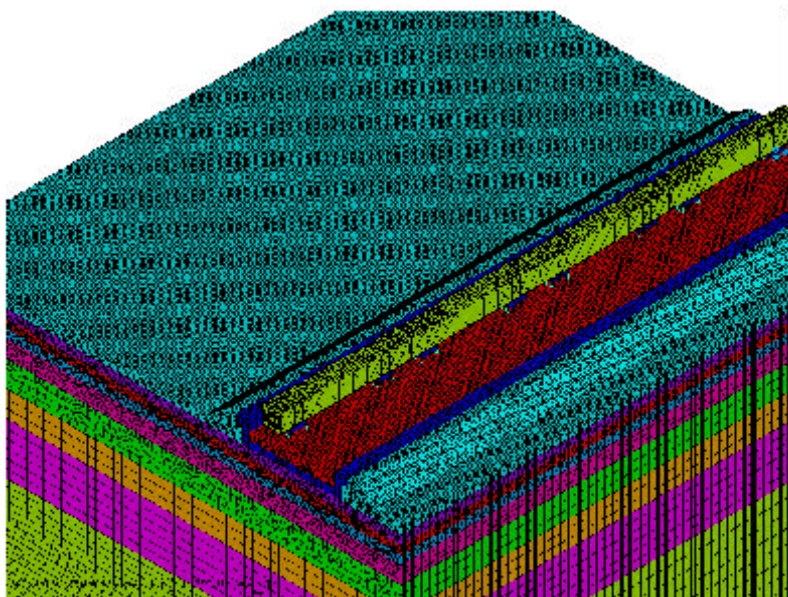


# Rapport

Trillingniveaus vanwege Zeeuwse lijn te Goes  
Invoegverlies beoogde betonnen spoorbak  
3D FEM analyse

Rapportnummer VL 849-7-RA-001 d.d. 8 december 2011



*Figuur 1: Driedimensionaal Finite Element Method rekenmodel*

Opdrachtgever: Gemeente Goes  
Rapportnummer: VL 849-7-RA-001  
Datum: 8 december 2011  
Ref.: MV/PB/HT/VL 849-7-RA-001

Lid NLIingenieurs  
ISO-9001:2000 gecertificeerd

Peutz bv  
Paletsingel 2, Postbus 696  
2700 AR Zoetermeer  
Tel. (079) 347 03 47  
Fax (079) 361 49 85  
info@zoetermeer.peutz.nl

Lindenlaan 41, Molenhoek  
Postbus 66, 6585 ZH Mook  
Tel. (024) 357 07 07  
Fax (024) 358 51 50  
info@mook.peutz.nl

L. Springerlaan 37,  
Postbus 7, 9700 AA Groningen  
Tel. (050) 520 44 88  
Fax (050) 526 31 78  
info@groningen.peutz.nl

Montageweg 5,  
6045 JA Roermond  
Tel. (0475) 324 333  
info@roermond.peutz.nl

www.peutz.nl

Peutz GmbH  
Düsseldorf, Bonn, Berlin  
info@peutz.de  
www.peutz.de

Peutz SARL  
Paris, Lyon  
Info@peutz.fr  
www.peutz.fr

Peutz bv  
London  
info@peutz.co.uk  
www.peutz.co.uk

Daidalos Peutz bvba  
Leuven  
Info@daidalospeutz.be  
www.daidalospeutz.be

Köhler Peutz Geveltechniek bv  
Zoetermeer  
Info@gevel.com  
www.gevel.com

Opdrachten worden aanvaard en  
uitgevoerd volgens De Nieuwe  
Regeling 2005

BTW identificatienummer  
NL004933837B01  
KvK: 12028033

Inhoud	pagina
1. INLEIDING	3
2. UITGANGSPUNTEN	4
2.1. Projectomschrijving	4
2.2. Configuratie betonnen spoorbak	4
2.3. Opzet analyse	5
2.4. Meetgegevens	6
2.5. Reductiedoelstelling	7
3. MODELVORMING	9
3.1. Finite Element Method	9
3.2. Gehanteerde rekenmodellen	10
3.3. Rekenmethodiek	11
3.4. Bodemprofiel	11
3.5. Randvoorwaarden	12
3.6. Trein als meervoudig massa-veersysteem	14
3.7. Aanstoting	16
3.8. Betonsterkte	16
3.9. Rekenprogramma	16
4. SPECTRAAL INVOEGVERLIES	18
5. INTEGRAAL INVOEGVERLIES	20
6. CONCLUSIES	21

## 1. INLEIDING

In het kader van de beoogde intensivering van goederentreinen over de Zeeuwse lijn te Goes is in opdracht van de provincie Zeeland en de gemeente Goes een onderzoek uitgevoerd naar de effectiviteit van de beoogde betonnen monolitische spoorbak met betrekking tot de te verwachten trillingsniveaus in de directe omgeving van het spoortraject.

In 2005 is een inventariserende gedeelte van het onderzoek uitgevoerd, zie rapport met nummer VL 849-1-RA d.d. 30 september 2005. Dit onderzoek betrof een zogenaamde V-polder en een (U-vormige) verdiept liggende betonnen bak. Uit het onderzoek bleek dat de effectiviteit van een V-polder nagenoeg nihil was, maar dat met een verdiepte betonnen bak constructie een reductie in trillingsniveau zou kunnen worden bewerkstelligd van circa een factor 2 à 3 (uitgaande van een referentiewoning op circa 20 m van het bereden spoor).

In 2008 is een vervolgonderzoek uitgevoerd, zie rapport met nummer VL 849-5-RA d.d. 29 augustus 2008. Dit onderzoek betrof (onder andere) een betonnen bak op maaiveld met lagere verticale elementen c.q. geringere lengtestijfheid. Uit dit onderzoek bleek een trillingreductie van een factor 2 (uitgaande van een zevental referentiewoningen).

Bovenstaande onderzoeken zijn uitgevoerd met behulp van tweedimensionale dynamische Finite Element Method (FEM) rekenmodellen. Dit waren in feite indicatieve berekeningen, waarvan op voorhand duidelijk was dat binnen die benadering wellicht sprake was van oversimplificering van de optredende fysische processen.

In het huidige meer vergevorderde stadium van het spoorbak project is het zaak de effectiviteit van de betonnen spoorbak meer correct te bepalen met behulp van een complex 3D FEM rekenmodel. Daarnaast zijn de resultaten van diverse aanvullende onderzoeken – welke ook zijn uitgevoerd in het kader van het trillingsonderzoek Zeeuwse lijn te Goes – gebruikt om het 3D FEM-rekenmodel te configureren en te ijken.

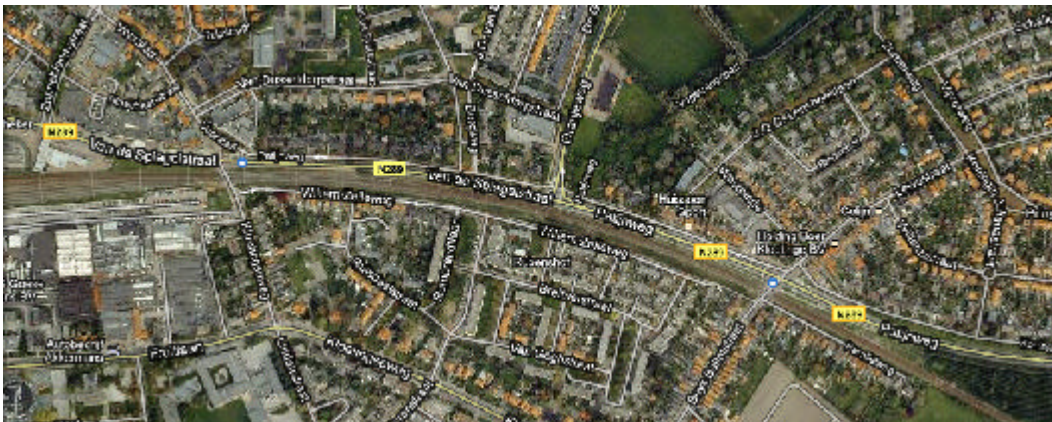
In voorliggende rapportage wordt de modelvorming van het complexe 3D FEM-rekenmodel beschreven en worden de resultaten van de berekeningen gepresenteerd en beoordeeld.

## 2. UITGANGSPUNTEN

### 2.1. Projectomschrijving

De Zeeuwse lijn is een bestaande spoorlijn tussen Roosendaal en Vlissingen. De Sloelijn is een bestaand goederenspoor dat het Sloegebied (havengebied Vlissingen Oost) verbindt met het hoofdspoor de Zeeuwse lijn. Door ontwikkelingen in het Sloegebied zullen steeds meer goederentreinen over genoemde spoorlijnen gaan rijden. Die intensivering is aanleiding te trachten de trillingniveaus per passage van met name goederentreinen over een zeker trajectdeel in Goes, met relatief veel woningen op korte afstand van de spoorbaan, te beperken.

De beoogde trillingreducerende maatregel in onderhavig onderzoek is een monolitische betonnen bak constructie, welke gepland is ten oosten van het station Goes over een lengte van circa 1 kilometer (min of meer vanaf de Kloetingseweg tot en met Parallelweg 24). Het traject is enigszins gekromd met het draaipunt in zuidelijke richting. Figuur 2 betreft een satellietfoto van de projectlocatie.

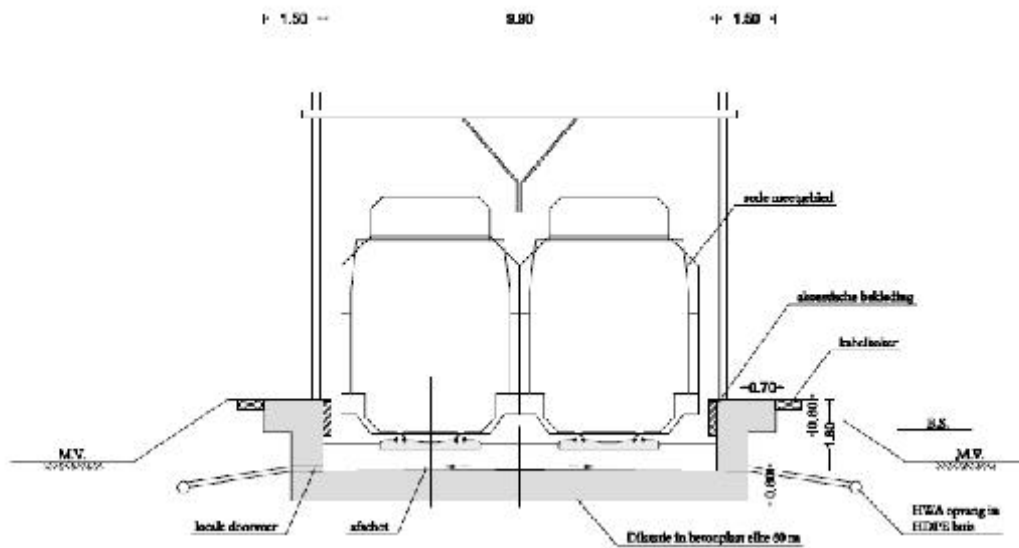


*Figuur 2: Satellietfoto van projectlocatie*

### 2.2. Configuratie betonnen spoorbak

De dwarsconfiguratie van de betonnen spoorbak is weergegeven in figuur 3. De breedte van het baanvak bedraagt circa 10 m en het baanvak zal op circa 0,5 m boven het maaiveld worden gesitueerd. De vloer en de wanden van de betonnen bak zullen circa 80 cm dik worden uitgevoerd.

Er wordt uitgegaan van segmenten van 60 m lang (afstand tussen bovenleiding portalen), met daarop het reguliere ballastbed (ballastbed is ook ingetekend in de figuur).



Figuur 3: Beoogde dwarsconfiguratie betonnen spoorbak d.d. 8 oktober 2010

### 2.3. Opzet analyse

De effectiviteit van de betonnen spoorbak wordt in eerste instantie beschreven door het spectrale (frequentie afhankelijke) invoegverlies, voor het trillingniveau vanwege treinpassages, op een representatieve afstand tot het spoor. Hiertoe wordt de FEM modellering ingezet, die de trein/spoor/bak/bodem interactie beschrijft. Daarbij wordt gebruik gemaakt van invoer- c.q. meetgegevens met betrekking tot bodemparameters alsmede trein- en betoneigenschappen en dergelijke. De ratio tussen het berekende spectrale trillingniveau op een zekere afstand, met en zonder betonnen bak, geeft het spectrale invoegverlies, min of meer onafhankelijk van de spectrale excitatie kracht (trein). Ter verificatie van het model worden evenwel de berekende trillingniveaus, onder aannames voor de excitatie kracht (trein), voor de aarden baan modelversie getoetst aan daadwerkelijk gemeten trillingniveaus, met zonodig terugkoppeling naar de FEM modellering. Deze verificatie betreft dan met name de onderlinge verhoudingen van het trillingniveau op diverse afstanden tot het spoor.

In een tweede stap wordt de invloed van de woningen verdisconteerd. De bodem/woning interactie wordt aldus los gezien van de trein/spoor/bak/bodem interactie. Door het spectrale invoegverlies toe te passen op het gemeten of berekende spectrale trillingniveau per woning, wordt het integrale invoegverlies per woning bepaald. Door te middelen over de beschouwde woningen ontstaat de reductiefactor (ééngetalswaarde) voor de beschouwde trillingarme spoorconstructie.

## 2.4. Meetgegevens

In het kader van het trillingsonderzoek zijn diverse metingen uitgevoerd. Conform de vorige paragraaf betreft dit met name metingen inzake:

1. bodemeigenschappen ten behoeve van bodemparameters FEM model
  2. trillingniveaus op zekere afstand (bodem of fundament) voor finetuning FEM model
  3. trillingniveaus in woningen voor integraal effect spectraal invoegverlies per woning
- Tabel 1 geeft een overzicht van de uitgevoerde metingen die een betekenis hebben voor onderhavig onderzoek. In de tabel is opgenomen:

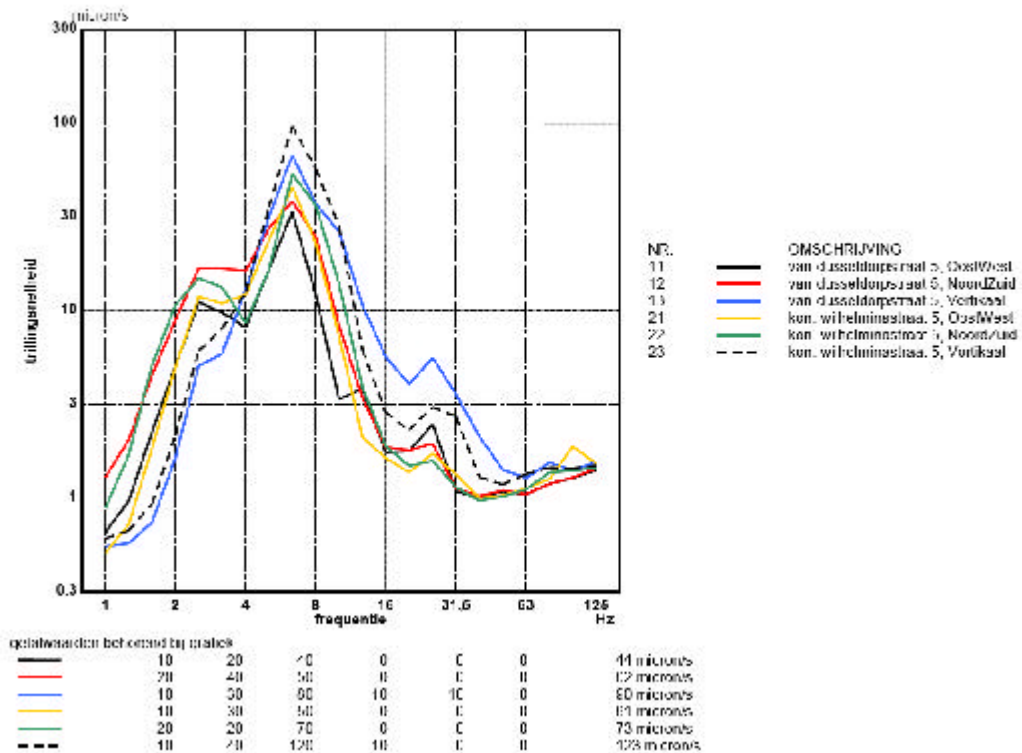
- het bedrijf dat de metingen heeft uitgevoerd
- het type meting (1/2/3, zie vorige paragraaf en bovenstaande opsomming)
- de periode waarin de meting is uitgevoerd
- nadere opmerkingen

Tabel 1: Overzicht uitgevoerde metingen

<b>Bedrijf</b>	<b>Type meting</b>	<b>Periode</b>	<b>Opmerking</b>
AEAT Rail	2*	8 april 2004, 14-23 december 2004	trillingen treinen in woningen
Peutz	2	7 november 2006	trillingen treinen in bodem
	3	26 oktober 2006 – 7 november 2006	trillingen treinen in woningen
	2	22 oktober 2010 – 9 november 2010	trillingen treinen in fundament
	3	19-22 oktober 2010	trillingen treinen in woningen
TNO	1	25 oktober 2010	trillingen valgewicht
	2	13-27 oktober 2010	trillingen treinen in fundament
	2	4-23 april 2011	trillingen treinen in fundament
vd Straaten	1	6 oktober 1995	sonderingen
Arcadis	1	maart – april 2006	sonderingen
Fugro	1	oktober – november 2010	sonderingen

\* in woningen, toegepast in combinatie met FEM model representatieve woning

Rapport met nummer VL 849-8-RA d.d. 7 februari 2011 beschrijft de onbemande trillingmetingen van Peutz in de referentieposities Van Dusseldorpstraat 5 en Koningin Wilhelminaweg 5 (respectievelijk 40 m en 55 m vanaf het spoor). In het rapport wordt een tertsbandspectrum gepresenteerd van de tijdgemiddelde trillingsnelheid over passages van goederentreinen van 60 seconden, gemiddeld over een selectie van 59 goederentreinen. In figuur 4 is dit spectrum weergegeven.



Figuur 4: Tertsbandspectrum tijdgemiddelde trillingsnelheid over passages van 60 seconden, gemiddeld over een selectie van 59 passerende goederentreinen (bron: VL 849-8-RA d.d. 22 november 2010)

De dominante tertsband c.q. frequentie is 6,3 Hz. Hierbij geldt dat op kortere afstanden deels ook hogere frequenties een rol kunnen spelen en dat een proportionele frequentieverschuiving op kan treden bij hogere rijsnelheden. Bij 80 km/h (vs. hoofdzakelijk 60 km/h in figuur 4) ligt de dominante frequentie dan bijvoorbeeld rond de 8 Hz.

## 2.5. Reductiedoelstelling

Op basis van de trillingmetingen in woningen van Peutz in 2006, in combinatie met de prognoses van het toekomstig aantal passerende goederentreinen en het beoordelingsschema conform SBR deel B van augustus 2002 zijn in rapport VL 849-3-RA d.d. 16 januari 2007 een aantal opties uitgewerkt voor de reductiedoelstelling van de betonnen spoorbak.

In overleg met de opdrachtgever is destijds gekozen voor de optie “geen toename van de etmaalperiode gemiddelde trillingsnelheid”. Bij de aangegeven intensivering c.q. een verachtvoudiging van het nachtelijke goederenvervoer betekent dit een reductiedoelstelling van een factor 3.

Aanvullend geldt vanwege relatief sterke trillingen per passerende goederentrein ter plaatse van de woning Willem Zelleweg 5 (en andere woningen die door deze woning worden gerepresenteerd zoals Willem Zelleweg 7) aldaar een reductiedoelstelling van een factor 5 (zie tabel 1 in rapport VL 849-3).



### 3. MODELFORMING

In dit hoofdstuk wordt de modelvorming toegelicht van het complexe 3D FEM-rekenmodel dat is ontwikkeld voor de bepaling van de trilling voortplanting in de bodem ten gevolge van een (goederen)treinpassage.

De bodem in het rekenmodel is opgebouwd aan de hand van verschillende bodemlagen en de randen van het model zijn gemodelleerd m.b.v. zogenaamde randelementen (veerdemper elementen). Daarnaast is een meervoudig massa-veersysteem toegevoegd ter modellering van de passerende (goederen)treinen. E.e.a. wordt nader toegelicht in paragraaf 3.4.–3.6. In paragraaf 3.7. volgt een beschrijving van de aanstoting van het rekenmodel en in paragraaf 3.9. een beschrijving van de gehanteerde elementen in ANSYS (het programma dat gebruikt is voor de modellering).

Voorafgaand aan de toelichting van deze onderdelen van het rekenmodel wordt eerst een korte uitleg van de Finite Element Method (Eindige Elementen Methode) gegeven alsmede een toelichting van de de gehanteerde rekenmodellen en de rekenmethodiek (paragraaf 3.1.-3.3.).

#### 3.1. Finite Element Method

Om de trillingoverdracht te bepalen is gebruik gemaakt van de Finite Element Method (FEM). Het principe van FEM is dat een complex mechanisch/dynamisch systeem kan worden samengesteld met behulp van een groot aantal (kleine) elementen, waarvan de eigenschappen volledig bekend zijn. Met behulp van deze elementen en de belastingen op het systeem kan een set van bewegingsvergelijkingen opgesteld worden voor het hele systeem:

$$[M] \cdot \{a\} + [C] \cdot \{v\} + [K] \cdot \{u\} = \{F(t)\}$$

waarbij:

$[M]$	=	massamatrix;
$[C]$	=	dempingmatrix;
$[K]$	=	stijfheidmatrix;
$\{F(t)\}$	=	tijdsafhankelijke belasting/krachtvector;
$\{a\}$	=	vector met versnellingen in knooppunten;
$\{v\}$	=	vector met snelheden in knooppunten;
$\{u\}$	=	vector met verplaatsingen in knooppunten.

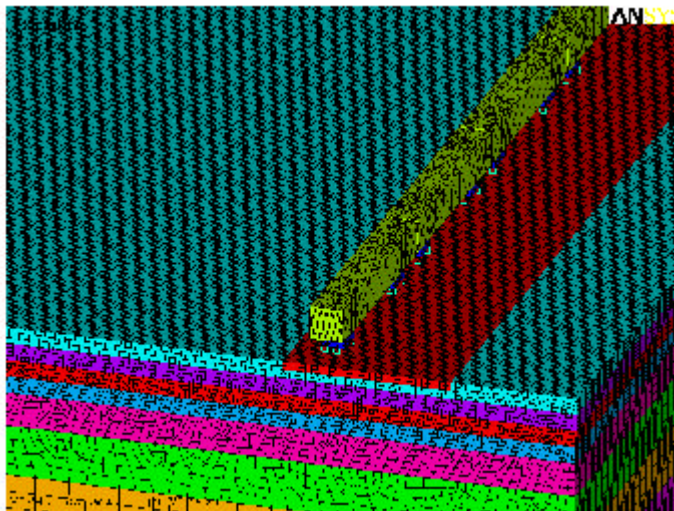
Op basis van de set van bewegingsvergelijkingen kan het mechanische / dynamische gedrag van het systeem worden bepaald.

## 3.2. Gehanteerde rekenmodellen

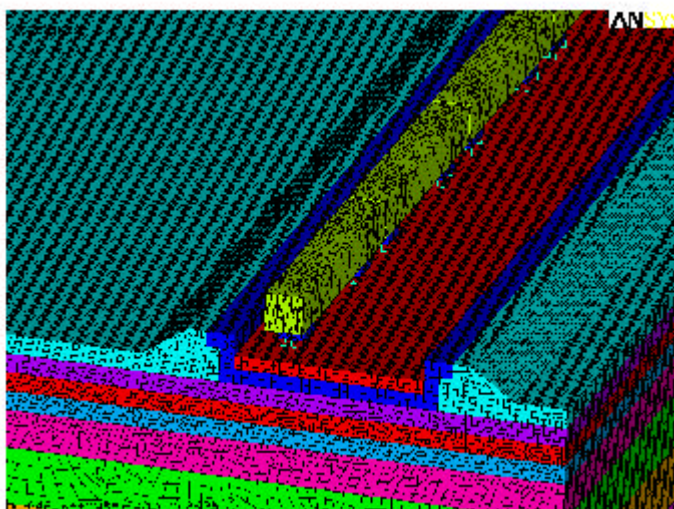
Ten behoeve van onderhavig onderzoek is een tweetal 3D FEM-rekenmodellen opgesteld, te weten:

- een driedimensionaal dynamisch rekenmodel voor de bepaling van de trilling voortplanting in de bodem ten gevolge van een goederentreinpassage in de huidige situatie met enkel ballastbed van 55 m · 30 m · 60 m (x · y · z), verder te noemen: *rekenmodel huidige situatie*, zie figuur 5 a);
- een driedimensionaal dynamisch rekenmodel voor de bepaling van de trilling voortplanting in de bodem ten gevolge van een goederentreinpassage in de situatie met een betonnen spoorbak en ballastbed van 55 m · 30 m · 60 m (x · y · z), verder te noemen: *rekenmodel situatie betonnen spoorbak*, zie figuur 5 b).

Voor de definitie van de assen in het rekenmodel zie figuur 6.



a) rekenmodel huidige situatie



b) rekenmodel situatie betonnen spoorbak

Figuur 5: Gehanteerde rekenmodellen

### 3.3. Rekenmethodiek

Aan de hand van de rekenmodellen wordt een zogenaamde harmonische analyse uitgevoerd, dat wil zeggen een analyse in het frequentiedomein waarbij uitgegaan wordt van een harmonische excitatie.

Als excitatie op het baanvak van het *rekenmodel huidige situatie* wordt in eerste aanleg een vlak bronspectrum gehanteerd (met een faseverschil over de lengte van het spoor vanwege de snelheid van de trein, zie paragraaf 3.7.). De berekende responsie ter plaatse van de meetlocaties ten gevolge van dit vlakke bronspectrum levert de (frequentie afhankelijke) overdracht van het baanvak naar de meetlocaties in het rekenmodel.

Aan de hand van de trillingmetingen (type 2 in tabel 1) en de berekende overdracht wordt vervolgens een equivalent krachtspectrum bepaald, zodanig dat de rekenresultaten overeenkomen met de meetresultaten. Op deze wijze wordt het *rekenmodel huidige situatie* geijkt aan de meetresultaten. Bij meerdere meetposities op verschillende afstanden tot het spoor kan nog finetuning van met name de bodemparameters plaatsvinden.

Het equivalente krachtspectrum dat volgt uit het *rekenmodel huidige situatie* wordt vervolgens gebruikt om met datzelfde model de responsie op de relevante afstanden (woningen) te berekenen, en evenzo het *rekenmodel situatie betonnen spoorbak* aan te stoten.

De (frequentie afhankelijke) ratio van de responsie van beide rekenmodellen is het invoegverlies van de betonnen spoorbak.

### 3.4. Bodemprofiel

Uit de sonderingen ter plaatse (type 1 in tabel 1) kunnen de vereenvoudigde bodemprofielen met de bijbehorende bodemeigenschappen worden afgeleid. Bij het bepalen van de dynamische elasticiteitsmodulus  $E$  is uitgegaan van de relatie  $E = 20 \cdot q_c$ , waarbij  $q_c$  de conusweerstand betreft (één en ander op basis van CUR rapport 95-2 "Prognosemodel trillinghinder" d.d. februari 1995). Voorts is bij de bepaling van de bodemeigenschappen uitgegaan van het feit dat de grondwaterstand in de vierde bodemlaag (in tabel 2) begint, zodat dan voor de Poissonratio  $\nu$  een waarde van 0,49 aangehouden kan worden. In tabel 2 zijn de in de FEM-modellen gehanteerde bodemeigenschappen weergegeven, overeenkomstig de representatieve sonderingen en valgewicht proeven te Goes.

Tabel 2: Overzicht van de gehanteerde bodemeigenschappen voor (vereenvoudigd) bodemprofiel.

Bodemlaag	diepte t.o.v. maaiveld [m]	$\rho$ dichtheid [kg/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ Poissonratio [-]	$E$ Elastiteitsmodulus [MN/m <sup>2</sup> ]
1	0,0 - -1,0	1960	0,3	32
2	-1,0 - -2,0	1960	0,3	20
3	-2,0 - -3,0	1320	0,3	12
4	-3,0 - -4,0	1500	0,49	28
5	-4,0 - -6,0	1800	0,49	96
6	-6,0 - -9,0	1700	0,49	80
7	-9,0 - -12,0	1960	0,49	260
8	-12,0 - -18,0	1960	0,49	212
9	-18,0 - -30,0	1960	0,49	212

De bodemeigenschappen van elke bodemlaag worden uniform verondersteld in de richting langs het spoor over het beschouwde stuk van 60 m (lengte spoorbak).

De minimale elementgrootte per bodemlaag is vastgesteld aan de hand van de maatgevende voortplantingsnelheid door de eis te stellen dat elke optredende golf lengte met minimaal 6 punten wordt beschreven.

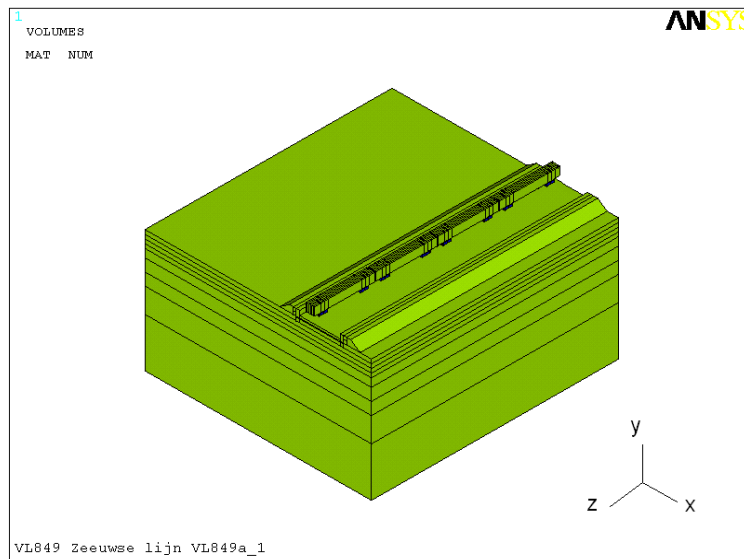
### 3.5. Randvoorwaarden

De randen van het model zijn gemodelleerd m.b.v. zogenaamde randelementen (veer-demper elementen). Door het toevoegen van deze veer-demper elementen aan de randen van het rekenmodel worden de trillingen aan de rand geheel geabsorbeerd; m.a.w. er wordt een halfoneindig medium gecreëerd in een eindig rekenmodel.

Ter illustratie is in figuur 6 een 3D aanzicht gegeven van het rekenmodel met daarin de definitie van de x-as, y-as en z-as.

De bovengenoemde absorberende randelementen zijn bevestigd aan de knooppunten van de volgende randen ofwel vlakken van het rekenmodel:

- yz-vlak bij laagste x-waarde,  $x_{\min}$ ;
- yz-vlak bij hoogste x-waarde,  $x_{\max}$ ;
- xz-vlak bij laagste y-waarde,  $y_{\min}$ .



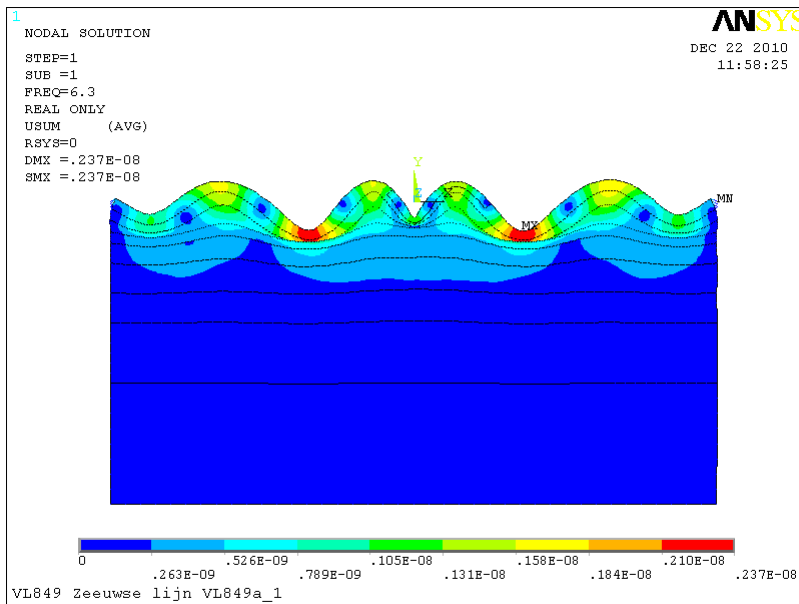
*Figuur 6: Definitie assen rekenmodel  
(x-as breedte spoor, y-as diepte bodem, z-as lengte spoor)*

De knooppunten van de overige twee randen ofwel vlakken van het rekenmodel waar ook een randvoorwaarde opgegeven dient te worden zijn:

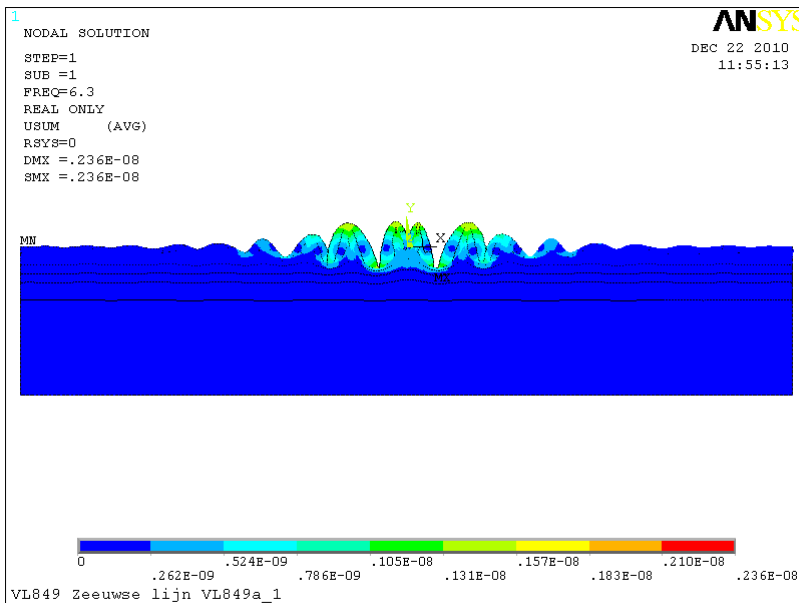
- xy-vlak bij laagste z-waarde,  $Z_{\min}$ ;
- xy-vlak bij hoogste z-waarde,  $Z_{\max}$ .

Bij deze randen van het model zijn de knooppunten numeriek aan elkaar gekoppeld zodat in feite uitgegaan wordt van een oneindig lang model in de z-richting (met een oneindig lange trein). Deze wijze van modelleren is gerechtvaardigd gezien het feit dat de beoordeling posities op relatief korte afstanden van het spoor liggen ten opzichte van de lengte van de passerende goederentreinen. De passerende goederentreinen kunnen als lijnbron worden gezien.

De werking van de randelementen op de vlakken  $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$  en  $y_{\min}$  is getoetst door de responsie te vergelijken van een tweetal rekenmodellen: een rekenmodel van 60 m · 30 m (x · y) en een extra groot rekenmodel van 260 m · 50 m (x · y), zie figuur 7. Beide modellen zijn met hetzelfde vlakke bronnspectrum aangestoten en doorgerekend. De responsie is vergeleken op een aantal afstanden van het spoor en het blijkt dat dezelfde responsie wordt gevonden in het rekenmodel van 60 m · 30 m als in het rekenmodel van 260 m · 50 m. Concluderend kan gesteld worden dat de randelementen in het rekenmodel van 60 m · 30 m de trillingen bij de rand goed absorberen en dus niet reflecteren. Er wordt immers dezelfde responsie gevonden als in het rekenmodel van 260 m · 50 m.



a) normale grootte (60 m · 30 m)

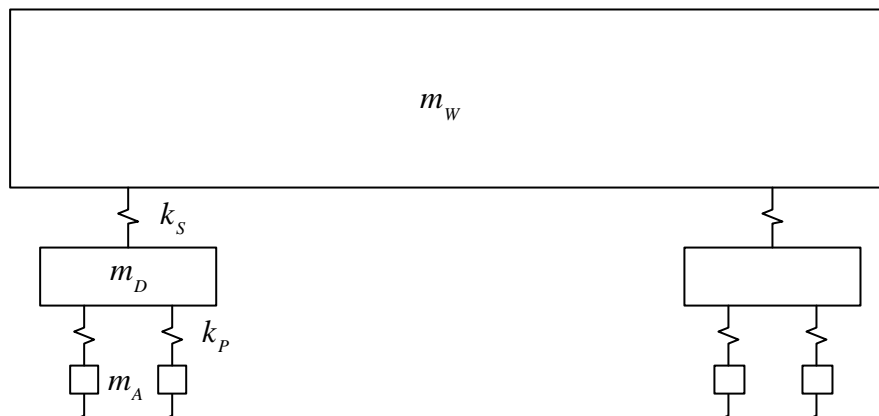


b) extra groot model (260 m · 50 m)  
 Figuur 7: Verificatie randvoorwaarden

### 3.6. Trein als meervoudig massa-veersysteem

Voor het meervoudig massa-veersysteem wordt uitgegaan van een treinwagon met massa  $m_w$ , twee draaistellen met massa  $m_d$  en vier assen met massa  $m_a$ , zoals geschetst

in figuur 8. Elke as is verbonden met een draaistel door een primaire suspensie  $k_P$  en elk draaistel is verbonden met het voertuiglichaam door een secundaire suspensie  $k_S$ . Het contact tussen het wiel en de rail is zéér stijf en wordt als een perfect contact verondersteld.



Figuur 8: Meervoudig massa-veersysteem

Op basis van de uitgangspunten van bijlage I van rapport VL 849-4-RA d.d. 4 juni 2007 en literatuurgegevens <sup>[1], [2]</sup> zijn karakteristieke waarden vastgesteld voor de massa's en veerconstanten van het meervoudig massa-veersysteem. De karakteristieke waarden zijn bijgesteld aan de hand van de karakteristieke waarden van TNO, zodat bij beide massa-veersystemen wordt uitgegaan van dezelfde invoer. Tabel 3 geeft de karakteristieke waarden met bijbehorende eenheid.

**Tabel 3:** Karakteristieke waarden voor de massa's en veren van het meervoudig massa-veersysteem

Grootheid	Symbol	Waarde	Eenheid
Massa wagon	$m_w$	65800	[kg]
Massa draaistel	$m_D$	1600	[kg]
Massa wielas (incl. wielen)	$m_A$	1500	[kg]
Primaire suspensie	$k_P$	$24 \cdot 10^5$	[N/m]
Secundaire suspensie	$k_S$	$24 \cdot 10^7$	[N/m]

Bij het meervoudig massa-veersysteem zijn verder de volgende aannames gemaakt:

- alleen verticale bewegingen worden meegenomen; er wordt vanuit gegaan dat andere vrijheidsgraden (horizontale bewegingen en rotaties) van ondergeschikt belang zijn;
- geen demping;
- massa's zijn oneindig stijf verondersteld.

### 3.7. Aanstoting

De aanstoting van de rekenmodellen vindt plaats aan de hand van een vlak krachtspectrum op het baanvak ter plaatse van de bielzen. De snelheid van de passerende goederentreinen is meegenomen in de modelvorming door een faseverschil op te geven in de aanstoting, welke afhankelijk is van de aanstootfrequentie, de afstand tussen de bielzen en de snelheid van de trein.

Het faseverschil tussen twee bielzen is te herleiden tot:

$$\Delta \phi = 2 \pi f \cdot s_{biels} \frac{3,6}{v}$$

waarbij  $f$  = de aanstootfrequentie [Hz],  $s_{biels}$  = de bielsafstand [m] en  $v$  = de snelheid van de passerende goederentrein [km/uur]. In het *rekenmodel huidige situatie* en het *rekenmodel situatie betonnen spoorbak* is uitgegaan van een bielsafstand van 0,6 m en een snelheid van 80 km/uur.

De aanstoting ter plaatse van een biels is over de breedte van de biels onderverdeeld in een vijftal puntkrachten en wordt in de rekenmodellen opgegeven aan de hand van de reële en imaginaire component van de kracht:

$$F_{real} = F_0 \cos(n \cdot \Delta \phi)$$
$$F_{imag} = F_0 \sin(n \cdot \Delta \phi)$$

waarbij  $F_0$  = de amplitude [N] en  $n$  = aantal bielzen t.o.v. van de rand.

Opgemerkt zij dat de afmetingen en doorgerekende frequentiestappen van het model zodanig zijn gekozen dat er geen discontinuïteit optreedt in de aanstoting bij de gekoppelde randen van het model; de aanstoting bij de randen is in fase.

### 3.8. Betonsterkte

In het FEM rekenmodel van de monolitische betonnen bak wordt een betonsterkte (Young modulus) van  $3E10 \text{ N/m}^2$  gehanteerd. Deze betonsterkte is in overleg met opdrachtgever en externe deskundigen (betontechnologen) vastgesteld.

### 3.9. Rekenprogramma

De rekenmodellen zijn opgesteld met behulp van het programma ANSYS. Bij de dynamische FEM-modellering in ANSYS is gebruik gemaakt van een drietal type elementen:



- SOLID185-elementen (3D structural solid elementen met 8 knooppunten) voor de opbouw van de diverse bodemlagen en voor de massa's van het meervoudig massa-veersysteem;
- COMBIN14-elementen (veer-demper elementen met 2 knooppunten) voor de randelementen en de veren van het meervoudig massa-veersysteem;
- BEAM4-elementen (3D elastische balken met 2 knooppunten) voor de assen van de draaistellen van de goederentrein.

Ten aanzien van de opgestelde FEM-modellen dient te worden opgemerkt dat het lineaire rekenmodellen betreft; verondersteld wordt derhalve dat de optredende verplaatsingen zodanig klein zijn dat het gedrag rond een belastingsituatie gelineariseerd kan worden. Hoewel de modellering een vereenvoudiging weergeeft van de werkelijkheid, kan de modellering een voldoende nauwkeurige prognose geven van de te verwachten trillingsniveaus.

Vanwege de grote modelafmetingen en relatief kleine elementgrootte is gekozen voor de iteratieve 'Incomplete Cholesky Conjugate Gradient' (ICCG) solver.

## 4. SPECTRAAL INVOEGVERLIES

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het FEM deel van onderzoek c.q. het spectrale invoegverlies van de monolitische betonnen bak gepresenteerd.

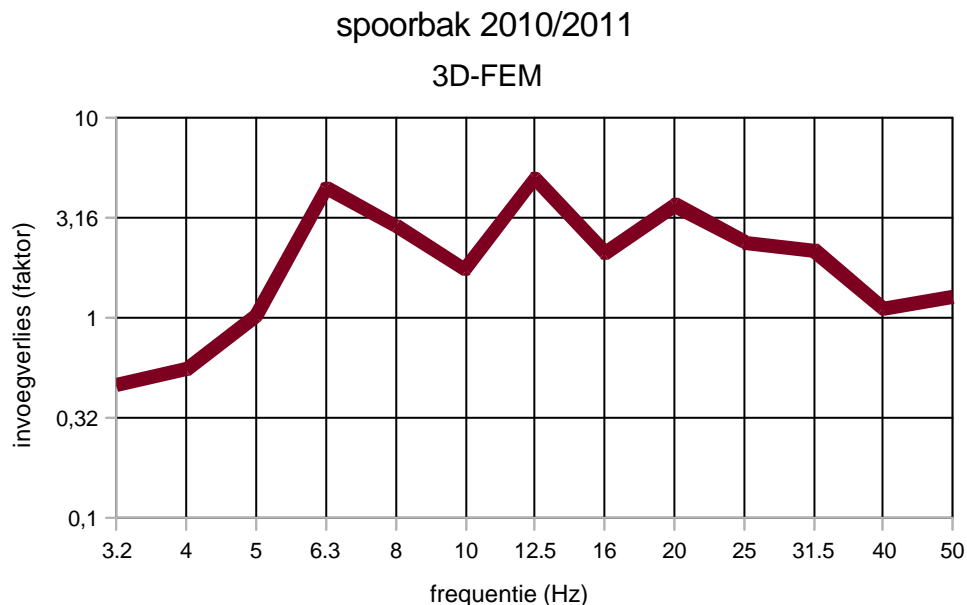
Aan de hand van de in hoofdstuk 3 beschreven rekenmodellen *rekenmodel huidige situatie* en *rekenmodel situatie betonnen spoorbak* is voor beide situaties de trillingoverdracht (responsie ten opzichte van excitatie) berekend voor afstanden van 15 tot 40 m van het spoor en in het frequentie gebied van 3,2 – 50 Hz.

Vervolgens is in dat frequentie gebied het invoegverlies als volgt bepaald:

$$\text{invoegverlies} = \frac{\text{responsie huidige situatie}}{\text{responsie situatie betonnen spoorbak}}$$

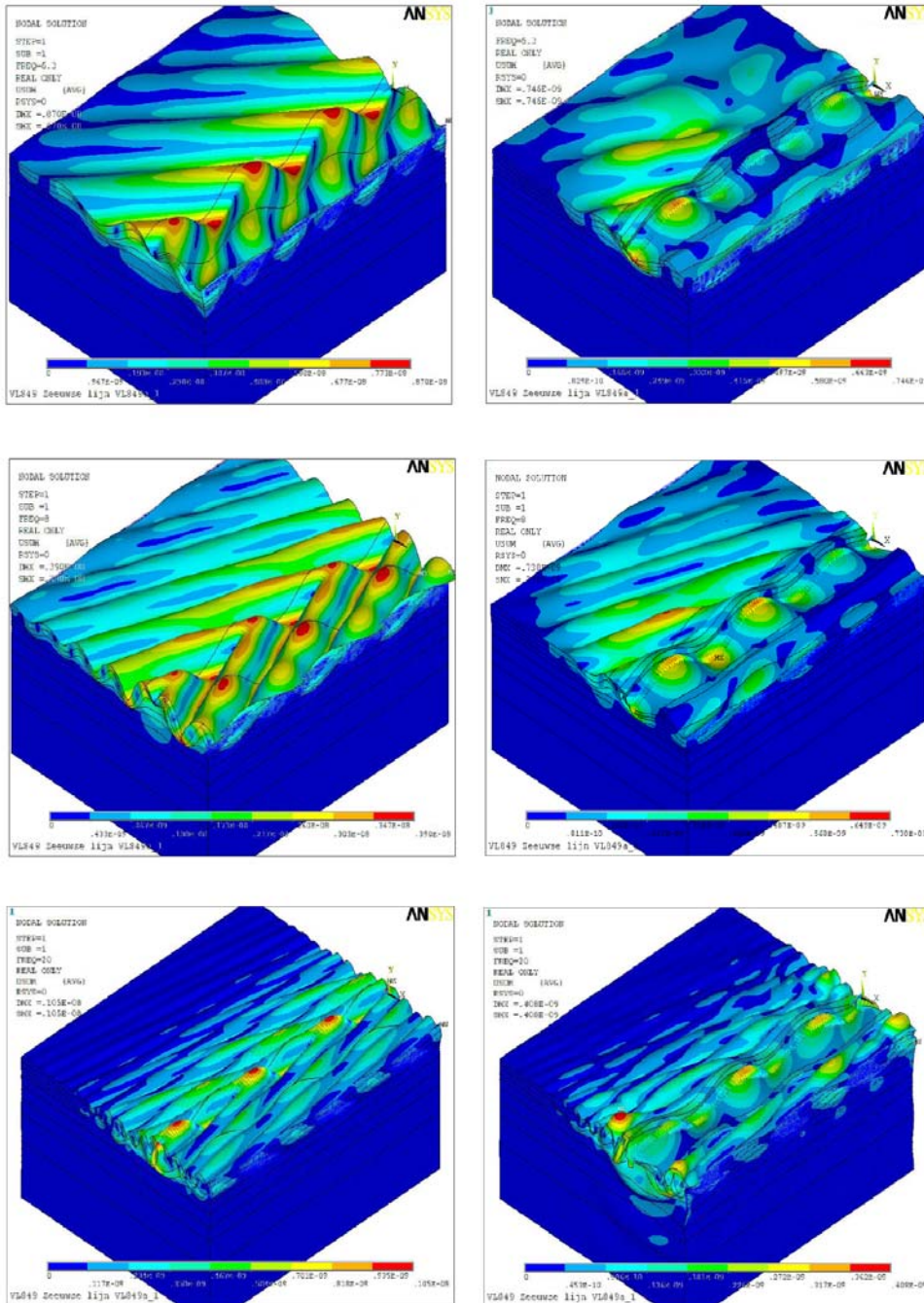
Opgemerkt zij dat een invoegverlies van 1 dus betekent dat dezelfde responsie wordt verwacht (de spoorbak levert geen reductie, noch verslechtering) en een invoegverlies van 2 dus betekent dat de te verwachten responsie door toepassing van de betonnen spoorbak de helft bedraagt van die in de huidige situatie.

Figuur 9 geeft het invoegverlies weer, gegeneraliseerd voor relevante afstanden tot het spoor (15 tot 40 m) in het frequentie gebied van 3,2 – 50 Hz.



Figuur 9: Invoegverlies betonnen bakconstructie

In figuur 10 zijn ter illustratie snapshots van de plaats afhankelijke responsie met en zonder bak voor enkele relevante frequenties grafisch weergegeven.



Figuur 10: Snapshots responsie aarden baan (links) vs. spoorbak (rechts) bij 6,3 Hz (boven), 8 Hz (midden) en 20 Hz (onder), de vervormingen zijn sterk opgeschaald ten opzichte van de werkelijkheid

## 5. INTEGRAAL INVOEGVERLIES

Voor de trillingen vanwege goederentrein passages in woningen in de uitgangssituatie met aarden baan worden de metingen type 3 in tabel 1 benut, met name de metingen in woningen van oktober 2010, in combinatie met de langdurige metingen van oktober/november 2010 voor de ratio goederentrein ten opzichte van personentrein, als meest complete metingen set. Die set metingen/uitwerkingen betreft een zevental woningen, zie rapport VL 849-9-RA d.d. 7 februari 2011. In onderstaande tabel zijn die woningen omschreven, met in de laatste kolom de (kwadratisch) gemiddelde trillingsnelheid. De weergegeven twee getalwaarden representeren de trillingsnelheid  $V_{max}$  per goederentrein passage conform SBR deel B in mm/s (RMS, fast, KB) per woningvloer (woonkamer/slaapkamer). De corresponderende spectra zijn weergegeven in rapport VL 849-10-RA, figuur 6, 8 en 10.

**Tabel 4:** Metingen/uitwerkingen van trillingen vanwege goederentreinen in woningen  
Uitgangspunt c.q. aarden baan situatie

adres	afstand	zijde	bouwjaar	fundering	bouwwijze	meting 2010
Willem Zelleweg 7	18 m	zuid	voor 1970	staal	niet robuust	0,5 / 0,6
Patijnweg 22	36 m	noord	voor 1970	staal	robuust	0,2 / 0,2
Patijnweg 40	50 m	noord	voor 1970	staal	robuust	0,2 / 0,2
Willem Zelleweg 59	30 m	zuid	na 1970	heipalen	robuust	0,3 / 0,3
Patijnweg 92	37 m	noord	voor 1970	staal	niet robuust	0,6 / -
Parallelweg 20	19 m	zuid	voor 1970	staal	niet robuust	0,3 / 0,4 (hal)
Parallelweg 24	19 m	zuid	na 1970	heipalen	robuust	0,3 / 0,3

Voor de prognose inclusief betonnen bak wordt op genoemde spectra het spectrale invoegverlies zoals bepaald met 3D-FEM van figuur 9 toegepast. Het integrale invoegverlies, als ratio van de uit de spectra samengestelde integrale responsie met en zonder bak, bedraagt dan:

**Tabel 5:** Integraal invoegverlies door spoorbak van goederentrein passage per woning

adres	woonkamer	slaapkamer
Willem Zelleweg 7	1,3	1,6
Patijnweg 22	1,8	2,0
Patijnweg 40	1,6	1,6
Willem Zelleweg 59	2,3	2,1
Patijnweg 92	2,0	
Parallelweg 20	2,0	2,2 (hal)
Parallelweg 24	1,7	1,8

Het gemiddelde integrale invoegverlies door de spoorbak over 13 woningvloeren is een factor 1,9 voor goederentreinen.

## 6. CONCLUSIES

In het kader van de beoogde en reeds gaande intensivering van goederentreinen over de Zeeuwse lijn te Goes is in opdracht van de provincie Zeeland en de gemeente Goes een onderzoek uitgevoerd naar de effectiviteit van de beoogde betonnen monolitische spoorbak (variant najaar 2010, op maaiveldniveau) met betrekking tot de reductie van trillingsniveaus in woningen aan de betreffende spoorbaan.

Teneinde de effectiviteit van de betonnen spoorbak afdoende nauwkeurig te bepalen zijn complexe 3D FEM-rekenmodellen ontwikkeld. Daarbij zijn meetresultaten van diverse typen metingen – welke ook zijn uitgevoerd in het kader van het trillingsonderzoek Zeeuwse lijn te Goes – gebruikt om het 3D FEM-rekenmodel te configureren en te ijken.

Uit de resultaten van de 3D FEM-berekeningen, aan een rekenmodel van de huidige situatie met aarden baan en aan een rekenmodel van de toekomstige situatie met betonnen spoorbak, blijkt dat de betonnen spoorbak resulteert in een spectraal invoegverlies zoals weergegeven in figuur 9.

Het omslagpunt van het spectrale invoegverlies ligt min of meer bij de 6,3 Hz terts (beneden 6,3 Hz geen invoegverlies maar juist iets versterking, vanaf 6,3 Hz een invoegverlies van ruim een factor 2). Dit omslagpunt ligt juist bij de belangrijkste excitatiefrequentie van 6,3 Hz, zie figuur 4. In principe maakt dit de analyse kritisch, en resteert de vraag waarom het omslagpunt daar ligt, en hoe die frequentie nog iets lager te krijgen.

Gezien de complexiteit van 3D FEM-rekenmodellen kan het door opdrachtgever uitgezette parallelle onderzoek eventueel bijdragen aan de zekerheid met betrekking tot dit geprognosticeerde spectrale invoegverlies.

Indien dit spectrale invoegverlies wordt toegepast op het spectrale trillingniveau van goederentreinen in een zevental woningen zoals gemeten najaar 2010 resulteert een gemiddeld (over 13 woningvloeren) integraal invoegverlies van een factor 1,9.

De beoogde reductie van een factor 3 is niet realiseerbaar met de configuratie van de betonnen bakconstructie zoals geschetst in paragraaf 2.2. Het invoegverlies van de betonnen spoorbak kan nog marginaal verhoogd worden door optimalisatie van de configuratie van spoorbak (optimalisatie lengtestijfheid).

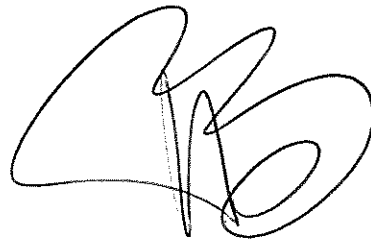
Het berekende integrale invoegverlies van circa een factor 2 ligt aan de onderkant van het indicatieve bereik van een factor 2 à 3 van 2005. Deels wordt dit veroorzaakt door de geupgrade rekentechnische benadering (3D vs. 2D FEM, integratie bodem en treinmodel) en anderzijds door de lagere lengtestijfheid van de spoorbak (maaiveldniveau vs. verdiepte ligging, nu met lagere verticale elementen). Overigens is het integrale invoegverlies slechts marginaal lager dan op basis van de 2D FEM analyse van 2008 inzake een spoorbak op maaiveldniveau (destijds genoemd perronconstructie).

Het berekende integrale invoegverlies van circa een factor 2 ten gevolge van de spoorbak dient afgewogen te worden tegen de kosten van een dergelijke voorziening. In het algemeen kan een reductie met een factor 2 slechts als een matige verbetering qua hinder worden gekwalificeerd. Anderzijds moet worden opgemerkt dat in het verleden

aangedragen alternatieven (zoals durflex, jet-grouting, sleuven) juist ook door de specifieke laag-frevente problematiek in Goes (6,3 Hz terts) in feite nog minder een oplossing bieden.

Dit rapport bestaat uit:  
22+1 pagina's

Mook,

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a vertical stroke, positioned to the right of the text 'Dit rapport bestaat uit: 22+1 pagina's'.

## Literatuurlijst

- 1: Stijn François, Trillingen ten gevolge van de Thalys hogesnelheidstrein op de lijn L2 Brussel-Keulen: in situ metingen en numerieke voorspellingen, Eindwerk, Katholieke Universiteit Leuven, 2003
- 2: Coenraad Esveld, MODERN RAILWAY TRACK, Delft University of Technology, 2001