T. Er heeft daarna een zeer omvangrijke variatiestudie plaatsgevonden in een in fysisch-complete modelwereld om de variatieparameters te bepalen die gebruikt kunnen worden bij de later door middel van metingen vast te leggen gemiddelde waarden.

De resultaten van de variatiestudie zijn in eerste aanleg op een vereenvoudigde wijze verwerkt. Voor een eventuele vervolgstudie wordt aanbevolen een variantiestudie uit te voeren en te kijken naar een eventuele groepering van parameters.

Voor een vervolg is ook de mogelijkheid geboden om een verificatie uit te voeren van de SRM-T. Dit kan door een SRM-T voorspelling te doen voor een punt op een afstand van 60 m van het hart spoor; in dit rapport zijn hier ook de theoretisch bekende waarden berekend. Deze vergelijking kan indicatief zijn voor de eventuele groepering van parameters.

10 Literatuur

TNO rapport TNO-034-DTM-2009-01104, Betrouwbare Trillingsmaatregel
Ontwikkeling Standaard RekenMethode voor Trillingen (SRM-T), 2009

J. S. Hoving, A.V. Metrikine. Evaluation of the Effect of Embankment on
the Transfer Functions of Soil Vibrations. Delft University of Technology 2009.

LS Dyna, User Manual.

VP Drempeel en VP Damwand, Handleiding TNO.

TRINT, gebruikershandleiding.

CUR 166, Damwandconstructies, 3e druk