DEKRA Rail

Vaststellen effect van ballastverlijming

Door injecteren met Durflex

9 juli 2025

Vaststellen effect van ballastverlijming

Door injecteren met Durflex

Opdrachtgever	:	ProRail - Programma Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS) T.a.v. Irene Kraak
Adres	: :	Postbus 2038 3500GA Utrecht
Uw kenmerk	:	Opdrachtnummer 4119172
Ons kenmerk	:	DR/25/230444/009
Auteur(s)	:	Eric Deckers, Jaap Horst
Onderzoek	:	Jaap Horst, Eric Deckers, Patrick Gottmers
Referent	:	Jochem Wagemakers
Vrijgave	:	Jaap Horst
Datum	:	9 juli 2025
Versie	:	4.0 definitief

© 2025 DEKRA Rail bv
Concordiastraat 67, 3551 EM, Utrecht, Nederland.
Niets uit dit rapport mag worden gebruikt voor andere doeleinden dan door de opdrachtgever met DEKRA Rail is overeengekomen.

Managementsamenvatting

Wegens de groeiende problematiek met betrekking tot trilling en geluidsoverlast in en rond het spoor heeft ProRail vanuit de Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS) DEKRA Rail gevraagd om mechanische testen uit te voeren op ballast, dit om te achterhalen of het toevoegen van Durflex, een type polyurethaanschuim, aan de ballast een positieve werking heeft op de stijfheid en/of de demping van het ballastbed. De uitgevoerde test is gebaseerd op de DIN45673-5 / EN 17282 normering, eveneens onderdeel van de ProRail SPC00061 voor ballastmatten.

In deze rapportage worden de bevindingen gerapporteerd alsmede de gebruikte werkwijze om tot het resultaat te komen.

Het hoofddoel van deze test is om het verschil in stijfheid en demping tussen de standaard ballast en de met polyurethaan (Durflex) verlijmde ballast vast te stellen.

Het injecteren van de ballast heeft een duidelijke invloed op het gedrag. In vergelijking tot de situatie zonder Durflex zijn er mèt Durflex de volgende verschillen:

1) De stijfheid is bij Durflex bij alle gemeten frequenties waarbij geldige resultaten verkregen zijn (1 t/m 20 Hz) aanzienlijk lager. Dit varieert van een factor 2 tot bijna een factor 4.
2) De relatieve demping (tan δ) bij Durflex is bij bovengenoemde frequenties aanzienlijk groter, ongeveer een factor 1,5. Deze demping is bij ballast zonder Durflex 15% tot 25% van de energie die in het systeem komt, bij ballast met Durflex is dit 27% tot 33%, afhankelijk van de frequentie.
3) De absolute demping (gedissipeerde energie) is bij ballast met Durflex groter dan zonder Durflex, een factor 3 tot 6.
4) Bij de opeenvolgende metingen, met daartussen steeds een duurtest, wordt de stijfheid steeds lager bij ballast met Durflex, waarbij het verschil tussen de laatste test en die daarvoor niet erg groot is (Figuur 6).
5) Dit treedt niet op bij de continue stijfheidsmeting tijdens de duurtest van de ballast met Durflex, hierbij blijft de stijfheid vrijwel constant (Figuur 13).
6) Bij het initiële belasten bij Durflex (vóór de tests) treedt er veel minder verdichting van de ballast met Durflex op dan bij initieel belasten bij alleen ballast.
7) Tijdens de duurtests bij ballast met Durflex treedt indrukking op, die echter ná de test grotendeels terugveert (voor ca. 70%). Bij ballast zonder Durflex veert het minder terug.
8) Bij alle frequenties, ook de hogere, is het verschil in vibratieniveau tussen de dwarsligger en de bodem van de ballastbak groter in geval van ballast met Durflex.

De oorzaak voor de geconstateerde verschillen, en dan met name de aanzienlijk lagere stijfheid, is niet onderzocht. Waarschijnlijk is het grootste verschil dat de ballast met Durflex meer zijn oorspronkelijke structuur behoudt, en de ballast zonder Durflex meer gecompacteerd wordt door de wisselende belastingen. Mogelijk wordt bij ballast met Durflex een deel van de krachten overgedragen van ballaststeen naar ballaststeen via een laagje Durflex daartussen, wat ook een lagere stijfheid veroorzaakt.

Inhoudsopgave

Managementsamenvatting **2**

1 Inleiding **5**

2 Vraagstelling **5**

3 Methode **5**
3.1 Testopstelling 7
3.2 Testplan 9
3.2.1 Wijze van meten 9
3.2.2 Invering van de dwarsligger: 9
3.2.3 Bepaling trillingsniveaus 9
3.3 Bepaling stijfheid en demping 10
3.4 Beschrijving van de gebruikte apparatuur en instrumentatie 11
3.5 Observaties tijdens uitvoering van de test 11

4 Resultaten **13**
4.1 Resultaten stijfheid en demping 13
4.2 Verloop van verplaatsing tijdens duurtests 16
4.3 Resultaten versnellingsopnemers 18
4.3.1 Verschil in RMS waardes 19
4.3.2 Amplitudes per frequentie 20
4.4 Doorvloeien van Durflex tussen de ballast 22

5 Conclusies **24**

Bijlage 1: Testplan **25**

Bijlage 2: Resultaten tests van stijfheid en demping **26**

Bijlage 3: Resultaten versnellingsopnemers 1Hz **29**

Bijlage 4: Resultaten versnellingsopnemers 5Hz **31**

Bijlage 5: Resultaten versnellingsopnemers 10Hz **33**

Bijlage 6: Resultaten versnellingsopnemers 20Hz **35**

Bijlage 7: Resultaten versnellingsopnemers 40Hz **37**

Revisie Overzicht

Versie	Status	Datum	Beschrijving	Auteur
0.1	Concept	29-10-2024	Concept 1	Eric Deckers
0.2	Concept	11-04-2025	Toevoegen resultaten versnellingsopnemers	Eric Deckers
0.3	Concept	22-04-2025	Verder compleet maken	Jaap Horst
1.0	Definitief	23-04-2025	Definitief na interne referentie	Jaap Horst
2.0	Definitief	19-06-2025	Definitief met wijzigingen naar aanleiding opmerkingen ProRail	Jaap Horst
3.0	Definitief	26-06-2025	Definitief, § 4.3.1 toegevoegd	Jaap Horst
4,0	Definitief	9-07-2025	Definitief, kleine wijzigingen op verzoek opdrachtgever	Jaap Horst

1 Inleiding

Wegens de groeiende problematiek met betrekking tot trilling en geluidsoverlast in en rond het spoor heeft ProRail vanuit de Innovatieagenda Bronaanpak Spoortrillingen (IBS) DEKRA Rail gevraagd om mechanische testen uit te voeren op ballast, dit om te achterhalen of het toevoegen van Durflex (een soort polyurethaanschuim) aan de ballast een positieve werking heeft op de stijfheid en/of de demping van het ballastbed. De uitgevoerde test is gebaseerd op de DIN45673-5 / EN 17282 normering, eveneens onderdeel van de ProRail SPC00061 voor ballastmatten.

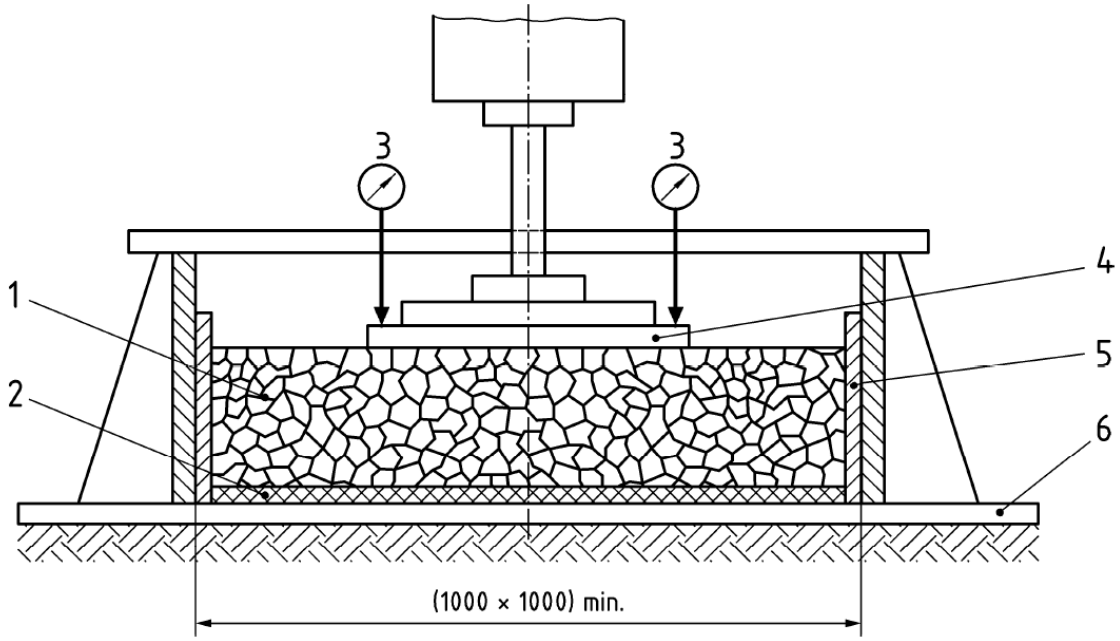
In deze rapportage worden de bevindingen gerapporteerd alsmede de gebruikte werkwijze om tot het resultaat te komen.

2 Vraagstelling

Het hoofddoel van deze test is om het verschil in stijfheid en demping tussen de standaard ballast en de met polyurethaan (Durflex) verlijmde ballast vast te stellen.

3 Methode

Als grondslag voor dit onderzoek geldt de EN17282 norm en de voorganger daarvan, de DIN45673-5. Hiernaar wordt verwezen in de ProRail SPC00061 “Productspecificatie Ballastmatten”, wat wordt gebruikt is specifiek de omschrijving van de duurtest voor ballastmatten. In deze norm wordt de onderstaande test voorgeschreven waarin gebruik wordt gemaakt van een ‘ballast box’ (EN17282, Annex D). In Figuur 1 staat een schematische weergave van deze ‘ballast box’.



Key

1	Ballast	4	Circular loading plate
2	Under-ballast mat	5	Elastic liner (rigidity of liner is lower than that of the under-ballast mat to impede ballast creep)
3	Gauge on a rigid reference frame	6	Steel plate rigidly mounted on a base

Figuur 1: 'Ballast Box' EN17282.

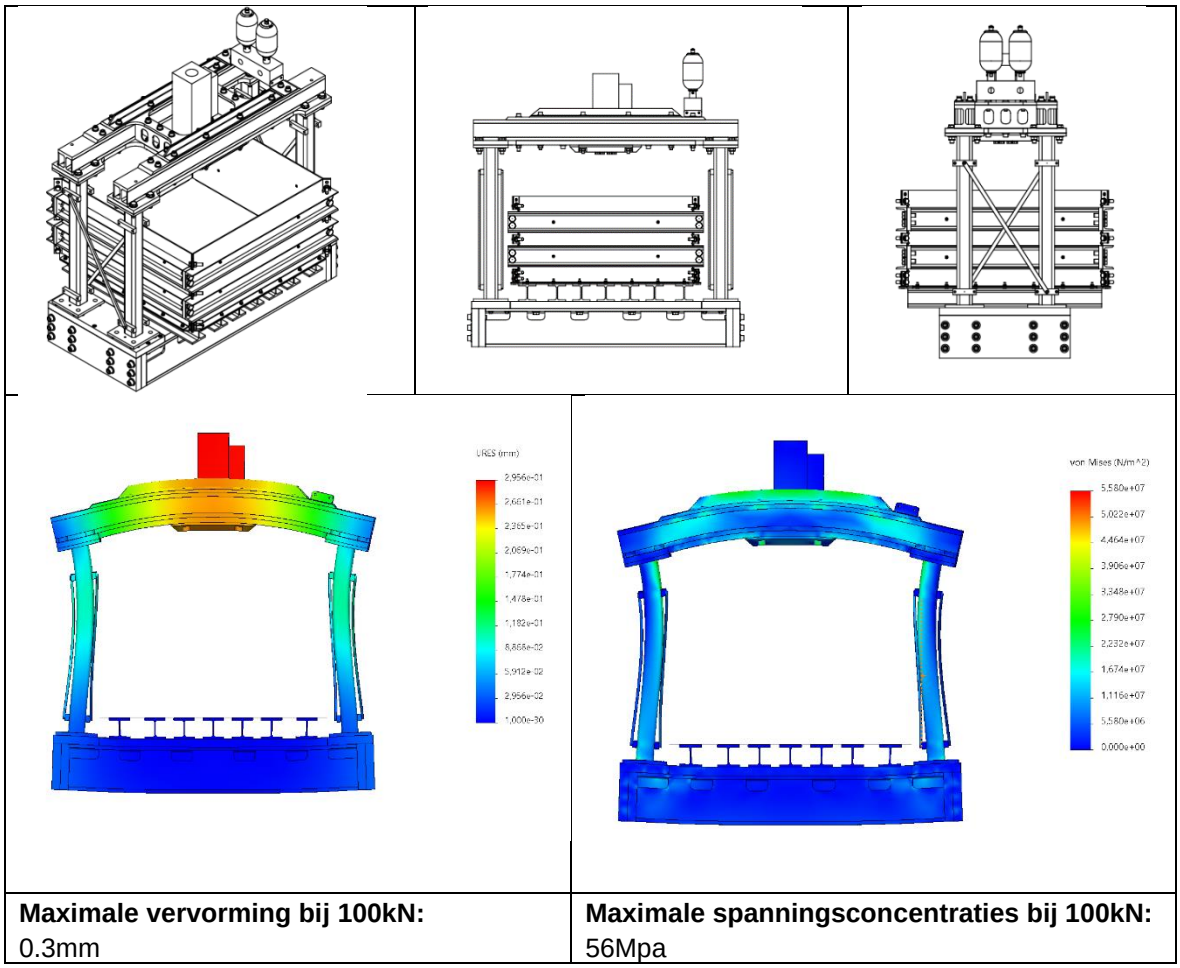
In de EN17282 wordt deze opstelling uitsluitend gebruikt in de duurtest, om de weerstand tegen vermoeiing van de ballast mat vast te stellen. De stijfheid van de ballast (statisch en dynamisch) wordt in deze opstelling niet gemeten, wel de verplaatsing vóór en na de test.

Het bovenstaande principe is geadapteerd voor de ballastverstijvingsproef, echter zijn er enkele aanpassingen uitgevoerd. Zo is de “circular loading plate” vervangen door een sectie van een NS90 dwarsligger met het daarbij horende spoorstaafbevestigingssysteem inclusief rail, daarnaast zijn de meetklokken (n° 3) vervangen door digitale verplaatsingsopnemers (LVDT’s), hierdoor is het mogelijk om de verplaatsing per krachtcyclus te meten waaruit zowel de dynamische stijfheid als de demping kan worden bepaald.

3.1 Testopstelling

Om de test uit te kunnen voeren heeft DEKRA Rail een eigen testframe ontwikkeld waarin de eerder genoemde ‘ballast box’ geplaatst kan worden. Met name de overspanning tussen de kolommen moest aanmerkelijk groter zijn dan bij de beschikbare machines, om voldoende ruimte te hebben voor het plaatsen van de ballastbak. In Figuur 2 staan diverse schematische afbeeldingen van het testframe inclusief ballastbak met de daarbij horende berekeningsresultaten. Het gehele testframe is ontworpen op de maximale kracht die de testmachine kan leveren, namelijk 100kN, en dan met name op een grote stijfheid. Aangezien bij hoge frequenties de slag van de hydraulische actuator beperkt is, betekent elke ongewenste vervorming (van frame of ondersteuning van de ballastbak) een verlaging van de maximale frequentie bij een bepaalde slag van de hydraulische cilinder.
De hier getoonde vervormingen van 0,3 mm zijn de vervormingen van het frame. De vervormingen van de ballastbak zijn minstens een factor 10 kleiner, maximaal in de orde van enkele honderdste mm. De invering van de ballast wordt rechtstreeks gemeten middels verplaatsingsopnemers die via de wanden van de ballastbak verbonden zijn met de bodem daarvan.

Foto 1 en Foto 2 op de volgende pagina laten zien hoe dit er in de praktijk uitziet.



Maximale vervorming bij 100kN: 0.3mm	**Maximale spanningsconcentraties bij 100kN:** 56Mpa

Figuur 2: Tekeningen en berekeningsresultaten van het testframe en de ballastbak.

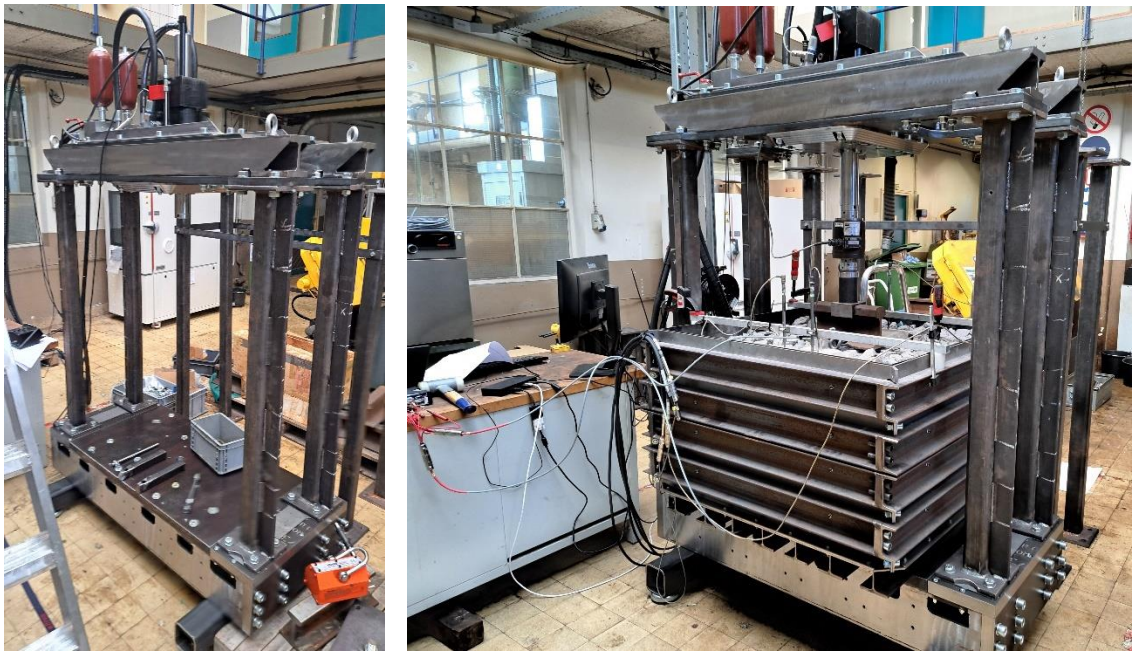


Foto 1: Links: Testframe, hydraulische actuator geïnstalleerd (boven). Rechts: Gereed voor testen: Ballastbak met ballast, dwarsligger en spoorstaaf in het testframe.

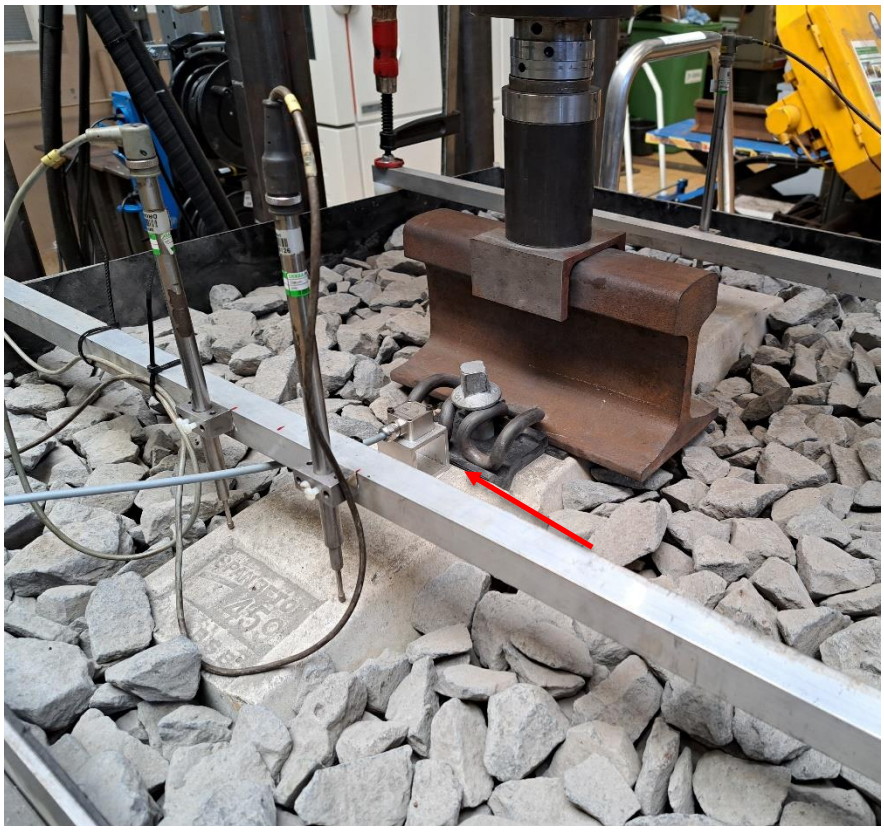


Foto 2: Detail van de bovenzijde van de dwarsligger, met 3 LVDT's (twee in de voorgrond, één aan de achterzijde (achter de spoorstaaf) en de versnellingsopnemer (rode pijl) gemonteerd.

3.2 Testplan

Zoals eerder benoemd wordt in dit onderzoek de stijfheid en de demping bepaald van de ballast, zowel standaard ballast als middels Durflex verlijmde ballast. Om de uit te voeren testen goed te omschrijven is een testplan opgesteld, deze bevindt zich in Bijlage 1, onderstaand staat in hoofdlijnen wat de test inhoudt.
Van belang hierbij is het verdichten van de ballast vóór de test, dan wel voor het verlijmen met Durflex. De methode hiervoor is genoemd in Bijlage 1, § voorbereiding proefstuk.

In het geval van de met Durflex verlijmde ballast is het vullen met ballast van de ballastbak, het verdichten van de ballast inclusief het plaatsen van de sectie dwarsligger, uitgevoerd bij Huntsman in Duitsland. Huntsman heeft van DEKRA Rail de methode van opbouwen van het proefstuk en het verdichten van de ballast ontvangen, en op die wijze uitgevoerd.

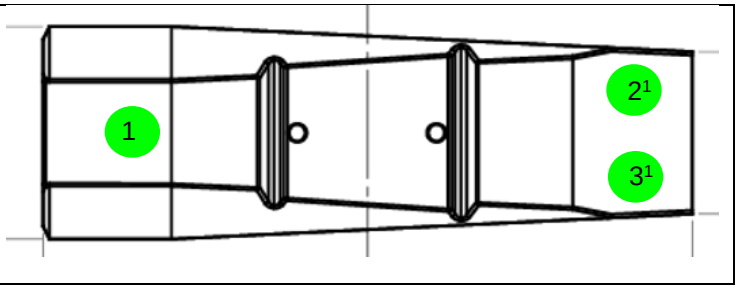
De demping en stijfheid is steeds bepaald bij meerdere frequenties; 1Hz, 5Hz, 10Hz, 20Hz & 40Hz, tijdens de dempingtest wordt de verplaatsing van de sectie dwarsligger continu gemonitord.
Om de demping te kunnen bepalen wordt de ingaande energie (kracht) vergeleken met de uitgaande energie gedurende één cyclus, zie § 3.3. De stijfheid wordt gemeten uit de verplaatsing van de dwarsligger ten opzichte van de bodem van de ballastbak. De vervorming van de ballastbak is verwaarloosbaar, daarvoor is daarom niet gecompenseerd.

De stijfheid / dempingsmetingen zijn in totaal 4 keer uitgevoerd, met daartussen kortere (zetten) of langere (duurtest) periodes van cyclische belasting welke het effect van meerdere passerende treinen op de ballast (met en zonder Durflex) na te bootsen.

3.2.1 Wijze van meten

3.2.2 Invering van de dwarsligger:

De invering van de dwarsligger wordt op drie punten gemeten, zie onderstaande figuur. Om tot een gemiddelde invering van de dwarsligger te komen worden de drie LVDT's gemiddeld, $\frac{1}{2}LVDT\ 1 + \frac{1}{4}LVDT\ 2 + \frac{1}{4}LVDT3$.

Op de dwarsligger worden een drietal LVDT's geplaats (aangegeven in groen). De LVDT's 1, 2 en 3 worden symmetrisch opgesteld t.o.v. de middenlijn v/d dwarsligger.	

3.2.3 Bepaling trillingsniveaus

Op verzoek van ProRail zijn additioneel versnellingsopnemers geplaatst op de bovenzijde van de dwarsligger en onder de bodem van de ballastbak. Hiermee kunnen de trillingen van de dwarsligger vergeleken worden met de trillingen onder het ballastbed.

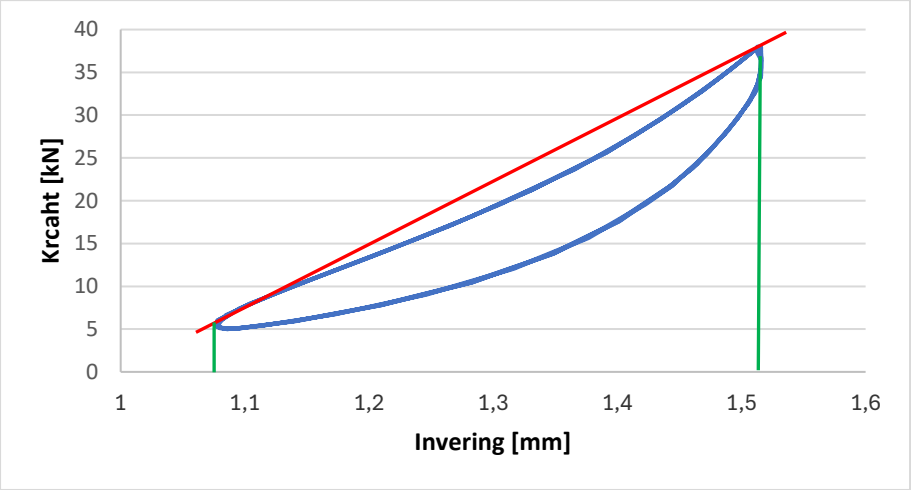
3.3 Bepaling stijfheid en demping

In Figuur 3 is een voorbeeld gegeven van het kracht-verplaatsingsdiagram van één cyclus tijdens bepaling van de stijfheid en demping (uitgevoerd bij frequenties van 1, 5, 10 , 20 en 40 Hz). Steeds is gedurende 200 cycli belast met een sinusvormige (in de tijd) kracht, en zijn de laatste 4 cycli gemeten. Over deze 4 cycli zijn de waarden gemeten, en daarvan is het gemiddelde bepaald. In de figuur is met de rode lijn de stijfheid aangegeven. De stijfheid die berekend wordt is het verschil in maximale en minimale kracht, gedeeld door het verschil in maximale en minimale positie van de LVDT.
Het oppervlak onder de bovenste blauwe lijn (tussen de twee verticale groene lijnen), is de energie die opgenomen wordt tijdens belasting (W_{max}), het oppervlak onder de onderste lijn is de energie die wordt teruggegeven tijdens ontlasten.

Het oppervlak in de "banaan" is de gedissipeerde energie ΔW die in het systeem blijft (in kN·mm, ook N·m ofwel J).

$$\tan(\delta) = \frac{\Delta W}{W\max} = \frac{\text{gedissipeerde energie per cyclus}}{\text{maximaal opgeslagen energie per cyclus}}$$

.



Figuur 3: Voorbeeld van het kracht-verplaatsingsdiagram van één cyclus. De rode lijn geeft de stijfheid weer (secant stijfheid). Het oppervlak onder de bovenste lijn (tussen de twee verticale groene lijnen), is de energie W_{max} die opgenomen wordt tijdens belasten, het oppervlak ΔW in de "banaan" is de gedissipeerde energie.

3.4 Beschrijving van de gebruikte apparatuur en instrumentatie

Apparaat / Instrument	Nadere omschrijving	Identificatie	Laatste kalibratie	Volgende kalibratie
MTS Loadcell	100 kN	CTO 5.33.49.6	09-2024	09-2026
LVDT's - DR126 - DR127 - 1.15.69	LVDT 40mm	DR00028126	03-2024	03-2026
	LVDT 40mm	DR00028127	03-2024	03-2026
	LVDT 40mm	1.15.69	03-2024	03-2026
2G - Acceleratiemeter	2G	1.16.368	04-2024	04-2025
	2G	1.16.369	04-2024	04-2025
Hoogtemeter (digitaal)	Mitutoyo Absolute HDS-30CX	DR00038399	08-2024	08-2025

Tabel 1: Gebruikte apparatuur.

3.5 Observaties tijdens uitvoering van de test

1) Tijdens het uitvoeren van de referentietesten (ballast zonder Durflex) is gebleken dat bij het inregelen van de hydraulische cilinder (alvorens de reeks testen te starten), de dwarsligger aanzienlijk verzakt is in de niet verlijmde ballast, (6mm gemiddeld). Dit gebeurde ná het verdichten van de ballast, conform de methode genoemd in Bijlage 1.

   Dit is op zich logisch, tijdens de test worden krachten van tientallen kN aangebracht (meerdere duizenden kg), terwijl is verdicht met een trilplaat van 14 kg.

   Zodoende is er besloten om de Durflex ballastbak met vergelijkbare krachten te "verdichten", zodat de "historie" van de ballast in beide gevallen dezelfde is:

   Procedure voor het verdichten:
   - Fmin = 5kN
   - Fmax = ½ * 76kN
   - Frequentie = 40Hz (hoogste test frequentie)
   - Tijd = 300 secondes

   Tijdens het uitvoeren van deze additionele verdichtingsprocedure op de ballast met Durflex is die verzakking van de ballast overigens niet in die mate waargenomen, slechts enkele tienden van mm. Dit is waarschijnlijk het effect van de verlijming met Durflex.

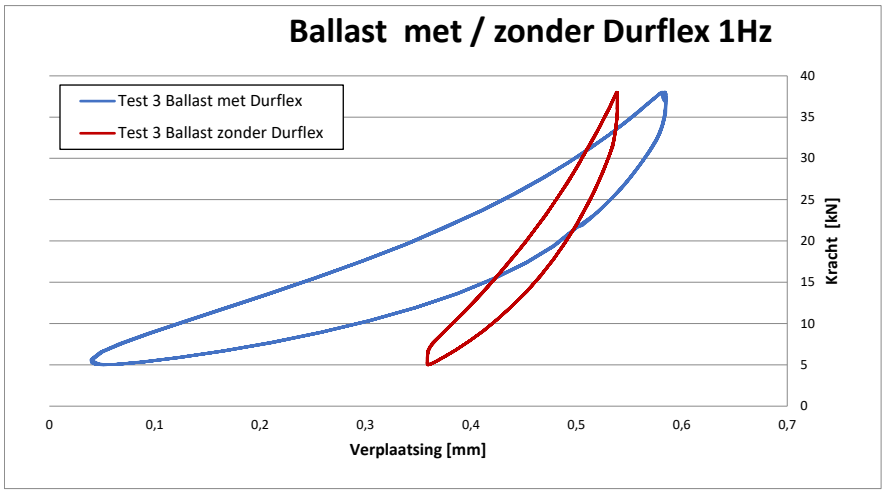
2) Tijdens het testen van de niet verlijmde ballast is gebleken dat bij hogere frequenties, 20Hz en hoger, dynamische effecten zijn opgetreden (hogere frequenties treden op, zichtbaar in de metingen met de versnellingsopnemers) waardoor de stijfheid en demping niet meer op betrouwbare wijze meetbaar zijn. Bij de ballast met Durflex treedt dit ook op, maar in iets mindere mate. De verschillen (ballast zonder of met Durflex) in elasticiteit en demping bij lagere frequenties (tot 10 Hz) zijn wel duidelijk zichtbaar. Dit verschil zal ook bij hogere frequenties nog steeds aanwezig zijn.

4 Resultaten

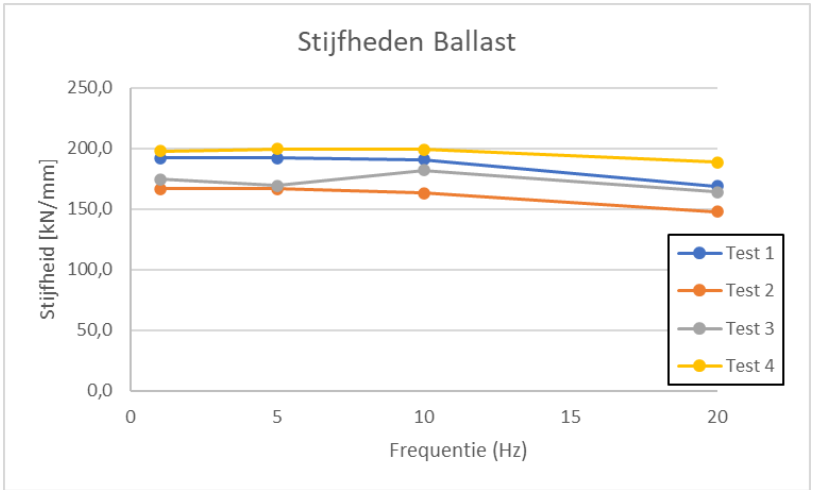
4.1 Resultaten stijfheid en demping

De stijfheden en dempingswaardes van ballast met en zonder Durflex zijn voor elk vier keer getest, (steeds bij 5 frequenties). Zoals ook omschreven in het testplan (Bijlage 1) was dit eerst de initiële test (Test 1), daarna een test (Test 2) na “zetten” van de ballast (20.000 belastingscycli). Test 3 en Test 4 zijn uitgevoerd respectievelijk ná de eerste duurtest van één etmaal en na de 2e duurtest.

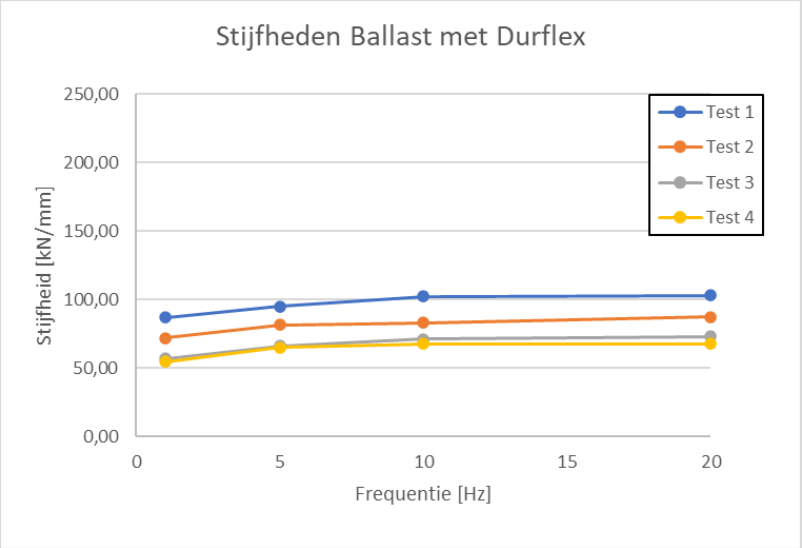
Figuur 4 geeft een indruk van de verschillen tussen ballast zonder en met Durflex. Zonder Durflex (rode lijn) is de hoek van de hysterese-curve veel steiler, wat een grotere stijfheid betekent. Ook is zonder Durflex het oppervlak in de hysterese-curve kleiner, er wordt dus minder energie gedissipeerd.



Figuur 4: Kracht-weg diagrammen van Ballast met en zonder Durflex, voorbeeld bij een frequentie van 1 Hz, 3e test (na eerste duurtest). De horizontale positie van de curves is gekozen i.v.m. een duidelijk plaatje.



Figuur 5: Stijfheden van de ballast zonder Durflex, bij verschillende frequenties en bij de vier achtereenvolgende tests. Deze stijfheid is berekend als het verschil in maximale en minimale kracht, gedeeld door het verschil in maximale en minimale verplaatsing.



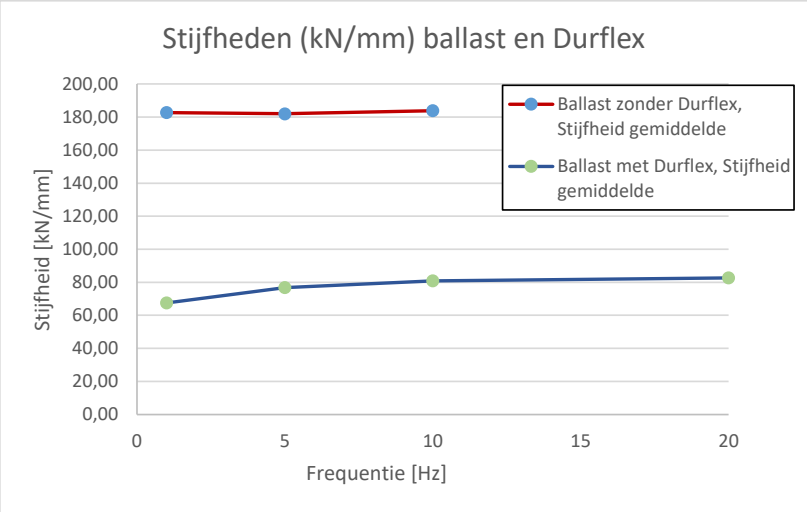
Figuur 6: Stijfheden van ballast met Durflex, bij 4 frequenties en bij de 4 achtereenvolgende tests.

Figuur 5 en Figuur 6 laten de verschillen zien tussen ballast met en zonder Durflex. De waardes zijn in alle gevallen aanmerkelijk lager mét Durflex dan zonder, zie ook Figuur 7. Waar bij ballast zonder Durflex geen trend te ontdekken is in de waardes bij de opeenvolgende tests (de eerste en de laatste test laten de hoogste waardes zien), is met Durflex een dalende trend zichtbaar bij de opeenvolgende tests, met de laagste waarde bij de laatste test (alhoewel die wel bijna dezelfde is als bij de 3^{e} test). DEKRA Rail heeft geen verklaring voor deze dalende trend.

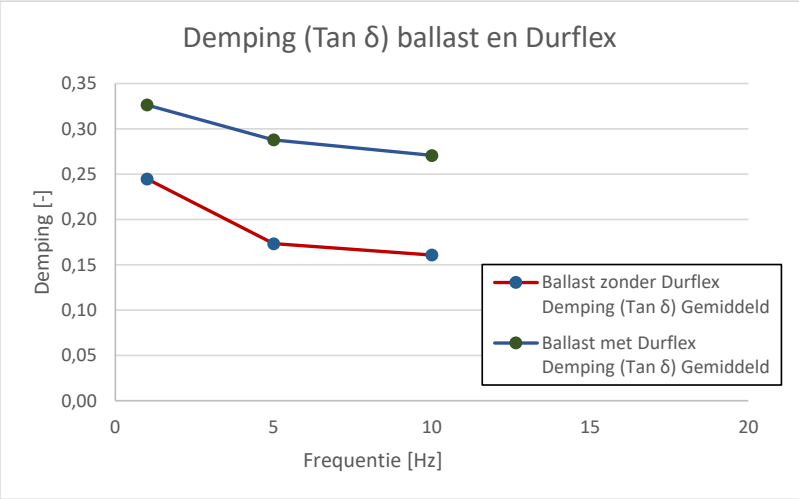
De oorzaak voor het verschil in stijfheid tussen ballast met en zonder Durflex is niet onderzocht. Waarschijnlijk is het grootste verschil dat de ballast met Durflex meer zijn oorspronkelijke structuur behoudt, en de ballast zonder Durflex meer gecompacteerd wordt door de wisselende belastingen. Mogelijk wordt ook een deel van de krachten overgedragen van ballaststeen naar ballaststeen via een laagje Durflex daartussen.

Bij ProRail is zorg ontstaan over deze relatief lage stijfheid en het effect daarvan op doorbuiging van de spoorstaaf en mogelijke vermoeiing daarvan. Ervaring met andere slappe systemen (er zijn spoorstaafbevestigingssystemen tot ongeveer 10 kN/mm) is dat vermoeiing daar geen issue is. Een eenvoudige berekening van de buiggolf van de spoorstaaf kan daar uitsluitsel over geven.

In Figuur 7 zijn de verschillen tussen ballast met en zonder Durflex het meest duidelijk zichtbaar. Hier zijn de gemiddelden (per frequentie) over de 4 tests weergegeven. Opvallend is ook dat de stijfheid bij ballast zonder Durflex niet of nauwelijks varieert met de frequentie, met Durflex neemt de stijfheid toe met de frequentie, wat gebruikelijk is voor elastomeren (rubber-achtige materialen).

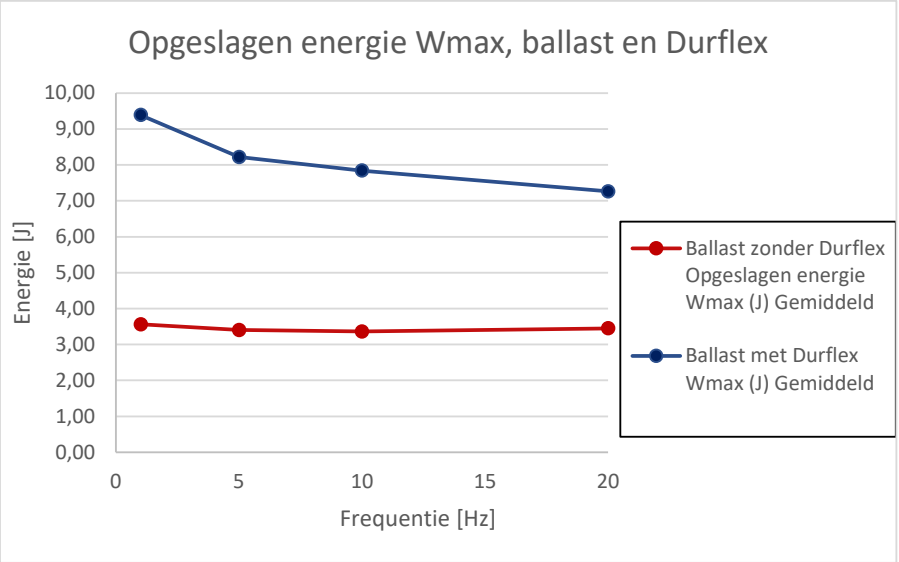


Figuur 7: Metingen stijfheden samengevat, per frequentie is steeds het gemiddelde genomen van de 4 tests.

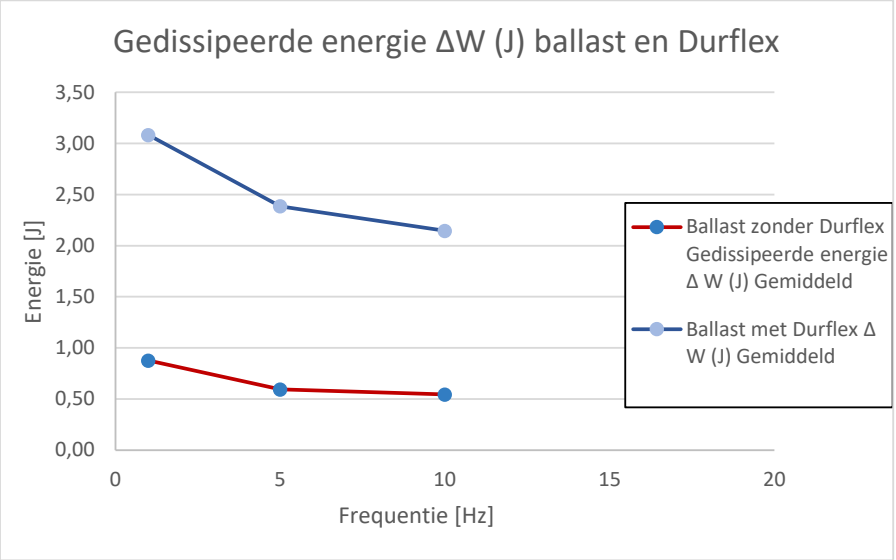


Figuur 8: Demping (Tan δ) van ballast met en zonder Durflex (gemiddelde van de 4 tests).

Figuur 8 geeft het verschil in demping weer, tussen ballast met en zonder Durflex. Het gaat hier om de Tan δ, het gehalte van de opgeslagen energie en de energie die gedissipeerd wordt. Wanneer we kijken naar de absolute waardes van die twee, dus de energie per cyclus die wordt opgeslagen (Wmax) en wordt gedissipeerd (Δ W), dan is het verschil tussen ballast met en zonder Durflex aanzienlijk groter, zie Figuur 9 en Figuur 10.



Figuur 9: Opgeslagen energie van ballast met en zonder Durflex.



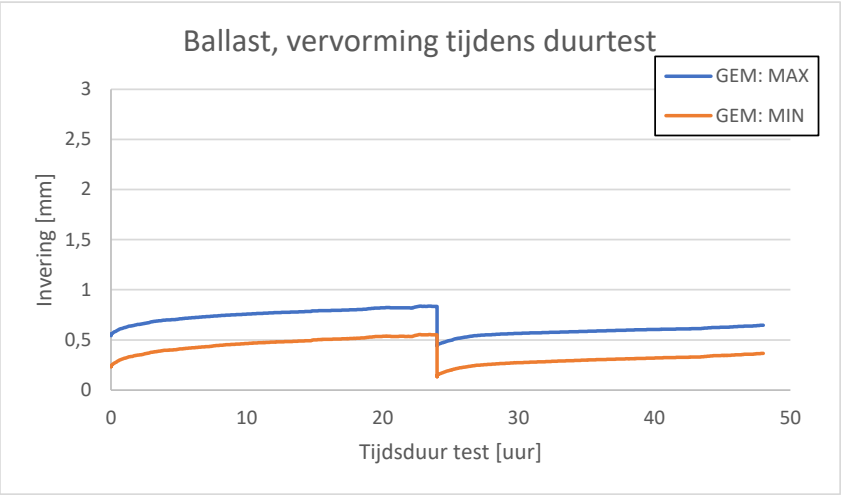
Figuur 10: Gedissipeerde energie van ballast met en zonder Durflex.

In Bijlage 2 staan alle individuele resultaten van de metingen van de stijfheid en de demping. In Tabel 7 in die bijlage staat steeds de verhouding tussen ballast met en zonder Durflex weergegeven.

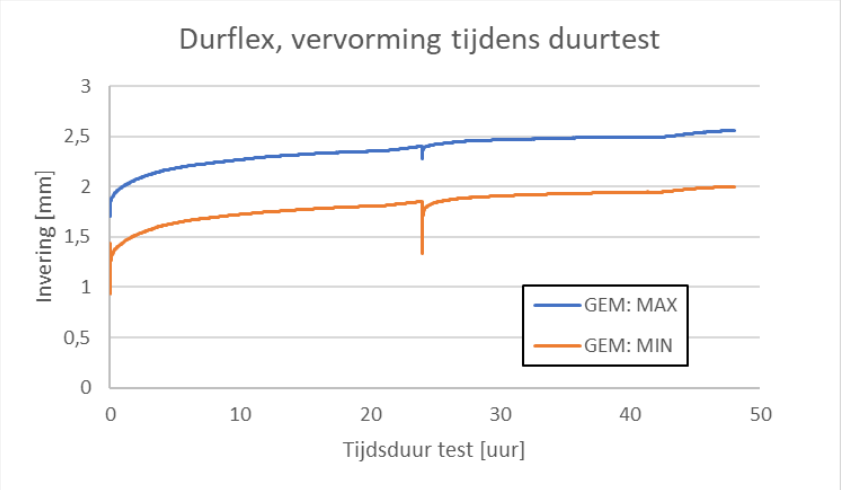
4.2 Verloop van verplaatsing tijdens duurtests

In Figuur 11 en Figuur 12 is het verloop van de vervorming te zien tijdens de twee duurtests van elk 24 uur. Tussen deze twee duurtests is bij ballast zonder Durflex relatief veel tijd verstreken, en zijn de verplaatsingsopnemers gedemonteerd geweest. De niveau's vóór en na de stilstand komen daarom niet met elkaar overeen.

De ballast zonder Durflex vervormt vanaf het begin minder (deze heeft initieel al veel vervorming laten zien, zie opmerking 1 in § 3.5). De ballast met Durflex vervormt relatief meer. De weergegeven lijnen zijn steeds de vervorming bij minimale kracht (5 kN) en maximale kracht (76 kN).



Figuur 11: Verloop van de invering van de ballast zonder Durflex tijdens de twee duurtests (elk 24 uur), gemiddelde van de 3 LVDT's, bij maximale en minimale belasting. Tussen de twee duurtests in zijn de LVDT's gedemonteerd geweest, zodat deze niet hetzelfde niveau meer hebben. De onderlinge niveau's zijn daarom onbekend.

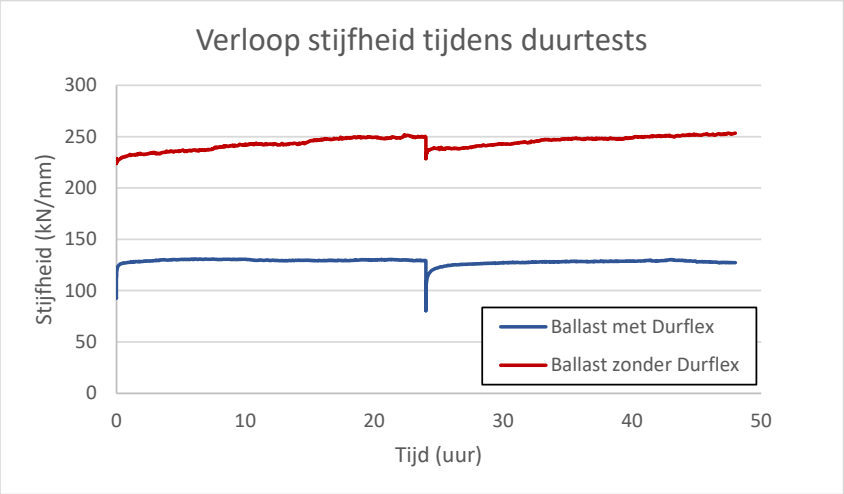


Figuur 12: Verloop van de invering van ballast met Durflex tijdens de twee duurtests (elk 24 uur), gemiddelde van de 3 LVDT's, bij maximale en minimale belasting. Instelling van de drie LVDT's was dezelfde bij beide duurtests.

Aan de hand van deze invering kan de stijfheid worden uitgerekend, deze is weergegeven in Figuur 13. Hier is zichtbaar dat de ballast zonder Durflex verstijft tijdens de duurtest, met Durflex is de stijfheid vrijwel constant. Dit gedrag komt niet volledig overeen met de opeenvolgend gemeten stijfheden (Test 1 t/m Test 4) zoals getoond in Figuur 5 en Figuur 6.

Ná afloop van de eerste duurtest "hersteld" de ballast (met en zonder Durflex) zich enigszins, bij de start van de tweede duurtest begint de stijfheid weer iets lager dan aan het eind van de eerste duurtest.

De waardes van de stijfheid zijn hoger dan dat wat is gepresenteerd in § 14.1, omdat de maximale belasting hoger is (76 kN bij de duurtest, 38 kN bij de stijfheids/dempingstest), en de relatie tussen kracht en vervorming niet lineair is.



Figuur 13: Verloop van de stijfheid tijdens de duurtests. De "dip" in het midden is de scheiding tussen de eerste duurtest van 24 uur, en de tweede. Let op dat hier de niveau's voor en na die stop correct zijn, ook voor ballast zonder Durflex. De stijfheid van de ballast zonder Durflex neemt tijdens de eerste duurtest 11% toe, bij de tweede duurtest 10%. Bij ballast met Durflex is dit ca. 5% maximaal.

4.3 Resultaten versnellingsopnemers

Er zijn een tweetal versnellingsopnemers geplaatst, één op de dwarsligger en één onder de bak. In de resultaten is een vergelijking gemaakt tussen de dempingstesten bij 1, 5, 10, 20 & 40 Hz met en zonder Durflex. De gedetailleerde resultaten van de versnellingsmeting bevinden zich in de Bijlages 3 t/m 7.

N.B. Alle onderstaande resultaten zijn gemeten bij een cyclische kracht op de dwarsligger, met constante minimale en maximale kracht: F_{min} = 5kN - F_{max} = 38kN.

Waar bij de metingen met de verplaatsingsopnemers bij hogere frequenties dan de aanstootfrequentie verstoringen optreden bij de meting (de "banaan" zoals getoond in Figuur 4 krijgt een "8" vorm) waardoor de stijfheid, en met name de demping niet meer betrouwbaar te meten zijn, is bij de metingen met de versnellingsopnemers deze verstoring niet belangrijk. De versnellingen kunnen juist per frequentie uit de data gefilterd worden.

In Tabel 2 en Tabel 3 zijn de resultaten getoond van de metingen met de versnellingsopnemers. Opvallend is dat bij alle metingen aan ballast met Durflex de versnellingen groter zijn dan bij ballast zonder Durflex. Dat geldt zowel voor de RMS waarde (Tabel 2) als de amplitudes bij de aanstootfrequentie (Tabel 3), en voor zowel de dwarsligger als de bodem van de ballastbak.

Dit wordt veroorzaakt doordat de complete machine op rubber veren staat. Hierdoor ontstaat een ingewikkeld massa-veer systeem, waarvan de versnellingsopnemers alleen de absolute waarden meten. Meer specifiek is bij ballast met Durflex de cyclische belasting (kracht) dezelfde als bij ballast zonder Durflex. Door de lagere stijfheid van de ballast met Durflex wordt de dwarsligger (en

de bovenste laag van de ballast) meer aangestoten, en is de versnelling daarvan groter. Door de grotere versnelling hiervan, wordt het gehele massa-veer systeem dat op de rubber veren staat meer in trilling gebracht, inclusief de bodem van de ballastbak.

Zonder Durflex			Met Durflex	
Frequentie	**RMS v/d Dwarsligger**	**RMS v/d Bodem**	**RMS v/d Dwarsligger**	**RMS v/d Bodem**
1Hz	0,021 m/s^2	0,017 m/s^2	0,036 m/s^2	0,026 m/s^2
5Hz	0,14 m/s^2	0,07 m/s^2	0,29 m/s^2	0,09 m/s^2
10Hz	0,47 m/s^2	0,23 m/s^2	0,99 m/s^2	0,41 m/s^2
20Hz	1,47 m/s^2	0,86 m/s^2	2,73 m/s^2	1,40 m/s^2
40HZ	4,49 m/s^2	2,08 m/s^2	10,13 m/s^2	4,28 m/s^2

Tabel 2: RMS vergelijking zonder en met Durflex.

Zonder Durflex			Met Durflex	
Aanstoot Frequentie	**Amplitude v/d Dwarsligger**	**Amplitude v/d Bodem**	**Amplitude v/d Dwarsligger**	**Amplitude v/d Bodem**
1Hz	0,00354 m/s^2	0,00137 m/s^2	0,011 m/s^2	0,00262 m/s^2
5Hz	0,0931 m/s^2	0,0378 m/s^2	0,2499 m/s^2	0,0701 m/s^2
10Hz	0,389 m/s^2	0,165 m/s^2	1,02 m/s^2	0,31 m/s^2
20Hz	1,32 m/s^2	0,98 m/s^2	3,11 m/s^2	1,67 m/s^2
40HZ	4,70 m/s^2	1,25 m/s^2	13,21 m/s^2	1,86 m/s^2

Tabel 3: Amplitude (acceleratie) vergelijking (afgelezen v/d grafiek uit Bijlages 3-7).

4.3.1 Verschil in RMS waardes

De volgende methode om de resultaten van de versnellingssensoren te duiden is uitgevoerd. Zoals in de tabellen hierboven is gepresenteerd blijkt dat de versnelling aan de onderkant van de ballastbak groter is bij ballast met Durflex. Dit kan alleen, als de bak “vervormd”, of inderdaad de hele bak beweegt, of er hoog- of laagfrequent een bijzondere (ver)storing is die het RMS signaal verminkt. Onze conclusie is dat de hele bak beweegt. Dit zou dan ook terug te vinden moeten zijn in het versnellingssignaal op de dwarsligger, want alles beweegt dan. Uit de metingen blijkt dat het versnellingssignaal op de dwarsligger ook groter is, dan in de situatie zonder Durflex.

Bij bijvoorbeeld 40 Hz (zie ook Tabel 4) is het volgende te zien:
Ballast zonder Durflex:
Op de dwarsligger: 4,49 m/s^2
Onderaan de bak: 2,08 m/s^2

Ballast met Durflex:
Op de dwarsligger: 10,13 m/s^2
Onderaan de bak: 4,28 m/s^2

Als de totale opstelling “danst” op deze 40 Hz en de opstelling is oneindig stijf, zijn de versnellingsopnemer op de dwarsligger en de onderkant van de bak in fase. Dan is de onderkant een maat voor de versnelling van de gehele opstelling. Deze meting kan dan gebruikt worden om de meting op de dwarsligger te corrigeren. Hiervoor wordt dan het verschil gebruikt.

Zonder Durflex
Op de dwarsligger: (4,49-2,08 =) 2,41 m/s^2

Met Durflex:
Op de dwarsligger: (10,13-4,28 =) 5,85 m/s^2

Het valt dan op dat de dwarsligger met Durflex veel meer beweegt dan zonder. Dit is in overeenstemming met de gemeten lagere stijfheid door het toevoegen van Durflex.
Er is dan nog géén verklaring voor waarom de opstelling met Durflex meer beweegt dan zonder (4,28 m/s2 versus 2,08 m/s2). Een waarschijnlijke oorzaak is dat door de slappere ballast meer beweging in het hele systeem is gekomen, en daardoor dus het hele systeem meer beweegt.

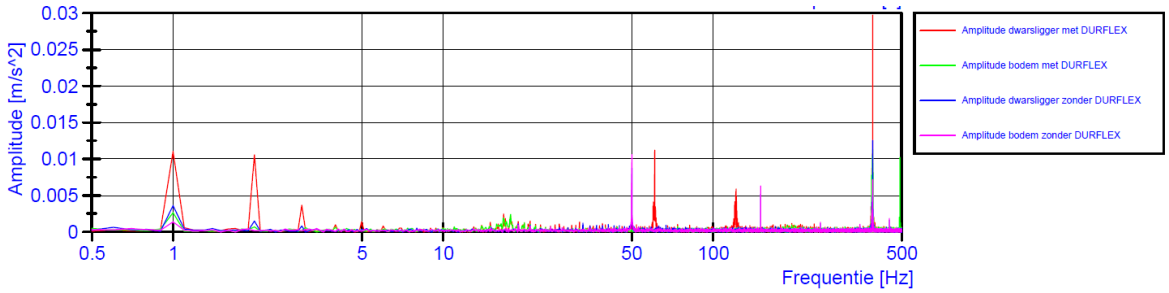
Met de aanname dat de bak oneindig stijf verondersteld mag worden bij alle frequenties, blijkt dat het verschil in stijfheid tussen de situatie met en zonder Durflex gelijk is, als wordt gekeken naar de meetresultaten van de verplaatsingsopnemers en zoals gemeten met de versnellingsopnemers, zie Tabel 4. In beide gevallen is het verschil circa 2,3. Aangezien deze overeenkomst best netjes is (gezien het verstoorde versnellingssignaal en dat een verplaatsing veel nauwkeuriger is bij lage frequenties dan een versnellingsopnemer), zien wij hierin de onderbouwing dat de bak als oneindig stijf verondersteld mag worden bij alle gemeten frequenties, in deze meetopzet.

	Ballast zonder Durflex RMS versnelling			Ballast met Durflex RMS versnelling			Verschil in stijfheid	Ballast zonder Durflex	Ballast met Durflex	Verschil in stijfheid
Frequentie	boven	onder	verschil boven-onder	boven	onder	verschil boven-onder	Uit RMS waardes	Stijfheid berekend uit verplaatsing (Figuur 7)	Stijfheid berekend uit verplaatsing (Figuur 7)	Uit verplaatsing
1Hz	0,021	0,017	0,004	0,036	0,026	0,01	2,5	180	75	2,4
5Hz	0,14	0,07	0,07	0,29	0,09	0,2	2,9	180	80	2,25
10Hz	0,47	0,23	0,24	0,99	0,41	0,58	2,4	180	80	2,25
20Hz	1,47	0,86	0,61	2,73	1,4	1,33	2,2		80	
40HZ	4,49	2,08	2,41	10,13	4,28	5,85	2,4			

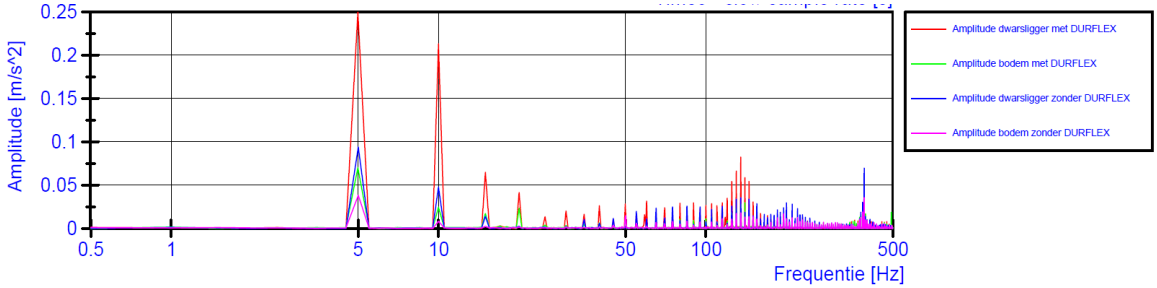
Tabel 4: In deze tabel zijn de verschillen in stijfheid uitgerekend uit verschillen in RMS-versnelling, van de bovenzijde (dwarsligger) en onderzijde (onder de ballastbak).

4.3.2 Amplitudes per frequentie

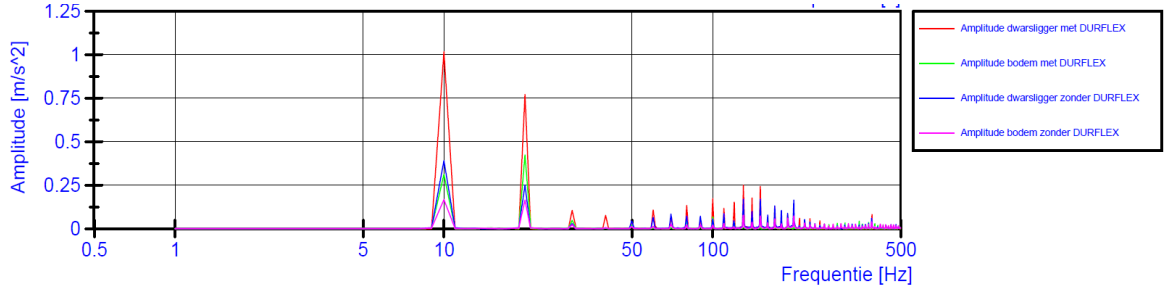
In de onderstaande grafieken (Figuur 14 t/m Figuur 18) worden de frequenties waarbij versnellingen waargenomen zijn weergegeven.



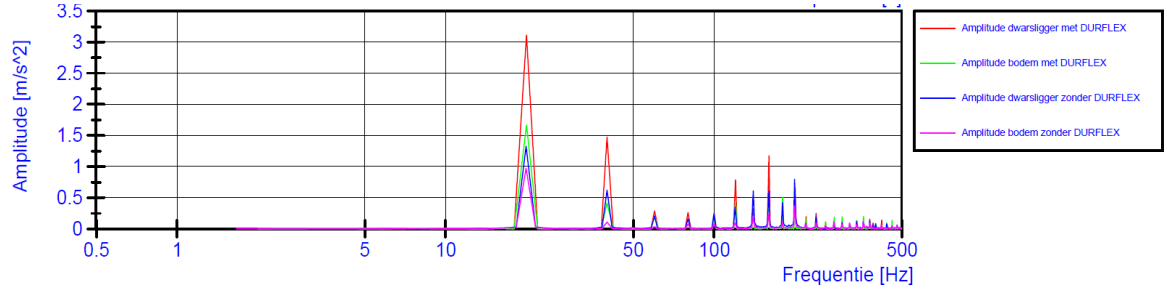
Figuur 14: Amplitude/Frequentie aanstoot frequentie: 1Hz.



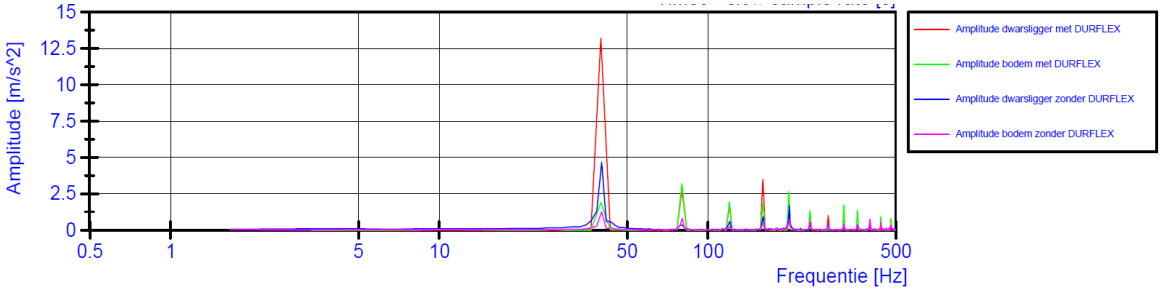
Figuur 15: Amplitude/Frequentie (FFT) aanstoot frequentie: 5Hz.



Figuur 16: Amplitude/Frequentie (FFT) aanstoot frequentie: 10Hz.



Figuur 17: Amplitude/Frequentie (FFT) aanstoot frequentie: 20Hz.



Figuur 18: Amplitude/Frequentie (FFT) aanstoot frequentie: 40Hz.

Opvallend is dat er bij hogere frequenties dan de testfrequenties pieken ontstaat op factor 2, 3 en meer van de testfrequentie, maar ook bij veel hogere frequenties zoals bijvoorbeeld 400 Hz. Oorzaak hiervoor is niet vastgesteld, dit kan worden veroorzaakt door resonanties in verschillende delen van de ballast, de ballastbak of het frame. Verder is te zien dat bij dezelfde aanstoting (belasting) de amplitude van de versnelling van de dwarsligger groter is in geval van ballast met Durflex dan zonder Durflex. Dit is een direct gevolg van de grotere elasticiteit van de ballast met Durflex (zie Tabel 3).

4.4 Doorvloeien van Durflex tussen de ballast

Na de laatste test met ballast met Durflex is de ballastbak aan de voorzijde geopend, waarmee zichtbaar was in hoeverre de Durflex doorgevloeid was tussen de ballast, zie Foto 3. Ook was het mogelijk om alle ballast aan de spoorstaaf / dwarsligger uit de ballast te tillen. Dan is ook zichtbaar dat de Durflex aan de andere zijde ook is doorgevloeid (iets minder), Foto 4.

Met de ballastbak open aan de voorzijde zoals in Foto 3 is nogmaals de test uitgevoerd van stijfheid en demping, de ballast bleek nog op dezelfde wijze belastbaar, en kon een kracht tot 38 kN opnemen.

Foto 3: Openen van de ballastbak ná de laatste test. Het grootste deel van de ballast blijft aanwezig in de bak. Duidelijk zichtbaar dat de Durflex tot onderin is gevloeid.

Foto 4: De ballast kon uit de ballastbak verwijderd worden door de dwarsligger omhoog te trekken. Het geheel kan nog steeds kracht opnemen.

5 Conclusies

Het injecteren van de ballast heeft een duidelijke invloed op het gedrag van de ballast. In vergelijking tot de situatie zonder Durflex zijn er mèt Durflex de volgende verschillen:

1) De stijfheid is bij Durflex bij alle gemeten frequenties waarbij geldige resultaten verkregen zijn (1 t/m 20 Hz) aanzienlijk lager. Dit varieert van een factor 2 tot bijna een factor 4.
2) De relatieve demping (tan δ) bij Durflex is bij bovengenoemde frequenties aanzienlijk groter, ongeveer een factor 1,5. Deze demping is bij ballast zonder Durflex 15% tot 25% van de energie die in het systeem komt, bij ballast met Durflex is dit 27% tot 33%, afhankelijk van de frequentie.
3) De absolute demping (gedissipeerde energie) is bij ballast met Durflex groter dan zonder Durflex, een factor 3 tot 6.
4) Bij de opeenvolgende metingen, met daartussen steeds een duurtest, wordt de stijfheid steeds lager bij ballast met Durflex, waarbij het verschil tussen de laatste test en die daarvoor niet erg groot is (Figuur 6).
5) Dit treedt niet op bij de continue stijfheidsmeting tijdens de duurtest van de ballast met Durflex, hierbij blijft de stijfheid vrijwel constant (Figuur 13).
6) Bij het initiële belasten bij Durflex (vóór de tests) treedt er veel minder verdichting van de ballast met Durflex op dan bij initieel belasten bij alleen ballast.
7) Tijdens de duurtests bij ballast met Durflex treedt indrukking op, die echter ná de test grotendeels terugveert (voor ca. 70%). Bij ballast zonder Durflex veert het minder terug.
8) Bij alle frequenties, ook de hogere, is het verschil in vibratieniveau tussen de dwarsligger en de bodem van de ballastbak groter in geval van ballast met Durflex.

De oorzaak voor de geconstateerde verschillen, en dan met name de aanzienlijk lagere stijfheid, is niet onderzocht. Waarschijnlijk is het grootste verschil dat de ballast met Durflex meer zijn oorspronkelijke structuur behoudt, en de ballast zonder Durflex meer gecompacteerd wordt door de wisselende belastingen. Mogelijk wordt bij ballast met Durflex een deel van de krachten overgedragen van ballaststeen naar ballaststeen via een laagje Durflex daartussen, wat ook een lagere stijfheid veroorzaakt.

Bijlage 1: Testplan

Voorbereiding proefstuk

- Plaatsen kunststof tegen de wanden (wrijvingsvermindering ballast → ballastbak)
- Kunststof folie op de bodem (Dit om bij gebruik van Durflex het PUR weer los te kunnen maken van de bodem)
- Vullen bak met 30 cm ballast
- Verdichten tot ±14mm verzakking bereikt is. Hiervoor is een trilplaat gebruikt, 50kN 14kg
- Aanvullen tot 30 cm hoogte
- Nogmaals verdichten (ballast zal nu nauwelijks nog verdichten als het goed is)
- Dwarsligger sectie gecentreerd in de bak plaatsen (parallel aan de HEB profielen onder de bak)
- Rondom de dwarsligger ballast storten (eveneens verdicht met de trilplaat) +-55cm hoogte
- Met Durflex: Opsturen naar Huntsman, en met Durflex verlijming retour ontvangen. Eventueel dwarsligger of spoorstaaf fixeren aan de ballast-bak wanden.

Voorbereiding test

- Plaatsen spoorstaaf-sectie op dwarsligger
- Plaatsen ballastbak in test-frame
- Plaatsen verplaatsingsopnemers, minimaal 3 op de bovenzijde van de dwarsligger
- Plaatsen versnellingsopnemers (later toegevoegd)
- Plaatsen hulpstuk voor aanbrengen belasting, tussen cilinder en spoorstaaf-kop (verticaal).

Belasting en duur van de test

- Details duurtest: maximale belasting = 76 kN (F_{max}), minimaal 5 kN (F_{min}), frequentie 5 Hz
- Aantal wisselingen bij duurtest. Gebaseerd op één etmaal testen bij een frequentie van 5 Hz (432.000 cycli). De duurtest van één etmaal is uiteindelijk twee maal uitgevoerd.

Uitvoering test – fases, deels in navolging van de EN 17282

1. Eerst voorbelasten: 2000 cycli tussen F_{min} en ½ F_{max} (Tijdens voorbelasten worden de minimale en maximale verplaatsing van de verplaatsingsopnemers continu gelogd)
2. Testen van stijfheid en demping bij meerdere frequenties: 1, 5, 10, 20 en 40 Hz. Dit tussen F_{min} en ½ F_{max} (=38 kN), per frequentie 200 cycli, laatste 10 cycli volledig meten
3. Stop-moment: eerst uitwerken resultaten – vaststellen of er afwijkingen zijn
4. “Zetten”, 10000 cycli bij 5 Hz, tussen F_{min} en F_{max}
5. Herhalen 2) – Dempingstest 2
6. Duurtest 1): 1 dag bij 5 Hz (432000 cycli), tussen F_{min} en F_{max} (Tijdens de duurtest worden de minimale en maximale verplaatsing van de verplaatsingsopnemers elke 100 cycli gelogd)
7. Herhalen 2) – Dempingstest 3
8. Duurtest 2): 1 dag bij 5 Hz (432000 cycli), tussen F_{min} en F_{max}
9. Herhalen 2) – Dempingstest 4.

Bijlage 2: Resultaten tests van stijfheid en demping

De resultaten bij de hogere frequenties (20 en 40 Hz) zijn in geel weergegeven, aangezien deze door hoger frequente dynamische effecten niet correct zijn.

	Frequentie (Hz)				
Resultaat Ballast zonder Durflex Stijfheid (kN/mm)	1	5	10	20	40
Test 1	192,1	192,3	190,8	168,8	142,1
Test 2	166,7	166,9	163,4	147,8	128,2
Test 3	174,4	169,6	182,0	164,3	138,9
Test 4	197,7	199,5	199,3	188,5	130,5
Ballast zonder Durflex Stijfheid gemiddelde	182,74	182,05	183,88	167,33	134,94
Resultaat Ballast zonder Durflex Demping (Tan δ)	1	5	10	20	40
Test 1	0,23	0,16	0,14	0,05	-0,03
Test 2	0,26	0,18	0,16	0,10	0,00
Test 3	0,26	0,21	0,21	0,11	-0,03
Test 4	0,23	0,15	0,13	0,04	-0,09
Ballast zonder Durflex Demping (Tan δ) Gemiddeld	0,24	0,17	0,16	0,08	-0,04
Resultaat Ballast zonder Durflex Opgeslagen energie Wmax (J)	1	5	10	20	40
Test 1	3,31	3,15	3,07	3,18	4,85
Test 2	3,93	3,71	3,63	3,82	5,57
Test 3	3,69	3,57	3,50	3,60	4,99
Test 4	3,32	3,18	3,24	3,20	4,69
Ballast zonder Durflex Opgeslagen energie Wmax (J) Gemiddeld	3,56	3,40	3,36	3,45	5,03
Resultaat Ballast zonder Durflex Gedissipeerde energie Delta W (J)	1	5	10	20	40
Test 1	0,77	0,50	0,44	0,16	-0,16
Test 2	1,01	0,65	0,59	0,39	-0,01
Test 3	0,96	0,74	0,72	0,40	-0,13
Test 4	0,77	0,48	0,42	0,12	-0,43
Ballast zonder Durflex Gedissipeerde energie Delta W (J) Gemiddeld	0,88	0,59	0,54	0,27	-0,18

Tabel 5: Resultaten stijfheid en demping, ballast zonder Durflex.

Resultaat Ballast met Durflex-Stijfheid (kN/mm)	1	5	10	20	40
Test 1	86,81	95,01	102,16	103,00	82,64
Test 2	71,93	81,44	83,00	87,16	70,08
Test 3	56,79	65,94	71,12	73,01	58,38
Test 4	54,46	64,81	67,46	67,56	53,43
Ballast met Durflex Stijfheid gemiddelde	67,50	76,80	80,93	82,68	66,13

Resultaat Ballast met Durflex Demping (Tan δ)	1	5	10	20	40
Test 1	0,31	0,26	0,24	0,15	0,05
Test 2	0,33	0,28	0,26	0,18	0,09
Test 3	0,33	0,30	0,28	0,21	0,12
Test 4	0,34	0,31	0,30	0,25	0,14
Ballast met Durflex Demping (Tan δ) Gemiddeld	0,33	0,29	0,27	0,20	0,10

Resultaat Ballast met Durflex Wmax (J)	1	5	10	20	40
Test 1	7,25	6,49	6,26	5,78	7,67
Test 2	8,79	7,65	7,35	6,84	8,47
Test 3	10,68	9,23	8,75	8,22	10,08
Test 4	10,83	9,49	8,99	8,21	10,11
Ballast met Durflex Wmax (J) Gemiddeld	9,39	8,22	7,84	7,26	9,08

Resultaat Ballast met Durflex Gedissipeerde energie Delta W (J)	1	5	10	20	40
Test 1	2,22	1,72	1,51	0,87	0,40
Test 2	2,88	2,17	1,93	1,25	0,78
Test 3	3,55	2,73	2,42	1,75	1,21
Test 4	3,68	2,93	2,72	2,05	1,40
Ballast met Durflex Delta W (J) Gemiddeld	3,08	2,39	2,15	1,48	0,95

Tabel 6: Resultaten stijfheid en demping, ballast met Durflex.

Ratio - Durflex - Ballast

Ratio - Ballast met Durflex – Ballast zonder Durflex - Stijfheid (kN/mm)	1	5	10	20	40
Test 1	0,45	0,49	0,54	0,61	
Test 2	0,43	0,49	0,51	0,59	
Test 3	0,33	0,39	0,39	0,44	
Test 4	0,28	0,32	0,34	0,36	

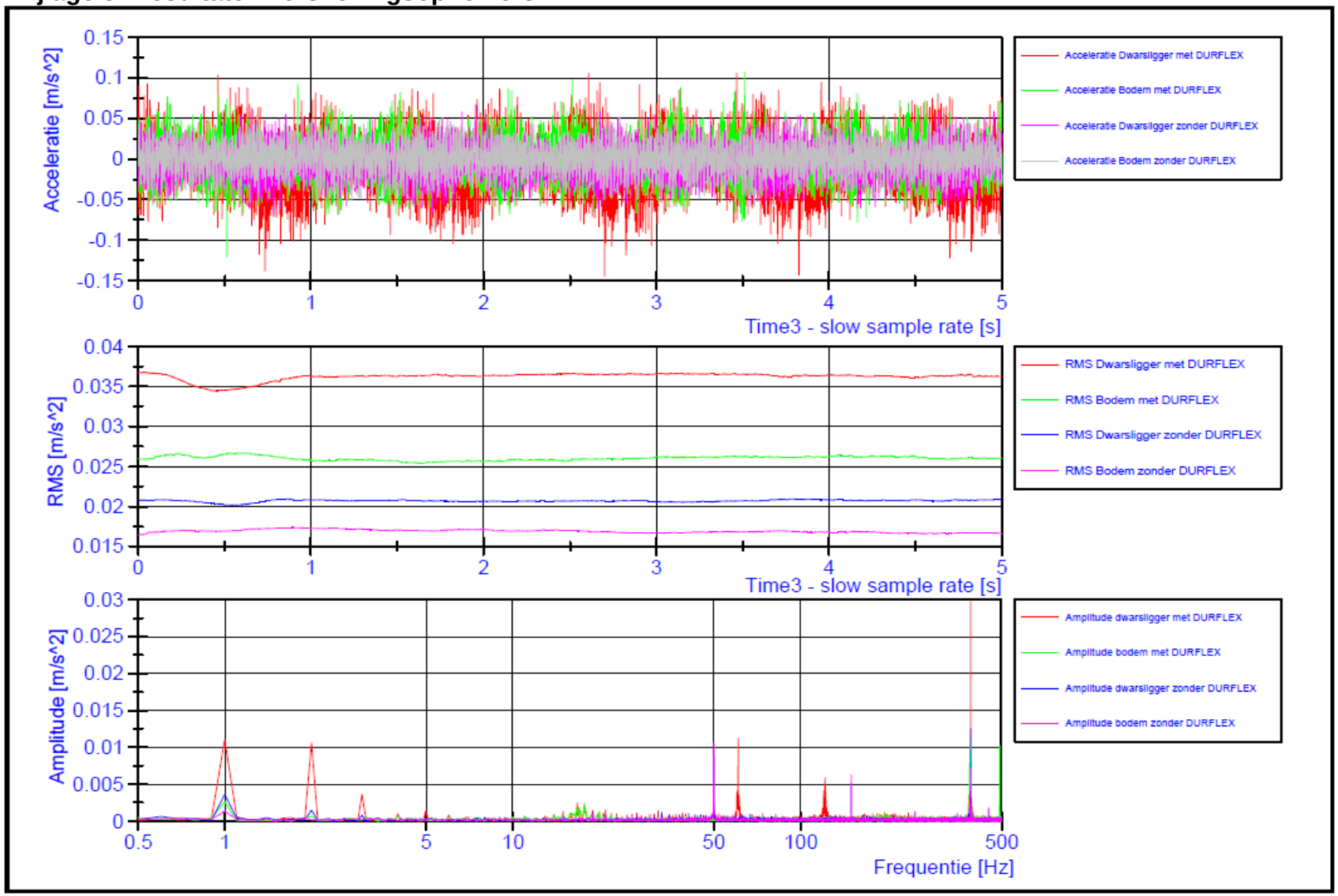
Ratio - Ballast met Durflex – Ballast zonder Durflex Demping (Tan δ)	1	5	10	20	40
Test 1	1,32	1,66	1,67		
Test 2	1,27	1,61	1,62		
Test 3	1,28	1,42	1,34		
Test 4	1,47	2,06	2,32		

Ratio - Ballast met Durflex – Ballast zonder Durflex Opgeslagen energie Wmax (J)	1	5	10	20	40
Test 1	2,19	2,06	2,04	1,82	
Test 2	2,24	2,06	2,02	1,79	
Test 3	2,90	2,59	2,50	2,29	
Test 4	3,26	2,99	2,78	2,57	

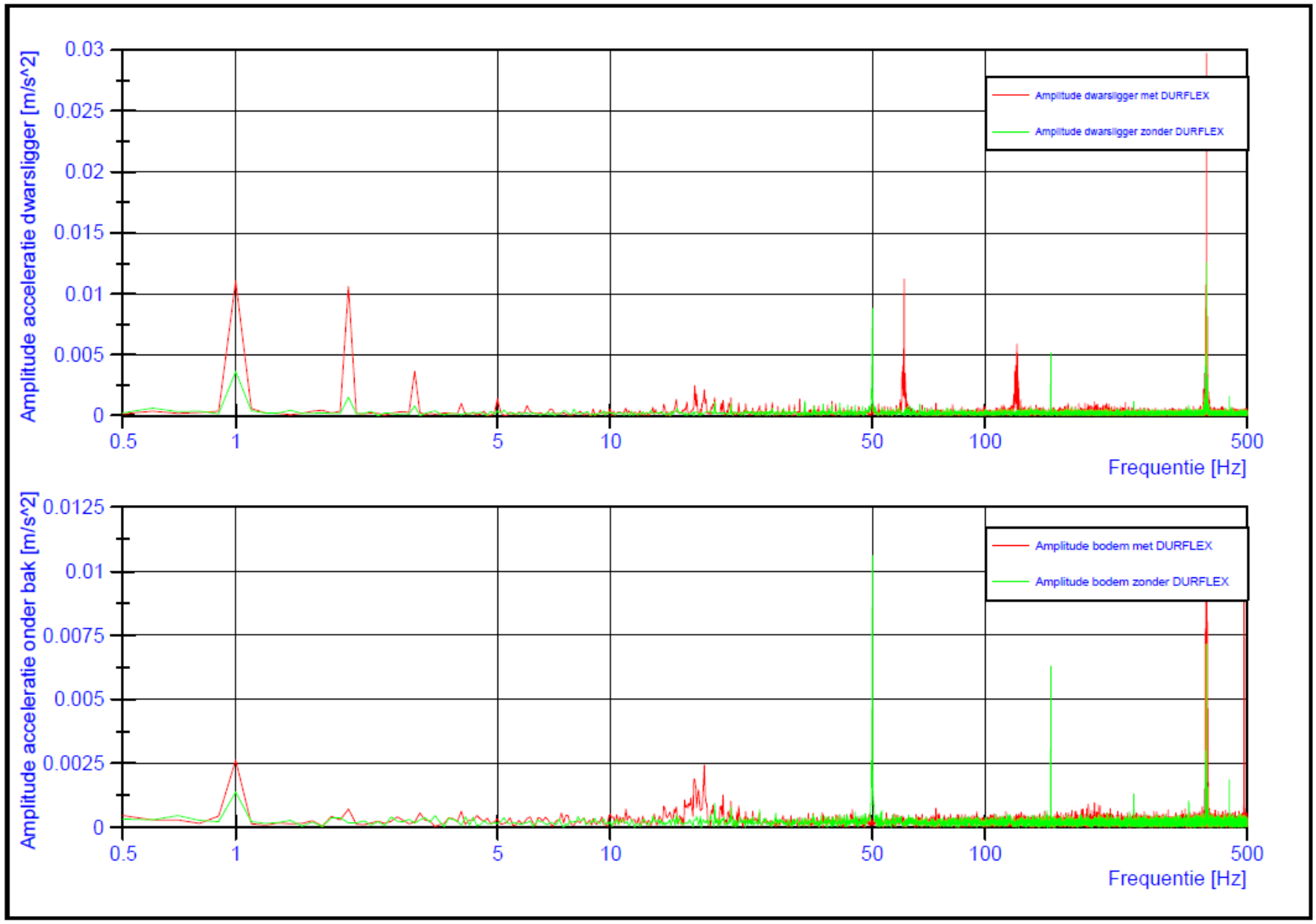
Ratio - Ballast met Durflex – Ballast zonder Durflex Gedissipeerde energie Delta W (J)	1	5	10	20	40
Test 1	2,90	3,42	3,39		
Test 2	2,85	3,32	3,27		
Test 3	3,70	3,67	3,35		
Test 4	4,81	6,15	6,46		

Tabel 7: Resultaten stijfheid en demping. Verhouding tussen ballast met en zonder Durflex.

Bijlage 3: Resultaten versnellingsopnemers 1Hz

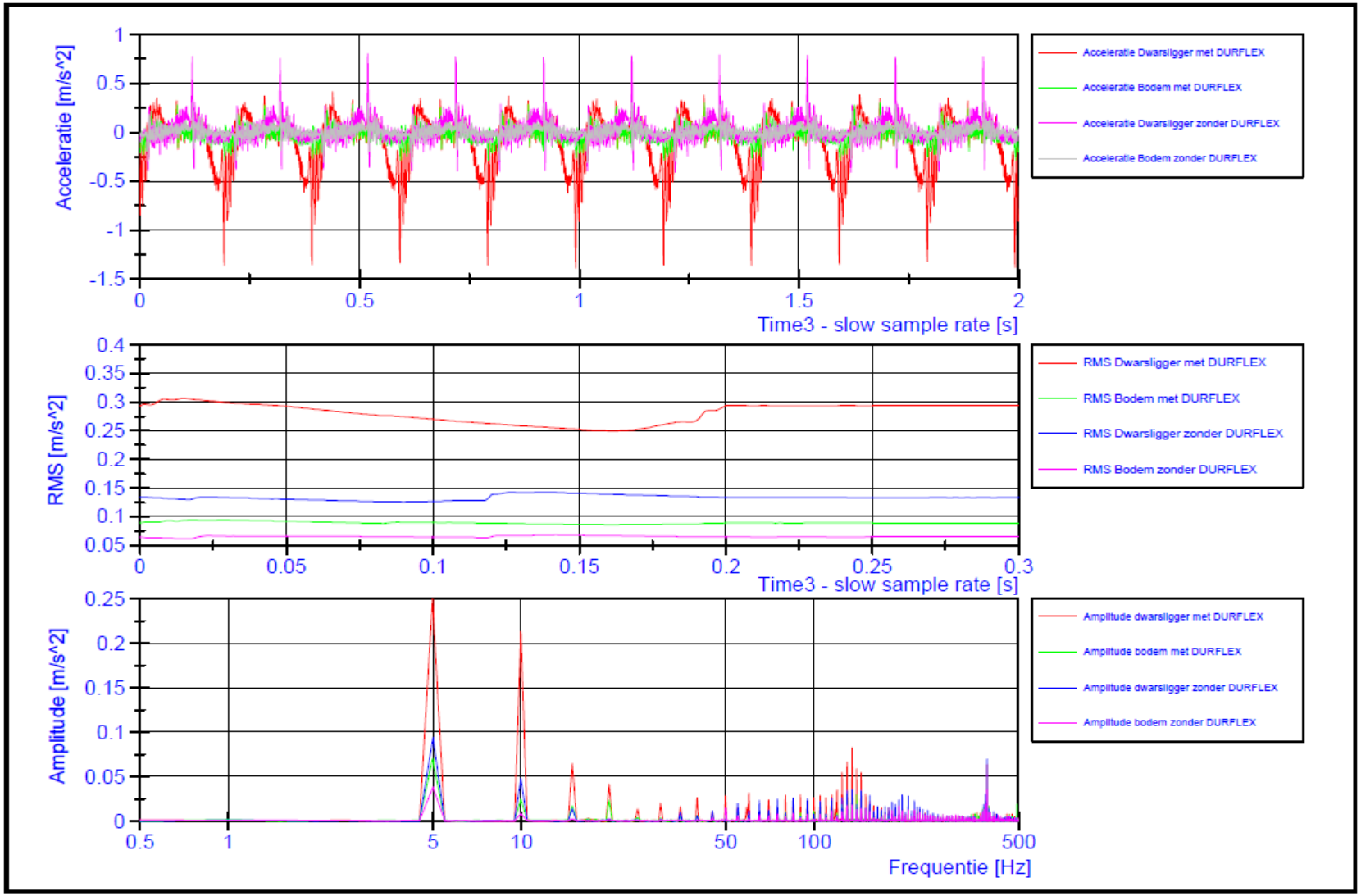


Figuur 19: 1Hz/1.

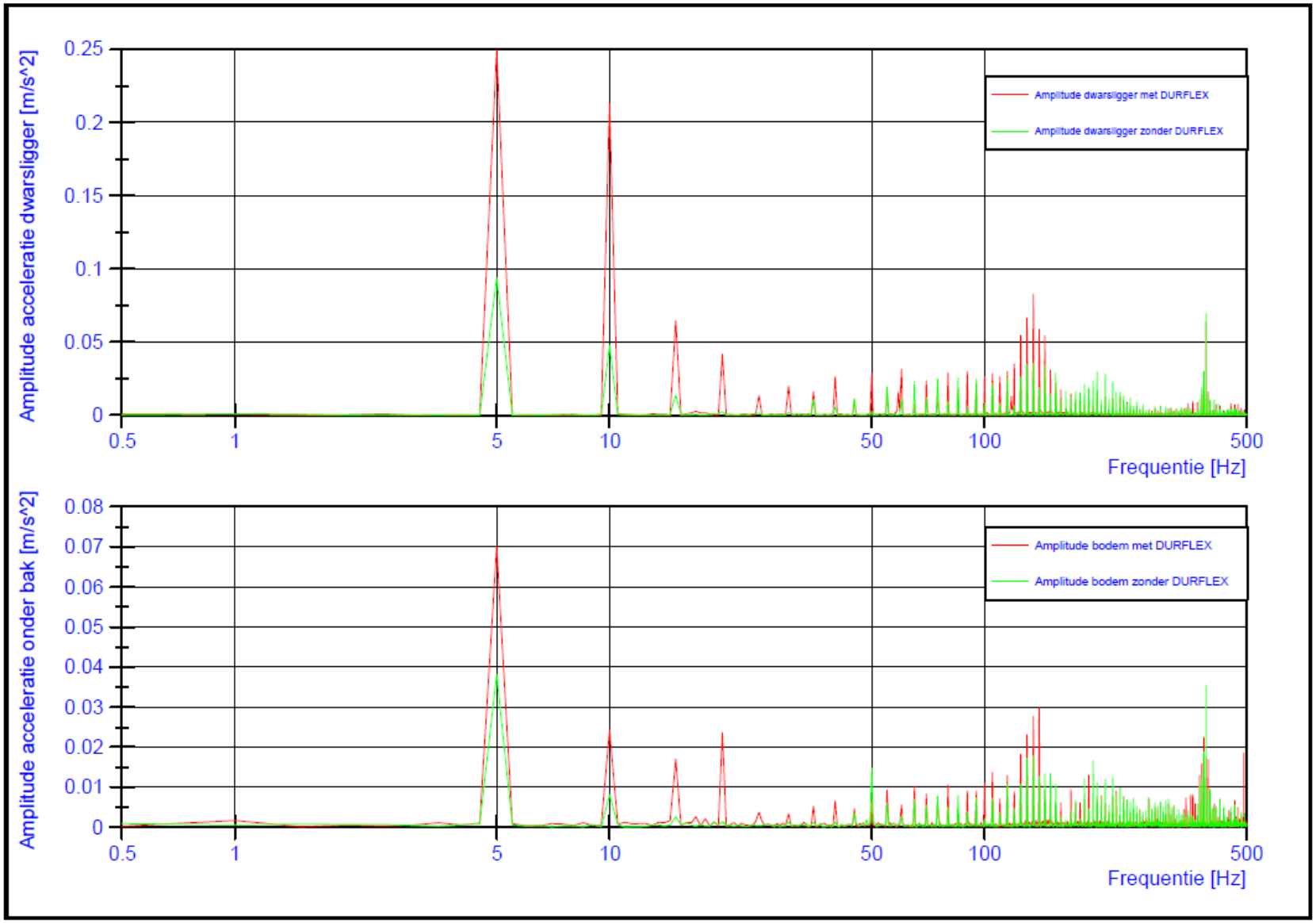


Figuur 20: 1Hz/2.

Bijlage 4: Resultaten versnellingsopnemers 5Hz

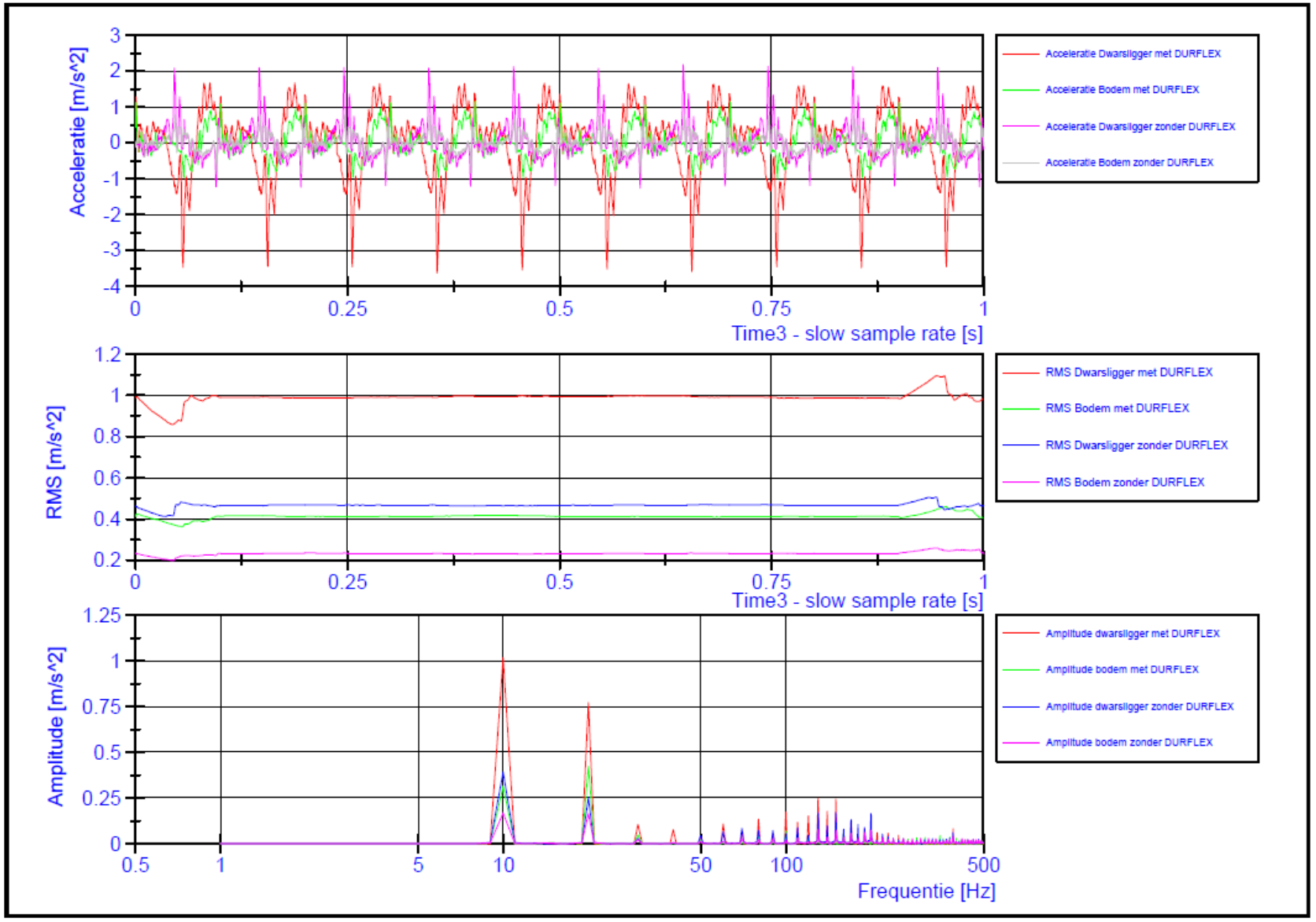


Figuur 20: 5Hz/1.

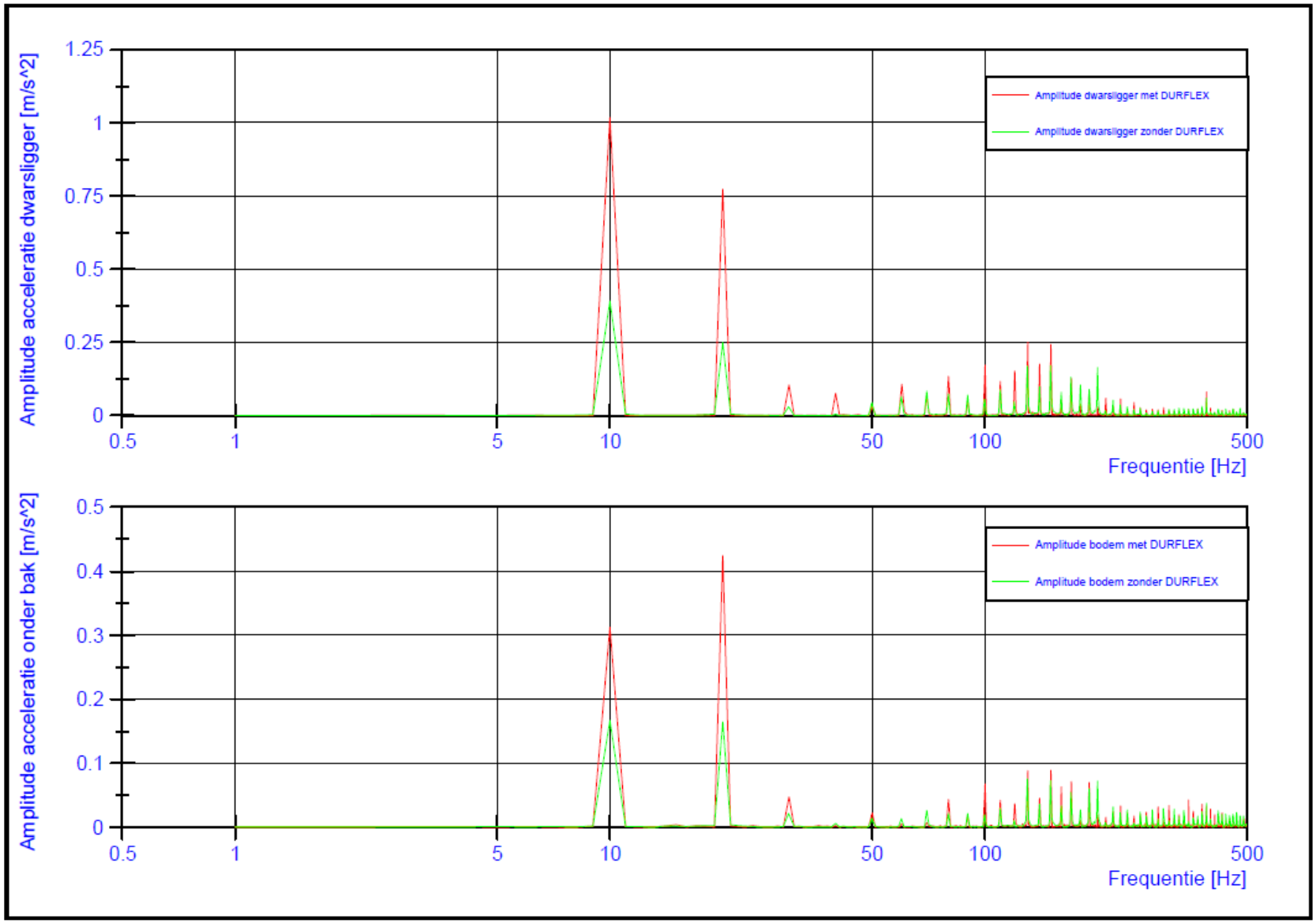


Figuur 21: 5Hz/2.

Bijlage 5: Resultaten versnellingsopnemers 10Hz

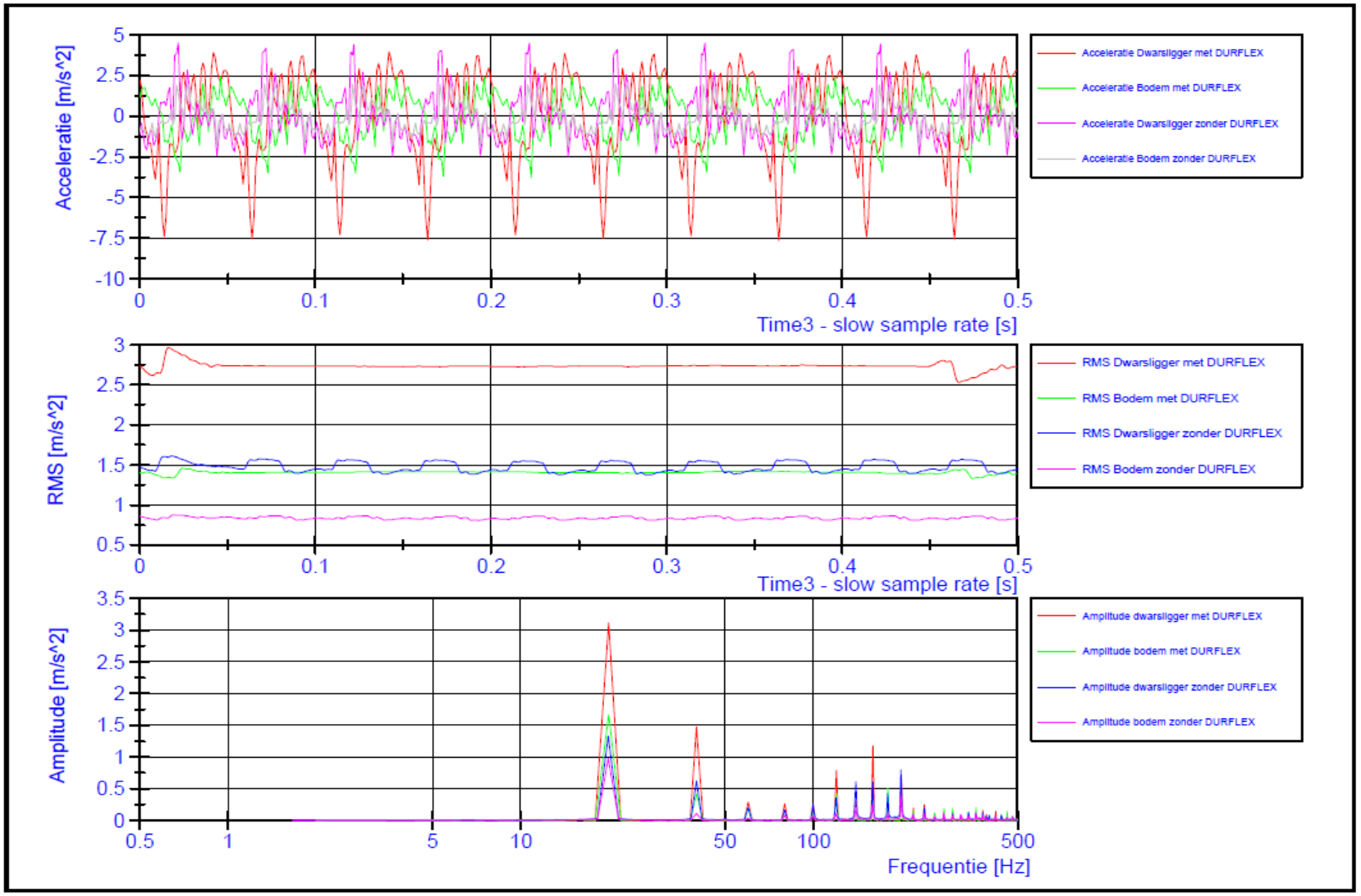


Figuur 22: 10Hz/1.

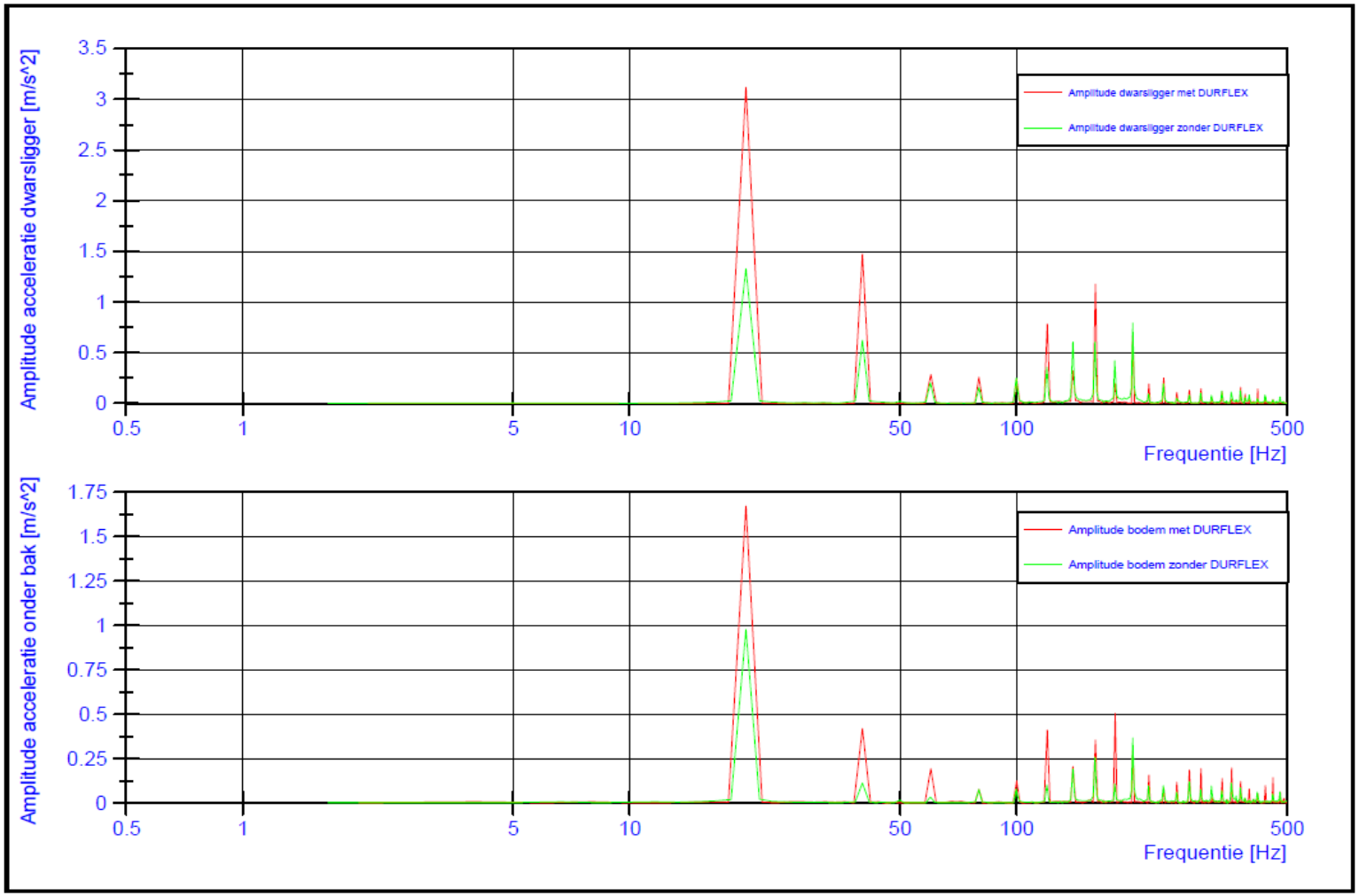


Figuur 23: 10Hz/2.

Bijlage 6: Resultaten versnellingsopnemers 20Hz

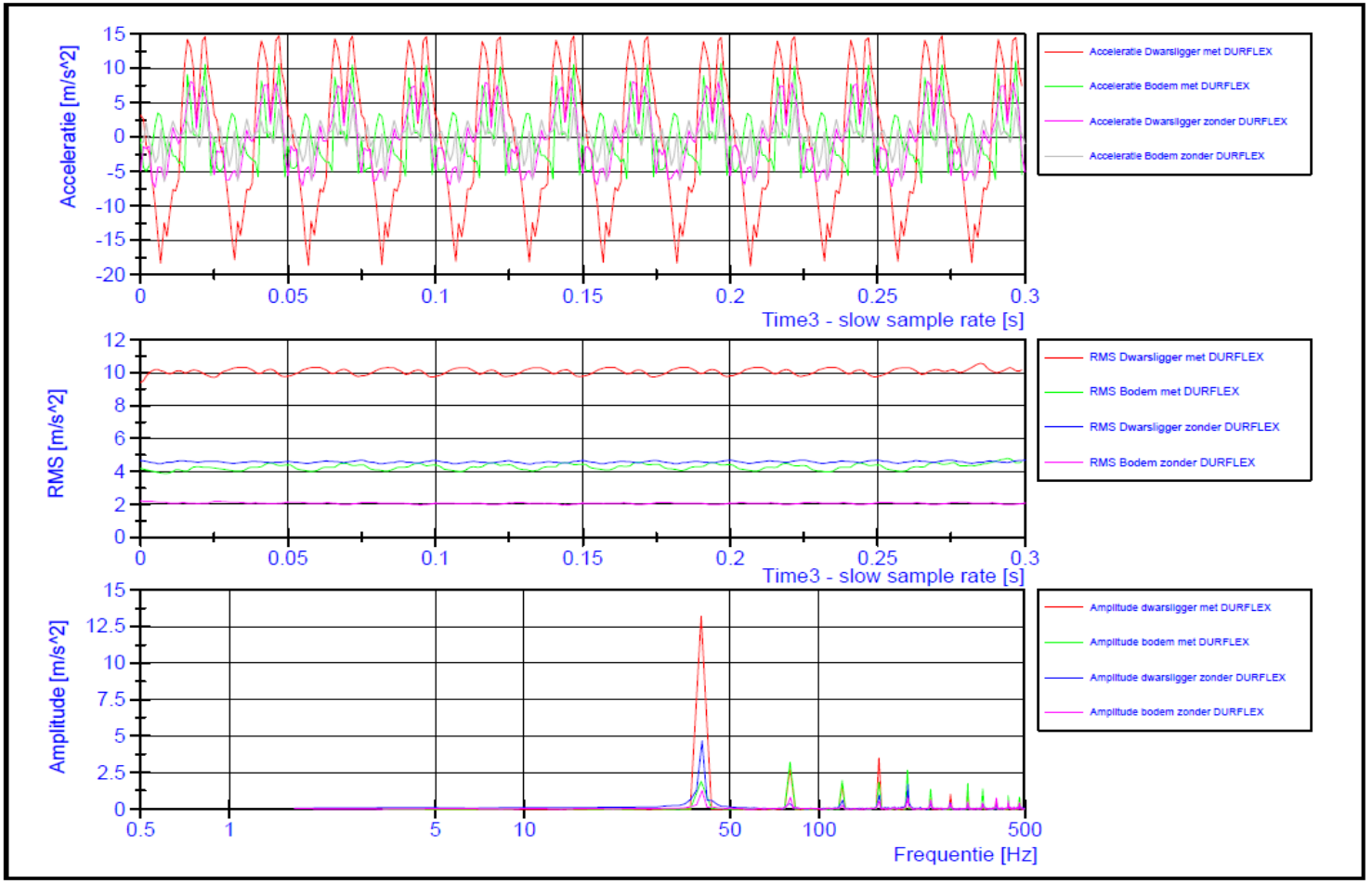


Figuur 24: 20Hz/1.

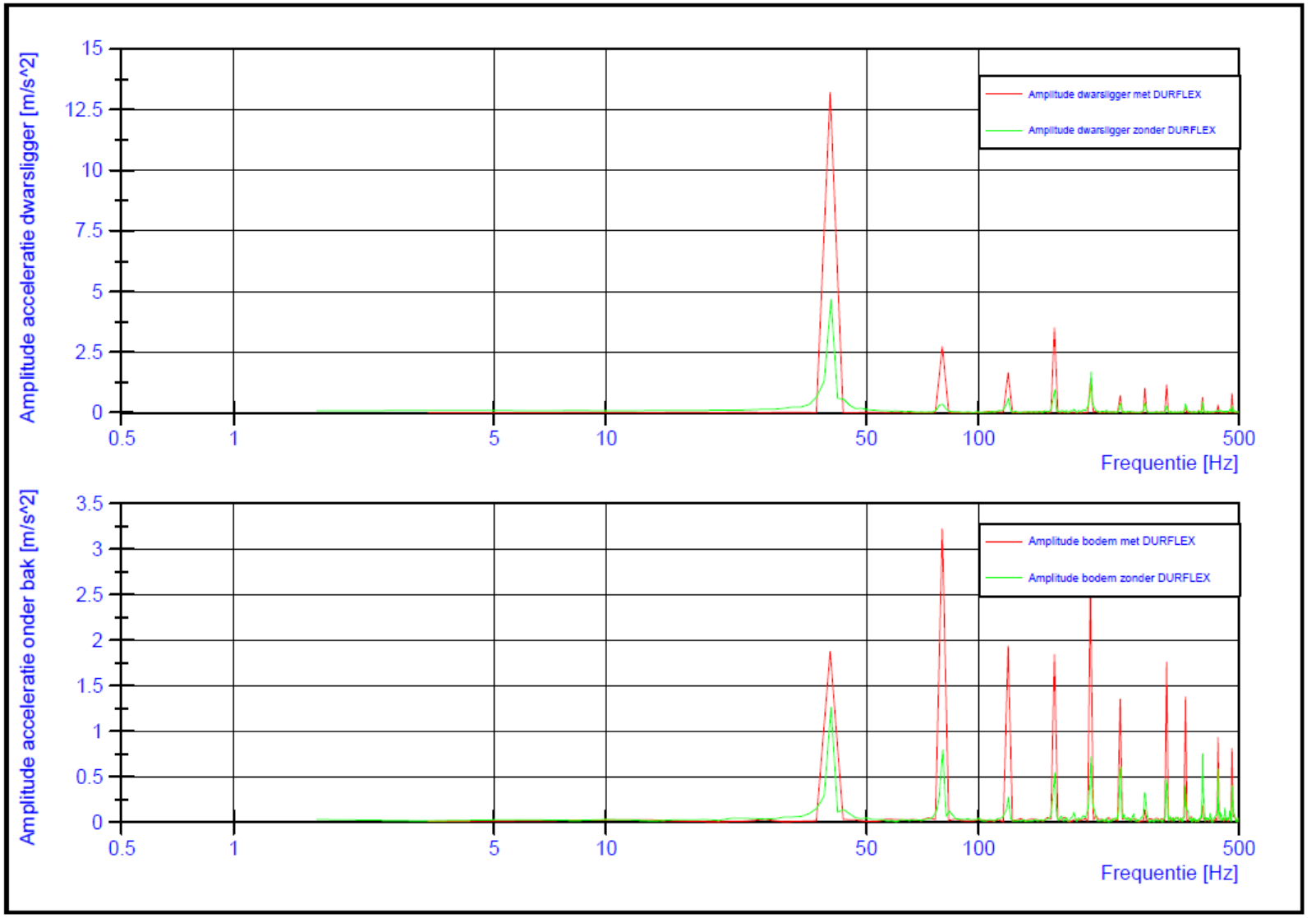


Figuur 25: 20Hz/2.

Bijlage 7: Resultaten versnellingsopnemers 40Hz



Figuur 26: 40Hz/1.



Figuur 27: 40Hz/2.