

TNO
Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 88 86 630 00
F +31 88 86 630 21
infodesk@tno.nl

TNO-rapport

TNO-060-DTM-2011-02597

Spoor door Goes: studie naar de effectiviteit van een betonnen spoorbak op maaiveld als trillingsreducerende maatregel

Datum	20 december 2011
Auteur(s)	Arnold Koopman Flavio Galanti Henco Burggraaf
Aantal pagina's	26
Aantal bijlagen	-
Opdrachtgever	Dhr. A.J. Potter Gemeente Goes Afdeling Operebare Ruimte Postbus 2118 4460 MC Goes
Projectnaam	Spoorbak Goes
Projectnummer	034.24288/01.01

Alle rechten voorbehouden.

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

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

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

© 2011 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Aanleiding	3
1.2	Doel	3
1.3	Onderzoeksmethodiek.....	3
2	Valproef	4
2.1	Inleiding	4
2.2	Meetopzet	6
2.3	Afstandsdemping	7
2.4	Samenvatting.....	10
3	Analyse trillingen in de omgeving met en zonder spoorbak	11
3.1	Methodologie	11
3.2	Overdrachtmodel (FEM)	12
3.2.1	Huidige situatie: spoor op ballast.....	13
3.2.2	Toekomstige situatie: spoor op bak.....	13
3.2.3	Belasting	13
3.2.4	Materiaal eigenschappen	14
3.2.5	Analyse	15
3.2.6	Resultaten analyse met pulsbelasting.....	15
3.2.7	Tuning model	16
3.3	Bronmodel (TRINT)	17
3.4	Predictie trillingsniveaus bij treinpassages	19
3.5	Beoordeling effectiviteit van de spoorbak.....	21
4	Conclusies.....	24
5	Referenties	25
6	Ondertekening.....	26

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Tracébesluit Sloelijn leidt naar verwachting tot een aanmerkelijke toename van het goederenvervoer over de Zeeuwse lijn. In de situatie waarin de goederentreinen 80 km/uur rijden is er in de Gemeente Goes reeds sprake van klachten over trillingen vanwege het spoor, langs het traject ten oosten van het station. De vraag is wat de ernst van de situatie is, in welke mate er toename van trillingshinder te verwachten is en wat voor maatregelen daartegen te treffen zijn. Sedert enige jaren is er een maatregel in the picture: het toepassen van een betonnen bak als onderbouw van de spoorconstructie.

Naar het effect van de betonnen bak als maatregel tegen trillingen heeft de firma Peutz in de afgelopen jaren enkele onderzoeken verricht. Volgens hun eerste prognoses zou de verdiepte versie van de bak voor een aanmerkelijke trillingsreductie zorgen (factor 2,8). Een eerder onderzoek van Peutz van een bak op maaiveld leidde tot een bescheidener trillingsreductie (factor 2).

Onderzoek van Peutz van dit jaar eveneens van een bak op maaiveld, waarbij belangrijke invoergegevens zijn afgestemd met of geleverd door TNO, leidde tot een soortgelijk niveau (gemiddeld factor 2). Aan TNO is gevraagd om ook een analyse te maken van het effect van de betonnen bak, bij wijze van second opinion. Tot slot: het onderhavige rapport maakt deel uit van een groter onderzoek naar de problematiek van het spoor in Goes. Daarin wordt de trillingshinder in de huidige en toekomstige situaties beoordeeld en verder een snelheidsbeperking voor het goederenvervoer als alternatieve trillingsreducerende maatregel.

1.2 Doel

In dit rapport wordt verslag gedaan van het onderzoek naar de effectiviteit van de betonnen bak (verder als spoorbak aangeduid) als maatregel tegen trillinghinder.

1.3 Onderzoeksmethodiek

Het beoordelen van de effectiviteit van de spoorbak als maatregel tegen trillingen, kan in een nog niet bestaande situatie alleen door middel van modellen worden verricht. De beoordeling geschiedt door een vergelijking te maken tussen twee modellen: een model van het spoor en omgeving zonder spoorbak en een model met spoorbak. Ten behoeve van het totale onderzoek, is tevens een zogeheten valproef gedaan, zie hoofdstuk 2. Een dergelijke proef maakt het mogelijk de voortplanting van trillingen op het maaiveld in kaart te brengen, en kan worden gebruikt ter ondersteuning bij het maken van modellen.

2 Valproef

2.1 Inleiding

De valproef behelst het op straat laten vallen van een valgewicht van 1200 kg en het meten van het resulterende trillingsniveau op 20, 40, 60, 80 en 100 meter afstand, zie Figuur 1, Figuur 2 en Figuur 3. Dit gebeurt op 20 meter van het spoor, eenmaal in het noordoosten (Patijnweg) en eenmaal in het zuidwesten (Willem Zelleweg) van de spoorbak zone. Voor zover mogelijk wordt dit uitgevoerd in de nabijheid van een woningmeting en/of de langdurige meting. Het valgewicht wordt opgevangen door een vangconstructie een keer in de vorm van een houten blok en een keer in de vorm van een blok betonplex. Hiermee wordt de frequentie inhoud van de puls uit de vallende gewicht op de ondergrond beïnvloed. De proef wordt enkele malen herhaald per locatie.

Per locatie worden de trillingen op het maaiveld gemeten langs twee meetraaien. Een meetraai wordt op bestrating geplaatst en de andere rechtstreeks op grond gelegd (langs plantsoen).



Figuur 1: Het valgewicht wordt gehesen met behulp van een kraan (Willem Zelleweg).



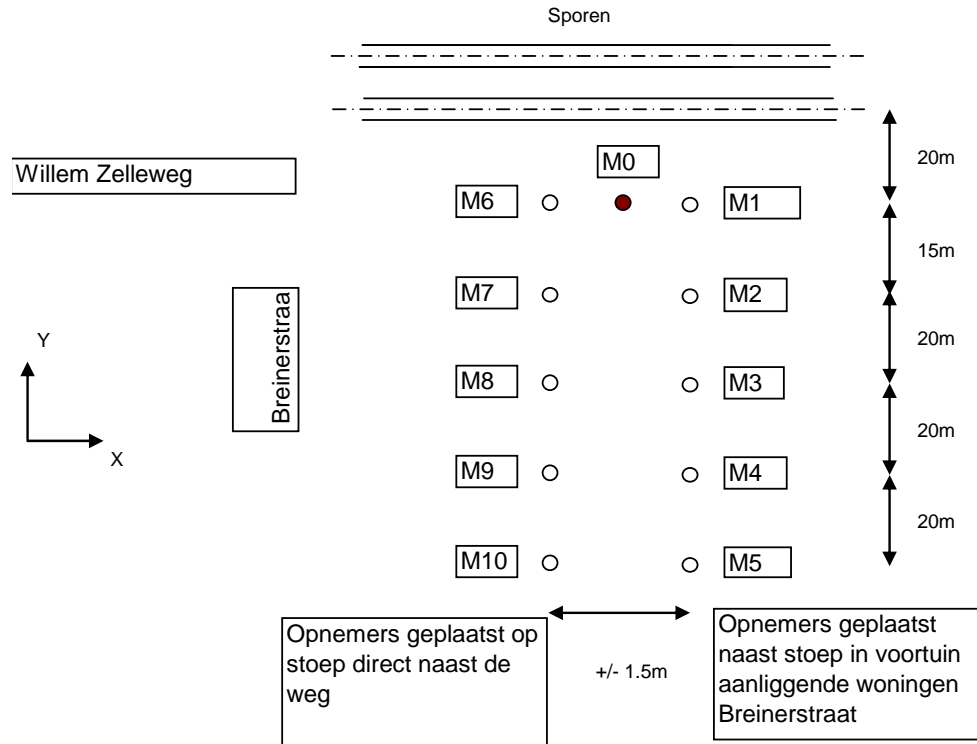
Figuur 2: Bekabeling langs het meetraai (valproef bij Willem Zelleweg).



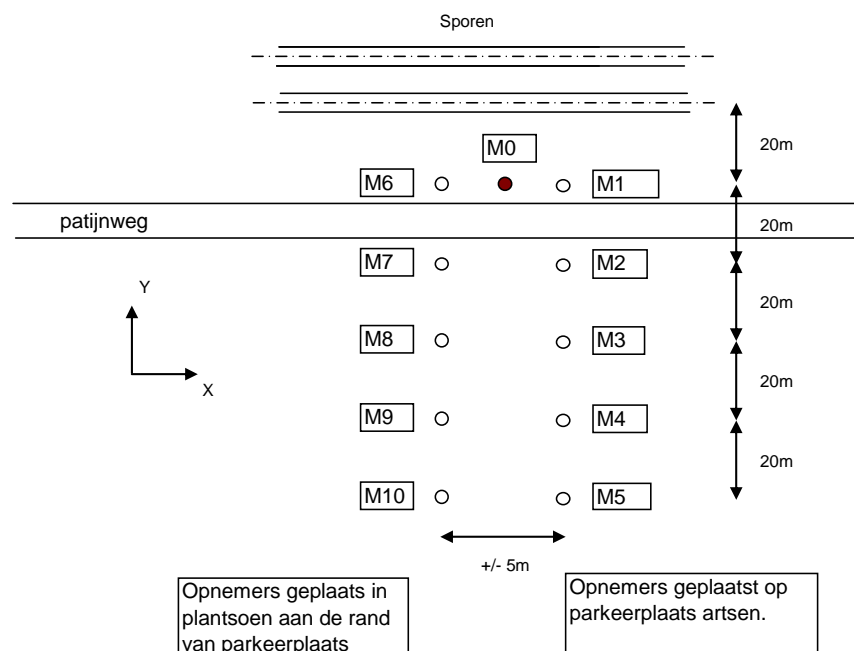
Figuur 3: Opnemers op meetpunten M1 en M6 (valproef bij Willem Zelleweg).

2.2 Meetopzet

Overzichten van de gehanteerde meetopzetten op de twee locaties zijn in Figuur 4 en Figuur 5 zijn gegeven.



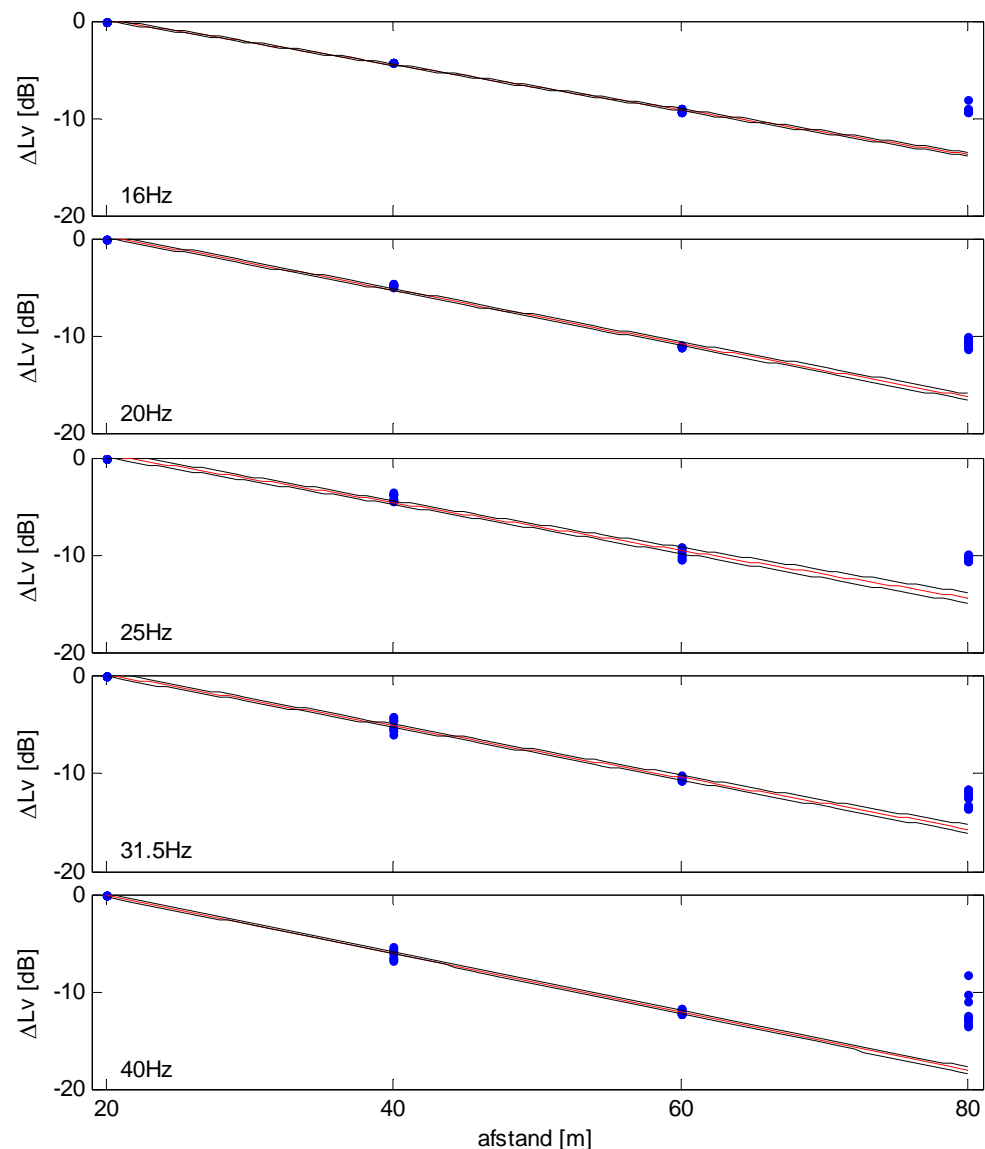
Figuur 4: Posities van de meetpunten bij de valproef aan de Willem Zelleweg.



Figuur 5: Posities van de meetpunten bij de valproef aan de Patijnweg.

2.3 Afstandsdemping

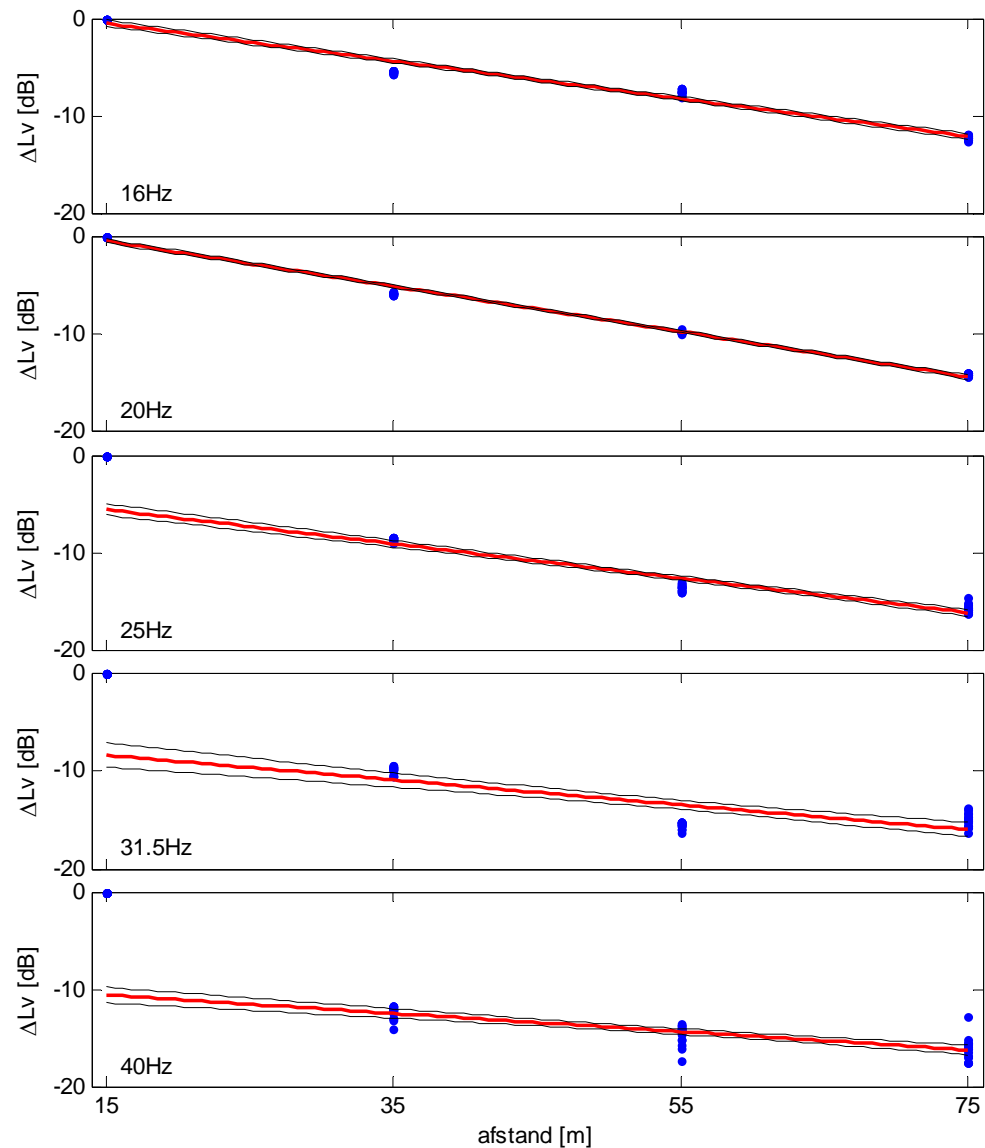
Per valproef wordt gekeken naar de afname van energie in de signalen. De afname wordt bepaald per tertsbands, tussen 16 en 40 Hz. De meetmethode (gekozen valgewicht, opvangplaat, locaties van opnemers, etc.) is afgestemd op dit frequentiegebied. Bepaling bij lagere frequenties is gewenst maar vraagt een zwaardere meetopstelling. Aangezien de gezochte parameter (de materiaalkundige demping) niet sterk van de frequentieafhankelijk is kan worden volstaan met metingen in wat hogere frequentiebanden.



Figuur 6: Afstandsdemping voor de valproeven aan de Patijnweg. De getrokken lijnen betreffen een lineaire regressie, met onzekerheidsband.

De afname is voor de twee locaties in Figuur 6 en Figuur 7 weergegeven. De gemiddelde afstandsdemping per meter afstand per tertsbands wordt in Tabel 1 gegeven.

Aan de Patijnweg is er tussen 60 en 80 meter geen sprake meer van een afname. Het is niet zo dat daar een ruisniveau is bereikt: de signaal-ruisverhouding is voldoende. Er moet dus sprake zijn van een verstoring van de ideale vrije veld omstandigheden. Verstoringen vinden vaak hun oorzaak in lokale variaties in bijv. bestrating of ondergrond. In dit geval is (achteraf) de oorzaak lastig te duiden. Het geeft wel aan dat ook de meetresultaten van de dichterbij gelegen punten met enige reserve dienen te worden beschouwd.



Figuur 7: Afstandsdemping voor de valproeven aan de Willem Zelleweg. De getrokken lijnen betreffen een lineaire regressie, met onzekerheidsband.

De afstandsdemping wordt door twee effecten beïnvloed: de geometrische uitbreiding (energie van een puls wordt bij voortplanting weg van de bron over een steeds groter oppervlak uitgesmeerd) en door demping door het bodemmateriaal. Dichtbij de bron is het geometrisch effect het sterkst: beginnend met 6 dB verzwakking per afstandsverdubbeling (wanneer trillingen zich als een halve bol in de bodem uitspreiden) en dan 3 dB per verdubbeling (zodra op maaiveld alleen de

oppervlaktegolven overblijven). Op grotere afstand is de materiaaldemping het belangrijkste, rond de 2 dB per 10 meter of minder

De sterkte van de effecten, en daarmee de afstandsafhankelijke afstandsverzwakking, zijn afhankelijk van de golflengte in de bodem, en dus van de frequentie.

In Figuur 6 is te zien dat op de Patijnweg tussen 20 en 40 meter de geometrische demping dominant is met een verzwakking van ongeveer 3 dB per afstandsverdubbeling. Dit geldt voor alle onderzochte terstbanden. Vanaf ongeveer 20 meter is er op maaiveld zichtbaar alleen nog sprake van een oppervlaktegolf. Vanaf 60 meter gaat de materiaaldemping domineren. Bij lage frequenties, dus lange golflengtes, kan de materiaaldemping (een percentage energieverlies per afgelegde golflengteafstand) nog nauwelijks zijn werk doen en is de afstandsdemping bijna 0. Hoger frequent is wel enige verzwakking te bespeuren.

De Willem Zelleweg toont grosso modo vergelijkbare resultaten. Tussen 15 en 35 meter is echter sprake van een zeer grote verzwakking. Dit zou kunnen worden verklaard als hier geheel of gedeeltelijk nog sprake is van veel verlies van trillingsenergie “de diepte in”, met andere woorden dat oppervlaktegolven nog niet dominant zijn. Vanaf 35 meter blijven uiteindelijk wel ook alleen de oppervlaktegolven over. Het (diepere) bodembeslag, dat invloed heeft op de geometrische uitbreiding, verschilt echter weinig tussen de twee locaties. Een versturende invloed die een rol kan spelen in het verschil tussen Patijnweg en Willem Zelleweg is die van de toplaag en het plaveisel. Zolang die op alle meetpunten hetzelfde karakter hebben verstoren ze een vergelijkende meting niet zo, maar zodra dat karakter van toplaag en plaveisel varieert per meetpunt kan dit de resultaten sterk verstoren. Bij keuze van meetraailocatie wordt hier rekening mee gehouden maar geheel te beheersen is dit fenomeen niet. Ook achteraf is niet eenduidig vast te stellen of dit op een of beide locaties specifiek speelde. Een sluitende verklaring is derhalve nog niet voorhanden.

Onderstaande tabel geeft de afstandsdemping volgens de lineaire regressie in de twee figuren. De fysische betekenis van deze regressie is beperkt aangezien er meer dan één afstandseffect actief is. Het geeft in ieder geval een bovengrens van de materiaaldemping, vooral daar waar de regressie wordt gedomineerd door de resultaten op grote afstand, zoals bij de Willem Zelleweg. Bij een voortplantingssnelheid van 60 m/s voor schuif- en oppervlaktegolven (conform Fugro / Royal Haskoning) kan uit de resultaten van de Willem Zelleweg een demping van ongeveer -0,6 dB/golflengte worden afgeleid. Dat is gelijk aan een dempingswaarde van 15%, wat een hoge waarde is, zelfs voor zachte grondsoorten.

Tabel 1: Vastgelegde afstandsdemping per locatie en tertsbands.

Tertsband [Hz]	$20 \cdot \log_{10}(V_{x+1m} / V_x)$	
	Patijnweg [dB]	Willem Zelleweg [dB]
16	-0.2313	-0.1941
20	-0.2761	-0.2335
25	-0.2459	-0.1768
31.5	-0.2631	-0.1268
40	-0.3015	-0.0938

2.4 Samenvatting

Aangezien de trillingshinder vooral frequenties bij 8 en 16 Hz betreft is het resultaat van de 16 Hz octaafband het meest interessant.

Als op 20 meter afstand 1 mm/s zou worden gemeten is de waarde op 40 meter 0,5 mm/s, op 60 meter 0,25 en op 80 meter 0,12. In feite geldt dat vanaf 20 meter de trillingsamplitude halveert.

3 Analyse trillingen in de omgeving met en zonder spoorbak

3.1 Methodologie

De beoordeling van de effectiviteit van de spoorbak wordt gedaan door de voortplanting van trillingen in de omgeving in twee situaties, een zonder spoorbak en een met spoorbak, te vergelijken. Hiervoor wordt gebruikt gemaakt van een drie dimensionaal eindige elementen model (FEM) van het spoor en ondergrond. De ondergrond is hier gemodelleerd met solide elementen (lineair, 8 knoops). Het model is voorzien van een aantal lagen, welk de gelaagdheid van de ondergrond vertegenwoordigen, en een rechthoekige sleuf. De sleuf is in het geval met bak bekleed met vlakke schaal elementen (lineair, 4 knoops), welk de betonnen wanden en betonnen vloer van de spoorbak vertegenwoordigen. In het geval zonder bak, heeft de aanwezigheid van een sleuf in het model, praktisch gezien, geen consequenties voor de manier van voortplanten van trillingen in de omgeving, en is daarmee voldoende om de huidige situatie met een gewone ballast te vertegenwoordigen.

De eindige elementen analyse behelst een dynamisch, lineair analyse waarbij een puntlast precies in het midden van het spoor wordt aangebracht. De puntlast is aangebracht als een korte puls. Daarmee kan de simulatie worden gezien als een soort valproef.

In de simulatie wordt de responsie op het maaiveld op verschillende afstanden van het spoor als output weggeschreven. Vervolgens kan hiermee de overdracht worden bepaald tussen aanstootpunt en afstand. Een verificatie van het model geschied door deze overdracht te vergelijken met die uit de valproeven beschreven in het voorgaande hoofdstuk. Van belang daarin is dat de afstandsdemping in de simulatie en in de werkelijkheid redelijk overeenkomen. Indien nodig worden hiervoor een aantal modelparameters aangepast.

Een vergelijking tussen de twee situaties alleen op grond van de overdracht is niet voldoende. De trillingen in de omgeving zijn afhankelijk van de bron, ofwel de treinen en de spoorconstructie. De trein is een lijnbron, niet een puntbron, hetgeen de overdracht, en ingrepen in de overdracht zoals de betonnen bak, beïnvloedt. Bovendien betreft de betonnen bak een ingreep in de *bron*, zijnde het dynamische systeem van trein, baan en bodem. De betonnen bak is *geen* overdrachtsmaatregel (zoals bijv. een geluidscherm dat wel is voor geluid). Voor de beoordeling van de bak moet dus juist dat systeem worden gemodelleerd. Een ingreep in de baan zal het gedrag van de trein en van de bodem beïnvloeden, en daarmee weer het effect van de ingreep zelf. Dit heet "koppeling".

Daarom is het nodig om de resultaten van de eindige elementen analyses te vertalen naar een responsie door een treinpassage. Hiervoor zal het programma TRINT worden toegepast.

TRINT is een twee dimensionaal "Multi-body" model waarin trein, baan en bodem worden gerepresenteerd door massa's, veren, dempers en liggers. Net als bij de FEM berekening wordt dit model geëxciteerd en wordt uitgerekend hoe alle

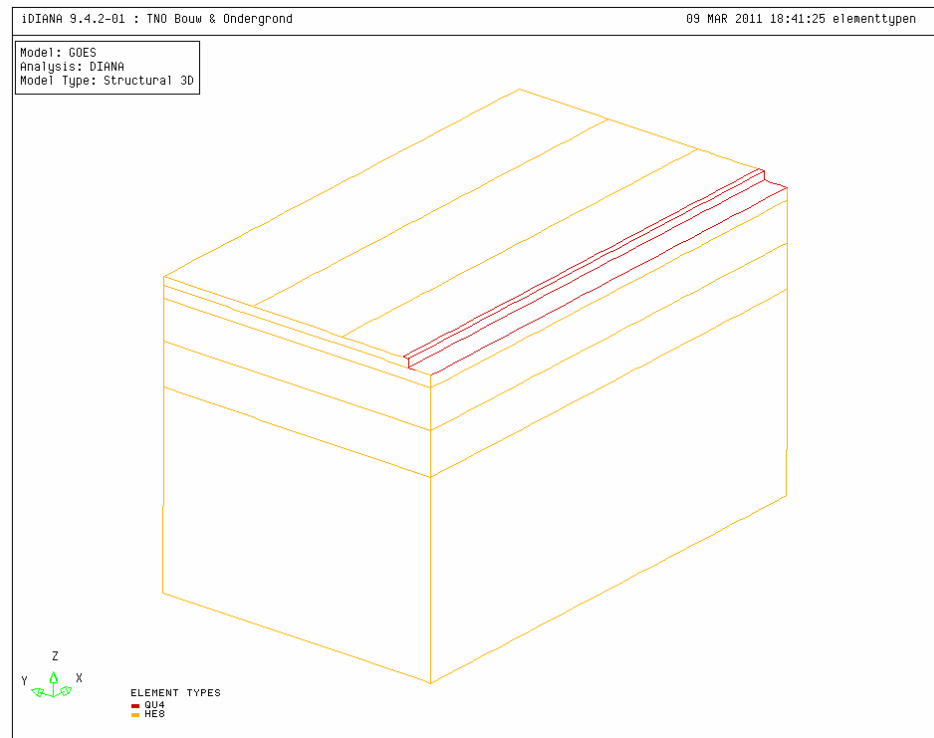
onderdelen in de loop der tijd uittrillen. In tegenstelling tot een FEM som vindt de excitatie niet plaats met een korte krachtpuls maar met het laten rijden van de trein over de spoorbaan. Omdat aan de spoorbaan een zekere mate van oneffenheid wordt toegekend, zoals dat in werkelijkheid ook zo is, en omdat het passeren van (zware) assen an sich al een excitatie vormt, leidt de rijdende trein tot een trillend systeem.

De overdrachten uit de FEM-som (van kracht in de baan naar trillingsniveau in de omgeving) worden geconvolveerd met de door TRINT berekende krachten in de spoorbaan. Het resultaat is een tijdsignaal van de trillingen in de omgeving vanwege een passerende trein op een zekere afstand.

Ten einde FEM en TRINT goed op elkaar te laten aansluiten, vooral met het oog op de dynamische koppeling tussen baan en bodem, is er overlap tussen de modellen. In FEM wordt niet alleen de bodem maar ook de onderbouw van de baan gemodelleerd (zoals de betonnen bak, en anders een zandlaag). In TRINT wordt, naast rijdende trein en bovenbouw, ook de onderbouw en de bodem gemodelleerd, zij het als een eenvoudige afgeveerde ligger. Aangezien in FEM onderbouw en bodem veel nauwkeuriger wordt beschreven dan in TRINT wordt de parametrisering in TRINT bepaald op grond van de FEM resultaten. Daartoe wordt de pulsexcitatie in FEM ook beoordeeld op de responsie op het aanstootpunt zelf en wordt de zo bepaalde puntimpedantie gebruikt om de onderbouw als ligger en de bodem als veer met demper te tunen.

3.2 Overdrachtmodel (FEM)

Het model van het spoor en ondergrond heeft een afmeting van 60 x 100 x 60 m (breedte x diepte x hoogte). Er wordt gebruik gemaakt van twee symmetrie vlakken, dat wil zeggen alleen een kwart van het spoor en ondergrond, met aan een hoek de puntlast, zie Figuur 8. Op de twee symmetrie vlakken zijn verplaatsingen uit het vlak niet mogelijk. Op alle andere vlakken, behalve het bovenste (het maaiveld), is gebruik gemaakt van niet reflecterende randvoorwaarden (silent boundaries). Op deze vlakken, wordt een binnenkomende compressie golf niet gereflecteerd. In totaal heeft het model ongeveer 50000 elementen.



Figuur 8: Model van het spoor en ondergrond. De onderdelen van de betonnen bak (vloer, wand en uitkraging) zijn als zogenaamde schaalementen gemodelleerd en hebben in de visualisatie geen dikte.

3.2.1 *Huidige situatie: spoor op ballast*

Het model van de huidige situatie bestaat alleen uit grondlagen.

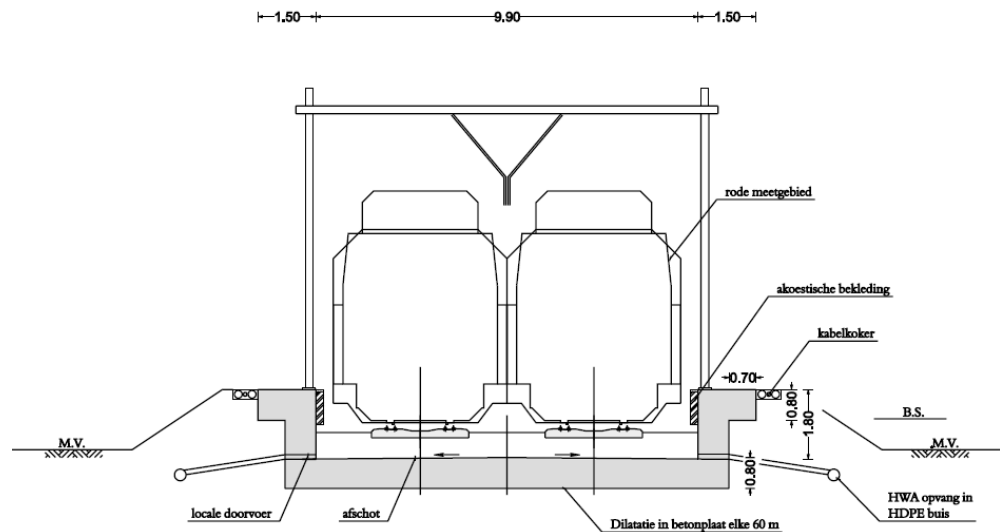
3.2.2 *Toekomstige situatie: spoor op bak*

Het model van de toekomstige situatie bestaat uit het model van de huidige situatie met daarin de spoorbak constructie gemodelleerd met behulp van schaalementen. De dikte van de schaal elementen is uit een voorlopige ontwerp van de spoorbak constructie [2] afgeleid, zie Figuur 9. Hierin hebben de wanden en de bodemplaat van de spoorbak een dikte van 0,8 m.

Bij de modellering is met name de orientatie van de vloer en de wand ten opzichte van de bodemlagen en onderbouw (verdicht zand) zo realistisch mogelijk gerepresenteerd. Het beoogde kleine talud tegen de wand en de overkraging aan is niet als driehoekig detail meegemodelleerd. Het effect van de aanwezigheid van dat talud, namelijk een koppeling van wand en overkraging met de bovenste grondlaag, komt in het model tot zijn recht door de koppeling tussen de schaalementen en de omringende volume-elementen van de bodem.

3.2.3 *Belasting*

De pulsbelasting is gedefinieerd als een halve sinus met een duur van 5 milliseconde en een amplitude van 10000 N.



Figuur 9: Doorsnede toekomstige spoor.

3.2.4 Materiaal eigenschappen

De bodem opbouw (gelaagdheid en type grond) is afgeleid uit sonderingen [1]. Hieruit zijn voor het dynamisch gedrag belangrijke eigenschappen afgeleid. De parameters en hun waarden van de materialen in het model zijn in Tabel 2 weergegeven.

Tabel 2: Materiaal eigenschappen.

Laag nr.	Type grond	Conus		dynamische		Poisson		
		Hoogte	waarde	Dikte	E-modulus	Dichtheid	verhouding	
		boven	onder	q_c	h	E_{dyn}	ρ	ν
		[+ N.A.P.]	[-]	[MPa]	[m]	[MN/m ²]	[kg/m ³]	[-]
1	Klei droog	0.5	-0.3	1	0.8	18	1640	0.2
2	Klei nat	-0.3	-2.75	1	2.45	18	1640	0.49
3	Zand nat	-2.75	-11	2	8.25	36	1960	0.49
4	Zand nat	-11	-	8	-	144	1960	0.49
Beton						20000	2500	0.2

De waardes wijken af van die Peutz gebruikt [3], welke zijn gebaseerd op dezelfde bron. De verschillen betreffen voornamelijk:

- Het aantal onderscheiden lagen: Peutz onderscheidt er negen. TNO komt tot slechts vier lagen om schijnnaauwkeurigheid te voorkomen en meer recht te doen aan het globale beeld van het geotechnisch lengteprofiel. Overigens is uit eerder onderzoek wel gebleken dat een fijnere detaillering van de bodemlagen de uitkomsten nauwkeuriger maakt maar dat zou in dit geval alleen verzilverd worden als per sonderingslocatie een model wordt gemaakt.
- De relatie tussen conuswaarde en E-modulus: Peutz hanteert een factor 20 waar TNO een factor 16 hanteert. Vooral in de jaren '90 was de factor 20 'in zwang', op grond van een onderzoek van Deltares (toen: GeoDelft).

Begin jaren 2000 is in het kader van een DelftCluster onderzoek de omrekenfactor wat bijgesteld en afhankelijk gemaakt van het type bodemmateriaal. De gemiddelde waarde wijzigde van 20 naar 16. De omrekenfactor blijft echter een grote bandbreedte hebben. Fugro adviseert in het sondersrapport een factor 10.

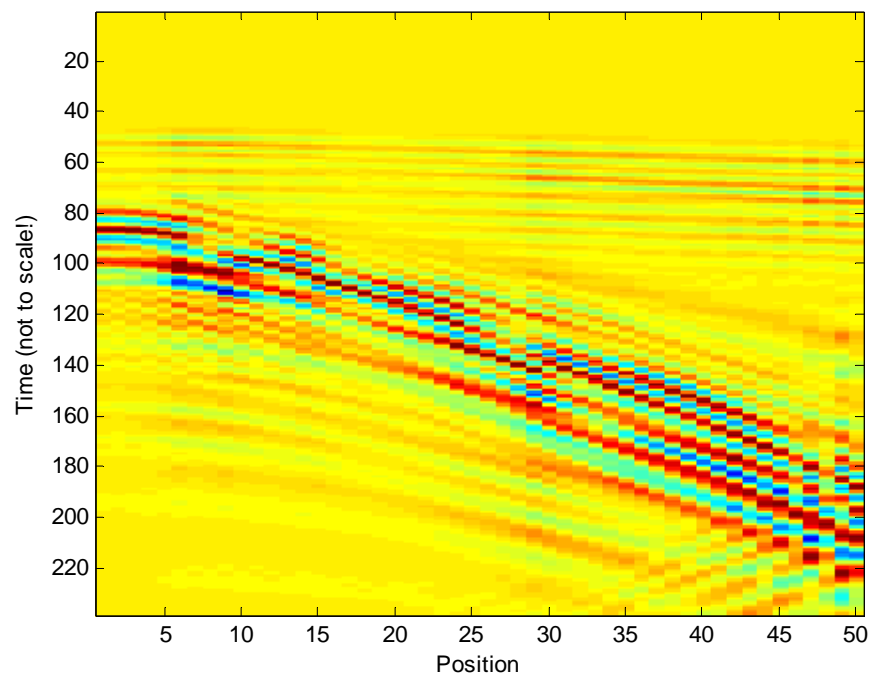
- Poisson's ratio. TNO gaat uit van door vocht verzadigde grond tot vlak onder maaiveld terwijl Peutz van 3 meter droge grond uitgaat.

3.2.5 *Analyse*

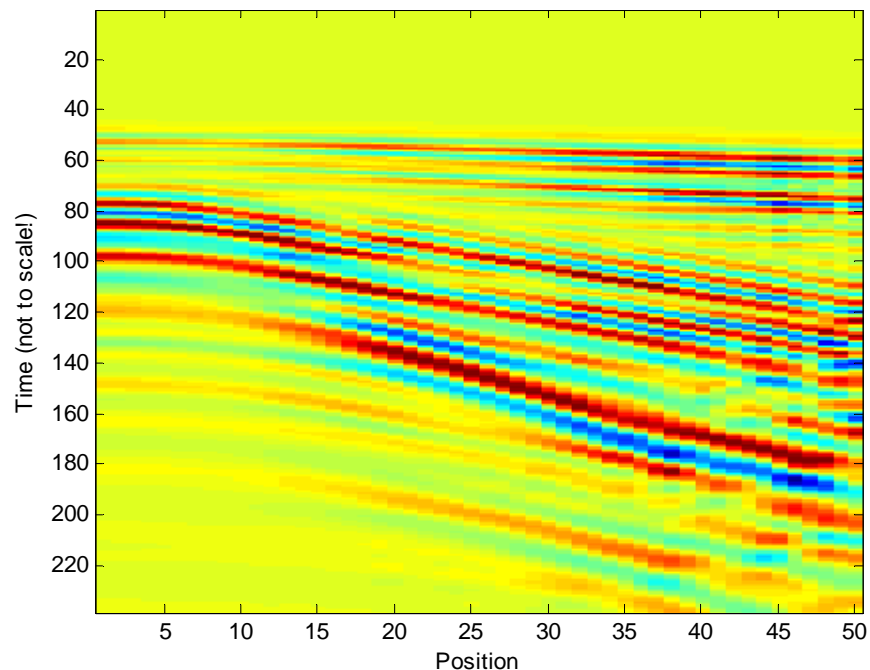
Voor de tijdsanalyse is de standaard Newmark integratie methode toegepast. De totale simulatietijd is 2 s. De responsie, in termen van de verticale snelheid van het maaiveld op 3 lijnen parallel aan het spoor op 0, 20 en 40 m afstand is als output gegenereerd.

3.2.6 *Resultaten analyse met pulsbelasting*

In Figuur 10 en Figuur 11 wordt de responsie van het maaiveld langs een lijn op 40 m afstand van het spoor weergegeven. Uit deze figuren is de voortplanting van een principiële golf duidelijk te zien. In het geval van met spoorbak lijkt deze golf zich met een grotere snelheid voort te planten.



Figuur 10: Model zonder bak: responsie van het maaiveld op 40 m afstand.



Figuur 11: Model met bak: responsie van het maaiveld op 40 m afstand.

3.2.7 *Tuning model*

Om het model te tunen wordt een goed gedefinieerde trillingsproef zowel in situ als in het model uitgevoerd, waarna de resultaten met elkaar worden vergeleken. Indien nodig worden er aanpassingen gedaan het model.

De betreffende trillingsproef is de valgewichtmeting. Deze is in situ uitgevoerd, op twee locaties, en is ook in het model uitgevoerd. In het model betreft het niet anders dan de pulsrespons meting, zoals reeds in de vorige paragrafen is toegelicht.

De resultaten van de insitu meting was dat indien op 20 meter van het valgewicht een trillingsamplitude van 1 mm/s wordt gemeten in de 16 Hz octaafband, op 40 meter 0,5 mm/s, op 60 meter 0,25 mm/s en op 80 meter 0,1 mm/s wordt gemeten.

De resultaten in het model zijn daarmee vergeleken als volgt:

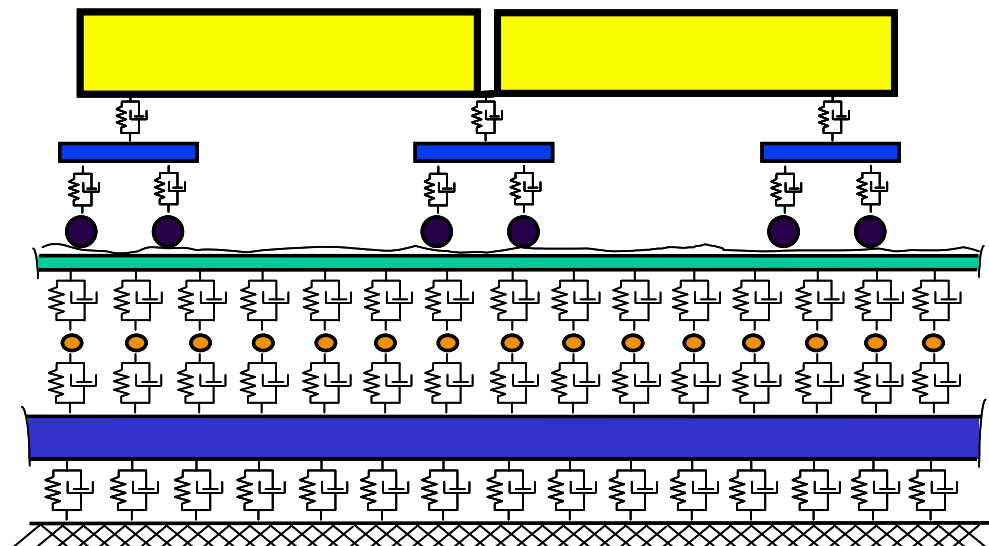
Afstand [m]	meting	model
20	100%	100%
40	50% (16 Hz)	43% (8Hz) 39% (16 Hz)
60	25% (16 Hz)	-
80	12% (16 Hz)	-

De afstandsverzwakking is in het model sterker dan in de meting. De belangrijkste modelparameter hierin is de materiaaldemping. Die was gesteld op 5%, wat al veel lager is dan de op grond van de meting vastgestelde bovengrens van 15%. Het is dus niet opportuun om de demping nog verder omlaag te brengen.

De belangrijkste afstanden zijn 20 en 40 meter. Het model zal, naarmate de afstand tot het spoor groter is, de trillingsniveaus dus gaan onderschatten. Het verschil is

echter niet dermate groot (orde van grootte of meer) dat aan het fysische realisme van het model moet worden getwijfeld. Aangezien het doel niet absolute voorspellingen betreft (maar relatieve effecten, vanwege inpassing van een maatregel), is er geen noodzaak om het model verder fine te tunen.

3.3 Bronmodel (TRINT)



Figuur 12: TRINT model.

De bronbeschrijving in TRINT bestaat uit een aantal onderdelen, zie Figuur 12:

- De rijdende trein
- De baan en bodem
- Spooroneffenheid en treinsnelheid

Als rijdende trein zijn de volgende twee treinen gemodelleerd:

- Goederentrein, bestaande uit een elektrische loc van het type E1700 die vier containerwagens met de maximale aslast trekt.
- IRM, het dubbeldeks interregio materieel, als “zesje” (zes rijtuigen).

De IRM is slechts ter referentie meegenomen.

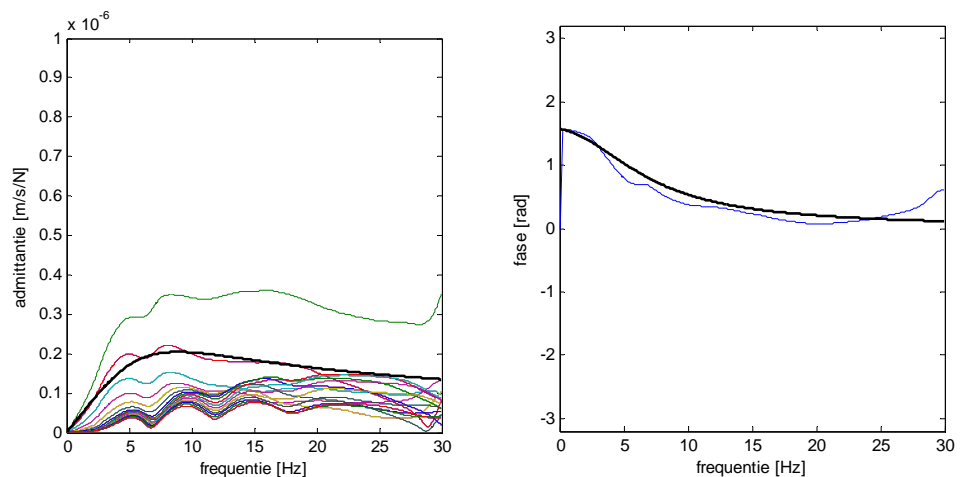
De parametrisering van deze treinen komt uit eerdere projecten.

De modellering van TNO verschilt op het punt van bronbeschrijving op een aantal wezenlijke en minder wezenlijke punten met die van Peutz.

- TNO brengt zowel spooroneffenheid als aslastpassages als oorzaken van trillingen in rekening. Peutz modelleert alleen aslastpassages. Uit de praktijk blijkt dat ook bij goederentreinen alleen dichtbij de baan (binnen, zeg 10 meter) aslastpassages dominant zijn bij optredende krachten en versnellingen.
- Peutz doet een aanname over de trillingsveroorzakende krachten en legt die op aan het model, waarbij geen rekening wordt gehouden met de invloed van de al dan niet aanwezige bak op de grootte van de krachten. TNO laat op grond van in eerdere onderzoeken bepaalde treineigenschappen en baaneigenschappen het model de krachten

berekenen, waardoor de aanwezigheid van de bak zijn invloed hierop kan laten doen gelden.

- Peutz hanteert een oneindig lange trein, TNO heeft een trein van ongeveer 100 meter lengte. Tot een afstand van 50 meter van het spoor is dit equivalent. Voor grotere afstanden is de trein van TNO te kort om representatief te zijn voor de werkelijke goederentreinen die er rijden. Trillingsniveaus voorbij de 50 meter worden echter niet beschouwd.



Figuur 13: Tuning van de admittantie van de onderbouw in TRINT (dikke zwarte lijn) op die van FEM (gekleurde lijnen, met bovenste groene lijn direct onder aanstoting en rode lijn 2 meter van de aanstoting).

De baan en bodem zijn gemodelleerd als volgt:

- spoorstaaf UIC60
- railpads FC6
- betonnen dwarsliggers
- 50 cm ballast
- betonnen bak of 50 cm zandlichaam (conform Fugro-Royal Haskoning)
- klei

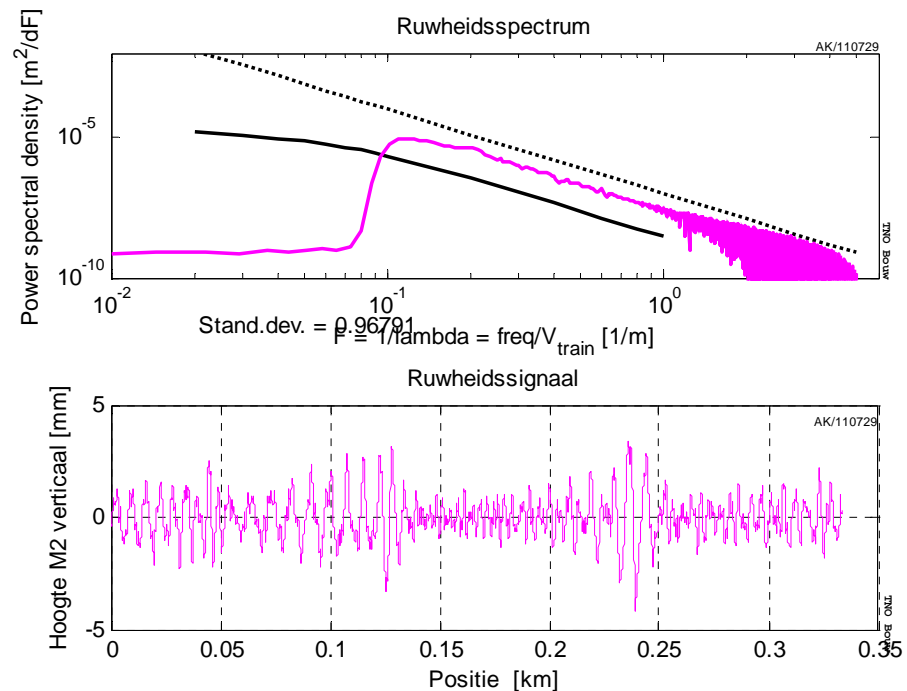
De parametrisering van de onderbouw (bak of zandlichaam op klei) zijn getuned op het FEM-model opdat de invloed van de nodige detaillering (zoals opstaande rand) op het dynamisch gedrag in rekening wordt gebracht. De parametrisering van de overige onderdelen komt uit eerdere onderzoeken.

Figuur 12 toont de tuning van de onderbouw.

De spoorbak, zijnde een maatregel dichtbij, zelfs *in* de bron, beïnvloedt het ontstaan van trillingen. De werkzaamheid verschilt daarom per *subbron* (cq per achterliggende oorzaak van de trillingen). De belangrijkste twee subbronnen in dit kader zijn, naast het wissel, de passage van aslasten en de oneffenheid van het spoor. Was spooroneffenheid de enige bron, dan zou het effect invariant zijn onder de spooroneffenheid en was de grootte daarvan voor de bepaling van het effect niet belangrijk.

De spooroneffenheid is gekozen als die welke vaak wordt aangetroffen op "gemengd" spoor (gebruikt door zowel goederen- als reizigersvervoer) conform een recent onderzoek daarnaar ten behoeve van trillingsmaatregelen voor de Combitunnel Nijverdal..

Onderstaande figuur toont de gebruikte spooroneffenheid.



Figuur 14: Gebruikte spooroneffenheid (paars) als spectrum (boven) en als verplaatsingssignaal (onder); ter referentie zijn ook de spectra gegeven van de Duitse norm voor HSL-spoor (doorgetrokken zwarte lijn) en voor "gemiddeld" Nederlands spoor op houten dwarsliggers volgens Esveld (en zoals het er misschien nu bij ligt).

De beoogde rijnsnelheid van de goederentreinen in 2020 is 80 km/uur, die van de reizigerstreinen bijna overal zelfs hoger (70 tot 90 km/uur in de ene richting en 100 km/uur in de andere richting), Treinsnelheid beïnvloedt het systeem, als bron, op verschillende manieren en dus ook het effect van een maatregel in de bron, zoals de tunnelbak. Voor een goed beeld van het effect van de bak is een beoordeling bij verschillende snelheden dus noodzakelijk. Ter referentie is ook een reizigerstrein gemodelleerd, met een snelheid die halverwege de drie gemodelleerde goederensnelheden ligt.

De onderzochte treinsnelheden zijn uiteindelijk:

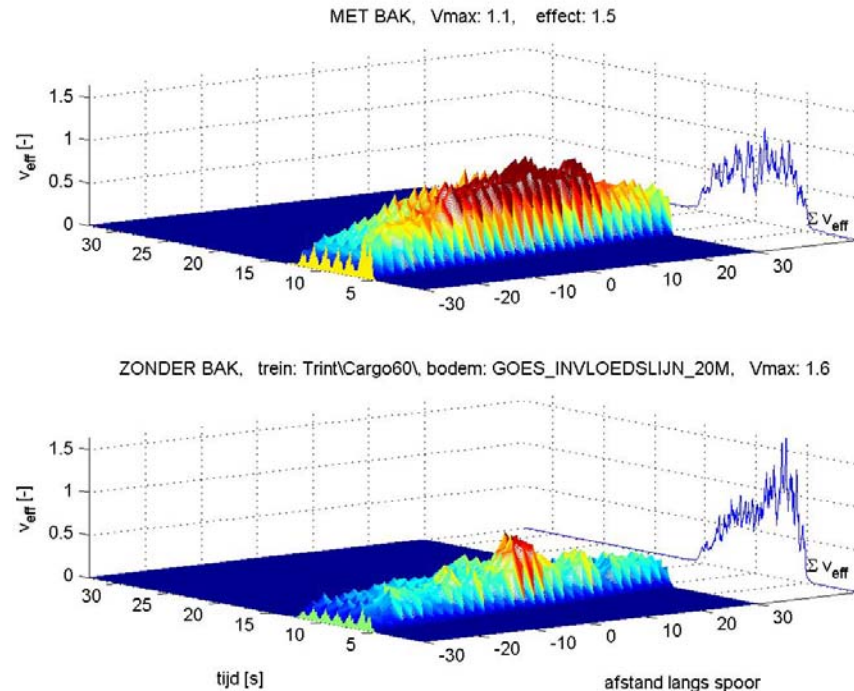
- voor goederen: 40, 60 en 80 km/uur
- voor IRM: 60 km/uur

3.4 Predictie trillingsniveaus bij treinpassages

Voor de twee verschillende treinen, goederen en IRM, zijn voor de verschillende snelheden de trillingsniveaus op 20, 40 en 60 meter afstand van het spoor berekend. De trillingsniveaus zijn gewogen met de versterkende invloed van de woningen: 10 dB versterking (factor 3) van de 8 Hz octaafband en 5 dB van de 16 Hz band. De trillingsniveaus zijn verder verwerkt conform richtlijn SBR-B.

Onderstaande figuur toont een grafische presentatie van de resultaten. In 3D wordt aandacht gegeven aan de deelbijdragen van verschillende punten langs het spoor, dit om te bestuderen wat het effect van de spoorbak in langsricting is. Het is

mogelijk dat de bak tot een ongunstig effect leidt (bijdragen van een langer deel van het spoor), wat eventueel te ondervangen zou zijn met dilataties e.d. Van dat effect lijkt hier echter geen sprake.



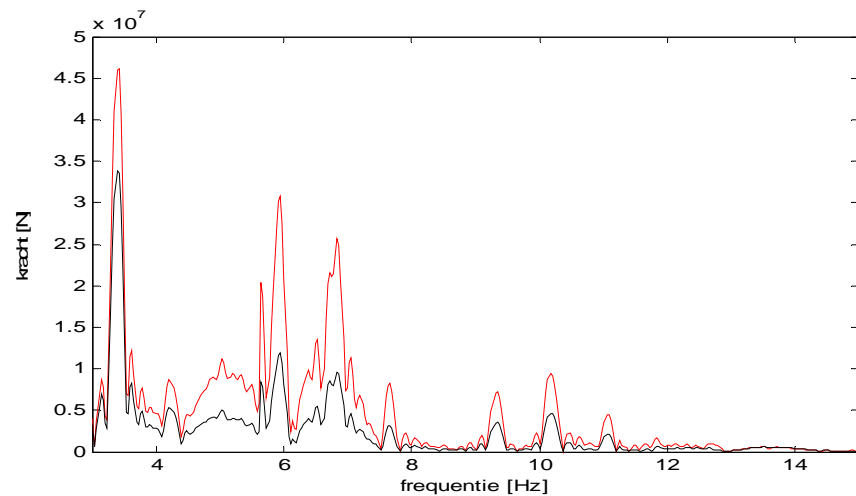
Figuur 15: Convolutie van FEM en TRINT voor spoor met bak (boven) en zonder bak (onder); in kleur zijn de deelbijdragen (als effectieve trillingsnelheid V_{eff} volgens SBR B) van 60 meter spoor te zien, afstand "0" is recht voor het ontvangpunt; tegen de "achtergrond" staat de som van de deelbijdragen gerepresenteerd;

Het effect van de spoorbak is niet heel groot en hangt af van de afstand. Dicht bij het spoor is er een positief effect, ver van het spoor een negatief effect. Volgens de berekeningen neemt het trillingsniveau vanwege een goederentrein met 60 km/uur op 20 meter afstand af van 1,6 mm/s naar 1,1 mm/s (zie figuur 15) maar neemt dat op 40 meter afstand toe van 0,60 naar 0,75 mm/s (zie tabel 3). Het omslagpunt ligt dus ergens tussen de 20 en de 40 meter.

Een belangrijk effect is dat de spoorbak de *krachten* in het spoorstelsel doen *toenemen*. Krachten zijn in een fysisch systeem immers altijd een resultante (er bestaat geen wet van behoud van kracht, wel van impuls) en de bak is in dit geval een harde reflector voor de impuls. Bij gelijkblijvende kracht zal een verstijving zoals een betonnen bak het trillingsniveau meestal doen afnemen (ten minste lokaal) maar dat wordt in dit geval bijna teniet gedaan door de vergroting van de krachten die de spoorbak veroorzaakt. Figuur 16 toont de krachten in de ballast zonder bak (zwart) en met bak (rood). De spoorbak leidt tot een verdubbeling van de krachten.

Wat opvalt in de resultaten is dat de bak vooral de enkele piek-gebeurtenissen (vaak de passage van de loc) 'afschaaft' (zie figuur 15). Het gemiddelde trillingsniveau wijzigt niet zo. Aangezien de beoordelingsgrootte V_{max} bepaald

wordt door de piek-gebeurtenissen is het gunstige effect van de bak daarop van groot belang.



Figuur 16: kracht op de onderbouw, met bak (rood) en zonder bak (zwart)

3.5 Beoordeling effectiviteit van de spoorbak

Onderstaande tabel vat de resultaten van de berekening samen.

Tabel 3: Resultaten van de FEM-TRINT berekeningen voor effect spoorbak (met ballast)

	Cargo40	Cargo60	Cargo80	IRM60
ZONDER				
	V _{eff,max} [-]			
20 meter	1,5	1,6	2,7	0,75
40 meter	0,45	0,60	0,55	0,45
MET				
	V _{eff,max} [-]			
20 meter	0,95	1,1	1,7	0,75
40 meter	0,45	0,75	0,80	0,50
EFFECT				
	Reductiefactor [-]			
20 meter	1,6	1,5	1,6	1,0
40 meter	1,0	0,8	0,7	0,9

De reductiefactor is op grotere afstand 1 of lager, hetgeen betekent dat het trillingsniveau door de bak juist toeneemt. Alleen dicht bij het spoor, waar de aslastpassage het dominante aanstootprincipe vormt en de verstijving van de bak een grotere rol speelt dan de vergroting van de krachten, is de reductie hoger. Bij goederenpassages met 80 km/uur is de reductiefactor 1,6.

De berekende waarden voor $V_{\text{eff,max}}$ zijn uiteraard slechts een indicatie: in de praktijk variëren de waarden erg sterk, afhankelijk van trein, locatie langs het spoor, invloed van de woning, etc. De berekende reductiefactor, waar het uiteindelijk om gaat, zal van al deze variaties niet al te gevoelig moeten zijn. Toch

blijkt uit variatiestudies die met deze case zijn gedaan dat ook de reductiefactor aanmerkelijk kan variëren. Zo is in 1 geval een reductie van 2,9 gevonden (voor goederen met 40 km/uur op 20 meter). Maar in de meeste gevallen kwam de reductie op 20 meter niet boven de 1,6 en op 40 meter niet boven de 1,1.

Naast de variatie is er ook de onzekerheid die voortkomt uit de mate van betrouwbaarheid van het model. Het model is in de loop van de jaren getoetst aan metingen, waaronder ook aan het effect van maatregelen. Meest recent, bij een validatiestudie in verband met het ontwerp van een maatregel in Arnhem, is de modelfactor op 1,2 uitgekomen.

De variatie en de onzekerheid leveren tezamen een bandbreedte van een factor 1,3 op de voorspelling van het effect van de bak. Voor reizigerstreinen is die bandbreedte een factor 1,2.

Dit levert uiteindelijk als beoordeling van de bak op:

Goederen:

Reductiefactor op 20 meter: $1,4 \pm 0,4$

Reductiefactor op 40 meter: $0,9 \pm 0,3$

Reizigers:

Reductiefactor: $1,0 \pm 0,2$

Dit moet dus als volgt worden gelezen: indien *zonder* bak het trillingsniveau 1,0 [-] bedraagt (op 20 en 40 meter vanwege goederen en reizigers) zal *met* bak

- het trillingsniveau van reizigerstreinen 0,8 tot 1,2 gaan bedragen, maar naar verwachting 1,0
- het trillingsniveau van goederentreinen op 20 meter 0,6 tot 1 gaan bedragen, maar naar verwachting 0,7
- het trillingsniveau van goederentreinen op 40 meter 0,8 tot 1,7 gaan bedragen, maar naar verwachting 1,1

3.6 Ballastloze spoorbak

Een maatregel die de effectiviteit van de spoorbak zou kunnen vergroten is het vervangen van de bovenbouwconstructie door een ballastloze variant, zoals de discreet opgelegde, opgebouwde spoorstaafconstructie. Daarbij worden de spoorstaven niet gedragen door dwarsliggers en ballast maar worden zij direct bevestigd aan de betonnen bak. Zo'n bovenbouwconstructie heeft als voordeel dat het spoor nauwkeuriger kan worden neergelegd en langdurig goed blijft liggen. Dit betekent dat op grotere afstand van de bak, waarvoor spooroneffenheid de dominante bron is, een aanmerkelijke reductiefactor zou worden bereikt.

Eerste berekeningen geven echter geen positief effect. Weliswaar nemen de krachten vanwege spooroneffenheid af maar de (dynamische) krachten vanwege de aslastpassages nemen sterk toe. Per saldo nemen de trillingen in de omgeving op 40 meter afstand met een factor 2 toe tegenover regulier ballastspoor op maaiveld (dus zonder bak). Op 20 meter afstand blijft het trillingsniveau gelijk ten opzichte van de situatie zonder bak.

Een andere ballastloze variant is de ingegoten spoorstaafvariant. Ook daarvoor geldt dat de spoorligging sterk verbetert. Maar ook bij deze variant is te verwachten dat de dynamische aslastkrachten groter zullen worden.

4 Conclusies

Volgens de berekeningen is het effect van de spoorbak op trillingen vanwege goederentreinen dat het trillingsniveau (V_{\max}) op 20 meter afstand afneemt met een factor 1,4. Aan deze prognose is een bandbreedte toegekend van 30%. Op 40 meter afstand is er geen reductie meer. De spoorbak heeft geen effect voor reizigerstreinen.

5 Referenties

- [1] Fugro Ingenieursbureau B.V. *Geotechnisch onderzoek betreffende Trillingsreducerende bak Spoorlijn Goes*. Opdrachtnummer 1006-0004-010, 3 December 2010.
- [2] ProRail B.V. *Tekening 0321-514: Doorsnede 40 mio variant "Verbreed perronprofiel"*, Spoorproject Goes. 15-04-2009.
- [3] Peutz *Trillingsniveaus vanwege de Zeeuwse lijn te Goes – Invoegverlies beoogde betonnen spoorbak – 3D FEM analyse*, rapport nr VL 849-7-RA

6 Ondertekening

Naam en adres van de opdrachtgever:

Gemeente Goes
Dhr. A.J. Potter
Afd. Openbare Ruimte
Postbus 2118
4460 MC GOES

Projectteam:

Arnold Koopman
Sven Lentzen
Flavio Galanti

Auteur:



Drs. A. Koopman

Visa 2^o lezer



Dr. Ir. S. Lentzen

Goedkeuring:



Drs. P.P. van 't Veen
Research Manager
Structural Dynamics