

PRIJS
€ 8,00

ONDERZOEKSRAPPORT
L40026

L400

VEREFICATIE PROGNOSEMODEL
(MODUUL SPOORVERKEER)

COB – CENTRUM ONDERGRONDS BOUWEN

Het Centrum Ondergronds Bouwen wil als kennisnetwerk oog en oor zijn voor alles wat met ondergronds bouwen te maken heeft. Vanuit de visie dan ondergrond ruimtegebruik en essentiële bijdrage levert aan een mooi, leefbaar en slagvaardig Nederland, stimuleert het COB de dialoog tussen alle mogelijke partijen die een rol spelen bij de verkenning van belemmeringen en mogelijkheden van het bouwen onder de grond. Naast het (mede) uitvoeren van onderzoeken, is het COB actief op het gebied van communicatie, kennismanagement en onderwijs, onder meer door de ondersteuning van een leerstoel ondergronds bouwen aan de TU Delft en het lectoraat ondergronds ruimtegebruik aan de Hogeschool Zeeland. Meer dan honderd organisaties uit het bedrijfsleven, de overheid alsmede kennisinstellingen bundelen in het COB hun krachten en expertise. Het COB maakt deel uit van het CUR.NET en stemt zijn activiteiten af met andere deelnemers aan dat netwerk, zoals CUR, Habiforum en SKB. Daarnaast heeft het COB een Memorandum Of Understanding met de Japan Tunneling Association (JTA) en stimuleert het internationale uitwisselingen met andere landen. COB is mede initiatiefnemer van het nieuwe onderzoeksprogramma ECON en werkt nauw samen met Delft Cluster.

COB NA 2003

In 2003 loopt de tweede onderzoeksperiode van het COB af. In nauw overleg met de participanten is een businessplan opgesteld voor de periode 2004-2007. Hierin wordt ook een aangepaste programmeerwijze voorgesteld waarbij een grote nadruk op afstemming tussen vraag en aanbod zal worden gelegd.

De in het businessplan genoemde speerpunten, voortgekomen uit een brede consultatie van het COB netwerk, vormen het uitgangspunt voor de programmering van onderzoeksprojecten. De speerpunten bieden een focus voor de programmering en doen recht aan de visie van de komende jaren: 'Samenwerken aan het verantwoord ontwikkelen, bouwen en beheren van ondergrondse ruimte'



**VERIFICATIE
PROGNOSEMODEL L400**
(moduul spoorverkeer)

Opdrachtnummer: M-0559


RAPPORT
betreffende

**VERIFICATIE
PROGNOSEMODEL L400**
(moduul spoorverkeer)

Opdrachtnummer: M-0559

Projectleider : ir. M.Th.J.H. Smits
Hoofd Adviesafdeling Geotechniek & Geohydrologie

Opgesteld door : ir. G.A. Nuijten
ir. J.D. Stoop

VERSIE	DATUM	OMSCHRIJVING WIJZIGING	PARAAF PROJECTLEIDER
1	22 september 1998	Toetsing rapportage (1e fase)	
2	25 januari 1999	Eindrapport	
3			

INHOUDSOPGAVE

	<u>Blz.</u>
1. INLEIDING.....	1
2. BESCHRIJVING VAN HET MODUUL.....	2
2.1 Doel van het moduul	2
2.2 Opdrachtbeschrijving van het moduul.....	2
3. TOETSING VAN DE RAPPORTAGE.....	3
3.1 Resultaat van de rapportage	3
3.1.1 Inventarisatie van relevante fenomenen bij de modellering	3
3.1.2 Opzet van de modellering.....	4
3.1.3 Vergelijkende studies	4
3.1.4 Conclusies en aanbevelingen.....	5
3.2 Afwijkingen ten opzichte van de opdrachtbeschrijving	5
3.3 Toegankelijkheid en compleetheid van de rapportage.....	5
4. AANPAK VERIFICATIE	6
5. GEBRUIK EN GEBRUIKSVRIENDELIJKHEID VAN HET MODUUL.....	7
5.1 Inleiding.....	7
5.2 TrainInputfile	7
5.3 RailInputfile	7
5.4 Uitvoeren van de berekening van de treinbelasting	8
6. AFHANKELIJKHEID VAN INVOERPARAMETERS	9
6.1 Referentiesom.....	9
6.1.1 Genereren van de TrainInputfile.....	9
6.1.2 Genereren van de Railinputfile	10
6.1.3 Analyse van de berekende treinbelasting	11
6.2 Parametervariatie	14
6.2.1 Lege wagons.....	14
6.2.2 Andere treinsnelheden	16
6.2.3 Lage railstijfheid	18
6.2.4 Grotere oneffenheid van het spoor	19
7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	22
7.1 Rapportage	22
7.2 Gebruiksvriendelijkheid van het PC-model	22
7.3 Resultaten van uitgevoerde berekeningen	22
LITERATUUR	23
Bijlagen:	
1.1 TrainInputfile	
2.1 RailInputfile met invoerfactoren voor railruwheid	
2.2 RailInputfile met expliciet ruwheidsprofiel	

1. INLEIDING

Op 12 juni 1996 ontving Fugro ingenieursbureau b.v. opdracht van CUR/COB-uitvoeringscommissie L440 opdracht voor verificatie van de bronmodulen 'heien' en 'railverkeer', alsmede de transmissiemoduul 'bodem'.

Hiervan is het gedeelte met betrekking tot de verificatie van de modulen 'heien' geheel en 'bodem' gedeeltelijk uitbesteed aan Holland-Railconsult.

Het doel van de verificatie is het aangeven hoe in de verschillende modulen van het prognosemodel trillingen (L400) het verband wordt gelegd tussen fysisch meetbare invoergegevens en de door het prognosemodel gegenereerde uitkomsten. Hierbij is het met name van belang om aan te geven hoe de benodigde invoer kan worden verkregen. Ook de bruikbaarheid van de modulen voor praktijkproblemen komt hierbij aan de orde. Er zal worden aangegeven voor welk soort problemen het betreffende moduul geschikt is, en voor welke soort problemen het moduul niet geschikt is.

Onderhavige rapportage behandelt de verificatie van het bronmoduul 'spoorverkeer'. Dit model bouwt voort op het reeds in het kader van CUR D-11 project eerder ontwikkelde model voor trillingen door spoorverkeer [1, 2].

2. BESCHRIJVING VAN HET MODUUL

2.1 Doel van het moduul

Het doel van het bronmoduul 'spoorverkeer' is het ontwikkelen van een berekeningsmodel voor het voorspellen van trillingen, opgewekt door het spoorverkeer. Daartoe moet het moduul voor een aantal gangbare voertuigtypen de trillingsemissies berekenen, waarbij de dynamische eigenschappen van het voertuig in rekening worden gebracht.

Het eindresultaat is een bronmodel, waarmee trillingsemissie van spoorverkeer als trillingsbron nauwkeuriger en eenvoudiger kan worden berekend dan met de eerder genoemde basismodellering die in het kader van het CUR D-11 project is ontwikkeld. Het bronmodel zal werken als een rekenroutine in PC-omgeving en zal als bronmoduul opgenomen kunnen worden in het prognosemodel voor trillingshinder.

2.2 Opdrachtbeschrijving van het moduul

In het deelprojectplan dat betrekking heeft op de aanpassing van het moduul 'spoorverkeer' [3] worden de volgende drie stappen beschreven:

1. inhoudelijke uitbreiding van de modellering.
Hieronder worden concreet de volgende drie onderdelen verstaan:
 - uitbreiding van het al bestaande model met discrete oneffenheden, bijvoorbeeld aansluitingen tussen de spoorstaven, of de lokale oneffenheden ter plaatse van wissels;
 - verwerken van de invloed van de geometrie van de bovenbouw en de aardenbaan op de trillingsemissie door spoorverkeer;
 - toevoeging van regelmatige en random horizontale belastingen via modellering van horizontale bewegingen van de trein, dwars op het spoor.
2. kwalitatieve uitbreiding van de parameterset.
Hieronder wordt concreet verstaan:
 - het vaststellen van de parameters van rollend materieel welke relevant zijn voor de meeste toepassingen;
 - een verbetering van de geometrische parameters die de geometrische ligging van het spoor beschrijven.

Bij de verwerking van de relevante parameters in het prognosemodel wordt gestreefd naar een meer gebruikersvriendelijke opzet. De noodzakelijke parameters zullen in een database aanwezig zijn en door de gebruiker aan te duiden zijn met behulp van de verschillende klassen rollend materieel. Daarmee wordt voorkomen dat veel specialistische kennis over spoorwegen en treinen van de gebruiker vereist is;
3. specificatie van PC-versie bronmoduul.
In de opdrachtbeschrijving wordt ten aanzien van de specificatie van de PC-versie van het bronmoduul het volgende vermeld:
 - het bronmoduul moet kunnen werken als een rekenroutine in een PC-omgeving. Ten behoeve hiervan moet de basismodellering worden ingedikt tot een hanteerbaar bronmoduul. De noodzakelijke en mogelijke vereenvoudigingen worden geverifieerd aan de hand van reeds verrichte trillingsmetingen.

3. TOETSING VAN DE RAPPORTAGE

3.1 Resultaat van de rapportage

De rapportage met betrekking tot de uitbreiding van het model voor railverkeer bestaat uit drie aparte delen, een deel dat de feitelijke uitbreiding van de oorspronkelijke modellering beschrijft [4], een deel waarin de uitbreiding van de voor nauwkeuriger modellering vereiste parameters betreffende bovenbouw en ballastbed worden geïnventariseerd en gekwantificeerd [5], en een deel waarin gegevens van relevant treinmaterieel zijn geïnventariseerd en gekwantificeerd [6].

In dit hoofdstuk wordt op het tweede deel ten aanzien van de parameters van bovenbouw en ballastbed en het derde deel ten aanzien van de parameters van treinmaterieel niet ingegaan. De reden hiervoor is dat dit nauwelijks verifieerbare opsommingen zijn van gegevens ten behoeve van de feitelijke modellering die in het eerst genoemde deel wordt beschreven.

In de rapportage van het bronmoduul voor railverkeer [4] is de aanpak beschreven die is gevolgd om tot een model te komen voor de trillingsemisatie door spoorverkeer, waaronder naast treinverkeer ook metro- en tramverkeer wordt verstaan.

Eerst wordt een overzicht gegeven van de fenomenen die van belang zijn bij het modelleren van het dynamisch gedrag van het spoorwegverkeer. Vervolgens is beschreven hoe deze fenomenen op een eenvoudige manier zijn gemodelleerd. Daarna zijn vergelijkende studies gemaakt tussen de ontwikkelde module en andere, meer complexe modellen, teneinde de invloed van toegepaste vereenvoudigingen in het model te kunnen beoordelen. Tot slot worden conclusies en aanbevelingen gegeven.

De hier genoemde onderdelen van de rapportage worden in het vervolg van deze paragraaf kort beschreven.

3.1.1 Inventarisatie van relevante fenomenen bij de modellering

Er is gescheiden gekeken naar de invloedsfactoren die de verticale belasting en de horizontale belasting op het spoor bepalen. Ten aanzien van de verticale belasting wordt achtereenvolgens ingegaan op de volgende aspecten:

- modellering van de onvlakke ligging van het spoor (inclusief discrete oneffenheden);
- modellering van het voertuig (assen, draaistellen en bakken);
- modellering van de bovenbouw van de spoorbaan (spoorstaven, hellingplaten, dwarsliggers en ballastbed);
- koppeling van de subsystemen voertuig en bovenbouw.

De beschrijving van de invloedsfactoren die de horizontale belasting op het spoor bepalen verloopt vrijwel analoog aan de beschrijving van de invloedsfactoren die de verticale belasting bepalen. Achtereenvolgens wordt ingegaan op:

- de schift van het spoor (maat voor de 'horizontale' onvlakheid);
- aanpassing van de waarden van de relevante parameters van het voertuig;
- aanpassing van de waarden van de relevante parameters van de bovenbouw;
- modellering van de beïnvloeding van de zijdelingse beweging van de trein door het conische wielband profiel.

3.1.2 Opzet van de modellering

In de beschrijving van de opzet van de modellering worden de toegepaste vereenvoudigingen beschouwd die nodig waren om te komen tot een voor een PC hanteerbare module. De vereenvoudigingen zijn gebaseerd op het principe van superpositie, waarbij een aantal van de eerder beschreven fenomenen als onafhankelijke deelproblemen zijn gemodelleerd.

Achtereenvolgens wordt ingegaan op de overgang van de modellering van dynamische belastingen uit de wielen naar een plaatsvaste beschouwing op de spoorbaan, welke daartoe wordt opgedeeld in stukken met lengte Δx . Er wordt een formulering gegeven voor de berekening van de kracht op een gedeelte Δx in het tijdsdomein. Vervolgens wordt kort ingegaan op uitbreiding van deze benadering voor de passage van meerdere identieke assen, draaistellen of bakken.

3.1.3 Vergelijkende studies

Onder de vergelijkende studies worden een aantal deelstudies verstaan welke zijn uitgevoerd om na te gaan of bepaalde vereenvoudigingen in de spoorwegmodule redelijk zijn. De genoemde vereenvoudigingen zijn:

- de vereenvoudiging dat de dynamische belasting onder een wiel van een trein coherent is met de dynamische belasting onder een ander wiel van hetzelfde railvoertuig, maar met een fase verschoven. Deze vereenvoudiging maakt dat de berekening van het belastingspectrum door achtereenvolgende aspassages op relatief eenvoudige wijze kan worden berekend uit het spectrum van een afzonderlijk wiel en de tijdstippen tussen de verschillende achtereenvolgende aspassages;
- de vereenvoudiging dat de spoorbaan opgedeeld kan worden in een aantal delen met lengte Δx , waarin is aangenomen dat de dynamische belasting ongelijk is aan nul indien zich één of meer wielen in het deel Δx bevinden en in het andere geval de dynamische belasting gelijk aan nul is. Hiervoor is het noodzakelijk na te gaan of de spreidingsbreedte van de dynamische belasting onder het wiel in de bovenbouw klein is, en dus de aanname dat het verloop van een wielpassage door een blokfunctie kan worden beschreven gedaan kan worden;
- de verwaarlozing van het verschil in onvlakheid tussen de rail en de bodem ten gevolge van de stijfheid van de bovenbouw en het ballastbed. Dit maakt dat het rekenwerk wordt verminderd en het aantal invoerparameters van de module wordt beperkt.

Op basis van de deelstudies, waarbij mede gebruik is gemaakt van het eerdere en op onderdelen uitgebreidere 'integrale' model, dat in het kader van het CUR D-11 project is ontwikkeld, is gebleken dat de hierboven genoemde vereenvoudigingen acceptabel zijn.

3.1.4 Conclusies en aanbevelingen

De belangrijkste conclusie heeft betrekking op de constatering dat de toegepaste vereenvoudigingen van het model ten opzichte van de eerdere en op onderdelen uitgebreidere 'integrale' modellering die in het kader van het CUR D-11 project is ontwikkeld, acceptabel zijn. Daarmee is het mogelijk geworden het model zodanig te implementeren dat het ook op een PC kan draaien en niet noodzakelijk een krachtiger computer vereist.

3.2 Afwijkingen ten opzichte van de opdrachtbeschrijving

Met de beschrijving van de dynamische belasting door spoorverkeer met een grondige studie naar de invloed van verschillende parameters, de beschrijving van de opzet van de spoorwegmodule en de controle op toelaatbaarheid van de toegepaste vereenvoudigingen om het geïmplementeerde model op een PC te kunnen draaien, is in beginsel datgene geleverd wat in de opdrachtbeschrijving staat vermeld.

Met het oog op de opdrachtbeschrijving wordt het volgende opgemerkt:

- in de opdrachtbeschrijving is aangegeven dat de modellering ten opzichte van de modellering die in het kader van het CUR D-11 project is ontwikkeld inhoudelijk zal worden uitgebreid op een aantal genoemde aspecten. Alle genoemde aspecten zijn geanalyseerd en gerapporteerd;
- in de opdrachtbeschrijving is aangegeven dat het model moet kunnen werken als rekenroutine in een PC-omgeving, en dat het gebruik hiervan eenvoudiger moet zijn dan het oorspronkelijke model welke onder andere veel specialistische kennis van zowel het rollend materieel als de spoorbaan vereist.

Vereenvoudigingen zijn voorgesteld en ook uitgevoerd. Het effect van de voorgestelde vereenvoudigingen is getoetst en in orde bevonden.

Op detailniveau zijn er enige kleine onduidelijkheden betreffende de volgende aspecten:

1. er wordt vrij uitvoerig ingegaan op de modellering van verticale discrete oneffenheden, zonder dat met een voorbeeld duidelijk wordt gemaakt hoe dit kan worden toegepast om in de praktijk voorkomende oneffenheden te modelleren;
2. er worden parameters gegeven om horizontale random en discrete schift te kunnen modelleren, maar aanwijzingen voor het concreet modelleren van bijvoorbeeld de horizontale afbuiging op een wissel blijft achterwege;
3. benamingen m.b.t. onderdelen van de spoor worden soms wat verwarrend gebruikt. De rapportage van Holland-Railconsult [5] is nodig om het volgende overzicht duidelijk te krijgen:
 - bovenbouw = rails + dwarsliggers + railbevestigingen + hellingplaten / beddingplaatjes (hiërarchie!);
 - ballastbed = laag steenslag tussen dwarsliggers en de onderbouw (aardebaan of kunstwerk).

3.3 Toegankelijkheid en compleetheid van de rapportage

De rapportage is in zijn geheel toegankelijk, overzichtelijk en compleet bevonden en het moduul kan verder geverifieerd en gevalideerd worden.

4. AANPAK VERIFICATIE

De verificatie van de geïmplementeerde modellering is opgedeeld in de volgende twee stappen:

1. de gebruikersvriendelijkheid van de module wordt geanalyseerd. Daartoe wordt bekeken welke invoer vereist is, of de aanduiding hiervan duidelijk is, of deze veel specialistische kennis vereist of er in de rapportages voldoende aanknopingspunten en aanwijzingen te vinden zijn voor het geven van redelijke numerieke waarden, en of de geleverde uitvoer voldoende duidelijk is;
2. de afhankelijkheid van het berekeningsresultaat van variatie van de verschillende invoerparameters wordt onderzocht. Daartoe wordt het volgende programma voorgesteld:

referentiesom met defaultgegevens:

- treintype: 1700 loc en 3 beladen DDM loopbakken, allen met bijbehorende default gegevens
- treinsnelheid = 120 km/h
- gemiddelde verticale railonvlakheid
- bovenbouw met standaard NS-rail (UIC 54) en standaardafstand tussen de dwarsliggers (0,6 m)
- ballastbed met 'gemiddelde' dynamische eigenschappen

vaststellen effect van variatie van afzonderlijke parameters op het belastingsignaal

- treintype: lege wagons
- treinsnelheid: lager (90 km/h) en hoger (150 km/h)
- railstijfheid: kleiner
- oneffenheid van het spoor: groter

De twee stappen zijn in de hiernavolgende hoofdstukken 5 en 6 uitgewerkt.

5. GEBRUIK EN GEBRUIKSVRIENDELIJKHEID VAN HET MODUUL

5.1 Inleiding

Aanwijzingen voor het gebruik van de PC-module zijn beschreven in het rapport 'Gebruiksaanwijzingen COB L400 prognosemodel' [8]. Voor de berekening van de treinbelasting op de onderliggende aardebaan dienen twee invoerfiles te worden gemaakt. In de eerste, de TrainInputfile, worden samenstelling en fysische gegevens van de treinstellen beschreven. Met de tweede, de RailInputfile, wordt de snelheid van de trein, de lengte van het beschouwde baanvak en de geometrie (waaronder horizontale en verticale ruwheid) van het spoor gedefinieerd.

5.2 TrainInputfile

Bij de Treinmodule is een voorbeeld meegeleverd van een invoerfile waarmee de treinsamenstelling wordt beschreven. Deze is genaamd Cobtrein.def. De inhoud van deze file is eenvoudig te interpreteren en met de handleiding eenvoudig te wijzigen of uit te breiden met andere treinstellen. Hiervoor is in de handleiding verwezen naar de file Cobtrein.dat. Hierin is een grote lijst met locomotieven en wagons opgenomen inclusief de bijbehorende relevante gegevens. Uit deze file kunnen de benodigde gegevens worden opgehaald om een 'eigen' Cobtrein.def samen te stellen.

Bij een gedefinieerde treinsamenstelling kan de TrainInputfile worden gegenereerd met het programma Gentrain.

5.3 RailInputfile

Bij de treinmodule zijn vier voorbeelden meegeleverd van de RailInputfile. De vier voorbeeldfiles, PLVO100.inp, RLVO140.inp, RLNA100.inp en RLNA140.inp bevatten informatie over de spoorligging van twee trajecten bij twee verschillende treinsnelheden. De vraag is hoe de hierin beschreven railruwheid zich verhoudt tot de gemiddelde Nederlandse situatie. Hier wordt in de handleiding bij het programma geen indicatie van gegeven.

Naast de hier beschreven voorbeeldfiles biedt de module railverkeer ook de mogelijkheid een RailInputfile te maken waarin de railruwheid zelf kan worden gegenereerd op basis van een aantal invoerfactoren die een maat zijn voor de oneffenheid van het spoor. Om een indruk te krijgen van de praktische bandbreedte en betekenis van deze factoren biedt de rapportage van de treinmodule enige houvast.

5.4 Uitvoeren van de berekening van de treinbelasting

De berekening van de treinbelasting op een baanvak als functie van de tijd kan met behulp van de aanwijzingen in de handleiding eenvoudig worden uitgevoerd. De enige moeilijkheid bleek te zijn dat het programma twee keer moet worden gedraaid als zelf een railruwheidsprofiel wordt gegenereerd. Na de eerste keer draaien van het treinmoduul blijkt namelijk dat er alleen nog maar een nieuwe RailInputfile is gegenereerd. In deze nieuwe RailInputfile zijn de invoerparameters voor de generatie van het railruwheidsprofiel vertaald naar een expliciet ruwheidsprofiel. De nieuwe RailInputfile krijgt de naam die in de oorspronkelijke RailInputfile moet worden opgegeven.

Het resultaat van de uiteindelijke berekening is een x aantal files waarin de belasting als functie van de tijd is gepresenteerd. Het aantal files hangt af van het aantal stukken waarin het beschouwde baanvak in de RailInputfile is opgedeeld. De uitvoer voor de horizontale en verticale treinbelasting is gescheiden. De files met de horizontale belasting hebben extensie h0, h1, h2 etc. De files met de verticale belasting hebben extensie v0, v1, v2 etc.

6. AFHANKELIJKHEID VAN INVOERPARAMETERS

6.1 Referentiesom

Voor de referentiesom wordt uitgegaan van de volgende gegevens:

- treintype: 1700 loc en 3 beladen DDM loopbakken, allen met bijbehorende default gegevens
- treinsnelheid = 120 km/h
- gemiddelde verticale railonvlakheid, geen horizontale railonvlakheid
- bovenbouw met standaard NS-rail (UIC 54) en standaardafstand tussen de dwarsliggers (0,6 m)
- ballastbed met 'gemiddelde' dynamische eigenschappen

6.1.1 Genereren van de TrainInputfile

Op basis van de bovengenoemde uitgangspunten is de volgende treinsamenstelling gedefinieerd waarmee met het programma Gentrain de TrainInputfile wordt gegenereerd:

```
EL1700
DDM_loopbak_beladen
DDM_loopbak_beladen
DDM_loopbak_beladen
end
```

In de tabellen 1 en 2 zijn de relevante gegevens van achtereenvolgens locomotief en wagons weergegeven tezamen met de interpretatie daarvan. Deze gegevens zijn afkomstig uit de datafile Cobtrein.dat.

Tabel 1: Invoerparameters elektrische locomotief EL1700

bak	lengte bak tot buffer	17,9 m
	massa bak	40.300 kg
	rotatietraagheid bak	157.797 kgm ²
	demping tussen bak en draaistel	139.000 Ns/m
	veerstijfheid tussen hart bak en draaistel	24.000.000 N/m
	afstand tussen hart bak en draaistel	4,847 m
draaistel	massa draaistel	16.796 kg
	rotatietraagheid draaistel	10.973 kgm ²
	demping tussen draaistel en wiel	45.700 Ns/m
	veerstijfheid tussen draaistel en wiel	2.232.000 N/m
	afstand tussen hart draaistel en wielas	1,4 m
	aantal wielassen	2
wielstel	massa wielstel	3.033 kg
	straal wielstel	0,5 m
	coniciteit	0,05
	aantal harmonischen ter beschrijving onrondheid	1
	onrondheid per harmonische	0,0001 m

Tabel 2: Invoerparameters beladen wagon DDM

bak	lengte bak tot buffer	25,2 m
	massa bak	78,000 kg
	rotatietraagheid bak	1.300.000 kgm ²
	demping tussen bak en draaistel	44.400 Ns/m
	veerstijfheid tussen hart bak en draaistel	1.863.000 N/m
	afstand tussen hart bak en draaistel	10 m
draaistel	massa draaistel	3.600 kg
	rotatietraagheid draaistel	1.875 kgm ²
	demping tussen draaistel en wiel	5.640 Ns/m
	veerstijfheid tussen draaistel en wiel	3.534.000 N/m
	afstand tussen hart draaistel en wielas	1,25 m
	aantal wielassen	2
wielstel	massa wielstel	750 kg
	straal wielstel	0,46 m
	coniciteit	0,05
	aantal harmonischen ter beschrijving onrondheid	1
	onrondheid per harmonische	0,0001 m

De bij deze gegevens gegenereerde TrainInputfile is weergegeven in bijlage 1.

6.1.2 Genereren van de Railinputfile

Beschouwd is een baanvak met een lengte van 10 meter, dat niet wordt onderverdeeld in meerdere stukken. Met de aanwijzingen in de handleiding is een eigen RailInputfile voor dit baanvak gegenereerd. Zoals al aangegeven in hoofdstuk 5 moet de treinmodule twee keer gedraaid worden. De eerste keer worden namelijk de invoerfactoren die de oneffenheid van het spoor in de RailInputfile beschrijven vertaald naar een expliciete beschrijving van het ruwheidsprofiel in de RailInputfile. Beide RailInputfiles zijn weergegeven in bijlage 2. Voor de betekenis van de numerieke waarden hierin wordt verwezen naar de gebruiksinstructies van het prognosemodel [8].

In tabel 3 zijn de relevante baanvakparameters uit de Railinputfile samengevat. Een aantal van de parameters in de tabel is vanwege de lastige interpretatie kort verduidelijkt.

Tabel 3: Baanvakparameters

dimensies	afstand tussen dwarsliggers	0,6 m
	spoorbreedte	1,5 m
stijfheden	stijfheid spoorstaaf	9.870.000 Nm ² (1)
	gecombineerde stijfheid hellingplaat / dwarsligger	2,8·10 ⁸ N/m (2)
oneffenheid	ruwheidsgetal $\Phi_h (\Omega_0)$	0,1·10 ⁶ m ³ (3)
	normerende plaatsfrequentie Ω_0	1 rad/m (4)
	ruwheidsfactor w	3 (5)
	minimum plaatsfrequentie Ω_{\min}	0,02 rad/m (5)
	maximum plaatsfrequentie Ω_{\max}	3,1 rad/m (5)

- (1) Uitgegaan is van de meest gangbare spoorstaaf, UIC 54 [5]. De stijfheid van een enkele spoorstaaf UIC 54 kan worden berekend met de gegevens in [5]. Gegeven is $E = 210 \text{ kN/m}^2$ en $I_{\text{vert}} = 23,46 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$, waarmee volgt $EI = 4,935 \cdot 10^6 \text{ Nmm}^2$.
In de handleiding wordt niet aangegeven of nu wel of niet de gezamenlijke stijfheid van beide spoorstaven moet worden opgegeven. Er is echter wel een indicatie dat de op te geven stijfheid de gezamenlijke stijfheid betreft.
- (2) Ten aanzien van de bepaling van de gecombineerde stijfheid hellingplaat / dwarsdrager zijn in de basisrapportage [4] van de module spoorverkeer geen aanwijzingen gegeven. Om die reden wordt de default waarde uit de handleiding overgenomen: $2,8 \cdot 10^8 \text{ N/m}$. Het verdient aanbeveling de basisrapportage of de handleiding op dit punt te verduidelijken.
- (3) Met het ruwheidsgetal wordt het oneffenheidsspectrum bij de genormeerde plaatsfrequentie gedefinieerd. De defaultwaarde $0,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ uit de handleiding is een gemiddelde waarde voor spoorbanen (zie ook figuur 5.1 in [2]).
- (4) De normerende plaatsfrequentie is te interpreteren als een basiswaarde voor de beschrijving van de golflengten van oneffenheden van de spoorbaan. De in de handleiding vermelde defaultwaarde is een gemiddelde waarde voor spoorbanen (zie ook figuur 5.1 in [2]).
- (5) Voor de overige gegevens benodigd voor het genereren van de railonvlakheid (w , Ω_{\min} , en Ω_{\max}) zijn defaultwaarden uit de handleiding aangehouden. Deze waarden zijn heel algemeen toepasbaar, en hoeven derhalve niet op verschillende situaties te worden toegesneden.

6.1.3 Analyse van de berekende treinbelasting

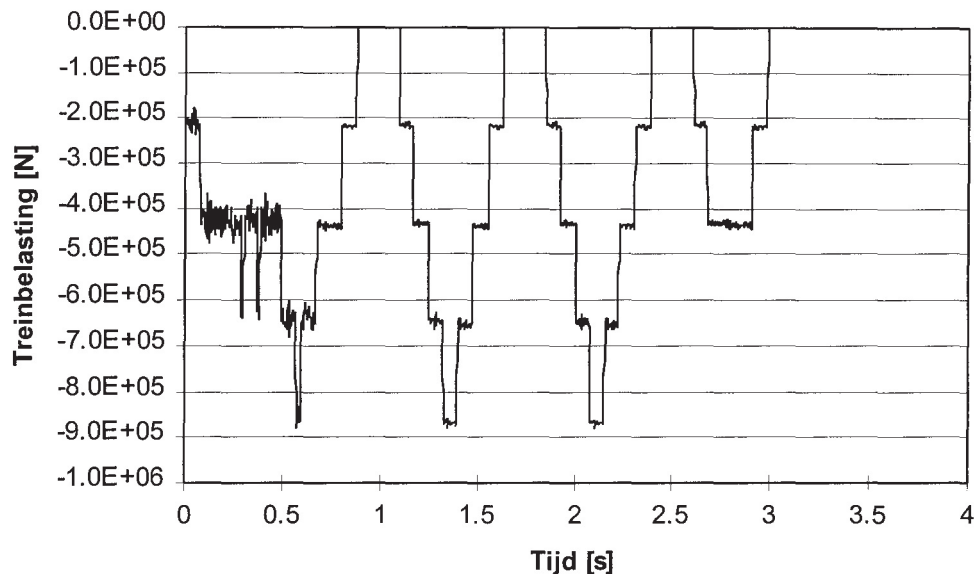
Met de TrainInputfile en de RailInputfile is de totale belasting vanuit de trein op het stuk spoor van 10 m berekend als functie van de tijd. De uitvoer bestaat uit twee files met extensies *.h0 en *.v0 (er is maar één stukje spoor beschouwd, en het programma rekent voor dit stukje gescheiden de horizontale en de verticale treinbelasting uit). Beide files bevatten 2 lange kolommen. De eerste kolom bevat de tijdstappen waarover is gerekend, de tweede kolom bevat de op de corresponderende tijdstippen berekende treinbelasting. In figuur 1 is de berekende verticale belasting grafisch weergegeven.

De berekende horizontale belasting is niet interessant. Zoals mocht worden verwacht zijn in geval van volledig ontbreken van oneffenheden van het spoor in horizontale richting de berekende horizontale belastingen op ieder tijdstip gelijk aan nul.

Aan de hand van figuur 1 en de onderliggende numerieke uitvoer van het programma zijn een tweetal basale controles uitgevoerd:

- de totale lengte van het belastingsignaal;
- de grootte van en intervallen tussen de berekende belastingensprongen.

Daarnaast is het belastingspectrum van dit signaal geanalyseerd.



Figuur 1: Berekende verticale belasting op het beschouwde baanvak van 10 meter

Lengte van het belastingsignaal.

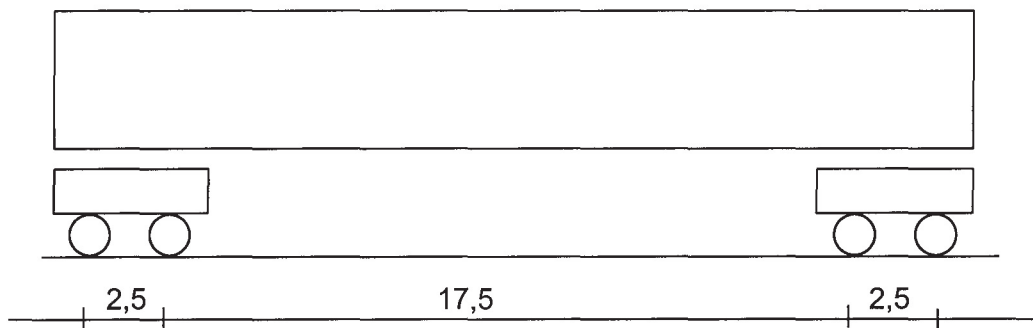
Uit de grafiek kan worden afgelezen dat na ongeveer 3 s de belasting op het baanvak weer nul wordt. Deze duur kan worden gecontroleerd gegeven de treinsnelheid van 120 km/h (33,33 m/s), de totale lengte van de trein tussen het voorste wiel van de locomotief en het achterste wiel van de laatste wagon en de lengte van het beschouwde baanvak. Uit de gegevens van de locomotief en wagons kan worden berekend dat deze afstand ca. 89,5 m bedraagt. De lengte van het beschouwde baanvak is 10 m. De totale duur van de passage van alle wielen van de trein moet derhalve $(89,5 + 10) / 33,33 = 3$ s bedragen.

Grootte van en intervallen tussen de belastingsprongen

In de figuur zijn duidelijk de tijdstippen te herkennen waarop wielstellen onder de trein van de locomotief en de wagons het beschouwde baanvak bereiken en verlaten.

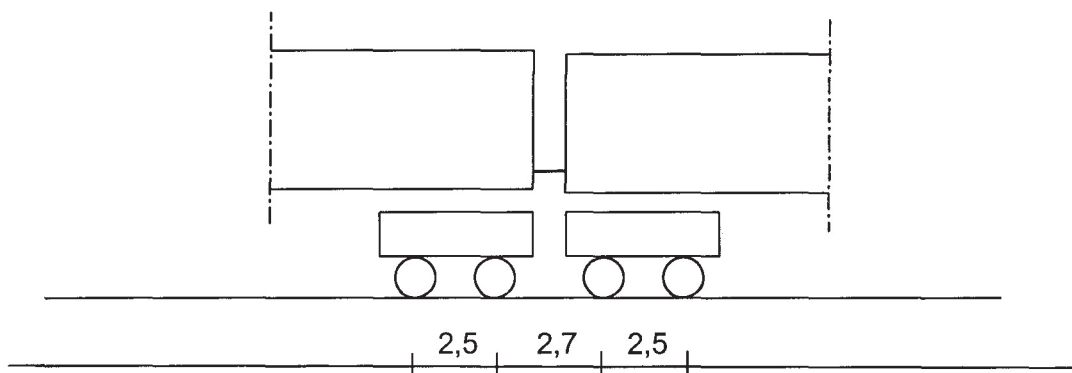
Het eerste deel van het belastingsignaal tot en met de eerste smalle belastingpiek van ca. $8,8 \cdot 10^5$ N correspondeert met de passage van de locomotief. Het belastingpatroon vanaf deze eerste piek correspondeert met de passages van de wielstellen van de drie wagons. Hierin zijn regelmatige belastingsprongen te zien. Deze sprongen corresponderen met de belasting van de afzonderlijke wielstellen van de wagons op het baanvak. Uitgaande van een gelijkmatige verdeling van het totale gewicht van de wagons (inclusief draaistellen en wielstellen $8,8 \cdot 10^5$ N) over de vier wielstellen onder de wagons, oefent elk wielstel een belasting uit van $2,2 \cdot 10^5$ N. Dit stemt overeen met de grootte van de in de figuur waar te nemen belastingsprongen.

In de figuur kunnen drie intervallen worden onderscheiden waarop de treinbelasting nul wordt. De lengte van deze intervallen bedraagt 0,22 s. Deze intervallen corresponderen met de afwezigheid van wielstellen op het beschouwde baanvak op de momenten dat de voorste wielstellen van een wagon het baanvak al zijn gepasseerd, maar de achterste wielstellen er nog niet zijn aangekomen. Aan de hand van figuur 2 is gecontroleerd dat de lengte van deze tijdsintervallen klopt. De tijd benodigd om $17,5 \text{ m}$ (wielafstand) - $10,0 \text{ m}$ (baanvaklengte) af te leggen bij een snelheid van $33,33 \text{ m/s}$ bedraagt $7,5 / 33,33 = 0,22 \text{ s}$.



Figuur 2: Wielafstanden onder de wagons

Tenslotte zijn de laatste twee bredere belastingpieken van ca. $8,8 \cdot 10^5 \text{ N}$ gecontroleerd. De duur van de pieken bedraagt volgens de berekening met treinmodule 0,07 s (zie ook figuur 1). Deze tijdsduur is gecontroleerd aan de hand van figuur 3. De afstand tussen de buitenste wielen in de figuur bedraagt 7,7 m. Derhalve zal er over een afstand van $10,0 \text{ m}$ (baanvaklengte) - $7,7 \text{ m}$ (tussenafstand buitenste wielen) sprake zijn van een belasting van vier wielstellen op het baanvak. Bij een treinsnelheid van $33,33 \text{ m/s}$ wordt deze afstand afgelegd in $2,3 / 33,33 = 0,07 \text{ s}$.

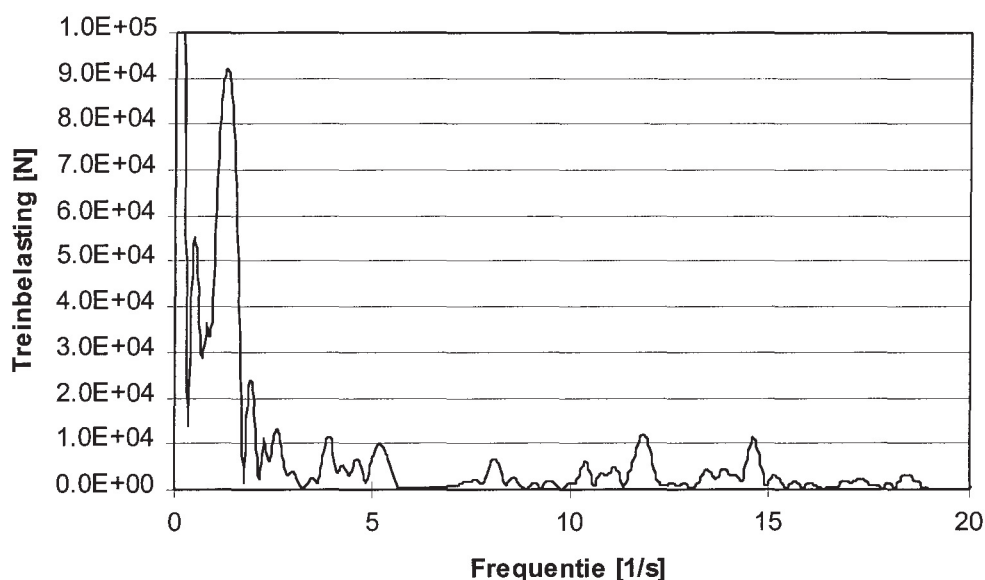


Figuur 3: Wielafstanden tussen de wagons

Analyse van het belastingspectrum

Het L400 trillingsprognose-programma bevat ook een module genaamd FFOUR waarmee belastingsignalen in het tijdsdomein kunnen worden getransformeerd naar het frequentiedomein en omgekeerd. Het belastingsignaal in het frequentiedomein geeft snel een goed inzicht in de ligging van dominantie belastingfrequenties.

In figuur 4 is het belastingspectrum van de treinpassage weergegeven.



Figuur 4: Belastingspectrum van de treinpassage

In de figuur is een grote piek waar te nemen bij 1,3 Hz. Deze piek komt overeen met de tijdsduur van 0,75 s tussen twee belastingpieken in het tijdsignaal dat is weergegeven in figuur 1. Deze 0,75 s is de tijdsduur benodigd voor de passage van een hele wagon van buffer tot buffer.

6.2 Parametervariatie

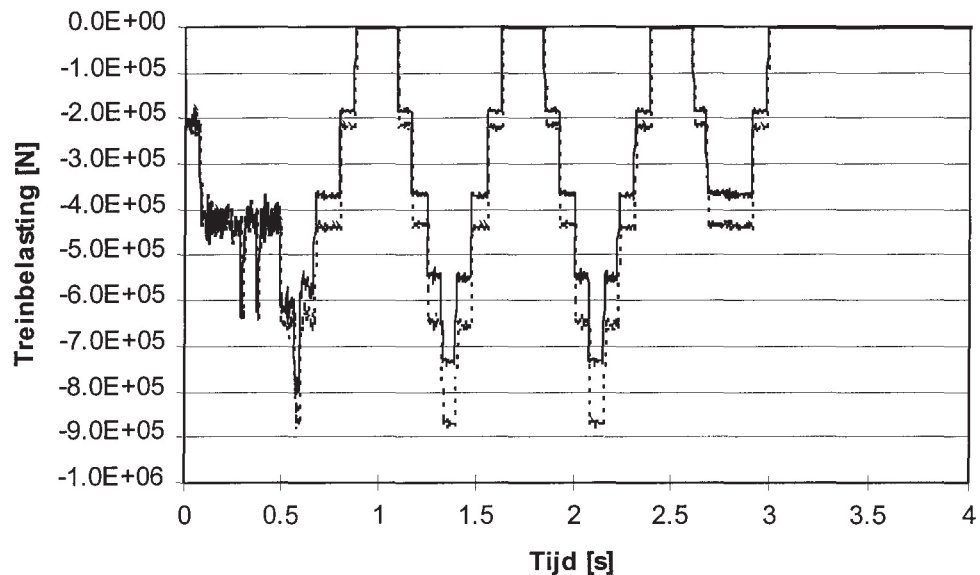
6.2.1 Lege wagons

Om de invloed van het gewicht van de trein op de berekende belastingen te onderzoeken is precies dezelfde som gemaakt als beschreven in paragraaf 6.1, maar dan met de gegevens voor lege wagons. Tabel 4 bevat de gegevens van de lege DDM wagons.

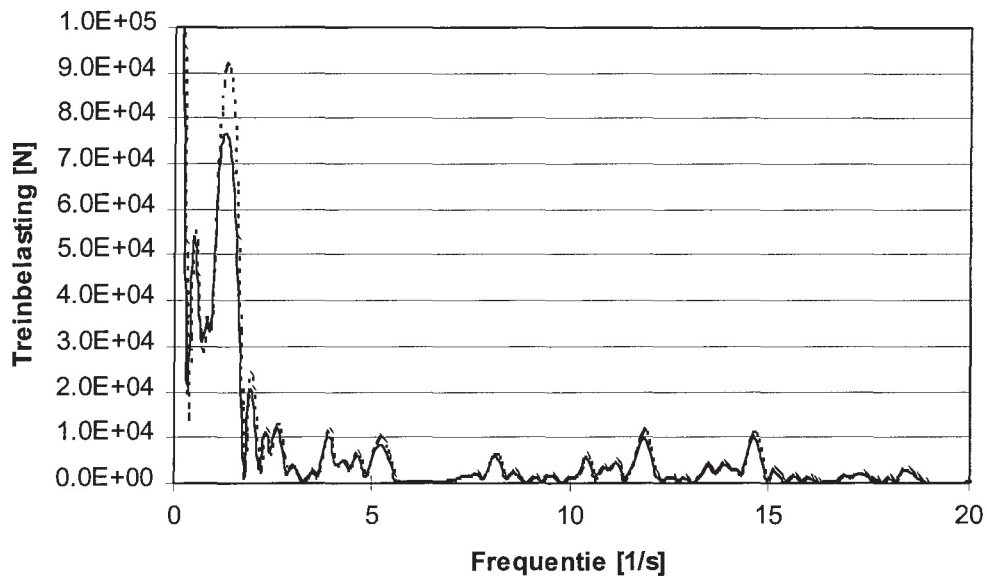
Tabel 4: Invoerparameters lege wagon DDM

bak	lengte bak tot buffer	25,2 m
	massa bak	64.200 kg
	rotatietraagheid bak	1.070.000 kg m ²
	demping tussen bak en draaistel	30.300 Ns/m
	veerstijfheid tussen hart bak en draaistel	1.407.000 N/m
	afstand tussen hart bak en draaistel	10 m
draaistel	massa draaistel	3.600 kg
	rotatietraagheid draaistel	1.875 kgm ²
	demping tussen draaistel en wiel	4.837 Ns/m
	veerstijfheid tussen draaistel en wiel	2.600.000 N/m
	afstand tussen hart draaistel en wielas	1,25 m
	aantal wielassen	2
wielstel	massa wielstel	750 kg
	straal wielstel	0,46 m
	coniciteit	0,05
	aantal harmonischen ter beschrijving onrondheid	1
	onrondheid per harmonische	0,0001 m

In de figuren 5 en 6 zijn de resultaten van de berekeningen weergegeven. Figuur 5 geeft de belasting in het tijdsdomein naast de belasting volgens de defaultsom. Figuur 6 geeft de belasting in het frequentiedomein naast de belasting volgens de defaultsom.



Figuur 5: Verticale belasting op het baanvak in geval van lege wagons



Figuur 6: Belastingenspectrum van de treinpassage in geval van lege wagons

Uit de figuren 5 en 6 kan worden opgemaakt dat de berekende belastingen van de wagons naar rato afnemen met de lagere massa en daarmee de lagere wieldruk. Dit stemt overeen met hetgeen verwacht mag worden.

6.2.2 Andere treinsnelheden

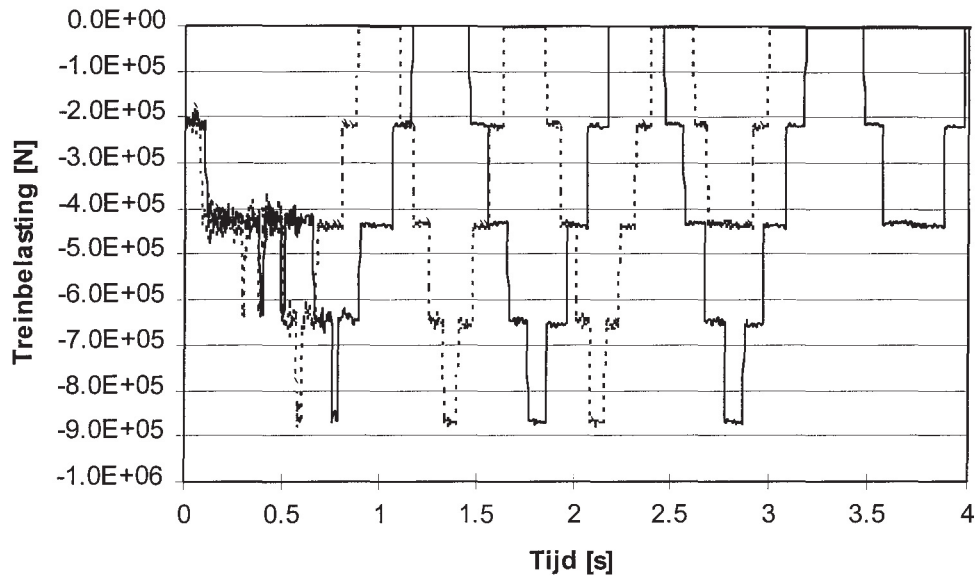
Om de invloed van de treinsnelheid te bekijken zijn een tweetal sommen gemaakt waarin ten opzichte van de defaultsom alleen de treinsnelheden zijn veranderd.

Lagere en hogere treinsnelheid

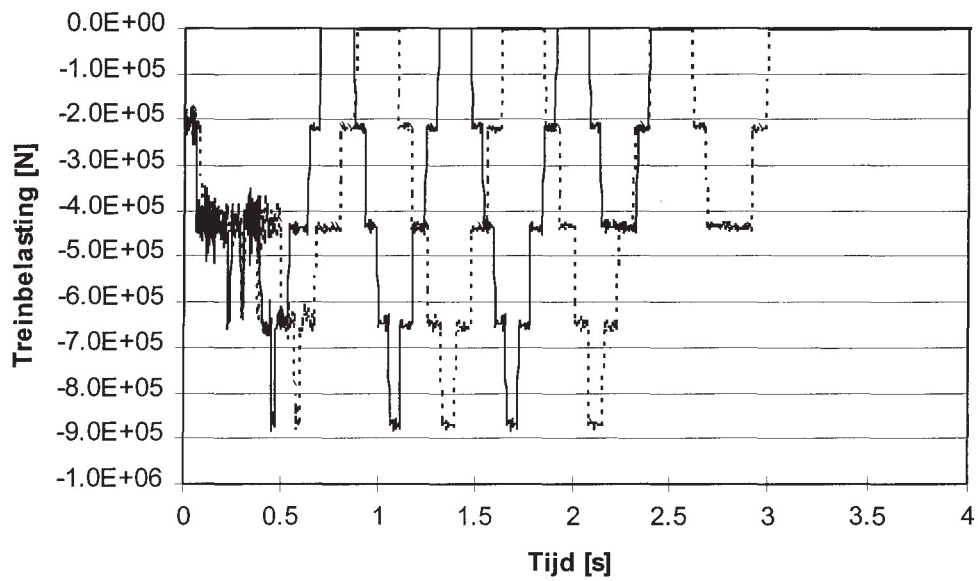
In de figuren 7 en 8 zijn de berekende belastingen in geval van een treinsnelheid van 90 km/h respectievelijk 150 km/h weergegeven naast de berekende belastingen bij de defaultsnelheid van 120 km/h.

Uit de figuren blijkt dat de grootte van de belastingen nauwelijks beïnvloed wordt door de treinsnelheid. Blijkbaar zijn de railonvlakheid, de railstijfheid en de onrondheid van de wielstellen te beperkt om significante belastingafwijkingen ten opzichte van de 'statische' belasting vanuit de wielstellen te veroorzaken. Dit kon overigens ook al uit figuur 1 worden afgeleid.

De toename respectievelijk afname van de totale tijdsduur van de passage van alle wielstellen onder de trein is voor beide gevallen gecontroleerd en blijkt te kloppen.



Figuur 7: Belastingen tijdens treinpassage bij lagere snelheid

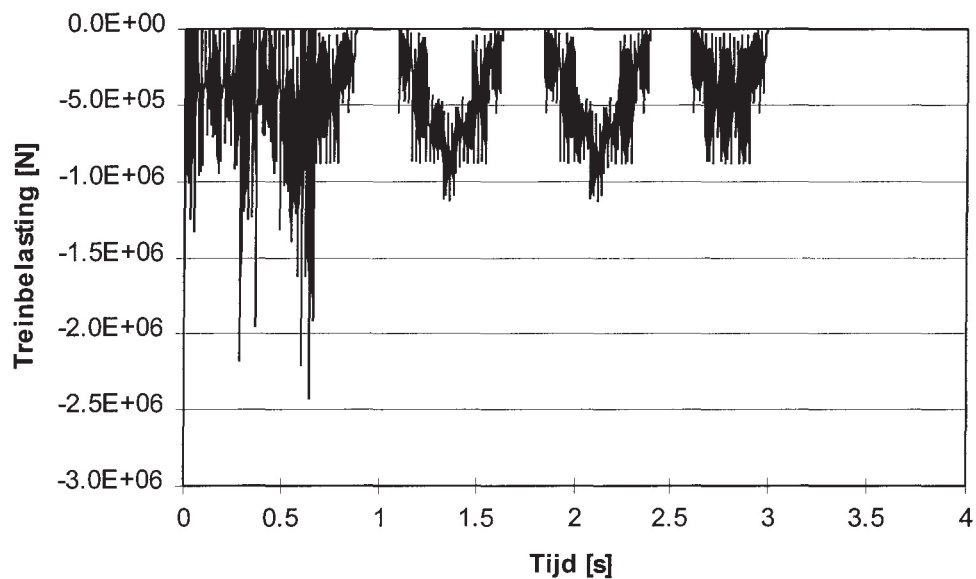


Figuur 8: Belastingen tijdens treinpassage bij hogere snelheid

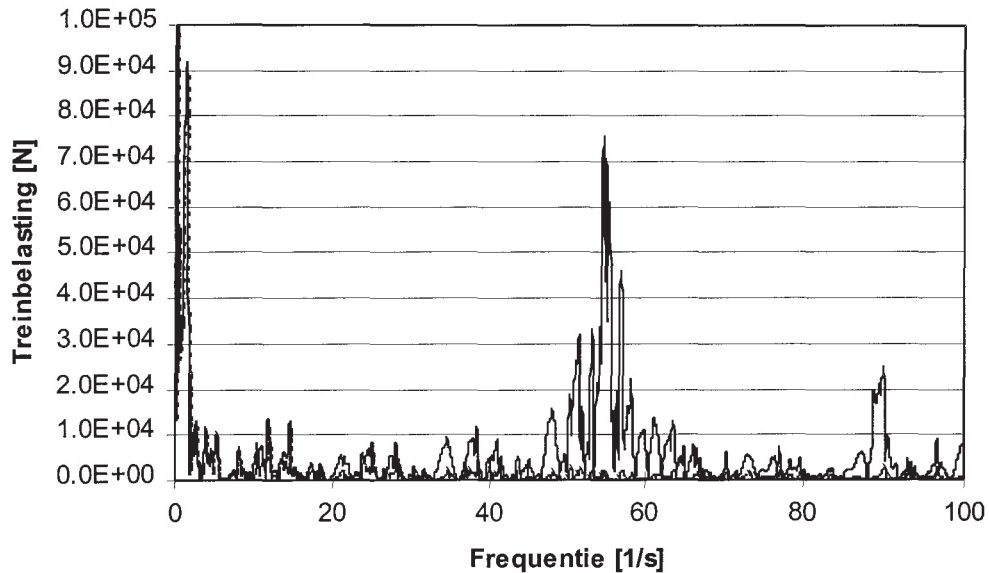
6.2.3 Lage railstijfheid

Indien wordt uitgegaan van een 100 keer lagere stijfheid van de rails zullen de wielstellen grotere verticale verplaatsingen ondergaan als gevolg van grotere doorbuiging van de rails tussen de dwarsdragers. In deze paragraaf zijn de effecten hiervan op het berekende belastingsignaal onderzocht. Het belastingsignaal en de Fourier-getransformeerde zijn weergegeven in de figuren 9 en 10.

Uit de figuren kan worden opgemaakt dat de lage railstijfheid een sterke toename van de dynamische belastingen op het spoor veroorzaakt in het hogere frequentiegebied rond ca. 55 Hz (zie figuur 10). Deze frequentie 55 Hz correspondeert precies met de afstand van 0,6 m tussen de dwarsdragers bij een treinsnelheid van 120 km/h ($33,33 / 0,6$).



Figuur 9: Belastingen tijdens treinpassage bij lage stijfheid van de rails



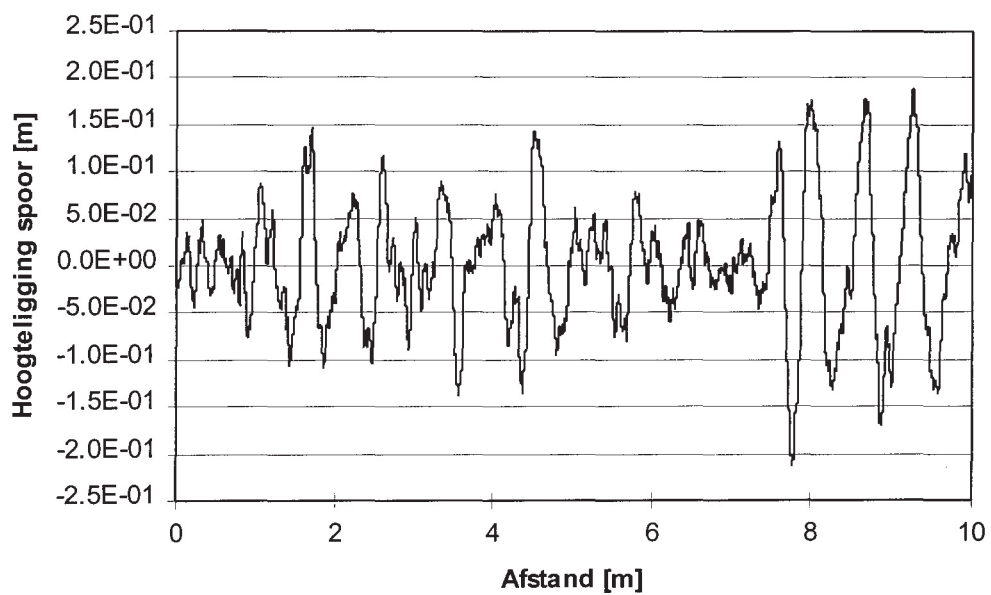
Figuur 10: Belastingspectrum van de treinpassage in geval van lage railstijfheid

6.2.4 Grotere oneffenheid van het spoor

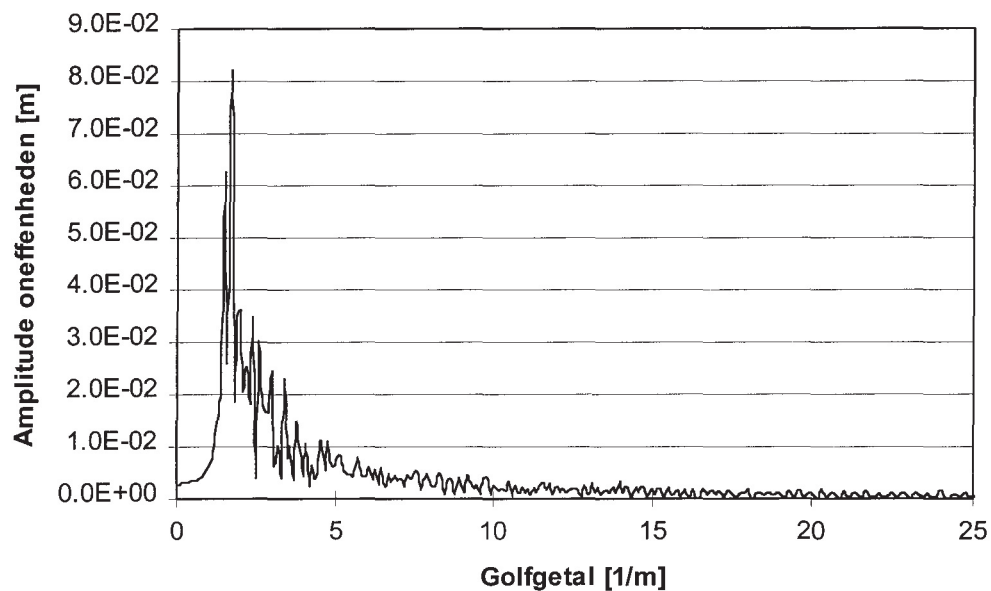
In geval van een grote oneffenheid van het spoor zullen de treinstellen grotere dynamische belastingen op het spoor veroorzaken. Om te verifiëren of dit ook met het computermodel wordt gevonden is een berekening gemaakt waarbij ten opzichte van de defaultgegevens een 1000 keer groter ruwheidsgetal $\Phi_h(\Omega_0)$ is aangehouden ($\Phi_h(\Omega_0) = 100 \cdot 10^{-6}$ in plaats van $\Phi_h(\Omega_0) = 0,1 \cdot 10^{-6}$). Het profiel van verticale ligging van het spoor dat daarmee wordt berekend is gegeven in figuur 11. In figuur 12 is het daaruit berekende oneffenheids-spectrum weergegeven.

Op grond van figuur 12 kan worden geconcludeerd dat voor waarden van het golfgetal tussen 2 m^{-1} en 3 m^{-1} de bijdrage aan de oneffenheid van het spoor relatief groot is. Deze waarden komen overeen met een golflengte tussen 0,33 m en 0,50 m. Bij een treinsnelheid van 33,3 m/s wordt derhalve een sterke verhoging verwacht van de belastingen in het frequentiegebied tussen ca. 60 Hz en 100 Hz ten opzichte van de defaultsom.

Naar aanleiding van bovenstaande moet overigens worden opgemerkt dat het onduidelijk is in hoeverre het berekende oneffenheidspectrum bij verhoging van het ruwheidsgetal $\Phi_h(\Omega_0)$ ten opzichte van de default-waarde een representatieve situatie oplevert. De hier berekende zeer dominante aanwezigheid van oneffenheden van het spoor met een korte golflengte van 0,33 m tot 0,50 m oogt weinig realistisch. Het is daarom aan te bevelen nadere informatie te geven ten aanzien van de te hanteren waarden voor deze parameter, al dan niet in samenhang met de andere parameters waarmee de oneffenheid wordt beschreven, zodanig dat in de praktijk voorkomende oneffenheden van het spoor bijvoorbeeld ingedeeld in spoorklassen kunnen worden gedefinieerd.

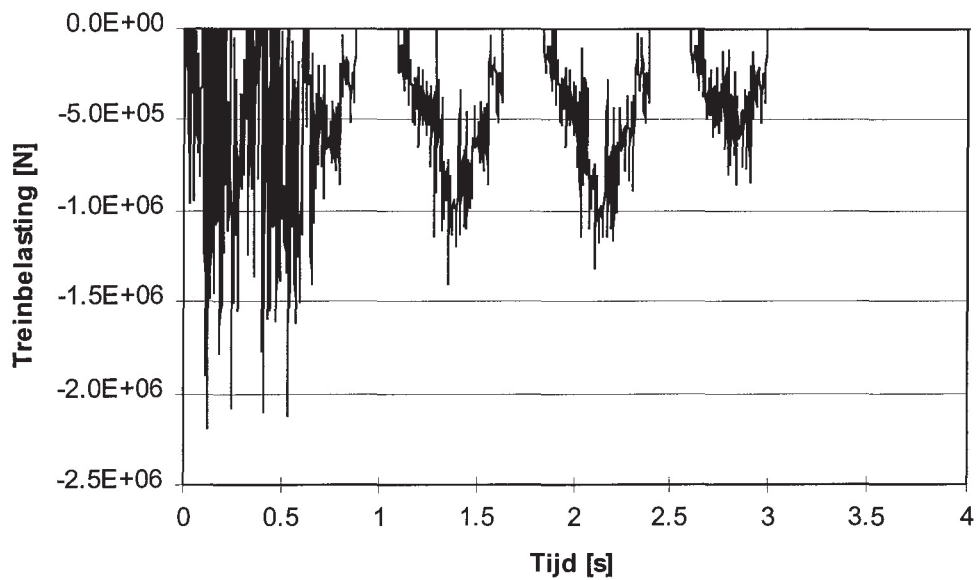


Figuur 11: Hoogteligging van het spoor voor verhoogde waarde ruwheidsgetal

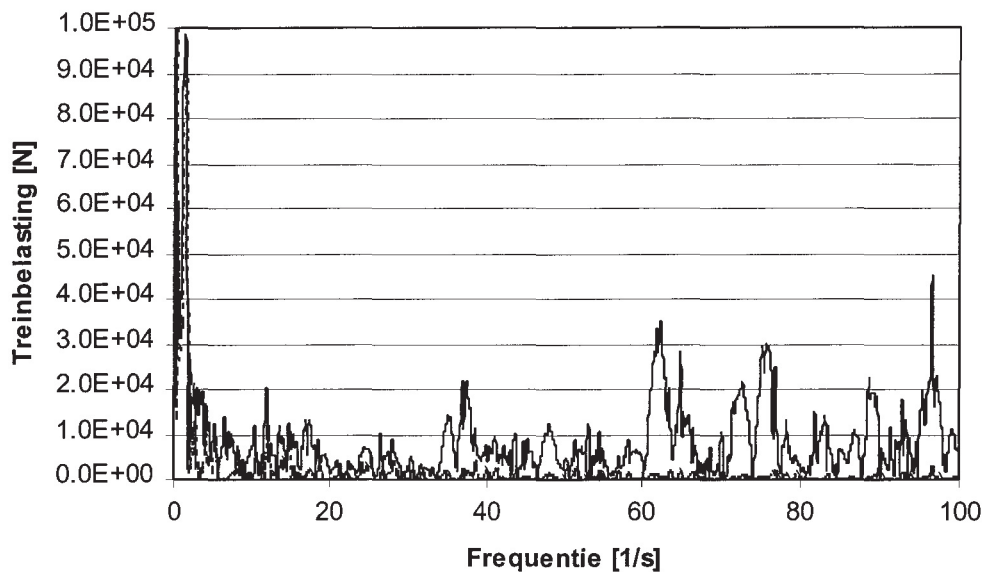


Figuur 11: Oneffenheidsspectrum van het spoor voor verhoogd ruwheidsgetal

Bij het verhoogde oneffenheidsprofiel zijn het belastingsignaal en belastingspectrum van de passerende trein berekend. De resultaten in de figuren 13 en 14 stemmen overeen met de verwachting.



Figuur 13: Treinbelasting in geval van verhoogde oneffenheid



Figuur 13: Belastingspectra treinpassage (stippellijn is spectrum defaultsom)

7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1 Rapportage

De theoretische modellering van de dynamische belastingen op de ondergrond door passerende treinen is duidelijk beschreven in de betreffende rapportage [4]. Wel blijkt het noodzakelijk om voor het volledige beeld ook de 'voorloper' uit de CUR D11 studie bij de hand te hebben [2].

7.2 Gebruiksvriendelijkheid van het PC-model

Het computermodel is relatief eenvoudig te gebruiken. De gebruiksaanwijzingen in de gebruiksinstructies [8] bieden voldoende houvast om relatief snel berekeningen te kunnen maken.

Voor een aantal invoerparameters is het echter wel wenselijk over wat nadere informatie te beschikken. Dit betreft:

- de in de RailInputfile op te geven waarde voor de stijfheid van de spoorstaaf. Het is onduidelijk of nu wel of niet de stijfheid van een enkele staaf moet worden gegeven of de gecombineerde stijfheid van twee staven. Opmerkelijk is dat de defaultwaarde in de RailInputfile gelijk is aan vier keer de stijfheid van de meest gangbare spoorstaaf UIC54;
- de in de RailInputfile op te geven waarde voor de parameter die in de gebruiksinstructies van het model is aangeduid met 'Stijfheid van een pad tussen staaf en dwarsligger'. Het is niet duidelijk wat hiermee precies wordt bedoeld, en daarmee evenmin hoe de gegevens van bovenbouw en ballastbed uit de rapportage van HR [5] kunnen worden gebruikt om een op een concrete situatie toegespitste waarde te geven;
- de in de RailInputfile op te geven waarden voor het ruwheidsgetal $\Phi_h(\Omega_0)$ en de normerende plaatsfrequentie Ω_0 . De interpretatie van deze parameters is lastig en het is daarom met het oog op de gebruiksvriendelijkheid aan te bevelen om bijvoorbeeld een voorzet te geven voor de aan te houden waarden bij verschillende 'spookklassen'.

7.3 Resultaten van uitgevoerde berekeningen

De numerieke resultaten van berekeningen met de module zijn goed te interpreteren en stemmen overeen met hetgeen verwacht mag worden, ook als belangrijke invoerparameters worden gevarieerd.

Een onduidelijkheid is er voor wat betreft de resultaten in geval van een sterk verhoogde waarde van het ruwheidsgetal $\Phi_h(\Omega_0)$. Dit blijkt te leiden tot een zeer dominante en weinig realistisch ogende aanwezigheid van oneffenheden van het spoor met een korte golflengte van 0,33 m tot 0,50 m. Het is daarom aan te bevelen nadere informatie te geven ten aanzien van de te hanteren waarden voor deze parameter in relatie tot in de praktijk voorkomende oneffenheden van het spoor bijvoorbeeld ingedeeld in spookklassen (zie ook vorige paragraaf).

LITERATUUR

1. Prognosemodel trillingshinder, rapport 95-2; Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving CUR, februari 1995
2. Bronmodel voor treinverkeer, W.M.G. Courage (TNO-bouw), TNO-rapport nr. 93-CON-R0057, 1993
3. Deelplan I (L-410), CUR/COB, versie 2, 1 november 1995
4. Dynamische belastingen door railverkeer t.b.v. het prognosemodel L400, C.M. Steenhuis, P.C. van Staalduinen, W.M.G. Courage (TNO-bouw), TNO-rapport nr. 96-CON-R0844, 24 september 1997
5. Gegevens bovenbouw en ballastbed, drs. ir. E.R. Kuiper (Holland Railconsult), rapport nr. JF/VC/70930 (versie 2), 22 augustus 1997
6. Gegevens treinmaterieel, dr. ir. H.G. Stuit (Holland Railconsult), rapport nr. VC/97.000124, juli 1997
7. Verificatie CUR D-11 prognosemodel voor trillingen, W.J. van Niekerk, M.C.W. Kimenai, en M.Th.J.H. Smits (Fugro Ingenieursbureau b.v.), Fugro-rapport M-0099, november 1994
8. Gebruiksaanwijzingen COB L400 prognosemodel (concept), ir. C.M. Steenhuis en ir. P.C. van Staalduinen (TNO-bouw), TNO-rapport nr. 98-CON-R0977, 2 juni 1998

block_EL1700
4.030000e+004
1.577974e+005
1.390000e+005
2.400000e+007
-4.847000e+000
1.390000e+005
2.400000e+007
4.847000e+000
1
6.247000e+000

suspen_s1_EL1700
1.679600e+004
1.097339e+004
1.390000e+005
2.400000e+007
4.570000e+004
2.232000e+006
1.400000e+000
2
1.400000e+000
1.109400e+001

wheel_w1_EL1700
3.032500e+003
5.000000e-001
5.000000e-002
2.109690e+005
4.570000e+004
2.232000e+006
1
1.000000e-004
4
0.000000e+000
2.800000e+000
9.694000e+000
1.249400e+001

block_DDM_loopbak_beladen
7.800000e+004
1.300000e+006
4.440000e+004
1.863000e+006
-1.000000e+001
4.440000e+004
1.863000e+006
1.000000e+001
3
2.779700e+001
5.299700e+001
7.819700e+001

suspen_s1_DDM_loopbak_beladen

3.600000e+003
1.875000e+003
4.440000e+004
1.863000e+006
5.639681e+003
3.534000e+006
1.250000e+000
6
1.779700e+001
3.779700e+001
4.299700e+001
6.299700e+001
6.819700e+001
8.819700e+001

wheel_w1_DDM_loopbak_beladen

7.500000e+002
4.600000e-001
5.000000e-002
2.163105e+005
5.639681e+003
3.534000e+006
1
1.000000e-004
12
1.654700e+001
1.904700e+001
3.654700e+001
3.904700e+001
4.174700e+001
4.424700e+001
6.174700e+001
6.424700e+001
6.694700e+001
6.944700e+001
8.694700e+001
8.944700e+001

einde

```
4096
8192
0.005
0.6
1.5
9.87e6
2.8e8
120
0
10
1
push
ruwheid1.dat
```

```
0.1
1.
3.
0.02
3.1
300
end
```

```
0
1.
3.0
0.02
3.1
300
end
```

```

4096
8192
5.000000e-003
6.000000e-001
1.500000e+000
9.870000e+006
2.800000e+008
1.200000e+002
0.000000e+000
1.000000e+001
1
database
-5.352774e-004 -1.375209e-002 3.554701e+000 verticale ruwheid
-5.643717e-004 1.736764e-003 3.296007e+000
-5.197518e-004 1.156056e-002 -2.175179e+000
-5.236804e-004 -1.424402e-002 -3.150178e+000
-5.839867e-004 -4.850561e-003 2.018712e+000
...
...
...
0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000 horizontale ruwheid
...
...
0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
0.000000e+000 0.000000e+000 0.000000e+000
end

```